

DOI: [10.46793/CIGRE37.C2.03](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C2.03)

C2.03

**ANALIZA USLOVA OSTRVSKOG RADA MIKROMREŽA SA DISTRIBUIRANOM
PROIZVODNJOM U PROCESU BEZNAPONSKOG USPOSTAVLJANJA
ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA****ANALYSIS OF ISLANDED OPERATION CONDITIONS OF MICROGRIDS WITH
DISTRIBUTED GENERATION IN THE PROCESS OF BLACK START OF THE POWER
SYSTEM****Nevena Popović, Milan Đorđević, Željko Damljanović, Aleksandar Latinović, Željko
Đurišić***

Kratak sadržaj: U procesu dekarbonizacija proizvodnje električne energije i integracije intermitentnih obnovljivih izvora energije stabilnost elektroenergetskog sistema je jedan od glavnih tehničkih izazova. Prisustvo distribuiranih izvora energije, kao što su vetroelektrane, fotonaponske elektrane i elektrane na biomasu, sa jedne strane povećava rizik od raspada elektroenergetskog sistema, dok sa druge strane omogućava novi pristup u ponovnom uspostavljanju elektroenergetskog sistema. U ovom radu analizirana je mogućnost uspostavljanja ostrvskog rada mikromreže sa distribuiranim izvorom energije nakon beznaponskog stanja u prenosnoj mreži. Biće analiziran proces uspostavljanja i stabilizacije napona i frekvencije u ostrvskom radu mikromreže. Istraživanja će obuhvatiti modelovanje sistema i analize tranzijentnih procesa pri postepenom uspostavljanju stabilnog rada mikromreže sa promenljivim opterećenjem. Na osnovu sprovedenih analiza biće sagledani uslovi ostrvskog rada mikromreže sa zadatim opterećenjem, kao i mogućnosti pružanja pomoćne usluge participacije mikromreže u procesu resturacije prenosnog sistema u uslovima beznaponskog pokretanja. Sprovedene analize biće komentarisane i u svetlu unapređenja žilavosti elektroenergetskih sistema sa distribuiranom proizvodnjom kroz koncept uspostavljanja i hijerarhijskog organizovanja energetski samoodrživih mikromreža nakon raspada globalnog elektroenergetskog sistema.

Ključne reči: *Restauracija elektroenergetskog sistema, Ostrvski rad mikromreže, Žilavost elektroenergetskog sistema, Beznaponsko pokretanje*

Abstract: In the process of decarbonization electricity generation and integrating intermittent renewable energy sources, power system stability is one of the main technical challenges.

*Nevena Popović, Elektrotehnički fakultet, pn243357m@student.etf.bg.ac.rs

Milan Đorđević, Elektroprivreda Srbije AD, djordjevic.milan@eps.rs

Željko Damljanović, Institut Mihajlo Pupin - Automatika, zeljko.damljanovic@pupin.rs

Aleksandar Latinović, Elektroprivreda Srbije AD, aleksandar.latinovic@eps.rs

Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, djurisic@etf.rs

The presence of intermittent renewable energy sources, such as wind farms, photovoltaic power plants and biomass power plants, on one hand, increases the risk of power system collapse, while on the other hand, distributed generation enables a new approach to power system restoration. This paper analyzes the possibility of establishing islanded operation of a microgrid with a renewable energy source after a blackout in the transmission network. The process of voltage and frequency restoration and stabilization in the islanded operation of the microgrid will be analyzed. The research will include system modeling and transient process analysis during the gradual establishment of stable microgrid operation under variable load conditions. Based on the conducted analyses, the conditions for islanded operation of the microgrid with a given load will be assessed, as well as the potential for providing ancillary services through microgrid participation in the transmission system restoration process under black start conditions. The conducted analyses will also be discussed in the context of enhancing the resilience of the power system with distributed generation through the concept of establishing and hierarchically organizing energy self-sustaining microgrids following the collapse of the global power system.

Key words: *Power system restoration, Islanded operation of a microgrid, Resilience of power system, Black start conditions*

1 UVOD

Proces dekarbonizacije proizvodnje električne energije je usmeren ka permanentnom povećanju instalisanih snaga intermitentnih obnovljivih izvora energije, kao što su vetroelektrane i fotonaponske elektrane. Značajni kapaciteti ovih izvora se priključuju na distributivnu mrežu, koja je po pravilu slaba i izložena čestim poremećajima koji ugrožavaju stabilnost rada distribuiranih izvora, uključujući i elektrane sa stabilnom proizvodnjom, kao što su biogasne elektrane. Varijabilnost primarnog energenta (sunca i vetra), kao i pouzdanost distribuiranog generisanja, mogu ugroziti stabilnost rada prenosnog sistema i u kritičnim slučajevima dovesti do njegovog raspada.

Beznaponsko uspostavljanje elektroenergetskog sistema (engl. *Black Start*) predstavlja proces koji se inicira nakon delimičnog ili potpunog raspada elektroenergetskog sistema (EES), koji je okarakterisan kao HILP (*High Impact Low Probability*) [1], događaj sa vrlo malom verovatnoćom pojave, ali sa veoma velikim uticajem na kompletnu mrežu. Trenutne strategije beznaponskog uspostavljanja zasnivaju na korišćenju konvencionalnih generatorskih jedinica priključenih na prenosni sistem koje mogu obezbediti stabilno napajanje i potrebnu snagu za pokretanje sistema. S obzirom na aktuelne tendencije ka dekarbonizaciji i integraciji distribuiranih izvora električne energije, neophodno je razmotriti mogućnosti koje ove promene donose u pogledu pružanja pomoćnih usluga beznaponskog uspostavljanja sistema i ostrvskog rada. Mikromeže, kao autonomne energetske celine sa mogućnošću rada u ostrvskom režimu, mogu igrati značajnu ulogu u procesu uspostavljanja sistema. Upotreba mikromreža sa distribuiranim izvorima energije u procesu uspostavljanja sistema poboljšava njegovu fleksibilnost, stabilnost i žilavost [1], a pored toga može doneti značajne finansijske benefite i skratiti vreme potrebno za ponovno uspostavljanje normalnog rada. Ključni tehnički izazovi uključuju stabilnost napona i frekvencije i sinhronizaciju sa ostatkom mreže.

U ovom radu analiziran je proces uspostavljanja sistema pomoću mikromreže modelovane u softverskom alatu *DigSILENT PowerFactory*. Model obuhvata distribuirani izvor električne energije (npr. elektrana na biomasu) modelovan kao sinhroni generator sa pripadajućim modelima automatskog regulatora napona (AVR - *Automatic Voltage Regulator*), stabilizatora sistema (PSS - *Power System Stabilizer*), turbinskog regulatora (GOV) i sopstvenom potrošnjom potrebnom za rad elektrane. Cilj rada je da se ispita mogućnost ovakve mreže za beznaponsko pokretanje, sa posebnim naglaskom na uticaj turbinskog regulatora u održavanju stabilnosti sistema.

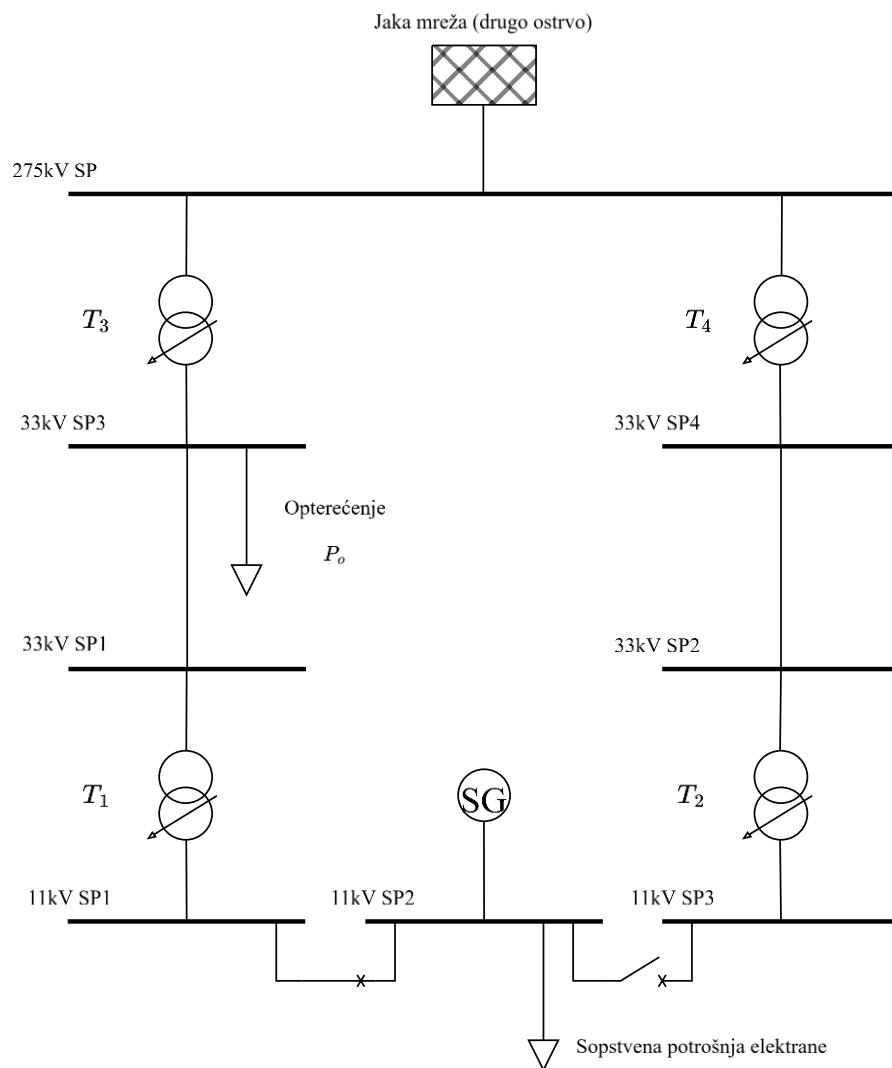
Rad je organizovan u 5 celina. Poglavlje 2 obuhvata opis modela mikromreže sa svim pripadajućim komponentama i modelovanim regulatorima. U poglavlju 3 objašnjena je metodologija simulacije sa opisom koraka beznaponskog pokretanja i uspostavljanja sistema. Takođe, analizirani su problemi koji se mogu javiti tokom pojedinih koraka, kao i načini njihovog prevazilaženja primenom adekvatnog regulatora. Četvrto poglavlje sadrži analizu dobijenih rezultata sa prikazom grafika najbitnijih veličina. U poslednjem poglavlju izneti su zaključci rada i istaknute su glavne prednosti primene ovakvog pristupa uspostavljanju EES.

2 OPIS MODELA MIKROMREŽE

2.1 Struktura modela

U cilju istraživanja mogućnosti uspostavljanja sistema sa distributivnog nivoa, napravljen je matematički model mreže u softverskom alatu *DigSILENT PowerFactory*. Razmatran je distribuirani izvor električne energije sa generatorom naznačene snage 72,5 MW i naznačenog napona 11 kV. Sopstvena potrošnja elektrane predstavljena je kao posebno opterećenje na generatorskim sabirnicama snage 6 MW. Za potrebe ovog rada, nije razmatran proces pokretanja elektrane, već se za početni trenutak uzima trenutak kada je generator dostigao naznačeni broj obrtaja i napojio sopstvenu potrošnju. Model sadrži sabirnice naponskih nivoa 11 kV, 33 kV i 275 kV koje su povezane odgovarajućim energetske transformatorima i kablovima/dalekovodima. Na sabirnicama 33 kV naponskog nivoa modelovano je opterećenje mikromreže koje se sekvencijalno povećava u koracima od 6 MW što omogućava ispitivanje odziva turbinskog regulatora. Model sadrži i model elektroenergetske mreže, drugog ostrva, čime je omogućeno modelovanje dva režima rada: ostrvski rad analizirane mikromreže i režim paralelnog rada mikromreže sa drugim ostrvom. Opisani simulacioni model prikazan je na

Sl. 1. Desna polovina mikromreže može biti iskorišćena kao rezerva za priključenje generatora na mrežu, pri čemu bi se opterećenje na sabirnicama 33 kV SP3 napajalo iz mreže. Takođe, ovaj deo mikromreže omogućuje implementaciju dodatnog izvora energije koji bi pružao podršku postojećem generatoru u procesu uspostavljanja sistema. Jedna od mnogobrojnih funkcionalnosti koje softverski paket *PowerFactory* nudi jeste i korišćenje već definisanih, standardnih modela iz biblioteke. Za modelovanje PSS i AVR su korišćeni standardni modeli: IEEE PSS2B, odnosno IEEE ST6B, respektivno, dok je turbinski regulator modelovan preko korisnički definisanog modela. U nastavku rada biće detaljnije opisan model turbinskog regulatora i njegovih parametara koji je implementiran pomoću DSL (*DigSILENT Simulation Language*).



Sl. 1: Struktura mikromreže modelovane za analizu procesa beznaponskog uspostavljanja sistema

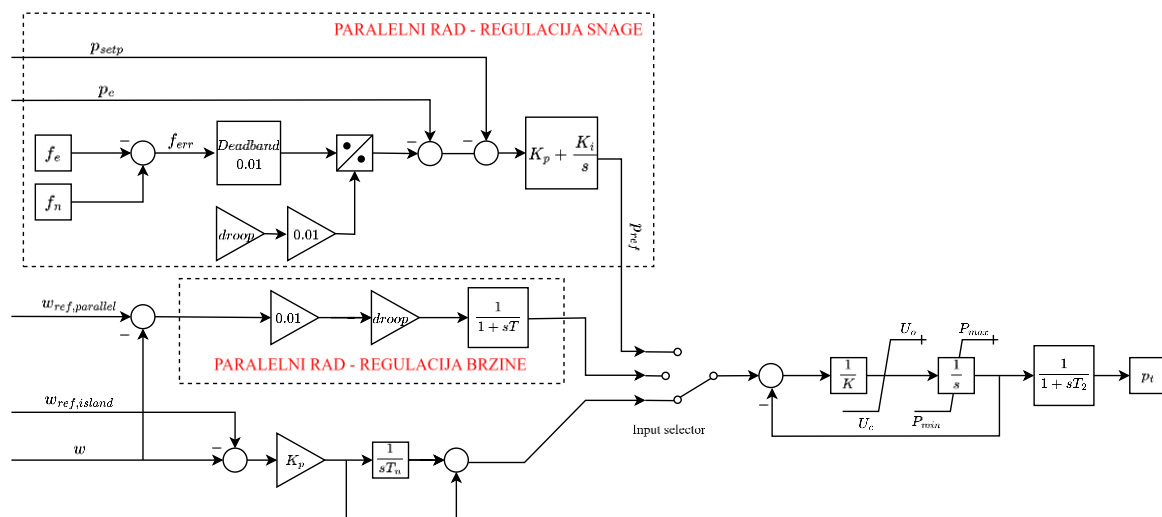
2.2 Turbinski regulator

Turbinski regulator je jedna od ključnih komponenti upravljačkih sistema generatora zadužena za kontrolu protoka radnog fluida kroz turbinu, a u cilju održavanja željene brzine rotora ili snage koju generator proizvodi [2]. U kontekstu uspostavljanja sistema, turbinski regulator ima nekoliko funkcija:

- da održava stabilnu frekvenciju inicijalno formiranog ostrva;
- da prilagodi proizvodnju snage promenljivom opterećenju ostrva;
- da omogući stabilno prebacivanje između ostrvskog i paralelnog režima rada pri sinhronizaciji sa drugim ostrvom;
- da omogući stabilan rad u paralelnom režimu rada kroz regulaciju snage.

U okviru modela turbinskog regulatora modelovane su tri regulacione strukture koje odgovaraju režimima rada:

- Izbor željenog radnog režima rada može se izvršiti pomoću *Input selector* bloka. Model regulatora je prikazan na Sl. 2. Za potrebe upravljanja mikromrežom u okviru ovog rada, korišćeni su radni režimi pod rednim brojevima 1) i 3). Detaljniji opisi regulacije aktivne i reaktivne snage mogu se pronaći u [3].



U slučaju rada u režimu regulacije brzine, na ulaz proporcionalno-integralnog (PI) regulatora dovodi se odstupanje brzine rotora od zadate vrednosti. Na izlazu regulatora dobija se položaj ventila koji teži da brzinu vrati na referentnu vrednost. Izlazna snaga turbine u ostrvskom režimu rada određena je funkcijom prenosa (1).

U režimu regulacije snage, na ulaz proporcionalno-integralnog (PI) regulatora dovodi se razlika snage generatora korigovane za odstupanje frekvencije od nominalne vrednosti i referentne vrednosti snage. Korekcijom merenja snage za vrednost odstupanja frekvencije od nominalne vrednosti modeluje se primarna regulacija učestanosti.

Kod ovakvog režima regulacije snaga agregata se povećava usled smanjenja frekvencije i obratno. Uobičajeno je da je primarna regulacija učestanosti aktivna tek kada odstupanje frekvencije pređe neku predefinisanu vrednost. Ovo se postiže tako što razlika izmerene i nominalne učestanosti prolazi kroz blok mrtve zone (*Deadband*). Nakon prolaska kroz blok mrtve zone, signal odstupanja frekvencije se deli zadatom vrednošću statizma čime se dobija potrebna modifikacija aktivne snage. Nakon poređenja sa referentnom (p_{setp}) aktivnom snagom, dobija se referenca za upravljanje ventilima turbine, tj. mehaničkom snagom turbine. U slučaju paralelnog rada sa beskonačno jakom mrežom i nominalnom vrednošću frekvencije, greška frekvencije bi postala jednaka nuli nakon prelaznog procesa, usled čega bi izlazna snaga u ustaljenom stanju bila jednaka zadatoj snazi.

Tab. 1 prikazane su usvojene vrednosti parametara regulatora. U slučaju paralelnog rada sa beskonačno jakom mrežom i nominalnom vrednošću frekvencije, greška frekvencije bi postala jednaka nuli nakon prelaznog procesa, usled čega bi izlazna snaga u ustaljenom stanju bila jednaka zadatoj snazi.

Tab. 1: Parametri turbinskog regulatora

Parametar	Vrednost	Jedinica
$droop$	5	%
K_p	5	r.j.
T_n	40	s
T_1	0,68	r.j.
T	0,02	s
T_2	2	s
U_o	-1	r.j. / s
U_c	1	r.j. / s
P_{min}	0	r.j.
P_{max}	1	r.j.
$mode$	0 – island, 1 – parallel (w), 2 – parallel (p)	

3 METODOLOGIJA SIMULACIJE

RMS simulacija u softveru *PowerFactory* omogućava analizu prelaznih pojava (trajanja od nekoliko sekundi do nekoliko minuta) u elektroenergetskom sistemu, čime se može ispitivati stabilnost napona i frekvencije, kao i rad regulacionih sistema. U ovom slučaju, simulacija je izvršena u cilju analize odziva generatora pri postepenom priključivanju opterećenja i kasnijem sinhronizovanju sa drugim ostrvom. Ovakav pristup omogućava detaljno praćenje odziva regulatora, uključujući automatski regulator napona i turbinski regulator, koji su ključni za održavanje stabilnog rada generatora u različitim režimima.

Simulacija se odvija u nekoliko ključnih koraka. Na početku, mikromreža radi izolovano, pri čemu generator napaja samo sopstvenu potrošnju elektrane. U sledećim koracima simulacije, u razmacima od po 20 s, sledi sekvencijalno priključivanje ostalih elemenata mikromreže. Najpre se uspostavlja napajanje 11 kV sabirnicom, a zatim transformatora T_1 . U 80. sekundi dolazi do priključenja dalekovoda DV 1, a 20 s nakon toga se pokreće priključenje tereta P_o .

Na svakih 200 s priključuje se po deo opterećenja snage 6 MW do dostizanja ukupne snage opterećenja od 18 MW. U završnoj fazi, mikromreža se sinhronizuje sa drugim ostrvom pri čemu se menja režim rada turbinskog regulatora u paralelni rad sa regulacijom snage.

U razmatranom slučaju je transformator T3 povezan kablovskim vodom 33kV kratke dužine, te Frantijev efekat tj. uticaj dalekovoda u praznom hodu na generisanje reaktivne energije u ovom slučaju nije bio izražen. U Tab. 2 je prikazan tok simulacije sa tačno definisanim koracima (događajima).

Tab. 2: Definisani koraci simulacije

	Događaj	
#1	Stavljanje pod napon sabirnica 11 kV	20
#2	Stavljanje pod napon transformatora T ₁	40
#3	Uključivanje u prazan hod DV1	80
#4	Priključenje opterećenja P _o	100
#5	Dodavanje dodatnog opterećenja	300
#6	Dodavanje dodatnog opterećenja	500
#7	Stavljanje pod napon transformatora T ₃	550
#8	Promena referentne vrednosti snage	600
#9	Sinhronizacija sa drugim ostrvom	630
#10	Promena režima rada regulatora	630
#11	Promena referentne vrednosti snage	900

Treba primetiti da generalna struktura turbinskog regulatora prikazana na Sl. 2 ne sadrži strukturu za promenu reference neaktivnog regulatora tzv. *tracking* vrednosti. Ukoliko regulacioni sistem ne bi imao implementirano praćenje referentne vrednosti u trenucima kada nije aktivan, može doći do naglih prelaza i oscilacija prilikom prelaska iz jednog u drugi režim rada. Kako u predmetnim analizama nije bio cilj detaljno modelovanje svih struktura turbinskog regulatora, već samo najuticajnijih, u cilju ispravnog prelaska iz jednog u drugi režim rada u model je dodat događaj promene setpointa aktivne snage kojim se referentna snaga turbine u trenutku sinhronizacije postavlja na vrednost koja je odgovara isporučenoj snazi pre sinhronizacije. Događaj u 900. sekundi služi kao primer promene reference snage u cilju ispitivanja odziva regulatora na promenu referentne vrednosti kada je regulator u režimu regulacije snage.

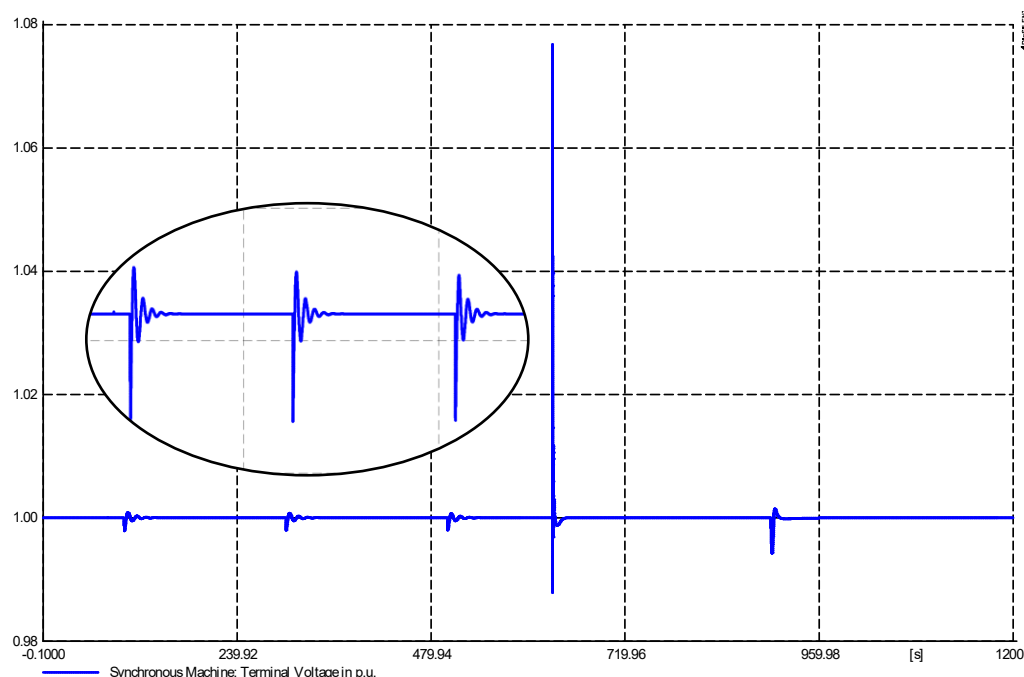
4 REZULTATI SIMULACIJE

Nakon simulacije uspostavljanja EES izvršena je analiza ključnih električnih veličina mikromreže tokom njenog rada u ostrvskom režimu i nakon sinhronizacije sa drugim ostrvom. U nastavku su prikazani rezultati analize napona, brzine, pobudne struje i snage turbine.

4.1 Napon na priključcima generatora

Na Sl. 3 prikazan je vremenski tok napona na priključcima sinhronog generatora tokom trajanja simulacije. U početnoj fazi rada, dok mikromreža funkcioniše u izolovanom režimu, napon na priključcima generatora održava se na približno konstantnoj vrednosti od 1 r.j. Ova stabilnost se postiže zahvaljujući regulatoru napona (AVR), koji održava napon generatora na postavljenoj vrednosti.

Sa grafika se mogu videti kratkotrajni propadi napona koji su uzrokovani povećavanjem opterećenja, te konačnom brzinom odziva regulatora i generatora. Sinhronizacijom mikromreže sa drugim ostrvom dolazi do porasta napona, što je posledica struje izjednačenja prilikom sinhronizacije. Važno je napomenuti da model ne sadrži model funkcije sinhronizatora, usled čega se sinhronizacija ne izvršava u najpovoljnijem trenutku. Nakon kratkotrajnih oscilacija, napon se stabilizuje, čime se potvrđuje ispravan rad automatskog regulatora napona generatora. U 900. sekundi se takođe dešava manji propad napona koji je posledica smanjenja snage turbine.



Sl. 3: Napon na priključcima generatora

4.2 Dinamički odziv brzine i pobudne struje generatora

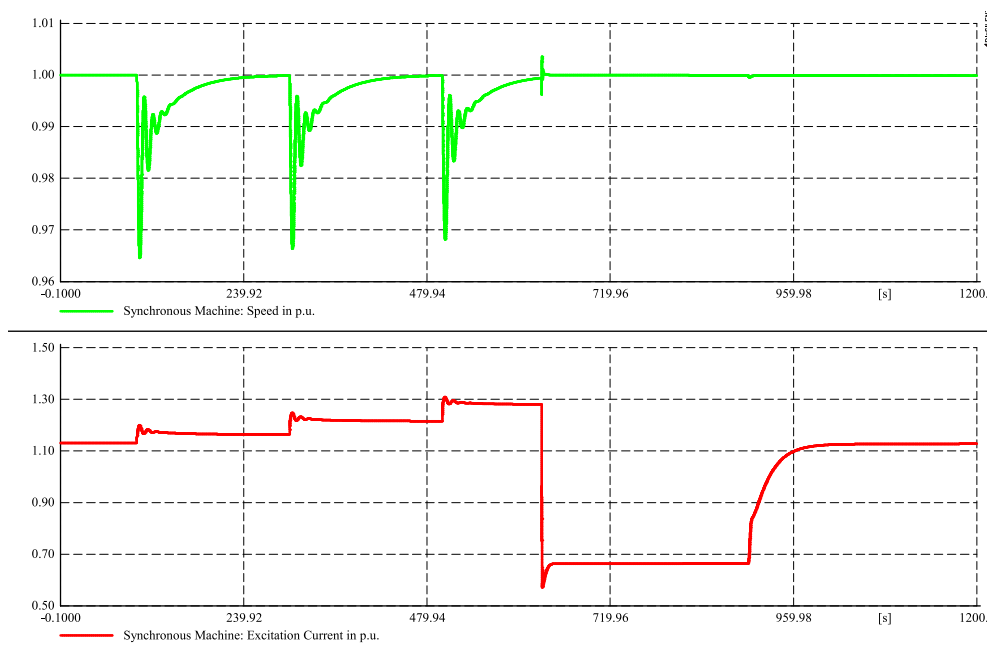
Na Sl. 4 **Error! Reference source not found.** prikazane su promene brzine i pobudne struje sinhronog generatora tokom simulacije. U inicijalnoj fazi rada, brzina generatora ostaje približno konstantna, u skladu sa modom rada turbinskog regulatora. Brzina generatora od 100. sekunde ispoljava prigušene oscilacije usled promene opterećenja. Kada dolazi do povećanja opterećenja, brzina rotora privremeno opada zbog povećanog momenta opterećenja na osovini. Turbinski regulator prepoznaje ovu promenu i povećava dotok pare kako bi kompenzovao gubitak energije, čime se brzina postepeno vraća na referentnu vrednost. Nakon sinhronizacije sa drugim ostrvom, javljaju se oscilacije brzine rotora, koje se postepeno prigušuju dok se sistem ne stabilizuje na sinhronoj brzini drugog ostrva koje je jaka mreža. Ove oscilacije su posledica usklađivanja frekvencije mikromreže sa frekvencijom mreže, a

njihovo uspešno prigušenje potvrđuje efikasnost primenjenog regulatora. Nakon 900. sekunde simulacije može se primetiti trend linearnog opadanja brzine generatora koji je posledica opadanja brzine mreže. Naime, u softverskom alatu *PowerFactory*, mreža je modelovana kao sinhroni generator sa podesivom inercijom (u ovom slučaju, ta inercija je mnogo veća od inercije generatora u mikromreži) i sa konstantnom mehaničkom snagom. Dakle, mreža koja bi trebalo da bude beskonačno jaka sa konstantnom frekvencijom, ponaša se kao generator koji isporučuje električnu snagu na račun kinetičke energije akumulisane u obrtnoj masi jako velike inercije.

Na osnovu diferencijalne jednačine za obrtno kretanje (2), može se zaključiti da se brzina odnosno frekvencija takvog sistema menja kada god postoji debalans snaga i nakon dovoljno dugo vremena postojanja tog debalansa bi brzina dostigla nultu vrednost.

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_e \quad (2)$$

Pobudna struja generatora se pri ostrvskom radu mikromreže menja skokovito u trenucima kada dolazi do promene opterećenja. Promene pobudne struje su relativno male, s obzirom na to da je opterećenje generatora čisto aktivno u ovim režimima. Nakon sinhronizacije mikromreže sa drugim ostrvom, dolazi do smanjenja pobudne struje, što je posledica razmene reaktivne snage između mreža. Tok reaktivne snage je od drugog ostrva ka mikromreži, usled čega je generator potpobuđen, tj. potrebna mu je manja pobudna struja za održavanje naznačenog napona na prikljčcima. Regulator pobude uspešno reaguje na sve poremećaje, što je očigledno na osnovu odziva napona prikazanog na Sl. 3 u prethodnom odeljku.



Sl. 4: Brzina rotora i pobudna struja generatora

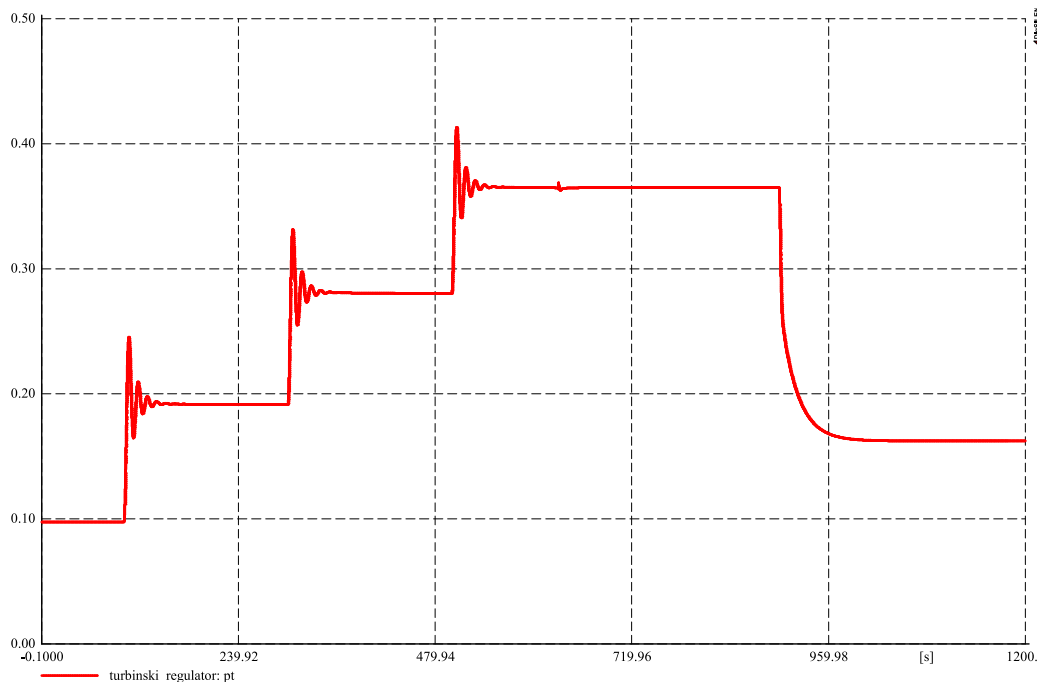
4.3 Analiza snage turbine

Na Sl. 5 prikazana je promena aktivne snage turbine tokom trajanja simulacije. Pri izolovanom radu, snaga koju generator proizvodi pokriva isključivo sopstvenu potrošnju. Sekvencijalno povećavanje opterećenja dovodi do proporcionalnog povećanja aktivne snage, pri čemu se mogu uočiti prigušene oscilacije nakon svakog priključivanja novog opterećenja.

U trenutku sinhronizacije sa drugim ostrvom, snaga na priključcima generatora blago opada usled nepovoljnog trenutka sinhronizacije, čime se povećava razlika između zadate i merene snage generatora. U cilju dostizanja željene vrednosti snage, turbinski regulator kratkotrajno povećava snagu turbine, nakon čega snaga turbine dostiže novu ustaljenu vrednost. U 900. sekundi uočava se pad snage turbine koji je posledica promene referentne snage na 10 MW. Referentna snaga turbine u režimu regulacije može se, na osnovu dijagrama na Sl. 2, izraziti kao

$$P_{ref} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (P_{setp} - P_e + k \Delta f), \quad (3)$$

gde su P_{setp} i P_e zadata i merena vrednost snage generatora, Δf odstupanje učestanosti od nazivne vrednosti, K_p i K_i parametri PI regulatora snage generatora i k parametar statizma primarne regulacije učestanosti. U skladu sa jednačinom (3), vrednost snage generatora pri radu na beskonačno jakoj mreži i nazivnoj vrednosti učestanosti bila bi jednaka zadatoj vrednosti. Imajući u vidu da inercija ostrva nije beskonačna, već da ima konačno veliku vrednost, brzina mreže kontinuirano opada, dok se snaga turbine jako sporo, ali monotono povećava usled uvećavanja odstupanja frekvencije Δf . U realnim sistemima bi se vrednosti snage turbine i izlazne snage generatora ustalile na konstantnim vrednostima delovanjem turbinskih regulatora. Kako je uočeni trend porasta snage turbine zanemariv i kako je posledica ograničenja primenjenog modela, sa stanovišta modelovanog procesa može se konstatovati da su sinhronizacija mikromreže sa drugim ostrvom i regulacija snage izvršeni uspešno.



Sl. 5: Snaga turbine

5 ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da mikromreža sa distribuiranom proizvodnjom, uz implementirane regulacione mehanizme kao što su automatski regulator napona (AVR), stabilizator sistema (PSS) i turbinski regulator (GOV), predstavlja tehnički izvodljivo rešenje za realizaciju procesa beznaponskog uspostavljanja elektroenergetskog

sistema. Detaljno modelovanje i simulacija u softverskom okruženju *PowerFactory* pokazali su da je sistem sposoban da održi stabilnost napona i frekvencije tokom ostrvskog rada, kao i prilikom postepenog priključenja opterećenja i kasnije sinhronizacije sa drugim ostrvom. Uočeno je uspešno prigušenje tranzijentnih oscilacija, što ukazuje na efikasnost primenjene regulacije u različitim režimima rada. Posebno je značajno to što ovakve mikromreže, osim autonomnog rada, imaju potencijal za pružanje pomoćnih sistemskih usluga u širem kontekstu restauracije sistema, čime se povećava fleksibilnost celokupnog elektroenergetskog sistema. Mikromreže sa distribuiranim izvorima energije doprinose unapređenju žilavosti sistema – sposobnosti sistema da se održi ili brzo povrati u stabilno operativno stanje nakon ozbiljnih poremećaja, kao što su masovni ispadi ili potpun kolaps mreže.

EES u budućnosti treba formirati kao fizički spoj hijerarhijski strukturisanih energetske samoodrživih mikromreža. Ovaj koncept obezbeđuje da se raspadom prenosnog sistema formiraju mala ostrva koja funkcionišu nezavisno i da restauracija sistema počiva na njihovoj ponovnoj sinhronizaciji. Ovakav koncept sistema ima visoku žilavost jer se raspadom integralnog sistema stvaraju nezavisni podsistemi koji su funkcionalni i obezbeđuju snabdevanje potrošača električnom energijom. Žilavost se u ovom kontekstu ne ogleda samo u otpornosti na poremećaje, već i u sposobnosti decentralizovanog delovanja, lokalne proizvodnje i kontrole, kao i fleksibilnog povezivanja i odvajanja od glavne mreže u zavisnosti od trenutnih uslova.

S obzirom na masovnost i prostornu propagaciju fotonaponskih izvora u distributivnim mrežama, kao pravac daljih istraživanja predlaže se analiza mogućnosti i uslova učešća ovih izvora u procesu restauracije sistema. Očekuje se da prisustvo fotonaponskih izvora u distributivnoj mreži u paralelnom radu sa sinhronim generatorom može dodatno rasteretiti glavni generator, kako u pogledu aktivne, tako i u pogledu reaktivne podrške sistemu, čime bi se omogućila još brža i efikasnija restauracija sistema u realnim eksploatacionim uslovima, uz istovremeno smanjenje emisija ugljen dioksida i povećanje energetske održivosti. Dodatna istraživanja mogu uključiti i optimizaciju koordinacije regulatora u mikromreži sa više izvora, kao i razvoj naprednih algoritama za automatsku sinhronizaciju sa mrežom. Takođe, potrebno je sagledati i mogućnost i tehničke uslove izolovanog rada i snihronizacije distributivnog sistema koji nema obrtne generatore priključene na mrežu.

Treba napomenuti, da proces restauracije sistema zahteva uspostavljanje i frekvencijske i naponske stabilnosti, u tom pored regulacije aktivnih snaga, treba imati u vidu da obnovljivi izvori energije, kao što su fotonaponske elektrane i vetroelektrane, mogu pružati i značajnu reaktivnu podršku, koja je nepohodna za održavanje naponske stabilnosti kako unutar izolovanih mikromreža, tako i nakon sinhronizacije sa prenosnom mrežom u procesu restauracije elektroenergetskog sistema.

6 LITERATURA

- [1] Nordic Energy Research, Nordic Energy Islanding - Resilience and Blackout Restoration in the Nordic Power System, 2024, <https://www.neso.energy/document/191636/download>
- [2] Woodward Inc., Governing Fundamentals, Fort Collins, CO, USA, 2003, <https://www.pbm.hr/media/1101/woodward-governing-fundamentals.pdf>
- [3] Kundur, P. (1994), Power System Stability and Control, McGraw-Hill