

Stjepan Stipetić
FER
stjepan.stipetic@fer.hr

Marinko Kovačić
FER
marinko.kovacic@fer.hr

Damir Žarko
FER
damir.zarko@fer.hr

Igor Erceg
FER
igor.erceg@fer.hr

SINKRONI RELUKTANTNI GENERATORI ZA MIKRO HIDROELEKTRANE (HYDREL)

SAŽETAK

Učinkovita potrošnja energije i povećana upotreba energije iz obnovljivih izvora su promovirane strateškim planovima Europske unije i Republike Hrvatske. Mikro, mini i male hidroelektrane imaju značajan neiskorišteni potencijal i prednost pred energijom vjetra i sunčevom energijom u stabilnijoj i predvidivoj proizvodnji. Vodna turbina i električni generator su ključni elementi takvih sustava, koji trebaju imati nisku cijenu, visoku učinkovitost i pouzdanost. Novi sustavi za pretvorbu energije su temeljeni na turbini promjenjive brzine vrtnje i na generatoru spojenom na energetske pretvarač, čime se ostvaruje fleksibilan sustav za upravljanje radnom i jalovom snagom. Topologije generatora, koje nude visoku učinkovitost, temeljene su na stalnim magnetima s elementima rijetkih zemalja koji imaju visoku i nestabilnu cijenu na tržištu i čija proizvodnja ima iznimno negativan učinak na okoliš. Alternativa strojevima sa stalnim magnetima su sinkroni reluktantni strojevi, jednostavnog robusnog dizajna bez magneta, visoke učinkovitosti i niske cijene.

Ključne riječi: sinkroni reluktantni generator, mikro hidroelektrane, pogon s promjenjivom brzinom vrtnje

SYNCHRONOUS RELUCTANCE GENERATORS FOR MICRO HYDROPOWER PLANTS (HYDREL)

ABSTRACT

Efficient energy consumption and the increased use of energy from renewable sources are promoted by strategic plans of the European Union and Croatia. Micro, mini and small hydropower plants have a significant unused potential and an advantage over wind and solar in more stable and predictable energy production. Water turbine and electrical generator are the key elements of such systems which need to have low cost, high efficiency, and reliability. Novel systems for energy conversion are based on the variable speed turbine and on the generator coupled with the power converter thus forming a flexible system capable of active and reactive power control. The most efficient generator topologies are based on rare-earth permanent magnets which have a high and unstable price and whose manufacturing has an extremely negative environmental impact. An alternative to permanent magnet machines are the synchronous reluctance machines, which have simple robust design without magnets, high efficiency, and low cost.

Keywords: synchronous reluctance generator, micro hydropower plants, variable speed drive

1. UVOD

Fakultet elektrotehnike i računarstva kroz projekt HYDREL financiran od Hrvatske zaklade za znanost istražuje mogućnosti korištenja sinkronih reluktantnih strojeva kao generatora u mikro hidroelektranama. Istraživanja i inovacije na projektu HYDREL su usredotočeni na sljedeće ciljeve:

- (i) razvoj koncepta proizvodnje energije u mikro hidroelektranama temeljenog na sinkronim reluktantnim generatorima;
- (ii) istraživanje optimalnog oblika rotorskih barijera sinkronog reluktantnog generatora u svrhu povećanja korisnosti i gustoće momenta uz projektiranje i izradu dva prototipna generatora;
- (iii) razvoj metode za dizajn energetskog pretvarača optimiranog po gubicima i volumenu uz projektiranje i izradu prototipa pretvarača s optimalno odabranim poluvodičkim i filtarskim komponentama;
- (iv) istraživanje naprednih metoda upravljanja bez mjernog člana brzine vrtnje za energetski učinkovito upravljanje sinkronim reluktantnim generatorom i mrežnim pretvaračem;
- (v) eksperimentalna verifikacija sustava za proizvodnju električne energije na laboratorijskom postavu.

Temeljne istraživačke metode na projektu HYDREL uključuju razvoj simulacijskih modela komponenata, integraciju tih modela u računalno nezahtjevan integrirani simulacijski sustav i detaljnu eksperimentalnu verifikaciju s implementacijom razvijenih algoritama upravljanja. Razvijeni koncept sustava proizvodnje električne energije bit će ispitan na laboratorijskom postavu sastavljenom od dva prototipna stroja, koji predstavljaju turbinu i generator, a spojeni su na mrežu preko prototipa energetskog pretvarača.

Najvažniji učinak očekuje se na području energije kroz industrijsku primjenu prototipnog sustava mikro hidroelektrane. S obzirom na to da prototipni sustav daje kompletno energetski učinkovito rješenje i da dosadašnja istraživanja članova grupe HYDREL imaju izraženu industrijsku primjenu, realno je očekivati da se ovaj učinak ostvari. Nadalje, očekivani učinak je i veća primjena sinkronih reluktantnih strojeva u industriji, pogotovo zbog robusnog dizajna i visoke korisnosti. Također, razvijeni simulacijski modeli i optimizacijski alati će biti primjenjivi na slične projektne probleme, a inovativni upravljački algoritmi mogu se koristiti i na ostalim obnovljivim izvorima energije, kao što su vjetrogeneratori, a potencijalno i u industrijskoj primjeni sinkronih reluktantnih motora.

2. KONCEPT PROIZVODNJE ENERGIJE U MIKRO HIDROELEKTRANAMA

Okosnica tradicionalnih elektroenergetskih sustava su bazni izvori energije kao što su prirodni plin, ugljen i nuklearna energija. Tijekom vršnog opterećenja oni se nadopunjuju hidroelektranama, koje mogu biti brže, učinkovitije i imati nižu cijenu povezivanja s elektroenergetskim sustavom ili biti odvojene od njega. Posljednjih godina, velika integracija obnovljivih izvora električne energije sa stohastičkom raspoloživosti, vjetar i sunce, stvara nove izazove u regulaciji tokova energije i regulaciji stabilnosti energetskih sustava. Izlazna karakteristika hidroelektrana je općenito predvidljivija od karakteristika izvora baziranih na suncu i vjetru, budući da se velike hidroelektrane oslanjaju na akumulacijska jezera, koja mogu biti nadopunjena dodatnim pumpnim skladištima te djeluju uglavnom pod punom kontrolom čovjeka, osim u slučaju dužih sušnih razdoblja.

Kako se povećava udio varijabilnih obnovljivih izvora energije, u nekom trenutku su pogođeni čak i bazni izvori te su prisiljeni raditi u cikličnim načinima rada. Dakle, sustavi bazirani na vjetru i sunčevoj energiji moraju biti poduprti stalnijim i fleksibilnijim obnovljivim izvorima energije. Dodatne mikro (5-100 kW), mini (100-500 kW) i male (0,5-10 MW) hidroelektrane bi mogle postati važnim izvorom čiste, obnovljive i ekonomične dopune varijabilnim izvorima poput lokalnih izvora baziranih na suncu i vjetru bez često kritiziranih štetnih utjecaja na okoliš velikih hidro projekata i pomalo problematičnih pozicija za odabir smještaja crpki. Takve elektrane zahtijevaju potok ili rijeku s dovoljno vode koja prolazi kroz nju uz odgovarajući volumni protok i dovoljni pad vode koji može opskrbljivati turbinu priključenu na generator.

U Europi, Njemačka je lider u broju malih hidroelektrana snage do 10 MW [1], dok im se, općenito, broj povećava u zemljama članicama EU. Taj je trend potaknut pritiskom za povećanjem proizvodnje i integracije obnovljivih izvora energije i zadovoljavanjem ambicioznih planova postavljenih u zakonodavstvu Europske komisije (EK) [2]. Prema "European Small Hydropower Association" (ESHA),

trenutno u Hrvatskoj postoje 32 male hidroelektrane snage do 10 MW , ali postoji veliki potencijal za povećanjem njihovog broja. Procijenjeno je postojanje 46 novih pogodnih lokacija za elektrane snaga 1-10 MW i 325 lokacija za elektrane snaga 100 kW-1 MW. Prema "Katastru malih vodnih snaga" (KMVS), koji je napravljen u Hrvatskoj 1985. godine, postoje 134 lokacije od kojih je 63 s potocima pogodnim za male hidroelektrane [3]. Na ta 63 potoka identificirano je 699 lokacija gdje bi ukupna instalirana snaga mogla iznositi oko 177 MW (prirodna bruto snaga 135 MW) s tehnički upotrebljivom godišnjom proizvodnjom od 567,7 GWh. Prema "Strategiji energetskega razvoja Republike Hrvatske"[4], cilj je izgraditi najmanje 100 MW malih hidroelektrana do 2020. godine. Taj će cilj biti teško postići zbog visokih specifičnih ulaganja i ograničenja vezanih uz utjecaj na okoliš, zaštitu kulturno-povijesne baštine i zaštitu krajolika.

2.1. Upotreba turbine s promjenjivom brzinom vrtnje u mikro hidroelektranama

Strojarnica tipične male hidroelektrane sadrži turbinu (obično Kaplan, Pelton, Turgo ili turbinu s križnim protokom), generator (asinkroni ili sinkroni s uzbudom), sustav za upravljanje turbinom, automatizirani sustav za daljinsko upravljanje i dodatnu (pomoćnu) električnu opremu poput transformatora, sklopne i zaštitne opreme, baterija i istosmjernog napajanja korištenog u slučaju nestanka napona mreže.

Turbine tradicionalnih hidroelektrana optimizirane su za rad s fiksnom brzinom vrtnje, pri čemu se snaga upravlja mehaničkim turbinskim regulatorom, koji mijenja karakteristike protoka vode. U nekim slučajevima protok vode se zbog klimatskih uvjeta ne može održavati konstantnim tijekom godine. Smanjenje protoka se obično postiže korištenjem varijabilne geometrije statora turbine ili pomoću specijalnih redukcijskih ventila na dovodu vode. S obzirom na to da mehaničke komponente predstavljaju glavninu troškova instalacije elektrane, smanjenje njihovog broja korištenjem elektroničkog sustava za upravljanje snagom generatora može značajno smanjiti ukupnu cijenu. Na nekim lokacijama, posebno u planinskim predjelima, ograničeni protok ne predstavlja problem. Problem se javlja kad takva elektrana radi na otočnoj električnoj mreži gdje se potrošnja neprestano mijenja s potrebom korisnika. Ako turbina nije mehanički upravljana, frekvencija mreže će varirati s promjenom potrošnje. Ovakav problem se uobičajeno rješava stupnjevitim priključivanjem različitih otpornih trošila na generator. Spomenuti pristup je neučinkovit jer se velika količina energije pretvara u toplinu.

Jedna od osnovnih ideja projekta je iskorištavanje ponašanja turbine pri radu uz različite protoke. Dobro je poznato da učinkovitost pretvorbe energije u turbini ovisi o protoku i brzini vrtnje. Kako bi se proširilo korisno područje rada turbine te osigurali minimalni gubici sustava, potrebno je upravljati brzinom vrtnje generatora. U oba slučaja, kada turbina funkcionira kao izvor energije na otočnoj mreži ili kada je priključena na elektroenergetski sustav, potrebna frekvencija je definirana teretom ili zahtjevima mreže. Promjenjiva brzina vrtnje turbine rezultirat će promjenjivom frekvencijom napona i struje generatora te potrebom za dodatnim uređajem za pretvorbu energije, kako bi se zadovoljili parametri trošila ili mreže. Projekt HYDREL se fokusira na optimizaciju sustava za elektromehaničku pretvorbu energije, npr. upotreba generatora s promjenjivom brzinom vrtnje i spoj na elektroenergetski sustav preko energetskega pretvarača.

2.2. Postojeće tehnologije generatora

Asinkroni generator (AG) je jednostavno rješenje za proizvodnu jedinicu, međutim mora raditi na mreži, jer treba reaktivnu snagu iz mreže radi normalnog funkcioniranja. Klasični sinkroni generatori (SG) mogu raditi povezani s mrežom ili u otočnom načinu u udaljenim područjima budući da njihova uzbuda nije ovisna o mreži. Oni također omogućuju regulaciju napona regulacijom jalove snage pomoću uzbudne struje. Sinkroni generatori su skuplji od asinkronih generatora i koriste se u elektroenergetskim sustavima gdje snaga generatora predstavlja značajan udio opterećenja elektroenergetskog sustava. Sinkroni generatori zahtijevaju konstantnu sinkronu brzinu vrtnje kako bi se proizvodio napon jednake frekvencije kao što ju ima elektroenergetski sustav. Ukupni trošak ulaganja za mikro i mini hidroelektrane treba minimizirati kako bi cjelokupan projekt bio ekonomski održiv. Cijena generatora u ukupnoj cijeni predstavlja značajan trošak.

Projekt je usredotočen na upotrebu sinkronog reluktantnog generatora (SRG), kao proizvodne jedinice u mikro hidroelektranama. SRG je robusan i jeftin stroj visoke učinkovitosti. Ima jednak trofazni

stator kao SG ili AG te lamelirani rotor s nekoliko slojeva rotorskih zračnih barijera, a princip rada oslanja se na različiti magnetski otpor u rotoru između dvije međusobno okomite magnetski osi.

Takav koncept ima nisku cijenu i visoku učinkovitost (veću od SG i AG) jer se u rotoru pojavljuju vrlo mali gubici lokalizirani blizu zračnog raspóra. Sinkroni generatori sa stalnim magnetima (SGSM) veću gustoću snage i učinkovitost od SRG, ali postoji zabrinutost zbog nestalne cijene i buduće dostupnosti magneta baziranih na elementima rijetkih zemalja zbog visoke koncentracije proizvodnje elemenata tih elemenata u Kini.

Usporedba SRG i SGSM može se naći u radu [5]. Pokazuje se da reluktantni stroj iste veličine ima nešto manju učinkovitost (98,7% u odnosu na 99% za SGSM) i samo 80 % mase u odnosu na SGSM pri snazi 5 MW. Također se pokazuje da su SRG robusniji, jeftiniji i imaju jednostavniju konstrukciju. Reluktantni strojevi su tiši i pogodni su za rad u širokom rasponu brzine vrtnje. Osim toga, pokazuje se da reluktantni generator pri nižim brzinama ima niže gubitke u željezu, što znači da kod nižih brzina ima veću učinkovitost od SGSM. Analiza utjecaja korištenja rotora s magnetima i bez magneta u sinkronim reluktantnim strojevima dana je u [6]. Pokazano je da dodavanje magneta povećava gustoću momenta i faktor snage stroja, ali se povećavaju i troškovi. U radu [7] je pokazano da sinkroni reluktantni generator može raditi i pri 5 MW s faktorom snage većim od 0.8. Usporedba AG, SGSM, SRG i sinkronog reluktantnog generatora potpomognutog stalnim magnetima (SRGSM) u [8] pokazuje da praćenjem trajektorije maksimalnog okretnog momenta SynRG može postići približnu učinkovitost kao SGSM. Također je moguće postići faktor snage iznad 0.8 za stroj veličine do 250 kW. Utjecaj broja polova na izvedbu sinkronog reluktantnog generatora za vjetroelektrane opisan je u [9] gdje se uspoređuju 6, 8 i 12-polne generatore. Pokazano je da 6 i 8-polni strojevi imaju slične performanse, dok 12-polni strojevi imaju znatno lošiju učinkovitost, osobito imaju veće gubitke i manji zakretni moment.

3. ENERGETSKI PRETVARAČI ZA MIKRO-HIDROELEKTRANE

Mikro hidroelektrane tradicionalno su se oslanjale na upravljanje snagom pomoću mehaničkih regulatora zbog visoke cijene energetskih pretvarača. Zbog povećane potrebe za energetskim pretvaračima za upravljive elektromotorne pogone u industriji, električnoj vuči i obnovljivim izvorima energije, u današnje vrijeme drastično su smanjene cijene poluvodičkih modula. Uz veliku potražnju, na smanjenje cijene energetskih pretvarača utjecao je i napredak u razvoju novih topologija pretvarača te novih tipova poluvodičkih sklopki, koje omogućuju rad na višim frekvencijama te upotrebu volumno manjih i jeftinijih komponenata filtra.

Za potrebu analize, cijena energetskih pretvarača procijenjena je iz tržišta solarne energije na 150 USD/kW za primjene do 10 kW [10]. Ukupna investicija za izgradnju standardne mikro hidroelektrane kreće se od 1500 USD/kW do 2500 USD/kW ovisno o specifičnostima lokacije i cijene rada [11]. Uzimajući u obzir navedenu cijenu, mogućnost izostavljanja mehaničkih komponenti regulatora te balastnog tereta, upotreba energetskog pretvarača ima zanemariv utjecaj na cijenu projekta.

Kada se uzme u obzir cijeli sustav za proizvodnju energije zajedno s cijenom povoljnim sinkronim reluktantnim generatorom, cijena ovakvog rješenja može biti manja od tradicionalnog. Osim niske cijene, korištenje energetskog pretvarača povećat će učinkovitost sustava i njegovu funkcionalnost. Npr. energetski pretvarač može biti korišten za mjerenja struja i napona za potrebe zaštite, za praćenje proizvodnje energije te za praćenje stanja generatora.

Glavna uloga energetskog pretvarača u elektrani temeljenoj na sinkronom reluktantnom generatoru je pretvorba električne energije iz generatora prema mreži ili teretu u otočnom radu uz upravljanje naponom i frekvencijom. Jednostavna rješenja poput diodnog ispravljača koji se često koristi kod generatora sa stalnim magnetima ne mogu se iskoristiti za sinkroni reluktantni generator zbog nedostatka trajnog magnetskog toka. Kako bi se ostvario generatorski rad sinkronog reluktantnog stroja, potrebno je koristiti trofazni izmjenjivač s utisnutim naponom. U najjednostavnijem slučaju potrebno je implementirati klasično vektorsko upravljanje na generatorskom pretvaraču, kako bi se upravljalo brzinom turbine. Korištenje naprednih topologija poput trirazinskog izmjenjivača za napajanje sinkronog reluktantnog stroja može se pronaći u literaturi [7]. Rad predstavlja novu vrstu modulacijskog algoritma i usporedbu između dvorazinskog i trirazinskog izmjenjivača. Usporedba između dvorazinskih i trirazinskih izmjenjivača također je dana u [12]. Pokazano je kako odabir topologije izmjenjivača značajno utječe na gubitke u željezu sinkronog reluktantnog stroja. Korištenjem trirazinskog izmjenjivača gubici su smanjeni za 60 %.

Za spoj pretvarača na mrežu uobičajeno se koristi trofazni AFE izmjenjivač (engl. active front end-AFE). Ovakav tip pretvarača dobro je poznat u industriji i području obnovljivih izvora energije. Energetski pretvarač za mikro hidroelektranu sastavljen je od generatorskog izmjenjivača, istosmjernog međukruga, mrežnog AFE izmjenjivača i mrežnog filtra. Iako je ovakav koncept AC-DC-AC pretvorbe često korišten u obnovljivim izvorima energije, nove topologije izmjenjivača i nove tehnologije poluvodičkih sklopki otežavaju proces dizajna takvog sustava [13]. Primjerice, korištenje višerazinskih topologija izmjenjivača poput trirazinskog diodno pritegnutog izmjenjivača ili izmjenjivača T-tipa smanjit će harmonički sastav izlaznog napona te time reducirati veličinu izlaznog filtra i smanjiti gubitke u željezu generatora. Negativan utjecaj bit će veća cijena poluvodičkih energetskih modula i okidnih uređaja [14]. Situacija je slična ukoliko se koriste silicij karbid (SiC) tranzistori s efektom polja, koji omogućuju rad na frekvencijama sklapanja iznad 20 kHz. Glavni problem u dizajnu pretvarača postaje odabir poluvodičkih komponenti, topologije, pasivnih komponenti te dizajnu izlaznog filtra, koji će uključiti uzročno posljedične veze između pojedinih komponenti.

Glavni cilj projektnog prijedloga u polju energetske elektronike je izrada programskog okruženja za višekriterijsku optimizaciju dizajna energetskog pretvarača. Jedan od ciljeva bit će minimizacija ukupnih gubitaka pretvarača koji uključuju gubitke u poluvodičima, pasivnim komponentama, filtru i generatoru. Vrlo važna značajka pristupa modeliranju pretvarača bit će korištenje komercijalno dostupnih komponenti, kao što su IGBT ili SiC energetski moduli raznih proizvođača, kondenzatori istosmjernog međukruga te magnetskih jezgri za izradu prigušnice filtra. Izgradit će se baza podataka s komponentama i njihovim svojstvima, kako bi se omogućio odabir unutar optimizacijske procedure. Ovakav pristup omogućit će značajno smanjenje cijene finalnog dizajna jer će se izbjeći korištenje nestandardnih komponenti.

4. METODE ZA UPRAVLJANJE GENERATORSKIM I MREŽNIM IZMJENJIVAČEM

Rastući trend distribuiranih proizvodnih jedinica te potreba za drugim i obnovljivim izvorima energije otvorili su mogućnost primjene samouzbudnih sinkronih reluktantnih generatora za primjenu u hidroelektranama [15]. Princip primjene sinkronih reluktantnih generatora dan ovim radom opisuje prednosti jednostavnosti i robusnosti, stacionarnih karakteristika te visoku učinkovitost u širokom rasponu radnih stanja sustava.

Kako bi se povećala učinkovitost sinkronih reluktantnih motora, u radu [16] dane su mogućnosti smanjenja gubitaka u željezu i bakru stroja. Optimalni kut struje za minimiziranje gubitaka u željezu i bakru se zasniva na nadomjesnoj ekvivalentnoj shemi stroja. U slučaju sinkronog reluktantnog stroja, proizvedeni moment je proporcionalan kvadratu struje statora za razliku od slučaja kod asinkronih strojeva. Zbog toga se u slučaju upravljanja magnetskim tokom moment ne mijenja. Rezultati dani u [17] prikazuju metodu maksimizacije učinkovitosti sinkronog reluktantnog stroja temeljenu na injektiranju signala. Kako bi se odredila radna točka s maksimalnom efikasnošću, potrebno je da je suma gubitaka u bakru i željezu minimalna. Ova metoda traženja radne točke maksimalne efikasnosti je neovisna o parametrima stroja. Nedostatak ove metode je konstantno injektiranje visokofrekvencijskih signala, koji uzrokuju dodatne gubitke u pretvaraču i stroju. Nadalje, u slučajevima rada stroja pri velikim brzinama vrtnje postoji mogućnost da energetski pretvarač dosegne svoja naponska ograničenja.

Algoritam auto-podešavanja i samoadaptacije temeljen na injektiranju visokofrekvencijskih signala za estimaciju položaja rotora i estimaciju brzine vrtnje sinkronih strojeva sa stalnim magnetima i sinkronih reluktantnih strojeva dan je u [18]. Pokazano je da dinamika visokofrekvencijske petlje varira s promjenom induktiviteta, što u konačnici znači da ovisi o radnoj točki zbog zasićenja. Dana je online estimacija i adaptacija pojačanja petlje koja omogućuje auto-podešavanje bezsenzorske upravljačke strukture, čak i bez poznavanja vrijednosti parametara stroja. U radu [19] je dano rješenje male hidroelektrane od 150 kW sa sinkronim generatorom sa stalnim magnetima. Turbina je integrirana s generatorom za primjene koje zahtijevaju široki raspon brzina vrtnje. Generator je spojen na elektroenergetski sustav preko AC/DC/AC pretvarača. Na generatorskoj strani se nalazi diodni ispravljač te ne postoji mogućnost upravljanja generatorom. Zbog toga se primjenjuje uzlazni pretvarač kako bi se povisio napon na ulazu u izmjenjivač.

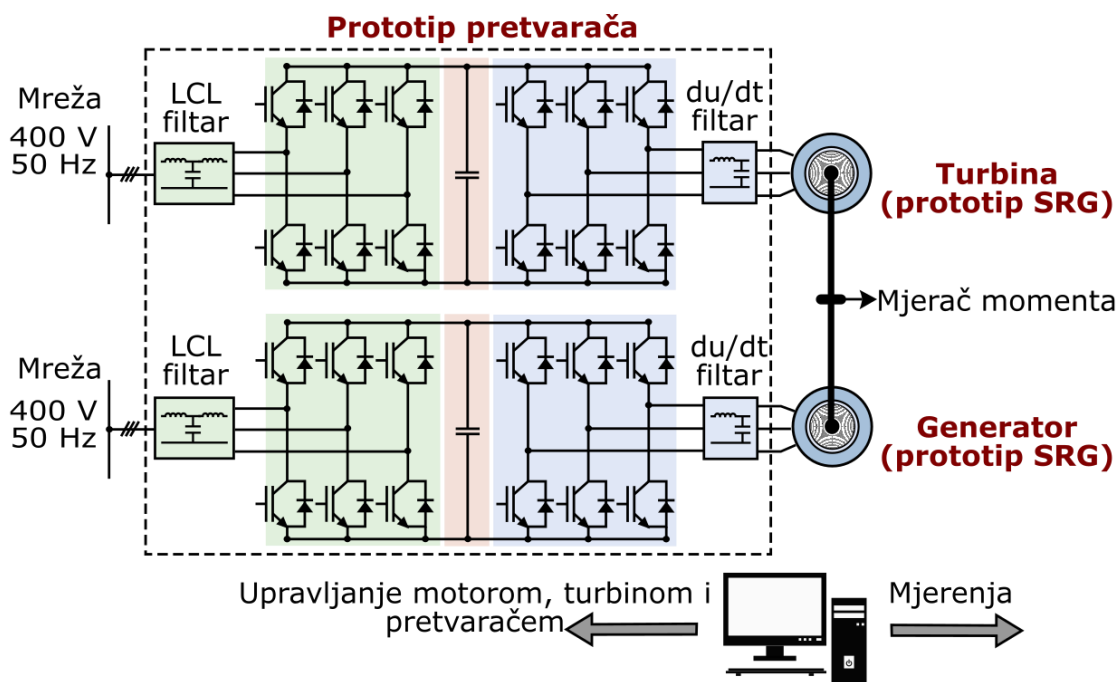
Također, značajan doprinos predloženog projekta je u upravljanju mrežnim pretvaračem. Klasični načini upravljanja mrežnim pretvaračem temeljeni na PLL (phase locked loop) su razrađeni i u širokoj primjeni u sustavima obnovljivih izvora energije [20]. S obzirom da u sustavima malih snaga, kao što su mikro hidroelektrane, cijena opreme igra značajnu ulogu u ukupnim troškovima, prednost imaju upravljački algoritmi koji ne zahtijevaju primjenu mjernog člana napona na strani mreže. Robusni algoritam upravljanja

bez mjernog člana napona i sinkronizacija pretvarača s elektroenergetskim sustavom dana je u [21] iako početna prijelazna pojava tijekom sinkronizacije nije baš detaljno elaborirana. Algoritam temeljen na Kalmanovom filtru, koji ne zahtijeva primjenu mjernog člana napona kako bi se implementirala metoda za sprječavanje otočnog jednofaznog pretvarača rada, dan je u [22]. Lee je primijenio prediktivni algoritam kako bi uzeo u obzir poremećaje u elektroenergetskoj mreži [23]. Navedeni algoritmi ne zahtijevaju primjenu mjernog člana napona, ali početni trenutak sinkronizacije s kutom napona mreže nije dovoljno istražen.

Mikro hidroelektrane malih snaga su cjenovno osjetljive. Treba primijeniti doprinose u načinu upravljanja koji mogu zamijeniti hardverske komponente kako bi se ukupni trošak smanjio. S generatorske strane, ušteda će se ostvariti implementacijom upravljanja sinkronog generatora bez mjernog člana brzine vrtnje te s većom pouzdanošću. Slični način uštede će se primijeniti i na generatorskom pretvaraču. Skupi mjerni članovi napona za mjerenje napona mreže, izolacijska pojačala i ADC-ovi se mogu izostaviti. Metoda početne sinkronizacije mrežnog pretvarača bez mjernog člana napona za mjerenje napona mreže biti će jedna od ključnih stavki istraživanja.

5. LABORATORIJSKI POSTAV ZA EKSPERIMENTALNU VERIFIKACIJU

Ekperimentalna verifikacija koncepta je ključna za prezentaciju projekta znanstvenoj zajednici u području elektrotehnike. Rezultati dobiveni pomoću simulacijskih modela moraju se usporediti s mjerenjima. Ekperimentalno provjerene metode će pridobiti više pažnje u akademskoj i industrijskoj zajednici i rezultat će većim utjecajem objavljenih radova u časopisima i na konferencijama. Prije provođenja eksperimenata na kompletnom sustavu generatora i energetskih pretvarača, komponente će biti testirane pojedinačno, kako bi se provjerio pristup projektiranju. Laboratorijski postav treba biti dobro pripremljen u smislu instalacije sklopne opreme i kabela.



Sl. 1.: Laboratorijski postav za ispitivanje dva prototipa generatora i prototipa energetskog pretvarača

Projekt HYDREL ima za cilj napraviti laboratorijski postav kao na slici 1. Postav se sastoji od prototipa energetskog pretvarača, dva prototipa sinkronih reluktantnih generatora i mjernog odnosno upravljačkog sustava. Dva sinkrona reluktantna stroja, koji su prototipno razvijeni i izrađeni u početnoj fazi projekta će biti postavljeni s laserski poravnanim vratilima na ispitnom postolju. Dobivene vrijednosti će se usporediti sa simulacijskim rezultatima i simulacijski modeli će biti podešeni koristeći konstrukcijske faktore uzrokovane nepravilnostima tijekom proizvodnje i ograničenjima materijala.

Energetski pretvarač sastoji se od dva AC/DC/AC pretvarača koji mogu biti neovisno upravljani i razdvojeni, a mogu biti i povezani preko istosmjernog međukruga ili preko mrežne strane. Po isporuci i

instalaciji, prototip pretvarača će biti prvo testiran na nižem naponu, kako bi se provjerio rad modulacijskih i zaštitnih funkcija. Zatim, provest će se testovi opterećenja s pasivnim induktivnim teretom pri nazivnom naponu. Projektirani energetski pretvarač će moći napajati oba stroja istovremeno, jedan u generatorskom, a drugi u motorskom režimu rada. Tijekom testova jedan će stroj biti korišten za emulaciju vodne turbine, dok će drugi biti testiran kao generator i nakon toga će biti ispitani ponovno sa zamijenjenim ulogama.

Jednom kada su strojevi i pretvarači ugrađeni i pušteni u rad, počinje faza implementacije upravljačkih algoritama. Potrebno je imati gotove upravljačke algoritme prije provođenja testova s opterećenjem. Test opterećenja se provodi, kako bi se provjerio toplinski model korišten u projektiranju stroja i energetskog pretvarača. Temperatura će se mjeriti pomoću nabavljene termografske kamere i ugrađenih sonde povezanih sa sustavom za mjerenje temperature. To je neophodna oprema u provjeri spregnutog toplinsko-elektromagnetskog modela razvijenog u programskim paketima Motor-CAD i Infolytica MagNET.

Za svaki eksperiment koristit će se prikladna mjerna oprema. To je ključno u mjerenjima učinkovitosti komponenti sustava. Budući da se pretpostavlja da je svaka komponenta projektirana kako bi dostigla visoku učinkovitost, mjerenja gubitaka postaju problem zbog zahtjeva na visoku preciznost ulazne i izlazne snage. Dostupni mjerni postav temeljen na Dewesoft Sirius HS sustavu bit će nadograđen s visoko preciznim „zero-flux“ strujnim senzorima koji će omogućiti točnost mjerenja snage unutar 0,03 %. Mehaničko mjerenje snage će biti povezano s električnim mjerenjem snage kroz nadogradnju laboratorija s visoko preciznim mjerjačem momenta.

ZAKLJUČAK

Dugoročni i indirektni utjecaji HYDREL projekta bit će vidljivi kroz razne akademske, socijalne, ekonomske i tehnološke učinke. Značajan učinak istraživanja očekuje se na području energije izdavanjem najmanje 3 članka s rezultatima istraživanja u časopisima Q1/Q2 kategorije po WoS-u tj. Q1 po Scopus-u. Također, projektom je predviđeno objavljivanje i financiranje dva rada za objavu u časopisima otvorenog pristupa. Dodatno, planira se prezentacija istraživanja na vodećim znanstvenim konferencijama unutar istraživačkog područja u opsegu od 10 radova. Prezentiranjem rezultata projekta pred ovelikom publikom (usmenim izlaganjem ili posterom), neposredno se dolazi do pozitivnih povratnih informacija o smjeru daljnjih istraživačkih aktivnosti HYDREL projekta. U sklopu neposrednog širenja znanja, na samom početku projekta je predviđena prezentacija, a na samom kraju projekta završna radionica i prezentacija. Rezultati istraživanja bit će dostupni i putem mrežne stranice te će kao takvi služiti kao trajni izvor znanja akademskoj i industrijskoj zajednici.

Očekuje se da će teoretski doprinosi, simulacijski modeli i tehnološki koncepti koji će proizaći kao rezultat istraživanja na HYDREL projektu biti prihvaćeni u široj akademskoj zajednici te da će putem publikacija u znanstvenim časopisima i konferencijama inicirati daljnje znanstveno istraživanje i nove projektne ideje. Dvoje mladih istraživača, koji 50% svoga radnog vremena koriste za rad na HYDREL projektu, dobit će priliku steći značajna znanja za početak svoje profesionalne karijere i završiti doktorski studij. Za njih će prisustvo konferencijama, razne specijalističke aktivnosti, stjecanje ekspertnih znanja iz programskih alata, iskustvo iz prve ruke u eksperimentalnom ispitivanju i jedinstvena prilika za rad u etabliranoj istraživačkoj grupi biti od velikog značaja u karijeri.

Kako je energija vode vrlo praktičan i efikasan obnovljivi izvor energije, mikro hidroelektrane nametnut će se kao uobičajen izbor za proizvodnju energije, posebice u ruralnim ili udaljenim područjima. Rezultati istraživanja svoju potencijalnu primjenu nalaze u potrebi za efikasnijom proizvodnjom energije uz minimalne početne troškove i troškove održavanja. Predloženo rješenje sa sinkronim reluktantnim generatorom je konkurentno rješenje koje odlično usklađuje ekonomske i tehničke zahtjeve te smanjuje ukupne troškove hidroelektrane. Eksperimentalna potvrda predložene metode temelj je HYDREL projekta. Zahvaljujućim čvrstim i dokazanim rezultatima, projekt će privući potencijalne investitore, akademike, stručnjake u proizvodnji električne energije, ali i lokalne vlasti ruralnih ili udaljenih područja.

Tehnološki učinak projekta je industrijska primjena prototipa mikro hidroelektrane. S obzirom na to da prototipni sustav predstavlja u potpunosti energetski efikasno rješenje i da svi istraživački rezultati članova HYDREL projekta imaju čvrstu vezu s primjenom u industriji, realno je za očekivati uspješno ostvarenje takvog cilja. Nadalje, kao učinak ovog projekta očekuje se da zbog svoje robusne izvedbe i visoke učinkovitosti sinkroni reluktantni motor postane uobičajeno rješenje za primjenu u industriji. Također, razvijeni modeli i optimizacijski alati mogu biti primjenjivi za rješavanje sličnih projektnih

zadataka, napredni upravljački algoritmi mogu se koristiti i za druge sustave s obnovljivim izvorima energije kao što su vjetroelektrane, ali imaju i potencijal za primjenu u industriji za rad sa sinkronim reluktantnim strojevima.

LITERATURA

- [1] Bódis K., F. Monforti and S. Szabó: Could Europe have more mini hydro sites? A suitability analysis based on continentally harmonized geographical and hydrological data, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37, 2014., 794-808
- [2] Union, Europäische: Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, *Official Journal of the European Union* 5, 2009.
- [3] Janić Ž.: Small Hydro Power Plants in Croatia, *The 4th International Workshop on Research on Irrigation and Drainage*, 2004.
- [4] Energy Strategy of The Republic of Croatia, Ministry of Economy, Labour and Entrepreneurship, Zagreb, June 2009. http://www.mzoip.hr/doc/energy_strategy_of_the_republic_of_croatia.pdf, 9.1.2018.
- [5] Roshanfekar, Poopak et al.: A synchronous reluctance generator for a wind application-compared with an interior mounted permanent magnet synchronous generator, 2014., 0329-0329.
- [6] Ibrahim, M. N., Sergeant, P., Rashad, E. M.: Rotor design with and without permanent magnets and performance evaluation of synchronous reluctance motors. In: *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016 19th International Conference on*. IEEE, 2016., 1-7
- [7] Howard, E. and M. J. Kamper: Reluctance synchronous wind generator design optimisation in the megawatt, medium speed range, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE*, 2017.
- [8] Borkowski, D. and T. Węgiel: Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 28.2.2013., 452-459
- [9] Roshanfekar, Poopak et al.: Investigation of pole number selection in a synchronous reluctance generator for wind applications, *Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017 IEEE International*, IEEE, 2017.
- [10] Fu, Ran et al.: US solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2017. No. REL/TP-6A20-68925, *National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States)*, 2017.
- [11] Elbatran A. H. et al., Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43, 2015., 40-50
- [12] Masisi, Lesedi, Pillay, Pragasen; Williamson, Sheldon S.: A three-level neutral-point-clamped inverter synchronous reluctance machine drive, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015., 51.6, 4531-4540
- [13] Franquelo L. G. et al.: The age of multilevel converters arrives, *IEEE industrial electronics magazine* 2.2, 2008.
- [14] Daher S., J. Schmid and F. LM Antunes: Multilevel inverter topologies for stand-alone PV systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55.7, 2008., 2703-2712
- [15] Awad H., Wadi M., Hamdi E.: A self-excited synchronous generator for small hydro applications, *Proc. Int. Conf. Energy, Environment, Ecosystems, and Sustainable Development*, 2005.
- [16] Kang, Seog-Joo and Seung-Ki Sul: Efficiency optimized vector control of synchronous reluctance motor, *Industry Applications Conference, 1996 Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS'96., Conference Record of the 1996 IEEE. Vol. 1. IEEE*, 1996.
- [17] Kim, Sungmin et al.: Maximum efficiency operation of Synchronous Reluctance Machine using signal injection, *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, IEEE, 2010.
- [18] Alberti, L. et al.: Self-adaptive high-frequency injection based sensorless control for IPMSM and SynRM, *Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), 2017 IEEE International Symposium on IEEE*, 2017.

- [19] Borkowski, D.: Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT) for Variable Speed Small Hydropower Plant With Neural Network Based Estimation of Turbine Discharge, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017.
- [20] Yazdani, Amirnaser and Reza Iravani: Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications. John Wiley & Sons, 2010.
- [21] Mohamed, Yasser Abdel-Rady I., and R. Seethapathy: Robust line-voltage sensorless control and synchronization of LCL-filtered distributed generation inverters for high power quality grid connection, IEEE Transactions on Power Electronics 27.1, 2012., 87-98
- [22] Liserre, M. et al.: An anti-islanding method for single-phase inverters based on a grid voltage sensorless control, IEEE Transactions on Industrial Electronics 53.5, 2006., 1418-1426
- [23] Lee, Kui-Jun et al.: Robust predictive current controller based on a disturbance estimator in a three-phase grid-connected inverter, IEEE Transactions on Power Electronics 27.1, 2012., 276-283