

Skrajni obratovalni pogoji sinhronskih generatorjev pri znižani napetosti zaradi okvare v omrežju s stališča kotne stabilnosti

Tadej Škrjanc, Urban Rudež

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: tadej.skrjanc@fe.uni-lj.si, urban.rudez@fe.uni-lj.si

Povzetek. Zaradi stalnega naraščanja proizvodnje električne energije iz razpršenih virov je pomembno, da se vzpostavijo pravila njihovega sodelovanja pri podpori stabilnosti elektroenergetskega sistema. To pa pomeni, da morajo na novo postavljena pravila zaradi izogibanja diskriminaciji veljati tudi za konvencionalne sinhronske proizvodne enote. Pri obratovanju pri znižani napetosti zaradi okvare v omrežju tako ob postavitvi preostrih zahtev nastanejo potencialne težave s tranzientno stabilnostjo sinhronskih enot. V ta namen je poleg omenjenih pravil treba jasno predpisati tudi skrajne obratovalne pogoje sinhronskih enot, pri katerih se preverja skladnost s predpisanimi pravili. Zahteva namreč je, da pri spoštovanju pravil tranzientna stabilnost enot ni ogrožena. Zato v članku analiziramo vplive različnih parametrov na tranzientno stabilnost v smislu kritičnega časa odprave motnje: kratkostične moči na priključni točki, obratovalnih pogojev generatorja ter amplitude napetosti na priključni točki. Na podlagi ugotovitev podamo skrajne obratovalne pogoje sinhronske enote pri znižani napetosti zaradi okvare v omrežju s stališča kotne stabilnosti.

Ključne besede: ENTSO-E, kritični čas odprave motnje, kriterij enakih površin, tranzientna stabilnost

Limit operating states of synchronous generators at a reduced voltage due to a failure in the network in terms of their impact on the angular stability

Due to the constantly increasing penetration of distributed energy resources, it is important to establish rules and regulations for their supporting the stability of the electric power system. This means that the rules imposed on avoidance of discrimination, should apply also to the conventional synchronous production units. Operating at a reduced voltage at an unfavourable system event is likely to affect the transient stability of synchronous units when the related specifications are set too tight. Thus, besides the above rules, the limit operating states of the synchronous units should be clearly specified and their compliance with the fault-ride-through criterion verified to determine that the unit transient stability complies with the set rules and regulations. The paper analyses the effect of different parameters on the transient stability in terms of the critical clearing time: lack of the short-circuit power and voltage amplitude at the connection point and the generator operating state. The conditions for checking the compliance of the synchronous unit operation with the low-voltage fault-ride-through criterion in terms of the angular stability are provided.

Keywords: ENTSO-E, critical clearing time, equal area criterion, transient stability

1 UVOD

Dandanes je čedalje več električne energije proizvedene z generatorji, ki imajo relativno majhno moč (manj kot

100 MW) in ki so električno razpršeni po elektroenergetskem sistemu (EES) ter so priključeni neposredno na distribucijsko omrežje. Takšni decentralizirani proizvodnji pravimo razpršena generacija (ang. *Distributed Generation*, DG). Mednje spadajo tako konvencionalni sinhronski generatorji (plinske turbine, stroji z notranjim zgorevanjem, geotermalne enote ter majhne hidro elektrarne), kot tudi pretvorniško-priključene enote (nekaterne vetrne elektrarne, fotovoltaične elektrarne, gorivne celice itd.) [1]. Dejstvo je, da se z večanjem števila zadnjih količina enot, ki prispevajo k zagotavljanju stabilnosti EES, zmanjšuje. Zato je smiselno nastajajočo problematiko urediti tako, da se za oba tipa proizvodnih enot postavijo kar se da podobna pravila obratovanja.

Glavna naloga posameznih sistemskih operaterjev prenosnega omrežja (SOPO) je nadzorovanje in upravljanje omrežja tako, da obratuje stabilno in zanesljivo. Za lažje usklajevanje in celovitost rešitve na ravni ENTSO-E interkonekcije je združenje evropskih sistemskih operaterjev (ang. *European Network of Transmission System Operators for Electricity*, ENTSO-E) pod okriljem Agencije za sodelovanje energetskih regulatorjev (ang. *Agency for the Cooperation of Energy Regulators*, ACER) pripravilo dokument, ki ga je 14. aprila 2016 Evropska komisija sprejela kot uredbo. Gre za uredbo o vzpostavitvi kodeksa omrežja za zahteve za priključitev proizvajalcev električne energije na omrežje (ang. *Establishing a network code on Requirements for*

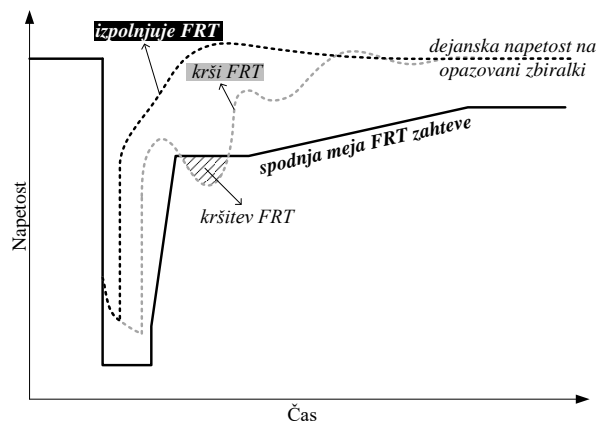
grid connection of Generators, RfG) [2]. Skladno z [2] je naloga posameznih SOPO v dveh letih po sprejetju direktive definirati in potrditi specifikacije za tako imenovane neizčrpne zahteve. Tako so namreč poimenovali zahteve, ki niso brezpogojno določene s strani ENTSO-E, temveč so podrobnosti prepuščene posameznim SOPO-jem v okviru vnaprej predvidenih meja, in sicer zaradi morebitnih specifik posameznih delov EES. Za lažjo implementacijo na nacionalni ravni je ENTSO-E izdal nekatere smernice (ang. *Implementation Guidance Documents, IGD*), ki pa zaradi širokega razpona neizčrpnih zahtev ne zajamejo vseh informacij, potrebnih za jasno usmeritev operaterjev [3].

Reševanja problema stabilnosti EES se sicer resda lahko lotimo z implementacijo hitrih FACTS naprav [4–7], vendar je bistveno cenejši in primernejši pristop urediti razmere pri samem viru. To pa pomeni vzpostavitev enotnih pravil za vse proizvodne enote, ki določajo prispevek vsake enote k odgovornosti zagotavljanja stabilnega obratovanja EES. Na to opozarjajo tudi avtorji v [1] in [8–9]. V konkretnem primeru znižane napetosti EES zaradi okvare v omrežju se na primer določa, da mora proizvodna enota ostati v obratovanju tako med okvaro kot tudi (za določen čas) po njej, in sicer kljub neugodnim električnim razmeram na priključni sponki. Pri tem je zmožnost obratovanja proizvodne enote pod takšnimi pogoji seveda odvisna od uporabljene tehnologije. Na primer: tehnologija sinhronskih strojev pomeni omejitve v smislu ohranitve tranzientne stabilnosti enote, katerih padec iz sinhronizma neugodno vpliva na obratovanje EES, saj lahko pride do kaskadnega izpada preostalih sinhronskih generatorjev in posledično do razpada celotnega EES.

Pri pretvorniško-priključenih enotah o tranzientni stabilnosti ne moremo govoriti, saj se obratovanje omenjenih naprav podreja drugačnim pravilom kot konvencionalne sinhronske enote. Dokler je bil delež inverterskih enot v EES majhen, zmožnosti obratovanja teh enot pri znižani napetosti v EES ni bila namenjena velika pozornost. Pravzaprav ravno nasprotno; zaradi nepredvidljive narave proizvedene moči (odvisno od razpoložljivosti obnovljivega vira energije, kot sta veter in sončno obsevanje) so jih celo spodbujali, da se ob morebitni okvari v EES čimprej odklopijo od omrežja. Razlog za to je bilo dejstvo, da z obratovanjem pretvorniških enot SOPO ni imel velikih izkušenj, medtem ko je odzive sinhronskih enot lahko zelo dobro predvidel. Dandanes, ko proizvodnja iz razpršenih virov strmo narašča, pa bi takšen način upravljanja EES ob okvarah povzročil nenadno izgubo bistveno večjega deleža proizvodnje električne energije in posledično velike podpore, potrebne za ohranjanje EES v obratovanju.

Opisane razmere so vodile v vzpostavitev spodnje meje napetostno-časovnega profila napetosti na priključni točki proizvodne enote v [2] (ang. *Fault-Ride Through, FRT*), prikazane na sliki 1. Ta določa spodnjo mejo napetostnih razmer, pri katerih mora katerakoli proizvodna enota (tako pretvorniška kot tudi sinhronska)

ostati priključena na omrežje. Torej, če dejanski časovni potek napetosti (siva črtkana črta na sliki 1) na priključni točki generatorja preseže predpisano mejo/profil (črna polna črta na sliki 1), ima proizvodna enota dovoljenje za odklop z omrežja.



Slika 1: Časovni potek napetosti na priključni točki generatorja po kratkem stiku (prekinjena črta) in primer predpisane napetostne karakteristike (neprekinjena črta)

2 KOTNA STABILNOST ZA VELIKE MOTNJE

Čeprav je v osnovi FRT-karakteristika nastala zaradi vzpostavitve pravil, vezanih na pretvorniške proizvodne enote, jo morajo upoštevati tudi sinhronski generatorji [11], ki pa imajo zaradi te zahteve lahko težave z ohranitvijo kotne stabilnosti za velike motnje oziroma tranzientne stabilnosti. Nenaden padec napetosti na priključni točki namreč povzroči spremembo v oddani električni delovni moči sinhronskega generatorja in posledično pospeševanje njegovega rotorskega kota. Dinamiko rotorskega kota je mogoče opisati z nihajno enačbo, katere poenostavljena oblika je [12–14]:

$$2H \cdot \frac{d\omega_{m,pu}}{dt} \approx P_{m,pu} - P_{el,pu}. \quad (1)$$

V enačbi je dušenje zanemarjeno, H pomeni normirano vztrajnostno konstanto (inerccijo) na nazivno navidezno moč stroja, $\omega_{m,pu}$ mehansko kotno hitrost v pu/s glede na nazivno vrednost frekvence ω_n in razlika $P_{m,pu} - P_{el,pu}$ pospeševalno moč, ponovno normirano na nazivno moč stroja [15]. Izhodna električna delovna moč sinhronskega stroja $P_{el,pu}$ je določena s prenosno karakteristiko električne moči, ki jo poenostavljeno za razmere brez ohmskih izgub zapišemo kot [12–14]:

$$P_{el,pu} = \frac{E \cdot U}{X_s} \cdot \sin(\Delta\delta). \quad (2)$$

V enačbi E pomeni amplitudo notranje napetosti generatorja, U amplitudo napetosti na priključni zbiralki generatorja, X_s sinhronsko reaktanco (na splošno

spremenljivo, glej teorijo sinhronskih strojev [12–14]) ter $\Delta\delta$ razliko med rotorskim kotom in faznim kotom napetosti na priključni zbiralki.

Pri analizi tranzientne stabilnosti je pozornost večinoma usmerjena na rotorski kot generatorja, ki se v normalnih obratovalnih razmerah vrti sinhrono glede na nazivno električno frekvenco sistema (50 Hz v ENTSO-E). Najdaljše trajanje okvare, pri kateri generator še ohrani sinhronizem in posledično tranzientno stabilnost, imenujemo kritični čas odprave okvare (ang. *Critical Clearing Time*, CCT). Višja vrednost CCT pomeni več razpoložljivega časa za odpravo okvare in tako tranzientno bolj stabilen sistem.

Obstaja več načinov za določitev CCT za posamezno okvaro ([12] in [16–17]), in sicer:

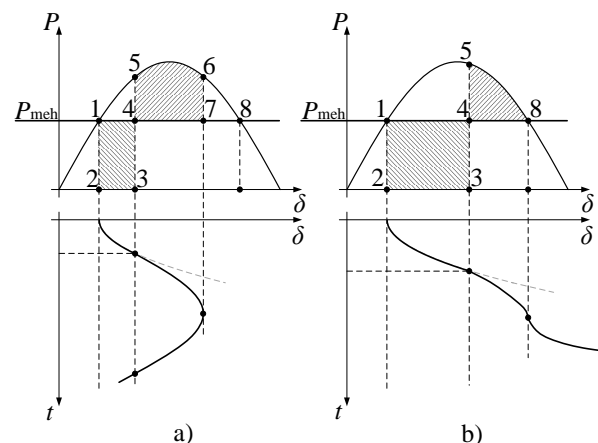
- uporaba kriterija enakih površin (uporabno samo za manjše in poenostavljene sisteme in zato v praksi po navadi neprisotno),
- izvedba množice dinamičnih simulacij, ki temelji na poskušanju različnega trajanja motnje (trenutno najbolj razširjena uporaba) in
- uporaba direktnih metod, ki temelji na teoriji energijskih funkcij in teoriji Ljapunova (redkeje uporabljena zaradi množice predpostavk in variabilne natančnosti).

Pri pridobivanju rezultatov, predstavljenih v nadaljevanju, smo za določitev CCT uporabili drugo od naštetih treh metod. Kljub temu je za lažjo interpretacijo rezultatov zelo koristen pogled tudi s stališča kriterija enakih površin. Zato v naslednjem podpoglavju podamo kratek opis metode kriterija enakih površin, povzete po [12–14] za primer trifaznega kratkega stika.

2.1 Kriterij enakih površin

Obratovalno točko sinhronskega generatorja v stacionarnem stanju določa presek ustrezne prenosne karakteristike z vrednostjo mehanske moči na turbini generatorja. Ta je za obdobje opazovanja po navadi obravnavana kot nespremenljiva. Kot prikazuje slika 2a, dobimo v normalnem obratovanju dve ravnotežni točki, označeni s številčkama 1 in 8. Ob nastopu trifaznega kratkega stika (okvara) neposredno na priključni točki naprave se električna moč zmanjša z vrednosti pred motnjo (točka 1) na vrednost nič (točka 2). Dokler okvara ni odpravljena, električna moč ostane na vrednosti nič, pospešek rotorja skladno z (1) pa premakne rotor s točke 2 na točko 3. Ta premik pomeni dvig kinetične rotacijske energije rotorja proporcionalno ploščini 1-2-3-4. Z odpravo okvare se obratovalna točka znova premakne na prvotno prenosno karakteristiko, in sicer s točke 3 na točko 5. S tem rotor sicer občuti zaviralni elektromagnetni navor, vendar zaradi vztrajnostne mase H še vedno narašča, dokler ni predhodno nakopičena kinetična rotacijska energija uspešno evakuirana nazaj v omrežje. Največja količina te tako imenovane zaviralne energije je omejena, v opisanem primeru pa proporcionalna ploščini 4-5-6-7.

Če je čas odprave okvare predolg (slika 2b), je razpoložljiva energija zaviranja (ploščina 4-5-8) manjša od energije pospeševanja (ploščina 1-2-3-4) in zato rotor v procesu zaviranja preseže nestabilno ravnotežno točko 8. S tem električna moč znova postane manjša od mehanske in rotor znova občuti pospeševalni navor, posledica tega pa je nadaljnje povečevanje rotorskega kota. Takšno stanje je povezano s padcem iz sinhronizma oziroma asinhronim obratovanjem, kar se velikokrat rešuje z zaščito pred izpadom iz koraka (ang. *out-of-step protection*), ki generator odklopi z omrežja.



Slika 2: Karakteristika moči v odvisnosti od kota (zgornji graf) in časovni potek rotorskega kota (spodnji graf): a) kratek čas odstranitve okvare; b) dolg čas odstranitve okvare [12]

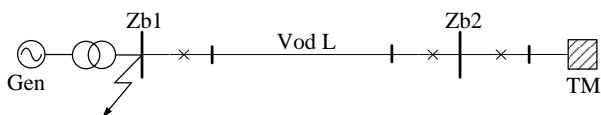
2.2 Terminologija

V [2] se za omenjeni različni vrsti tehnologij proizvodnih enot uporablja vsaj z inženirskega vidika nenavaden izraz "elektroenergijski modul" (ang. *Power-Generating Module*, PGM), ki zajema:

- "sinhronsko povezan elektroenergijski modul" (ang. *Synchronous Power-Generating Module*, SPGM)
 - po definiciji pomeni nedeljiv sklop opreme, ki lahko proizvaja električno energijo tako, da je razmerje med frekvenco proizvedene napetosti, hitrostjo generatorja in frekvenco omrežne napetosti konstantno in torej v sinhronizmu;
 - sem spadajo vse konvencionalne elektrarne, ki uporabljajo sinhronski generator;
- "modul v proizvodnem polju" (ang. *Power-Park Module*, PPM)
 - po definiciji pomeni enoto ali sklop enot, ki proizvajajo električno energijo, ta enota ali sklop pa je na omrežje priključena asinhronsko ali z močnostno elektroniko ter ima eno priključno točko na prenosno omrežje, distribucijsko omrežje, vključno z zaprtim distribucijskim omrežjem, ali visokonapetostni sistem prenosa z enosmernim tokom;
 - sem spadajo obnovljivi viri energije, kot so vetrne elektrarne in fotovoltaika.

3 OPIS TESTNEGA SISTEMA

Za analizo vpliva različnih parametrov na tranzientno stabilnost smo uporabili poenostavljen model EES, sestavljen iz sinhronskega generatorja, povezanega prek blok transformatorja in prenosnega voda na preostalo omrežje (modelirano z virom, katerega fazni kot je nespremenjen), kot prikazuje slika 3. Zbiralka, na katero je priključen omenjeni vir, je tudi referenčna zbiralka za merjenje kota. Podatki vseh uporabljenih elementov so podani v dodatku.



Slika 3: Testni sistem za analizo tranzientne stabilnosti sinhronskega generatorja

Pri vrednotenju tranzientne stabilnosti generatorja moramo predvideti najneugodnejši scenarij s stališča opazovane stabilnosti. V konkretnem primeru je to okvara v obliki trifaznega kratkega stika na priključni zbiralki sinhronskega generatorja Zb1, saj se ob nastanku takšne okvare električna povezava med generatorjem in EES popolnoma prekine. Proizvedena električna delovna moč proizvodne enote pade na vrednost nič in posledično mehanska moč v celoti pospešuje rotor generatorja (ob predpostavki zanemarljivih izgub).

V vseh izvedenih simulacijah smo analizirali štiri robne obratovalne točke generatorja, prikazane na sliki 4, in sicer:

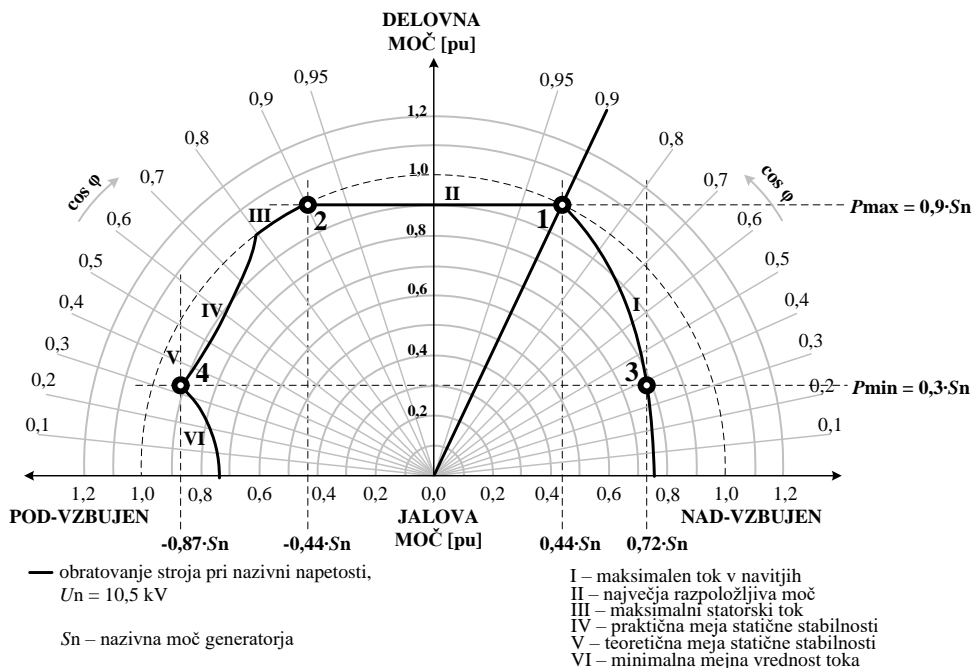
- 1 maksimalna proizvodnja delovne moči P_{\max} in pripadajoča skrajna meja nadvzbujanja Q_{\max} ,
- 2 maksimalna proizvodnja delovne moči P_{\max} in pripadajoča skrajna meja podvzbujanja Q_{\min} ,
- 3 minimalna proizvodnja delovne moči P_{\min} in pripadajoča skrajna meja nadvzbujanja Q_{\max} ,
- 4 minimalna proizvodnja delovne moči P_{\min} in pripadajoča skrajna meja podvzbujanja Q_{\min} .

4 ANALIZA

V tem poglavju analiziramo vpliv:

- kratkostične moči vira $S_{k, TM}$ pri nespremenjeni topologiji po odpravi okvare,
- obratovalne točke generatorja pred okvaro,
- amplitude napetosti na priključni točki opazovanega generatorja U pred okvaro in
- spremembe kratkostične moči na priključni točki generatorja po odpravi okvare (zaradi spremembe topologije kot posledica delovanja zaščite).

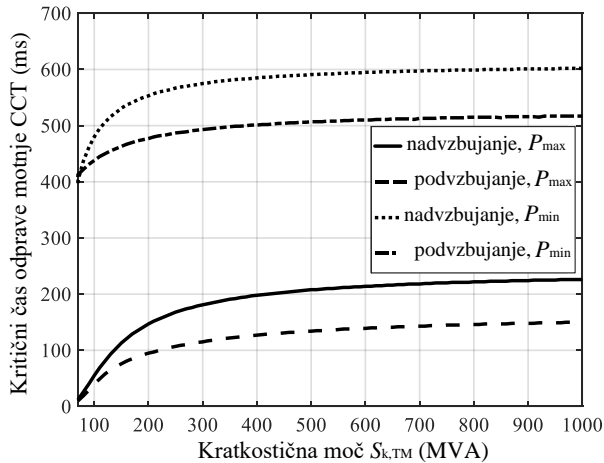
Vpliv preostalih parametrov, kot so bremena ter inercija generatorja, ki se ne nanašajo neposredno na obravnavani problem v tem članku, najdemo v [18].



Slika 4: Obratovalni (PQ) diagram sinhronskega generatorja s štirimi robnimi obratovalnimi točkami

4.1 Vpliv kratkostične moči vira

Pri analizi vpliva kratkostične moči vira smo spreminjali parameter $S_{k, TM}$ od 70 MVA do 1000 MVA za vse štiri posamezne obratovalne točke agregata na sliki 4. Povzetek rezultatov, podan na sliki 5, kaže, da z naraščanjem kratkostične moči vira narašča tudi CCT. Pri tem je smiselno poudariti, da je naraščanje izrazitejše pri manjših vrednostih kratkostične moči, medtem ko se pri večjih vrednostih naraščanje postopoma ustavi in doseže nekakšen efekt nasičenja.



Slika 5: Vpliv kratkostične moči vira $S_{k, TM}$ na CCT

Potek CCT s slike 5 si lahko razložimo s pomočjo kriterija enakih površin. Če iz (1) izpeljemo izraz za kritični čas odstranitve okvare, dobimo enačbo [1]:

$$t_{CCT} = \sqrt{\frac{4H}{\omega_n \cdot P_{m,pu}} (\delta_K - \delta_0)}, \quad (3)$$

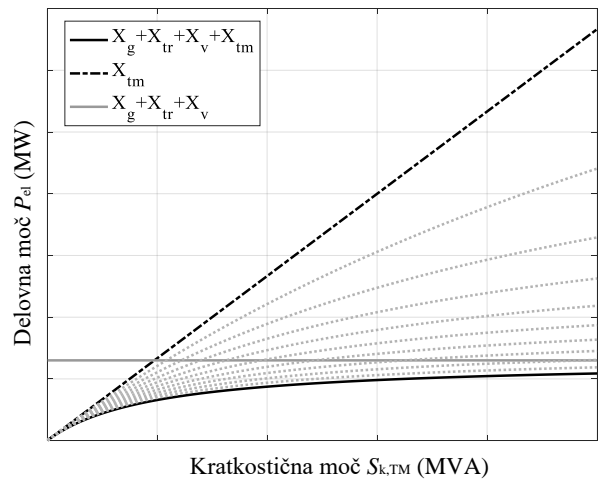
kjer sta δ_K kritični kot in δ_0 obratovalni kot pred nastankom okvare. Kritični kot pomeni vrednost rotorskega kota, pri katerem sta ploščini pospeševanja in zaviranja po kvadraturi enaki, oziroma z drugimi besedami maksimalno vrednost rotorskega kota, do katerega mora biti okvara odstranjena z namenom ohranitve kotne stabilnosti. Izračuna se po enačbi [1]:

$$\delta_K = \cos^{-1} \left[\frac{P_{m,pu} \cdot (\delta_M - \delta_0) + P_{el,pu} \cdot \cos(\delta_M)}{P_{el,pu}} \right], \quad (4)$$

kjer je δ_M kot, ki ga določa ravnotežna točka 8 na sliki 2 oziroma kot, pri katerem pride do izgube stabilnosti generatorja. Glede na enačbi (3) in (4) je razvidno, da je pričakovan potek CCT na sliki 5 odvisen od korena inverzne kosinusne funkcije, saj kratkostična moč vira z obratnim sorazmerjem vpliva na reaktanco v izrazu za električno moč (2). Z naraščanjem kratkostične moči vira se impedanca toge mreže namreč manjša po enačbi:

$$X_{TM} = \frac{U_n^2}{S_{k, TM}}, \quad (5)$$

kjer je U_n nazivna napetost in $S_{k, TM}$ kratkostična moč vira. V pomoč pri razumevanju slika 6 prikazuje potek prenesene delovne moči v odvisnosti od $S_{k, TM}$. Črna prekinjena črta prikazuje moč ob upoštevanju zgolj reaktance vira ($X_S = X_{TM}$), siva polna črta ob upoštevanju zgolj notranje reaktance generatorja, transformatorja in voda ($X_S = X_g + X_{tr} + X_v$), medtem ko črna polna črta ob upoštevanju vsote obeh ($X_S = X_g + X_{tr} + X_v + X_{TM}$). Vidimo, da čim manjši je delež impedanco v primerjavi s skupno impedanco sistema (sive prekinjene črte), tem bolj je potek krivulje zakrivljen navzdol in manjša je posledično prenesena električna moč pri enaki kratkostični moči vira. Z linearnim naraščanjem kratkostične moči na priključni sponki generatorja električna moč torej narašča nelinearno.



Slika 6: Vpliv impedance sistema (generator, transformator, vod, vir) na preneseno delovno moč

Glede na ugotovljeno lahko povzamemo, da je za zagotavljanje najneugodnejšega scenarija s stališča tranzientne stabilnosti poleg okvare same smiselno simulirati tudi izklop elementov EES (na primer izklop prenosnega voda) samo tedaj, ko obratovalno stanje EES ustreza območju pred izraženim pojavom nasičenja. V nasprotnem primeru je vpliv izklopa na t_{CCT} tako reko zanemarljiv.

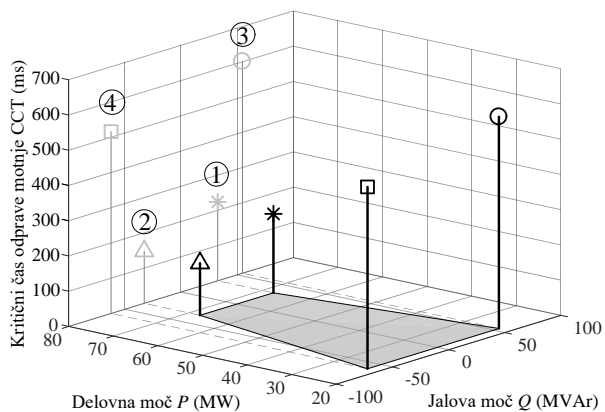
4.2 Vpliv obratovalne točke generatorja

Slika 7 prikazuje, kako različne obratovalne točke generatorja pred nastopom okvare vplivajo na CCT, če kratkostična moč $S_{k, TM}$ znaša 900 MVA – torej globoko v območju nasičenja pojava na sliki 5. Vidimo, da nižja ko je delovna moč, višji je CCT. V podporo razumevanju rezultatov je podana tudi slika 8, ki podaja poleg razmer na prenosni karakteristiki tudi razmere v obliki kazalnih diagramov (stanja pred okvaro).

Ob upoštevanju (2) in slike 8 je razvidno, da zmanjšanje delovne moči generatorja pri konstantni napetosti U in nespremenjeni konfiguraciji omrežja povzroči zmanjšanje rotorskega kota generatorja. V smislu kriterija enakih površin se torej ploščina pospeševanja za enako trajanje okvare zmanjša, ploščina zaviranja pa poveča. To omogoči dalj časa trajajoče pospeševanje brez izgube sinhronizma oziroma daljši t_{CCT} .

Poleg omenjenega opazimo tudi, da je pričakovani CCT višji pri obratovanju generatorja v nadvzbujenem kot v podvzbujenem stanju. Iz kazalčnih diagramov generatorja pri različnih vzburjanjih in zanemarjeni ohmski upornosti (slika 8) vidimo, da je pri nadvzbujenem obratovanju (a in c) manjši kolesni kot in večja notranja napetost E kot pri podvzbujenem (b in d) obratovanju, pri čemer je faktor moči $\cos\varphi$ v obeh primerih enak, le nasprotno predznačen. Če pogledamo enačbo (2) vidimo, da kolesni kot in notranja napetost generatorja vplivata na dvig (večji δ ali večji E) oziroma spust (manjši δ ali manjši E) karakteristike. Tako pri enaki mehanski moči in dvigu karakteristike generator obratuje pri manjšem kotu in ima posledično večjo ploščino zaviranja.

Skleniti je mogoče, da je najnižji CCT mogoče pričakovati v obratovalni točki 2, kar pa je navsezadnje razvidno tudi s slike 5, saj je črna črtkana krivulja, ki pripada obratovalni točki 2, za vse simulirane razmere najnižja.

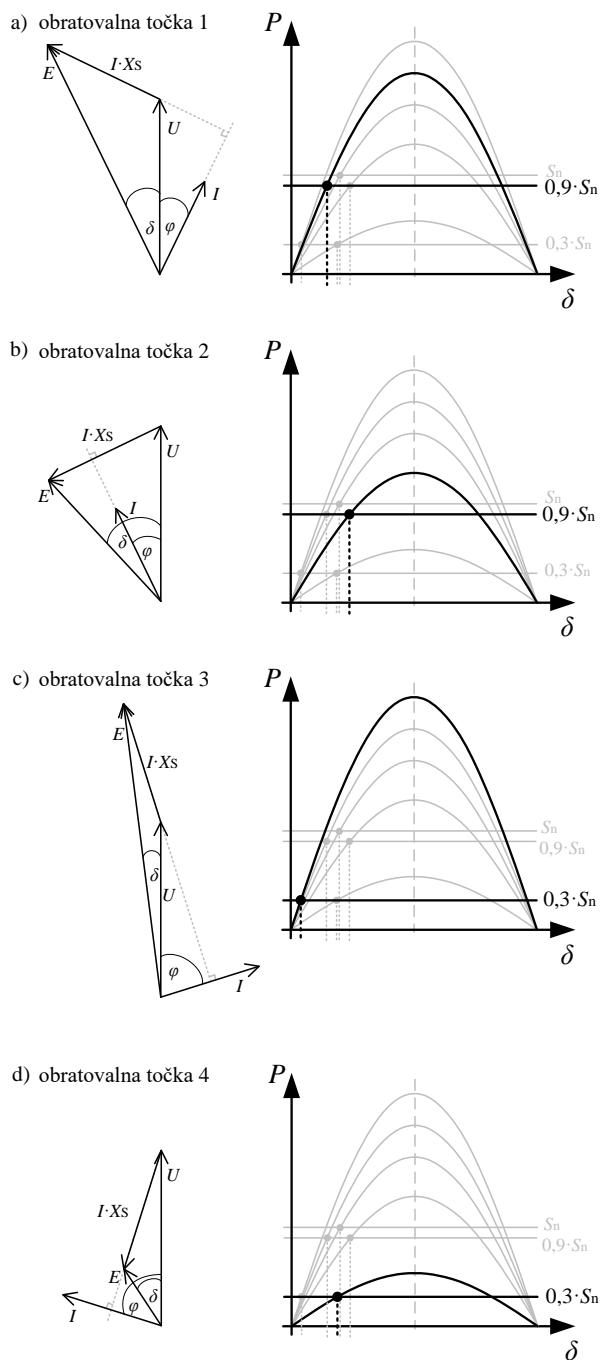


Slika 7: CCT za štiri mejne obratovalne točke pri $S_{k, TM} = 900$ MVA

4.3 Vpliv amplitude napetosti na priključni zbiralki

Pri analizi vpliva amplitude napetosti na priključni zbiralki generatorja pred nastankom okvare smo spreminjali parameter U od 90 do 130 kV (0,82 pu do 1,18 pu) za vse štiri obratovalne točke in nespremenjen $S_{k, TM} = 900$ MVA.

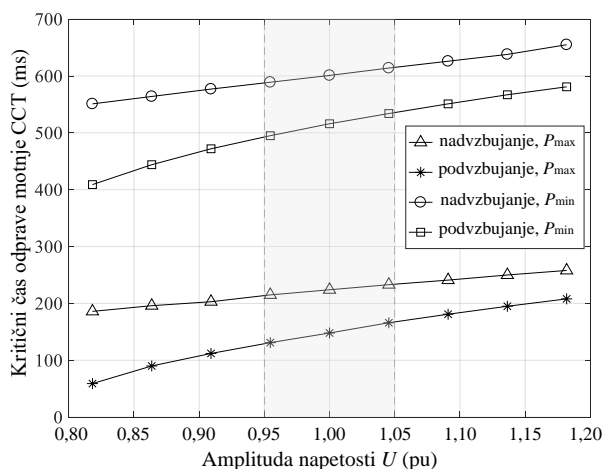
Kot kažejo rezultati na sliki 9, CCT narašča z naraščanjem napetosti na priključni zbiralki. To je razumljivo, saj višja napetost povzroči višjo amplitudo prenosne karakteristike skladno z (2) in tako povečanje ploščine zaviranja. Ponovno vidimo tudi, da je pri manjši



Slika 8: Kazalčni diagrami (levo) in prenosne karakteristike (desno) za različne mejne obratovalne točke sinhronskega generatorja

delovni moči generatorja CCT višji. Opazimo tudi, da je pri nižjih vrednostih amplitude napetosti razlika v CCT med skrajnima mejama vzburjanja generatorja večja, z naraščanjem napetosti pa se ta razlika manjša. To si lahko ponovno pojasnimo s pomočjo slike 8: razlika pri manjših napetostih med skrajnima mejama vzburjanja in manjši delovni moči je večja zato, ker je večja razlika med vzbujačnima napetostma E in posledično tudi med obratovalnima kotoma (sliki 8a in b v primerjavi s

slikama 8c in d). Pri višjih napetostih se razlika v obeh primerih manjša.

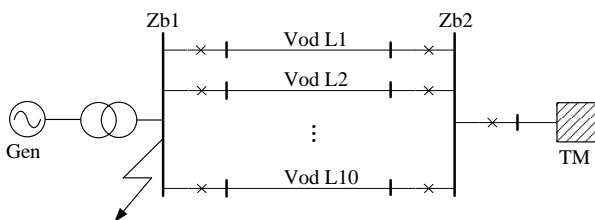


Slika 9: Vpliv amplitude napetosti U na CCT

4.4 Vpliv spremembe kratkostične moči po odpravi okvare

Ko pri obratovanju EES nastane okvara, se le-ta velikokrat odpravi z ustreznim delovanjem zaščite, ki ob predpostavki selektivnosti izklopi element, na katerem ta okvara nastane. Ker z izklopom elementa EES spremenimo konfiguracijo in s tem vplivamo na kratkostično moč, želimo ugotoviti, izklop katerega elementa bo kratkostično moč omrežja najbolj zmanjšal.

V ta namen smo testni sistem s slike 3 preuredili tako, da smo en prenosni vod zamenjali z desetimi vzporednimi enako dolgimi vendar, z desetkrat manjšo reaktanco. Preostali del sistema in parametri so ostali nespremenjeni – glej sliko 10. To nam omogoča opazovanje vpliva zmanjšanja kratkostične moči hkrati z odstranitvijo okvare. Zaradi razloga, omenjenega v poglavju 4.1, smo tokrat vrednost kratkostične moči vira nastavili na vrednost, ki se nahaja pod območjem nasičenja (glej sliko 5), in sicer 150 MVA.

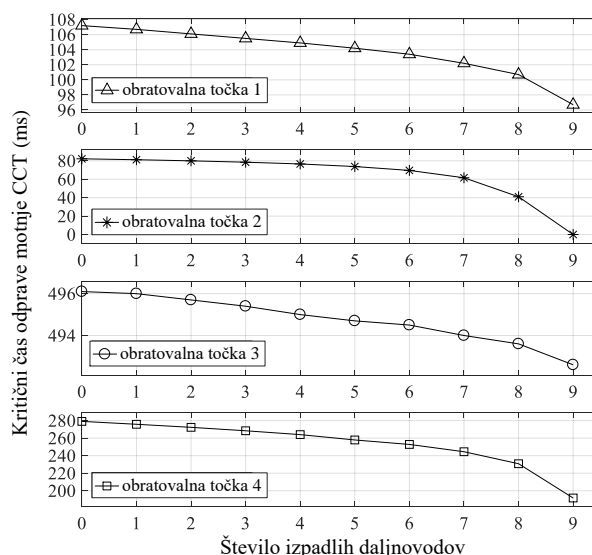


Slika 10: Prilagojen sistem za opazovanje vpliva bližnjih elementov na tranzientno stabilnost sinhronskega generatorja

Da pokažemo, kako število izpadlih prenosnih vodov kot posledica odprave okvare vpliva na stabilnost opazovanega generatorja, smo hkrati z odpravo motnje v različnih primerih izklopili različno število vodov. Rezultate prikazuje slika 11, kjer v vseh štirih

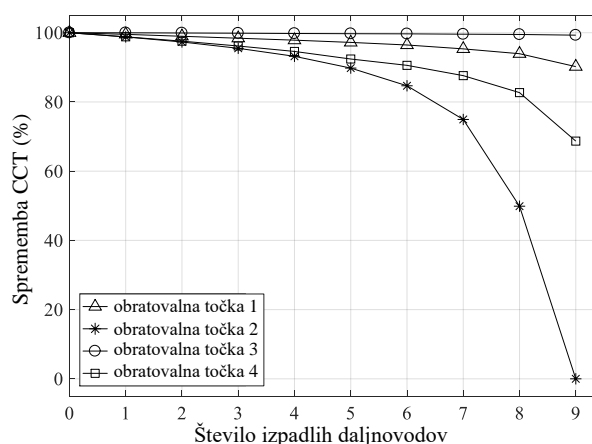
obratovalnih točkah opazimo upad CCT s številom izpadlih vodov.

To si ponovno lahko razložimo s pomočjo kriterija enakih površin in (2). Izpad prenosnega voda povzroči povečanje impedance sistema in tako glede na (2) znižanje amplitude prenosne karakteristike. Ploščina zaviranja se zmanjša in rotor lahko pospešuje manj časa oziroma absorbira manj energije, da bo po odpravi motnje ohranil sinhronizem.



Slika 11: Vpliv števila izpadlih vodov kot posledica odprave okvare na CCT

Za lažjo primerjavo CCT vrednosti pri različnih obratovalnih stanjih generatorja so na sliki 12 prikazane *relativne* spremembe CCT glede na število izpadlih vodov. Vidimo, da bolj ko je generator podzbujen in manj ko proizvede delovne moči, počasneje se spreminja CCT s številom izpadlih vodov. Kot je pričakovati, se najbolj spreminja CCT v obratovalni točki 2.



Slika 12: Vpliv števila izpadlih vodov kot posledica odprave okvare na spreminjanje CCT

5 POGOJI ZA PREVERJANJE SKLADNOSTI PGM S FRT-ZAHTEVAMI

Glede na ugotovitve v poglavju 4 lahko testne pogoje za preverjanje skladnosti novega elektroenergijskega modula s FRT-zahtevami podamo kot:

- vrsta simulirane okvare
Simulirana okvara mora biti takšna, da pomeni najneugodnejše razmere s stališča tranzientne stabilnosti. To je po navadi trifazen kratek stik.
- lokacija simulirane okvare
Okvara se mora nahajati čim bliže priključni točki PGM (v smislu električne razdalje).
- scenarij obratovanja EES pred nastankom motnje
Ugotoviti moramo, katere razmere v EES na CCT najbolj vplivajo, in temu primerno izbrati kritičen scenarij:
 - stanje z najnižjimi napetostmi v sistemu – po navadi dnevno stanje, ki ima lahko po drugi strani večje kratkostične moči zaradi večjega števila PGM v obratovanju ali
 - stanje z najnižjo kratkostično močjo na priključni točki PGM – po navadi nočno stanje z manjšim številom PGM v sistemu, ki pa ima lahko po drugi strani višje napetosti zaradi manjše obremenjenosti omrežja.
- sprememba topologije omrežja
Določiti je treba razmere na priključni točki PGM v smislu nasičenja (pod/nad kolenom, glej sliko 5) in se ustrezno odločiti, ali bomo skupaj z odpravo okvare simulirali tudi spremembo topologije omrežja v smislu izklopa elementov omrežja (vod, transformator itd.).
- obratovalna točka PGM pred nastankom motnje
Obratovalna točka PGM mora biti nastavljena na maksimalno proizvodnjo delovne moči in pripadajočo skrajno mejo podvzbujanja.

6 SKLEP

Uredba Evropske komisije je sistemskim operaterjem prenosnega omrežja določila, da v svoja sistemska obratovalna navodila prenosnega omrežja (SONPO) zapišejo tako izčrpne kot tudi neizčrpne zahteve za priključitev proizvajalcev električne energije na omrežje. Ena takšnih zahtev je tudi določitev spodnje meje napetostno-časovnega profila napetosti na priključni točki proizvodne enote ali z drugimi besedami FRT-karakteristike. Ta določa napetostne razmere na priključni točki proizvodne enote, pri katerih mora ob morebitni okvari ostati priključena na omrežje.

Pri znižanih napetostnih razmerah v EES imajo sinhronski generatorji lahko težave z ohranitvijo sinhronizma (kotne stabilnosti za velike motnje). Zato je pred priklopom nove proizvodne enote treba preveriti, ali je poleg skladnosti s FRT-zahtevami zmožna ohraniti

sinhronizem v najneugodnejših razmerah. Da torej zagotovimo enake pogoje za vse nove proizvodne enote, morajo biti v SONPO v kratki, vendar jasni obliki podani tudi pogoji, pri katerih se skladnost s FRT preverja. Pogoje se sicer da pridobiti iz že znane teorije, vendar morajo kljub temu biti v obratovalnih navodilih ustrezno utemeljeni, tako teoretično kot tudi s simulacijami.

Zato se v tem članku s pomočjo simulacij posvetimo analizi parametrov, ki v največji meri vplivajo na tranzientno stabilnost sinhronskega generatorja pred okvaro in po njej v EES ter glede na ugotovitve podamo zahtevane pogoje. Tako definiramo tip in lokacijo simulirane okvare, obratovalno stanje sistema in generatorja pred nastankom okvare ter mogočo spremembo topologije omrežja.

ZAHVALA

Predstavljeno delo je del raziskovalnega programa Elektroenergetski sistemi št. P2-0356. Avtorja se zahvaljujeta Javni agenciji za raziskovalno dejavnost RS za finančno pomoč.

DODATEK

Tabela 1: Podatki za sinhronski generator

S_n	75 MVA	x_q	0,631 pu
U_n	10,5 kV	T_d^n	0,05 s
$\cos\varphi_n$	0,9	x_d^n	0,237 pu
f_n	50 Hz	T_d^i	1,62 s
n_n	125 min ⁻¹	x_d^i	0,381 pu
H	3 s	T_q^n	0,05 s
x_σ	0,1 pu	x_q^n	0,252 pu
r_a	0,003 pu	T_q^i	0,3 s
x_d	0,920 pu	x_q^i	0,631 pu

Tabela 2: Podatki za blok transformator

S_n	75 MVA	u_r	0,388 %
$U_{n,p}$	110 kV	u_k	10,8 %
$U_{n,s}$	10,5 kV		

Tabela 3: Podatki za vir moči

S_k^n	$S_{k,TM}$	U_n	110 kV	R/X	0,1
---------	------------	-------	--------	-------	-----

Tabela 4: Podatki za prenosni vod

U_n	110 kV	l	15,794 km
r	0,119 Ω /km	x	0,402 Ω /km
c	6,142 nF/km		

LITERATURA

- [1] M. Reza, "Stability analysis of transmission systems with high penetration of distributed generation", Dissertation at Delft University of Technology, December, 2006.
- [2] Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators (Text with EEA relevance), vol. 112. 2016.
- [3] "CNC - Implementation Guidance Documents". [Splet]. Dostopno: https://electricity.network-codes.eu/network_codes/cnc/cnc-igds/. [Dostopano: 10-Jul-2018].
- [4] U. Gabrijel in R. Mihalič, "Zagotavljanje in ugotavljanje tranzientne stabilnosti v elektroenergetskih sistemih s tiristorsko krmiljenimi prečnimi transformatorji", Elektrotehniški vestnik 69(3-4): 198–206, Ljubljana, 2002.
- [5] V. Ažbe, "Energijske funkcije elektroenergetskih sistemov z napravami za krmiljenje pretokov moči", doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2005.
- [6] D. Povh in R. Mihalič, "Možnosti in omejitve prenosa električne energije na dolge razdalje 3. del – Povečanje prenosne zmogljivosti elektroenergetskih sistemov s sodobnimi koncepti", Elektrotehniški vestnik 73(5): 241–247, 2006.
- [7] K. Daher, M. Chlela and M. B. Najjar, "Investigation of transient stability of DG integration in Lebanon A simulation using MATLAB/SIMULINK", 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 901–906, Madrid, 2013.
- [8] R. Piwko, N. Miller, R. T. Girad, J. MacDowell and K. Clark, "Generator Fault Tolerance and Grid Codes", IEEE Power Energy Mag., vol. 8, no. 2, pp. 18–26, Mar. 2010.
- [9] I. Xyngi, A. Ishchenko, M. Popov, L. Sluis and V. Der, "Transient stability analysis of a distribution network with distributed generators", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 2, pp. 1102–1104, 2009.
- [10] V. Ažbe in R. Mihalič, "Tranzientna stabilnost paralelnega obratovanja sinhronskega generatorja in dvojno napajane stroja", 12. konferenca slovenskih elektroenergetikov, CIGRÉ ŠK B4-03, Portorož, 2015.
- [11] KEMA, "International Review of Fault Ride Through for Conventional Generators", London, November, 2010.
- [12] J. Machowski, J. W. Bialek and J.R. Bumby, "Power system dynamics, Stability and control", Second Edition, 2008.
- [13] P. Kundur, "Power System Stability and Control", 1st edition. New York: McGraw-Hill Education, 1994.
- [14] P. M. Anderson and A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", 2 edition. Piscataway, N.J: Wiley-IEEE Press, 2002.
- [15] U. Rudež and R. Mihalič, "Monitoring the First Frequency Derivative to Improve Adaptive Underfrequency Load-Shedding Schemes", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 2, pp. 839–846, May 2011.
- [16] V. Ažbe in R. Mihalič, "Uporaba direktne Ljapunove metode za ugotavljanje stabilnosti elektroenergetskih sistemov z univerzalnim prečnim transformatorjem", Elektrotehniški vestnik 74(1-2): 67–72, 2007.
- [17] Ž. Eleschová, M. Smitkova and A. Belan, "Evaluation of Power System Transient Stability and Definition of the Basic Criterion", International journal of energy, iss. 1, vol. 4, 2010.
- [18] L. V. L. de Abreu, F. A. S. Marques, J. Morán and W. Freitas, "Impact of distributed synchronous generators on the dynamic performance of electrical power distribution systems", IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, Latin America, 2004.

Tadej Škrjanc je diplomiral leta 2015 in magistriral leta 2017 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za preskrbo z električno energijo na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegovo raziskovalno področje vključuje dinamično analizo elektroenergetskih sistemov.

Urban Rudež je diplomiral leta 2005 in doktoriral leta 2011 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V letih 2005–2007 je bil zaposlen v podjetju Korona, v letih 2007–2011 pa kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za preskrbo z električno energijo na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot znanstveni sodelavec na isti fakulteti. Njegovo raziskovalno področje zajema obvladovanje in analizo dinamičnih pojavov v elektroenergetskih sistemih.