

-PRIJEDLOG PROJEKTA ISTRAŽIVANJA-

ANALIZA UTICAJA ZNAČAJNOG UČEŠĆA PROIZVODNJE IZ FOTONAPONSKIH SISTEMA

NA TRANZIJENTNU STABILNOST VELIKOG (PRENOSNOG) ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

1. Opis istraživanja

Predmet istraživanja

Projekat istraživanja će se baviti proučavanjem uticaja fotonaponskih sistema, priključenih u jednoj ili više tačaka, na stabilnost i naponske prilike prenosnog elektroenergetskog sistema u kojem proizvodnja iz fotonaponskih sistema potiskuje značajan udio proizvodnje iz konvencionalnih izvora na ugalj tj. u kojem je udio proizvodnje iz fotonaponskih sistema u ukupnom proizvodnom portfoliju proučavanog sistema značajan.

Teorijska postavka

Teorijska postavka projekta istraživanja će biti zasnovana na pretpostavkama iznesenim u dosada objavljenoj literaturi i istraživačkim radovima.

Validacija teorijskih postavki

Validacija i verifikacija hipoteza iznesenih u teorijskoj postavci će biti izvršena rezultatima dobijenim na osnovu simulacije rada sistema od interesa u modelu napravljenom u tu svrhu.

Model za verifikaciju istraživanja

Model test sistema iz IEEE baze će biti korišten za validaciju teorijskih postavki.

Potvrda teorijskih postavki će biti data na osnovu rezultata dobijenih iz modela stvarnog prenosnog sistema Bosne i Hercegovine u kojem je značajna fotonaponska proizvodnja modelirana u tačkama od interesa za ovaj sistem kao na primjer u Mostaru, Krajini i dr.

2. Stanje u industriji kao ambijent i pokazatelj praktičnog značaja istraživanja

a. Električna energija, nekad i sad

Električna energija je čovječanstvu na raspolaganju više od jednog stoljeća i zbog lakog prenosa i jednostavne distribucije je jedan od najvažnijih transformisanih oblika energije. Potrebe za njom neprestano rastu a čovječanstvo ih uglavnom pokriva sagorjevanjem fosilnih goriva čija je upotreba okarakterisana slijedećim negativnim pojavama:

Smanjenje rezervi fosilnih energenata

U zemlji postoje ograničene količine fosilnih energenata koje se svakodnevno koriste u veoma velikim količinama i stoga postoji prijetnja nestanka ovih energetske izvora

Štetan uticaj na okolinu

U procesu spaljivanja fosilnih goriva dolazi do formiranja gasova kao što su azotni-oksidi i sumpor-dioksidi što može dovesti do nastanka kiselih kiša. Takođe, pri sagorjevanju se oslobađa i ugljen-dioksid čije naslage u atmosferi dovode do efekta staklenika.

Političke i ekonomske posljedice

81% svjetskih rezervi nafte leži u zemljama OPEC-a a samo 19% u ostalim zemljama. Zemlje OPEC-a su Kuvajt, Irak, Iran, Libija, Nigerija, Katar, Saudijska Arabija, Ujedinjeni Arapski Emirati, Venecuela, Alžir, Angola, Ekvador. Dakle, više od 2/3 svjetskih rezervi nafte leži u krajevima Bliskog Istoka i sjeverne Afrike što ove regije čini nestabilnim i često predmetom političke manipulacije. [1]

Moguće strategije za prevazilaženje navedenih negativnih uticaja su:

Daljnja upotreba uglja uz upotrebu novih tehnologija za reduciranje emisije CO₂ u atmosferu. Uglja ima u dovoljnim količinama da zadovolji rastuće potrebe čovječanstva, a negativna posljedica u vidu emisije CO₂ u atmosferu bi se mogla minimizirati implementacijom preporuka ASME od kojih jedna je i investirati u istraživanje za razvoj troškovno opravdanih obnovljivih i efikasnih tehnologija za proizvodnju energije, poboljšanje izvedbe CO₂ sistema i sistema nove i čiste energije. [2] Danas postoje tehnologije za eliminaciju emisije sumpor-dioksida i azot-oksida i iako poskupljuju cijenu električne energije i negativno utiču na efikasnost, primjenjuju se. Međutim, emisija CO₂ koja za posljedicu ima stvaranje efekta staklenika odnosno globalno zagrijavanje i dalje ostaje izazov.

Upotreba nuklearne energije

Ova opcija postoji ali je manje privlačna nakon zadnje nuklearne katastrofe u Japanu.

Efikasna upotreba energije

Ovo je jedina strategija kojom bi se uticalo na ograničavanje rasta potražnje energije. Naime, čovječanstvo se 'rasipa' energijom i ne vodi računa o tome da li je moguće postići isti efekat u proizvodnji artikala potrebnih za život i rad sa manje uložene energije. U zadnjih par desetljeća, kako se podigla svijest o problemima koji prate proizvodnju električne energije lansirane su kampanje koje se bave pitanjem 'uštede' električne energije. Ove kampanje se nazivaju kampanje o energetske efikasnosti i uglavnom su, prema širim javnostima, fokusirane na poboljšanja u građevini (bolji energetski položaj kuća, fasade koje zadržavaju toplotu, korištenje štednih sijalica i sl.)

Upotreba obnovljivih izvora.

Ovo je najizvjesnija opcija. Naime, rezerve fosilnih goriva i minerala su ograničene a time eksploatacije uglja, nafte, gasa i uranijuma nisu dugoročno održive. Srećom, obnovljiva energija, koja se dobija iz prirodnih energetskih tokova je neiscrpna i nema dugoročan loš uticaj na okolinu. Projicira se da će kao takva postati osnova za sistem energetskog snadbjevanja i vjerovatno preuzeti primat u generisanju električne energije [3].

Gore navedene strategije ne isključuju jedna drugu nego se mogu međusobno nadopunjavati.

b. Obnovljivi izvori

Usljed povećane ekološke svijesti potpisuju se međunarodni sporazumi koji zahtijevaju smanjenje emisije ugljičnog dioksida i poboljšanje energetske efikasnosti te nameću obavezu za povećanjem udjela obnovljivih izvora energije u ukupnom energetskom bilansu zajednice.

Tako se Evropska Unija obavezala da do 2020. godine smanji emisiju stakleničkih gasova za 20%, poveća uštedu energije za 20% zbog povećanja energetske efikasnosti, te da 20% poveća udio obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji (Cilj '20-20-20'). [4] Sa željom da podrži ostvarenje tog cilja Evropska Unija je razvila i niz mjera koje promovišu obnovljive izvore i energetske efikasnost te dala upute kako stići do zacrtanog cilja [5]. Izvještaji pokazuju da ove mjere luče uspjeh i da se u obnovljive izvore energije, kao što su energija Sunca, vjetra, vode, biomase te geotermalni izvori sve više investira. [6]

Obnovljivi izvori imaju niz *prednosti* kao što su npr. njihova neiscrpljivost te činjenica da prilikom njihove eksploatacije nema emisije CO₂ u atmosferu. Ovim oni ispunjavaju uslove zaštite okoline i eliminišu rizik od iscrpljenja postojećih rezervi. Takođe, njihovom upotrebom smanjuje se ovisnost o uvozu energenata i električne energije iz drugih zemalja. [7]

Međutim imaju i *nedostatke* kao što su: a) nepredvidljivost b) tehnički preduslovi za priključenje i potencijalno c) nedostaci na ekonomskoj osnovi.

Nepredvidljivost je vezana za ovisnost proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora o potencijalu vjetra, Sunca, vode odnosno o neupravljivim izvorima energije.

Tehnički preduslovi su vezani za neprilagođenost mreže da prihvati ovakve izvore. Primjera radi, prema dosadašnjim shvatanjima uloga distributivne mreže je bila pasivne naravi i svodila se na distribuiranje električne energije u jednom smjeru, od centralizovane proizvodnje ka industrijskim potrošačima i domaćinstvima. Primjenom distributivne proizvodnje (obnovljivih izvora) javlja se potreba za distributivnom mrežom aktivne naravi u kojoj smjer energije može imati dvosmjern karakter jer proizvodnja više nije centralizovana na jednom mjestu nego je uključena u više tačaka u mreži. Distributivne mreže inicijalno nisu projektovane za priključenje proizvodnje na više različitih mjesta unutar same mreže tako da takav slučaj može imati uticaj kako na dimenzioniranje opreme (prenosni vodovi i prateća oprema) tako i na snagu kratkog spoja, relejnu zaštitu, gubitke, napone i kvalitet električne energije. Slučaj priključenja obnovljivih izvora na prenosnu mrežu, što je ujedno i kompleksniji slučaj integracije obnovljivih izvora, je detaljnije obrađen kasnije u tekstu.

Nedostaci na ekonomskoj osnovi, vjeruje se, postoje i to prvenstveno zbog visokih početnih ulaganja jer je tehnologija za iskorištavanje energije obnovljivih izvora skupa. Međutim, često ove elektrane zahtjevaju manje troškove redovnog održavanja i eksploatacije. Takođe, stepen iskoristivosti jedne termoelektrane je npr. 30%-35% (uložene primarne energije završi kao električna energija), a vjetroelektrane se kreće od 45% do 47%. Nije zanemariv ni gubitak u tradicionalnim prenosnim i distributivnim mrežama koji se smatra normalnim ako se kreće u rasponu od 6-8% [8] i koji su uglavnom vezani za tradicionalne izvore dok se obnovljivi izvori mogu priključivati bliže potrošnji pa su za njih ovi troškovi značajno manji. Pitanje ekonomske isplativosti obnovljivih izvora bi očigledno moglo biti predmetom posebne studije koja bi u konačnici rekla da li su obnovljivi izvori isplativiji od konvencionalnih ili ne.

c. Sunčeva energija

i. Eksploatacija uopšteno

Od svih raspoloživih obnovljivih izvora energije Sunce ima najveći potencijal. Međutim, od svih obnovljivih izvora iskorištenost Sunčeve energije u odnosu na njenu raspoloživost je najmanja.

Razlozi su prije svega skupa i neefikasna tehnologija kao i poticaji koje države daju koji, za stepen ekonomskog razvoja neke zemlje, nisu dovoljni da bi podstakli značajnije investicije u izgradnju solarnih elektrana. Iz ovog razloga tehnički uticaj koji bi njihova eksploatacija imala na tradicionalni elektroenergetski sistem još uvijek nije dovoljno istražen u realnom svijetu.

U istraživačkom domenu postoji određeni broj radova koji su se bavili uticajem solarnih elektrana ali uglavnom na rad i stabilnost distributivnog sistema [9]–[14]. Ove studije su analizirale uticaj u smislu najpogodnije tačke priključenja solarnih elektrana u distributivnoj mreži, načine upravljanja sa ciljem postizanja bolje performanse cjelokupnog sistema te opšti uticaj na rad i stabilnost distributivnog sistema. Generalni zaključak je da male penetracije proizvodnje iz fotonaponskih sistema imaju mali uticaj na distributivni sistem.

Uticaj *značajne penetracije* instalisane snage u solarnim elektranama na 'veliki' sistem je, sa druge strane, iako kompleksniji slučaj, manje istražen. Neki od opšte poznatih uticaja su cikličnost rada generatora i uticaj na kvalitet električne energije. Proizvodne jedinice na bazi obnovljivih izvora 'tjeraju' generatore da 'ciklično' rade tj. da se uključuju ili isključuju mnogo češće nego je to slučaj kada nema ovih izvora u proizvodnom portfoliju. Ta 'cikličnost' rada generatora ima uticaj na rad i stabilnost sistema kao i na povećanje operativnih troškova.[15] Što se tiče kvalitete električne energije CENELEC je razvio formu koja definiše njene parametre kvalitete i čije dvije osnovne komponente su:

- neprekidnost: stepen raspoloživosti električne energije krajnjem korisniku tokom vremena (u svakom trenutku)
- naponski nivo: specificirani opseg unutar koga se održava napon tokom vremena (u svakom trenutku) [16]

U današnjim hirovitim klimatskim uslovima ne samo da je teško projicirati koliko će električne energije proizvesti solarna elektrana nego je teško znati i koliko će ta proizvodnja biti kontinuirana u određenom vremenskom periodu što direktno utiče na ove parametre.

I ovo su samo dva potencijalna problema iz kojih je jasno da eksploatacija Sunčeve energije ima svoje prednosti ali i nedostatke koji se mogu pobrojati kao:

Prednosti:

- Sunčeva energija je besplatna i praktično neiscrpan izvor
- Tehnologija pretvaranja energije je čista
- Moguće je napajanje potrošača na mjestima gdje nema izgrađenog elektroenergetskog sistema
- Visoka pouzdanost i mali pogonski troškovi

Nedostaci:

- Proizvodnja ovisi o osunčanosti
- Potrebne su velike površine
- Tehnologija je još uvijek skupa
- Relativno mala efikasnost

ii. Eksploatacija u Bosni i Hercegovini

Kada je u pitanju eksploatacija solarne energije u Bosni i Hercegovini, prema nekim istraživanjima, ovaj potencijal se procjenjuje na cca 70,5 miliona GWh godišnje [17].

Bosna i Hercegovina pripada zemljama Evrope sa značajnom solarnom iradijacijom koja se na godišnjem nivou kreće u intervalu od 1240 kWh/m² na sjeveru zemlje do 1600 kWh/m² u južnim krajevima [18]. U Bosni i Hercegovini postoji određeni broj malih solarnih elektrana a interes i dalje raste o čemu svjedoči i lista kvalifikovanih proizvođača koju objavljuje Regulatorna komisija za električnu energiju u Federaciji Bosne i Hercegovini [19]. U skladu sa porastom interesa rasla je i potreba da se ova problematika jasno uredi te je donesen i Zakon o proglašenju zakona o korištenju obnovljivih izvora energije i efikasne kogeneracije (Službene novine FBiH broj 70 od 11.9.2013. godine. [19] Međutim, bez obzira na sve to, eksploatacija solarne energije, u odnosu na raspoloživi potencijal, se još uvijek može smatrati beznačajnom. Neki od razloga za to su visoki investicijski troškovi te nedostatne stimulacije za korištenje ovakvog vida obnovljivih izvora energije u svrhu proizvodnje električne energije.

3. Motivacija za istraživanje predložene teme

Obnovljivi izvori, kao jedna od strategija, za očuvanje okoline i prevazilaženje negativnih posljedica proizvodnje električne energije na bazi fosilnih goriva su naša stvarnost. Energetska politika većine zemalja u svijetu promoviše povećanje njihovog udjela u ukupnom proizvodnom portfoliju svoje zemlje. U tom smislu se donose zakoni i osmišljavaju poticaji i procedure koji će olakšati provođenje te politike. Međutim, ostvarenje tog cilja nije moguće ukoliko i tehnika ne prati ove trendove. Razvoj tehnike u određenoj oblasti je, prije svega, zasnovan na studijama koje se provode u toj oblasti.

a. Kratak pregled oblika i obima dosadašnjih studija

Postoji određeni broj studija koji se bavio pitanjem uticaja distribuirane proizvodnje na elektroenergetski sistem. Neke od njih su se bavile pitanjem modelovanja takve proizvodnje i sistema kao ključem uspjeha istraživanja [20]-[24], neke samo pitanjem stabilnosti sistema sa fotonaponskom proizvodnjom bez objašnjenja modela sistema na kojem je provedena studija [25], [26] a najviše ih se bavilo i jednim i drugim pitanjem [27]-[33]. Svojevremeno je napravljen i pregled svih istraživanja na ovu temu iz kojeg je očigledno da različiti istraživači različito pristupaju studijama u smislu veličine sistema koji analiziraju, veličine distribuirane proizvodnje koju uključuju, vrsti stabilnosti koju posmatraju te metodi kojom vrše analizu rezultata istraživanja. [34]

Sa ciljem da se napori istraživanja usmjere u određenim pravcima i po mogućnosti nadograđuju jedni na druge objavljene su publikacije u okviru standarda IEEE 1547 koje daju određene smjernice za provođenje studija. One daju tehničke upute i pojašnjenja iza pravila koja su propisana standardom IEEE 1547 a koji je serija povezanih standarda koji služe za pomoć, inženjering, implementaciju i održavanje distribuirane proizvodnje. [35] Ove publikacije su IEEE 1547.2 Application Guide for IEEE 1547, IEEE 1547.7 Draft Guide for Conducting Distribution System Impact for distributed resource Interconnection i IEEE 1547.8, Recommended Practice for Establishing Methods and procedures that provide Supplemental Support for Implementation Strategies for Expanded Use of IEEE Std.1547. Pored ovih postoje još neke publikacije koje se bave ovim pitanjem.

b. Modelovanje proizvodnje iz fotonaponskih sistema

Značajan rast distribuirane proizvodnje u elektroenergetskim sistemima je suočio inženjere sa velikim izazovom provođenja studija uticaja da bi se odredilo da li distribuirana proizvodnja može uzrokovati probleme u radu elektroenergetskog sistema. Opšte je poznato da je ključ dobrog istraživanja dobro poznavanje problema koji se želi riješiti (istražiti). Ovdje, ključ dobrog istraživanja je ispravna klasifikacija problema kojim se istraživač želi baviti (u ovom slučaju tipa stabilnosti) te pravilnog modelovanja sistema za taj problem.

Fotonaponski efekat je jednostavan fizički proces unutar fotonaponske ćelije kojim se vrši konverzija sunčeve energije u električnu energiju. Fotonaponski panel se sastoji od niza fotonaponskih ćelija povezanih serijski ili paralelno. Ključno za analizu uticaja je pravilno procijeniti izlaznu snagu PV ćelije/panela a koja zavisi od solarne iradijacije.

Invertori koji se koriste za instalaciju fotonaponskih panela se obično modeliraju tako da predstavljaju fotonaponske proizvodne jedinice. Ovo ograničava rad invertora jer većina njih ima sposobnost da daje i reaktivnu snagu dok fotonaponske jedinice daju samo aktivnu snagu. Međutim, standardi IEEE 1547 i UL 1741 [36] su zabranili upotrebu invertora u funkciji regulacije napona sa ciljem izbjegavanja konflikta između distribuirane proizvodnje i tradicionalnih uređaja za regulaciju napona. UL 1741 čak zahtjeva isključenje invertora ne samo za slučaj velikog odstupanja napona nego i za slučaj gubitka napona u tački uključenja fotonaponskog sistema. Za analizu tokova snaga ovo znači da se invertori modeliraju kao strujni izvori ili jednostavno kao negativno opterećenje. Invertori, s obzirom da mogu injektirati i reaktivnu energiju, imaju nekoliko radnih stanja ali ono najčešće korišteno za ove studije je stanje fiksne PF jedinice kod koje je $Q=0$. Sam model fotonaponske jedinice zavisi od softvera koji se koristi za modeliranje i varira od slučaja do slučaja.

Kako su od interesa za ovaj rad disperzirani pojedinačni fotonaponski sistemi instalirani na krovu ali i solarne elektrane kao velike proizvodne jedinice uključene u jednoj tački sistema za ispravno modelovanje važno je znati očekivanja od takve elektrane unutar jednog elektroenergetskog sistema. U [21] su navedene optimalne funkcije koju jedna 'grid-friendly' elektrana treba da ima da bi aktivno doprinosila stabilnosti i pouzdanosti mreže te da bi efektivno radila unutar ovog sistema. Ključna komponenta je kontroler koji je dizajniran tako da reguliše izlaznu aktivnu i reaktivnu snagu tako da se elektrana ponaša kao jedinstvena velika proizvodna jedinica. Ovim kontrolerom se reguliše napon/i ili snaga u tački uključenja elektrane, nivo aktivne snage, stopa povećanja/smanjenja izlazne snage, frekvencija i uključenje i isključenje elektrane. Ovim kontrolerom se takođe može minimizirati i uticaj naoblake. Ovaki 'grid-friendly' elementi danas postoje i mogu se nabaviti za elektrane snage od nekoliko megavata do nekoliko stotina megavata. Pomoću njih solarne elektrane se ponašaju više kao konvencionalne proizvodne jedinice i lakše ih je tako analizirati. Ovo treba uzeti u obzir pri modelovanju.

c. Stabilnost elektroenergetskog sistema

Stabilnost elektroenergetskog sistema je od davnina prepoznata kao važan problem za obezbjeđenje sigurnog rada sistema. Jedna od mogućih definicija stabilnosti je da je to sposobnost elektroenergetskog sistema da, za date početne uslove rada, ponovo postigne stanje radne ravnoteže, nakon što je bio izložen fizičkom poremećaju, sa svim sistemskim varijablama zadržanim u okviru granica tako da praktično cijeli sistem ostane neporemećen. [37]

Elektroenergetski sistemi su izloženi manjim ili većim poremećajima. Mali poremećaji u formi promjena opterećenja su stalna pojava i sistem mora biti u mogućnosti da odgovori na ove promjenjive uslove i da dalje radi na zadovoljavajućem nivou. Takođe treba da bude u mogućnosti da preživi brojne poremećaje velikog obima kao što su kratak spoj na prenosnoj liniji ili gubitak velike proizvodne jedinice. Veliki poremećaj može da vodi ka strukturalnim promjenama zbog izolacije ugroženih elemenata. Zbog očigledne kompleksnosti problema klasifikacija stabilnosti je ključna za praktičnu analizu i rješavanje problema stabilnosti.

Prema [37] stabilnost elektroenergetskog sistema se može klasificirati kao:

1. Ugaona stabilnost
 - 1.1. Ugaona stabilnost malih poremećaja
 - 1.2. Tranzijentna stabilnost (obje kratkoročne)
2. Frekventna stabilnost (kratkoročna i dugoročna)
3. Naponska stabilnost
 - 3.1. Naponska stabilnost velikih poremećaja
 - 3.2. Naponska stabilnost malih poremećaja (obje kratkoročne i dugoročne)

Od interesa za ovaj rad je ugaona stabilnost uzrokovana velikim poremećajima koja se naziva i tranzijentna stabilnost i koja se često definiše kao sposobnost sistema da održi sinhronizam tokom velikih poremećaja kao što je npr. kratak spoj na prenosnoj liniji. Vremenski okvir koji je interesantan za posmatranje je obično 3-5 s nakon kvara a može se povećati na raspon 10-20 s zavisno od karakteristika sistema. [37] Ova stabilnost je vezana za gubitak sinhronizma generatora usljed gubitka ravnoteže između ulaza (mehaničkog momenta) i izlaza (elektromagnetnog momenta) na turbini rotora. Kada dođe do poremećaja ravnoteže kao rezultat se javlja ubrzavanje ili usporavanje rotora konvencionalnih proizvodnih jedinica u sistemu. Do ovog poremećaja može doći usljed kratkog spoja na prenosnoj liniji ili gubitka proizvodnje.

Druga interesantna stabilnost je naponska stabilnost koja se odnosi na stabilnost elektroenergetskog sistema da održi napone u granicama tolerancije na svim sabirnicama u sistemu nakon nekog poremećaja. Naponska stabilnost ovisi o sposobnosti sistema da zadrži/povrati ravnotežu između potražnje i proizvodnje. Ovo je nestabilnost koja može rezultirati u formi progresivnog pada ili porasta napona na nekim sabirnicama. Mogući ishod je gubitak potrošnje u nekom području, ukidanje nekih prenosnih linija i drugih elemenata od strane zaštite što za posledicu ima kaskadne ispade. Značajan pad napona se može povezati i sa ugaonom nestabilnošću međutim postoji razlika između ove dvije vrste stabilnosti. Iako su obje uzrokovane poremećajem tokova aktivne i reaktivne snage razlika se ogleda u specifičnim silama koje su predmetom poremećaja ravnoteže i sistemskim varijablama u kojima se ovaj poremećaj ogleda.

d. Nalazi dosadašnjih istraživanja o uticaju značajne penetracije fotonaponske proizvodnje na elektroenergetske sisteme, posebno prenosne (velike) sisteme

Teško je izvući uopšten zaključak o uticaju značajne FN penetracije iz predstavljenih radova iz razloga što su svi različiti u smislu sistema koji je analiziran (distributivna mreža/prenosni sistem), načina modelovanja sistema i FN penetracije, softverskih alata korištenih za dinamičku analizu, nivoa penetracije i sl. Ispod je navedeno ukratko nekoliko interesantnih radova koji mogu približiti način na koji istraživači pristupaju ovoj problematici kao i najsvježije nalaze u ovoj oblasti.

U [25] je analiziran uticaj solarne elektrane izlazne snage 100 MW na elektroenergetski sistem Bangladeša kapaciteta 5277 MW i 1839 MVar. Za studiju tokova snaga i analizu tranzijentne stabilnosti je korišten CYME PSAF 2.81 softver a rezultati su analizirani u MATLAB 7.4. Izvršena je analiza tokova snaga i tranzijentne stabilnosti sa i bez fotonaponske proizvodnje pri čemu je ista uključena na različite sabirnice u sistemu. Opšti zaključak je da u sistemima srednje veličine kao što je ovaj u Bangladešu, fotonaponska proizvodnja ima sposobnost da poboljša stabilnost sistema. Studija je pokazala da je fotonaponska proizvodnja različitih snaga priključena na različite sabirnice doprinjela poboljšanju naponskih prilika u blizini sabirnica gdje je ista priključena. Takođe, pokazalo se da fotonaponska proizvodnja, odgovarajuće snage, može doprinjeti i rješavanju problema zagrijavanja transformatora i spriječiti njegovo oštećenje. Međutim, ukoliko se ne procjeni pravilno snaga fotonaponske proizvodnje koja se uključuje onda ona može i pogoršati problem.

U [26] je analiziran uticaj 200 MW koncentrisane proizvodnje iz solarne elektrane na stacionarno stanje i tranzijentnu stabilnost prenosnog sistema u Omanu projicirane snage 6500 MW. Za analizu je korišten DigSILENT profesionalni softver. Analizirana su tri slučaja: a) sistem bez solarne elektrane, b) solarna elektrana snage 200 MW priključena u 132 kV Manah mrežu i c) solarna elektrana snage 200 MW priključena u 132 kV Adam mrežu. Prvo je provedena analiza stacionarnog stanja tj. tokova snaga i struja kratkog spoja za sva tri ova slučaja. Zatim je provedena analiza tranzijentne stabilnosti sistema usljed ispada solarne elektrane u slučaju maksimalnog opterećenja sistema (npr. projicirano je opterećenje za ljeto 2016. godine). Zaključak studije je bio da je prenosni sistem u Omanu stabilan za ove slučajeve i sposoban da podnese testirane poremećaje.

U [27] su analizirane dvije različite mreže (brza i spora) sa 15% i 30% koncentrisane i razuđene fotonaponske proizvodnje i njihov uticaj na frekvenciju i napone sistema. Za analizu je korišten Matlab SIMULINK. Ova studija je koristila gotov model pojednostavljene mreže na koju je priključivala fotonaponsku proizvodnju modeliranu od FN panela DC/DC konvertora i DC/AC invertora. Penetracija od 15% i 30% se odnosi na % ukupnog proizvodnog kapaciteta mreže što znači da se radi o značajnoj penetraciji fotonaponske proizvodnje. Studija je pokazala da penetracija u ovom procentu ima značajan uticaj na napon i frekvenciju analizirane mreže pri čemu je uticaj koncentrisane proizvodnje veći od uticaja razuđene proizvodnje.

Rad [29] je možda najinteresantniji od svih predstavljenih jer je najpribližnji ideji istraživačkog projekta koji se ovdje predlaže. Autori ovog rada su se bavili proučavanjem uticaja povećane proizvodnje iz fotonaponskih sistema na stacionarno stanje sistema kao i na tranzijentnu stabilnost sistema. Posmatrani sistem je veliki sistem (u slučaju ovog rada Zapadna US interkonekcija) a fotonaponska proizvodnja je data u vidu razuđenih malih fotonaponskih proizvodnih jedinica odnosno skoncentrisane proizvodnje tipa solarne elektrane. S obzirom da fotonaponska proizvodnja ima različite karakteristike od konvencionalnih proizvodnih jedinica može imati jak uticaj na stacionarno stanje i tranzijentnu stabilnost sistema. Kako je već pomenuto, IEEE 1547 i UL 1741 nalažu da FN invertori ne mogu aktivno regulisati napon u tački uključanja fotonaponske jedinice i zato se one uključuju kao izvori samo aktivne snage, a reaktivna snaga je anulirana. Upravo nedostatak reaktivne snage je glavni problem sistema sa velikom penetracijom proizvodnje iz fotonaponskih sistema i to zbog reducirane inercije sistema. Kako je fotonaponska proizvodnja sve više prisutna u elektroenergetskim sistemima pretpostavka je da se njen uticaj širi sa distributivnog na prenosni sistem. Iz tog razloga, u ovom radu je fotonaponska proizvodnja modelirana na 69 kV sabirnici dok naponi cijelog sistema se kreću od 69 kV do 345 kV i 500 kV. Osim što je analizirano stacionarno stanje istražen je i uticaj fotonaponske proizvodnje na tranzijente sistema. U tu svrhu su korišteni softverski paketi DSATools i PSLF.

Opterećenje sistema je 13 GW odnosno 20 GW u ljetnjim mjesecima a proizvodnja iz fotonaponskih jedinica je 600 MW pri čemu je njome zamjenjena proizvodnja iz konvencionalnih izvora. U svrhu provođenja studije stacionarnog stanja fotonaponske jedinice su modelovane kao negativna aktivna potrošnja odnosno rezidencijalne jedinice su modelovane kao PQ sabirnice sa $Q=0$. Solarne elektrane, s druge strane daju reaktivnu snagu pa su modelirane kao PV sabirnice sa odgovarajućim VAR iznosima. Za studiju dinamičkog stanja rezidencijalne fotonaponske jedinice su modelirane kao konstantna opterećenja koja odgovaraju negativno injektiranoj snazi. Međutim, solarne elektrane imaju drugačije dinamičko ponašanje pa su ovdje opremljene sa konvertorima radi bolje prezentacije dinamike njihovog ponašanja. Tačnije, korišten je gotov model vjetroturbine iz PSLF-a. Osim konvertora, za bolju prezentaciju dinamičkog ponašanja solarne elektrane, dodat je i kontroler kojim se upravlja izlaznom aktivnom i reaktivnom snagom te strujom konvertora. Stabilnost stacionarnog stanja je definisana kao sposobnost sistema da zadrži stanje ravnoteže u slučaju različitih naprezanja tipa ograničenja prenosne moći sabirnice do promjena radnih napona sabirnica. Ova studija je dobra kao polazni pokazatelj odnosa između fotonaponske proizvodnje i napona u stacionarnom stanju te radi lociranja tačaka najviših naponskih odstupanja zbog FN proizvodnje te eventualno preduzimanja korektivnih akcija. Za održanje tranzijentne stabilnosti najvažniji je sinhronizam između generatora a kako se u ovom slučaju konvencionalni generatori mijenjaju FN jedinicama ukupna inercija sistema je smanjena što može dovesti do problema usljed većih poremećaja. Za analizu tranzijentne stabilnosti izvedena su dva kvara: trofazi kratki spoj na prenosnom sistemu i gubitak FN proizvodnje što je realno velika mogućnost s obzirom na naoblake i sl. Penetracija fotonaponske proizvodnje za slučaj studije stacionarnog stanja je iznosila 50% dok je za dinamičku analizu iznosila 20%. Nalaz studije je da za slučaj predstavljen u radu FN penetracija može imati kako negativan tako i pozitivan uticaj na prenosni sistem. Simulacije su pokazale da iznos FN penetracije, topologija sistema, vrsta poremećaja kao i lokacija kvara su važni faktori u određivanju prirode uticaja značajne FN penetracije na sistem. Gotovo u svim scenarijima naponi sabirnica su bili najjače pogođeni parametri sistema. Primjećeno je da sistemi sa većom FN penetracijom doživljavaju veće propade napona kao posljedicu poremećaja. Takođe, gubitak FN proizvodnje u određenim geografskim regijama može rezultirati većim oscilacijama kako nivo FN penetracije raste.

e. Motiv za predloženo istraživanje

Pretražujući istraživanja na temu uticaja fotonaponske proizvodnje na elektroenergetski sistem dolazi se do zaključka da su se ona uglavnom bavila uticajem značajne fotonaponske proizvodnje na distributivne sisteme. Rijetko su se istraživači bavili uticajem ovih sistema na prenosne sisteme. Oni koji jesu analizirali su slučajeve proizvodnje iz fotonaponskih sistema koja je dodavana proučavanom sistemu u vidu rezidencijalnih krovnih fotonaponskih sistema ili jedinstvenog postrojenja, elektrane. Za oba slučaja su proučavani stacionarno stanje i dinamičko ponašanje sistema. Kao referentni sistem su korišteni ti isti sistemi ali bez fotonaponske proizvodnje. Na taj način su identificirani pozitivni i negativni efekti fotonaponskih sistema na date sisteme.

Osnovna motivacija za ovaj rad su trendovi koji nameću da obnovljivi izvori postanu značajan učesnik u proizvodnji električne energije u budućnosti i to tako što će potiskivati konvencionalne proizvodne jedinice. Ukoliko to bude slučaj ove proizvodne jedinice će biti velike snage i uključivati će se direktno u prenosni sistem. Solarne elektrane će svakako igrati jednu od najznačajnijih uloga. Obnovljivi izvori uopšte, a solarne elektrane posebno, imaju dinamiku ponašanja koja je različita od dinamike konvencionalnih izvora. Za očekivati je da će se njihovim uključivanjem promijeniti i dinamika cjelokupnog elektroenergetskog sistema. Iz ovog razloga je potrebno da se što više zna o njihovom uticaju da bi elektroenergetski sistem i dalje mogao kvalitetno i kontinuirano obavljati svoju primarnu funkciju tj. blagovremeno isporučivati kvalitetnu električnu energiju krajnjim potrošačima. Dosadašnja istraživanja su tek načela ovu temu.

4. Cilj istraživanja

Modelirati značajnu fotonaponsku proizvodnju i analizirati njen uticaj na stabilnost i naponske prilike u prenosnom sistemu za slučaj stacionarnog stanja i tranzijentnog režima.

Okvir za istraživački projekat:

- Proizvodnja iz fotonaponskih sistema će biti predstavljena kao zamjena za proizvodnju iz konvencionalnih izvora (potisnuće proizvodnju iz konvencionalnih izvora).
- Tranzijentni režim će biti razmatran za dva moguća kvara i to:
 - o slučaj trolnog kratkog spoja
 - o slučaj gubitka fotonaponske proizvodnje
- Proizvodnja iz fotonaponskih sistema će biti skoncentrisana:
 - o u jednoj tački (jedan analizirani slučaj) odnosno
 - o distribuirana u više tačaka (drugi analizirani slučaj).

Nakon analize prethodnog slučaja na tipskom IEEE sistemu, ista će biti provedena i na prenosnom sistemu Bosne i Hercegovine gdje će se proizvodnja iz fotonaponskih sistema modelirati u prvom slučaju u jednoj tački (npr. Mostar) u iznosu od npr. 150 MW, a u drugom slučaju u tri tačke (npr. Mostar, Petrovac i Gradačac) po npr. 50 MW.

5. Plan istraživanja

Obnovljivi izvori energije donose mnoge prednosti u smislu očuvanja okoline. Istovremeno nameću mnoge tehničke izazove.

Distribuirana proizvodnja koja obično podrazumjeva izvore električne energije male snage, priključene na srednji ili niski naponski nivo blizu potrošača koji doprinose aktivnom energijom ali mogu a i ne moraju dati svoj doprinos (u pozitivnom i negativnom smislu) i u vidu reaktivne energije te utiče na promjenu toka snage, na svaki mogući način postavlja mnoge izazove pred tradicionalnu postavku elektroenergetskog sistema.

Projekat istraživanja će pokušati dati odgovore na slijedeća pitanja:

- A. Kako modelirati značajno učešće u proizvodnji iz fotonaponskih izvora tj. sistema koji su:
 - a. Skoncentrisani u jednu tačku tipa solarne elektrane i priključeni na jednom mjestu
 - b. Disperzirani na više izvora, obično tipa krovnih fotonaponskih sistema
- B. Na koji način značajna penetracija fotonaponskih sistema utiče na stabilnost elektroenergetskog sistema u slučaju:
 - a. Stacionarnog stanja
 - b. Tranzijentnog režima

Tranzijentni režim će biti simuliran izazivanjem trolnog kratkog spoja na prenosnom sistemu odnosno ispadom fotonaponske proizvodnje
- C. Kako sve prethodno rečeno izgleda u kontekstu Bosne i Hercegovine.

6. Metode istraživanja

U skladu sa postavljenim ciljevima metode istraživanja se zasnivaju na teoretskim razmatranjima te modelu tipskog IEEE sistema i modelu stvarnog prenosnog sistema Bosne i Hercegovine.

S obzirom da se projekat bavi pitanjem uticaja značajne penetracije proizvodnje iz fotonaponskih izvora na prenosni sistem što nije moguće uraditi u realnom okruženju svi eksperimentalni rezultati će biti dobijeni iz modela sistema koji već postoje (IEEE) ili će biti kreirani (sistem BiH). U svrhu modeliranja elektroenergetskog sistema će se koristiti softverski alat MATLAB. Za analizu signala u tranzijentnom režimu će se koristiti Wavelet transformacije.

7. Očekivani izvorni naučni doprinos

Elektroenergetski sistemi trenutno doživljavaju značajne promjene. Ove promjene se ogledaju kako u novim izvorima energije, u ovom slučaju obnovljivim izvorima energije, tako i tehnologijama koje stoje na raspolaganju industriji za unaprjeđenje efikasnosti rada elektroenergetskih sistema.

Svakoј novini obično prethodi naučni napor koji objašnjava kako će se određena promjena odraziti na okolinu sa pozitivnog i negativnog aspekta a zatim, na osnovu tih nalaza, reaguje industrija. U slučaju obnovljivih izvora to nije potpuno tačno. Naime, zbog trendova u zadnjih nekoliko decenija u domenu zaštite okoline i jakih lobija da se usvoje stimulirajuće politike za njihovo korištenje došlo je do toga da je nauka ponudila rješenja koja industrija nije bila spremna blagovremeno implementirati. To je posebno slučaj kod proizvodnje električne energije na bazi Sunčeve energije. Zbog visoke cijene tehnologija koje omogućavaju iskorištavanje Sunčeve energije ovaj obnovljivi izvor u početku nije nalazio široku primjenu kao npr. male hidroelektrane i sl. Međutim, u posljednje vrijeme, sa porastom pozitivnih primjera iskorištenja Sunčeve energije, porasla je i njihova primjena. Sve se više priča o tome ali to područje je još uvijek nedovoljno istraženo posebno u dijelu uticaja ovih izvora na rad elektroenergetskog sistema. U tom smislu naučni doprinos će biti u:

- Modeliranju fotonaponske proizvodnje i procjeni njenog uticaja na stabilnost i naponske prilike u prenosnom sistemu za slučaj stacionarnog stanja i tranzijentnog režima izazvanog tropolnim kratkim spojem odnosno gubitkom fotonaponske proizvodnje pri čemu je ista modelirana u jednoj tački odnosno u više tačaka.

Polazna literatura

- [1] http://www.opec.org/opec_web/en/data_graphs/330.htm
- [2] ASME General Position Statement on Technology and Policy Recommendations and Goals for Reducing Carbon Dioxide Emissions in the energy sector, april 2009 (ASME-American Society of Mechanical Engineers)
- [3] Renewable Energy in Power Systems; Leon Freris (Centre for Renewable Energy System Techonolgy (CREST)), Loughborough University, UK and David infield, Institute fro Energy and Enviroment, University of Strathclyde, UK
- [4] Energy 2020, A Strategy for competitive, Sustainable and Secure Energy, Publication Office of the European Union, Luxemburg 2011
- [5] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE COUNCIL AND THE EUROPEAN PARLIAMENT Renewable Energy Road Map, Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future, Brussels, 10.1.2007
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0848&from=EN>
- [6] Report from the Comission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Renewable energy progress report, Brussels, 27.3.2013; <http://ec.europa.eu/energy/renewables/reports/reports>
- [7] 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 ;
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>
- [8] Energy Efficiency in the Power Grid, ABB; 2007
- [9] E.Gulachenski, E.J.Kern, W.Feero and A.Emanuel, Photovoltaic Generation Effects on Distribution Feeders, Volume 1: Description of the Gardner, Massachusetts, Twenty-First Century PV Community and Reserach Program, EPRI, Palo Alto, CA, 1990, Tech.Rep. EL-6754
- [10] N.Srisaen and A.Sangswang, 'Effects of PV grid-connected system location on a distribution system', in Proc.IEEE Asia Pacific Conf.Circuits and Systems, Dec 2006, pp 852-855
- [11] P.P.. Barker and R.W.De.Mello 'Determining the impact of distributed on power systems: Part I radial distribution systems' in Proc. IEEE Power and Engineering Society Summer Meeting, Seattle, WA, Jul 2000, vol.3.,pp 1645-1656
- [12] Alma Bijedic, Hidajet Salkic The Analysis of the Impact on Electrical Energy Quality of Small Solar Plant in Trial Period, IREE Vol.9, N.1 (January-February 2014)
- [13] mr. Amir Softić, dipl.ing.el., dr.Šeila Gruhonjić Ferhatbegović, dipl.ing.el., dr. Hidajet Salkić, dipl.ing.el., mr.Ivo Divković, dipl.ing.el., Husnija Imamović, dipl.ing.el., JP Elektroprivreda Bosne i Hercegovine, 'Analiza uticaja solarne elektrane na distributivnu mrežu' , 11. Savjetovanje bosanskohercegovačkog komiteta CIGRE, Neum, 15.-19.09.2013.

- [14] Mia Lešić, dr. Tatjana Konjić, Almir Kurtić, Tomislav Tomljenović, 'Uticaj fotonaponskih sistema na kvalitet električne energije u distributivnoj mreži', 11. Savjetovanje bosanskohercegovačkog komiteta CIGRE, Neum
- [15] Debra Lew, Greg Brinkman, Nikhil Kumar, Steve Lefton, Gary Jordan and Sundar Venkataraman Finding Flexibility, Cycling the Conventional Fleet, November/December 2013
- [16] EN 50160 forma
- [17] Ajla Lukač, Mustafa Musić, Elma Turković, JP Elektroprivreda BiH, 'Indikativne analize rezultata mjerenja potencijala solarne energije na području Bosne i Hercegovine', novembar 2011, 10. Savjetovanje HRO CIGRE Cavtat, 6.-10, studenog 2011.
- [18] Mirsad Raščić, Ajla Lukač 'Mogućnost iskorištavanja solarne energije na osnovu dostupnih parametara i proračuna o Sunčevom zračenju za područje grada Sarajeva', septembar 2013., 20. Međunarodni Simpozij EIS 2010 Elektroinženjerski Simpozij, Šibenik, Hrvatska, 2010
- [19] <http://www.ferk.ba/>
- [20] Shirek, G.L., Lassiter, B.A., 'Photovoltaic Power Generation: Modelling Solar Plants' Loads Levels and Their Effects on Distribution Feeder', Industry Application Magazine, IEEE (Volume: 19, Issue: 4), July-Aug, 2013
- [21] Morjaria M., Anchikov, D., Chadilev V., Soni S., 'A Grid-Friendly Plant: The Role of Utility-Scale Photovoltaic Plants in Grid stability and reliability', Power and Energy Magazine, IEEE (Volume: 12, Issue: 3), May-June 2013
- [22] Zhao, Shi, Chen, Ding, 'Photovoltaic Generation Model for Power System Transient Stability Analysis', International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol.5, No.3, June 2013
- [23] Olulope, Folly, Venayagamrrothy, 'Mdeling and Simulation of Hybrid Distributed Generation and its Impact on Transient Stability of Power System', 2013 IEEE
- [24] Lave, Kleissl, Stein, 'A Wavelet-based Variability Model (WVM) for Solar PV Power plant', IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE
- [25] Mohammed Masum, Siraj Khan, Shamsul Atifin, Ariful Haque, Nahid Al-Masood; 'Stability analysis of power system with the penetration of photovoltaic based generation', International Journal of Energy and Power Engineering on June 10, 2013 (<http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ijepe>)
- [26] O.H.Abdalla, R.Al-Badwawi, H.Al-Hadi, H.Al-Riyami, A.Al-Nadabi, 'Impact of a 200 MW Concentrated Receiver Solar Power Plant on Steady-State and Transient Performances of Oman Transmission System', Power of Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malasiya, 2012 IEEE International
- [27] S.A. Pourmousavi, A.S.Cifala and M.H.Nehrir, ' Impact of High Penetration of PV Generation on Frequency and Voltage in a Distribution Feeder' , North American Power Symposium (NAPS) 2012

- [28] Yi Zhang, Chris Mensah-Bonsu, Pranil Walke, Sandeep Arora, Jazmin Pierce; 'Transient Over-Voltages in High Voltage Grid-Connected PV Solar Interconnection'; 2010 IEEE
- [29] Sara Eftekharnejad, Vijay Vittal, Gerald Thomas, Brian Keel, Jeffrey Loehr; 'Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems'; IEEE Transactions on Power Systems, Vol.28, No.2, May 2013;
- [30] Haifeng Liu, Licheng Jin, David Le, A.A. Chowdhury 'Impact of High Penetration of Solar Photovoltaic Generation on Power System Small Signal Stability'; 2010 International Conference on Power System Technology, 2010 IEEE
- [31] Kabir, Krause, Bartlett, 'Impact of Large-Scale Photovoltaic System on Short and Long Term Voltage Stability in Sub-Transmission Network', AUPEC 2013, TAS, Australia, 29 September-3 October 2013
- [32] Shah, Mithulananathan, Bansal, Lee, Lomi, 'Influence of Large-scale PV on Voltage Stability of Sub-transmission System', International Journal on Electrical Engineering and Informatics Volume 4, November 1, March 2012
- [33] Perera, Ciufo, Perera, 'Point of Common Coupling (PCC) Voltage Control of a Grid-Connected Solar Photovoltaic (PV) System', Industrial Electronic Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, 10-13 Nov 2013
- [34] Boemer, Gibescu, Kling, 'Dynamic Model for Transient Stability Analysis of Transmission and Distribution Systems with Distributed Generation: an overview', 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th-July 2nd, Bucharest, Romania
- [35] IEEE 1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, Oct. 2003 (Online). Available: <http://grouper.ieee.org/scc21/1547/1547/index.html>
- [36] UL 1741 Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources (online). Available: <http://ulstandardsinfonet.ul.com/scopes/1741.html>
- [37] Prabha Kundur, John Paserba, Venkat Ajjarapu, Goran Andersson, Anjan Bose, Claudio Canizares, Nikos Hatziargyriou, David Hill, Alex Stankovic, Carson Taylor, Theiry Van custem, Vijay Vittal, 'Definition and Classification of Power System Stability', IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.19, No.2, May 2004

