

АНАЛИЗА ЕФИКАСНОСТИ СИСТЕМА АПУ-А У ДИСТРИБУТИВНИМ МРЕЖАМА СА ДИСТРИБУИРАНИМ ИЗВОРИМА ЕНЕРГИЈЕ

ANALYSIS OF THE AUTOMATIC RECLOSING SYSTEM EFFICIENCY IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION

Miodrag FORCAN,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, miodrag.forcan@live.com,
Željko ĐURIŠIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, djurisic@etf.rs.

U prvom dijelu rada predstavljena je problematika integracije distribuiranog izvora energije u radialnu distributivnu mrežu sa aspekta relejne zaštite i sistema APU-a. Zatim je ukazano na posljedice mogućeg ostrvskog rada distribuiranog izvora energije i nesinhronog APU-a. Ukratko su objašnjene metode relejnih zaštita od ostrvskog rada sa osnovnim prednostima i nedostacima. Primjenom programa Power Factory izvršene su simulacije koje pokazuju efikasnost sistema APU-a u radialnoj distributivnoj mreži sa distribuiranim izvorom energije. Takođe, kroz posebnu simulacionu analizu verifikovane su karakteristične posljedice ostrvskog rada.

Ključne reči: radialni distributivni vod, distribuirani izvor energije; ostrvski rad; APU.

The first part of this paper presents the integration problem of distributed energy source in radial distribution network, from the view point of relay protection schemes and reclosing systems. In the second part it is pointed to the possible consequences of island operation of distributed energy source in the combination with reclosing system. A brief explanation of the relay protection methods for detection of island operation is also presented. Special simulations were performed, using software Power Factory, in order to demonstrate the effectiveness of reclosing system in distribution network with distributed energy source. Also, through simulation analysis characteristic consequences of distributed energy source island operation are verified.

Key words: radial distribution line; distributed energy source; island operation; automatic reclosing.

I. Uvod

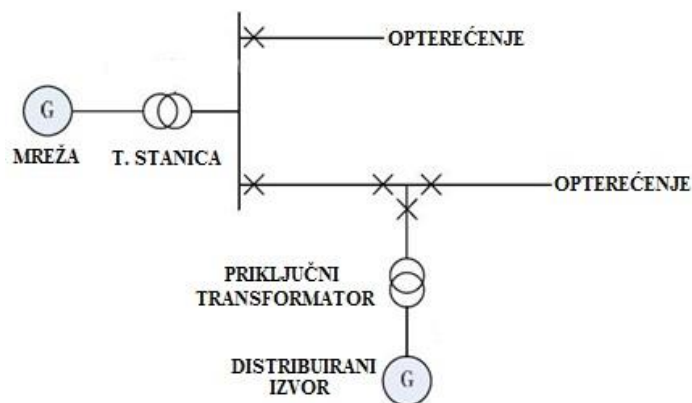
Veoma rasprostranjena upotreba distribuiranih izvora energije je veoma često nekompatibilna sa konvencionalnom relejnom zaštitom distributivnih mreža. Najčešći problemi su:

- Nenamjeran ostrvski rad u smislu dostupnosti napajanja, bezbjednosti personala i korisnika i uopšte kvaliteta električne energije. Posebno je nepovoljan ostrvski rad u kombinaciji sa sistemom automatskog ponovnog uključanja (APU-a), jer tada i kratkotrajni ostrvski rad može biti veoma opasan [1-3]. Zaštita od ostrvskog rada je naznačena kao jedan od najvažnijih aspekata integracije distribuiranih izvora energije [4-7].
- Neosjetljivost klasične prekostrujne relejne zaštite na početku radialnog distributivnog voda. Dio struje kvara, koji je napajan od strane distribuiranog izvora energije, može smanjiti struju kvara koju mjeri prekostrujna zaštita na početku voda.

- Neselektivno reagovanje klasične prekostrujne zaštite na distributivnim vodovima koji nisu u kvaru.
- Neselektivno isključenje distribuiranih izvora energije [8,9].

II. APU radijalnog distributivnog voda sa distribuiranim izvorom energije

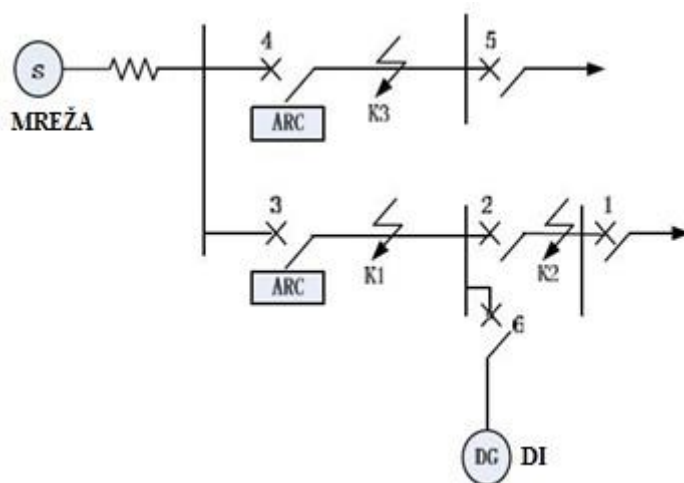
Distribuirani izvori energije se najčešće priključuju na distributivnu mrežu u vidu takozvane „T“ strukture, kao što je prikazano na sljedećoj slici:



Sl. 1. Priključenje distribuiranog izvora energije na mrežu u vidu „T“ strukture

Distribuirani izvor energije (DI) priključuje se direktno na mrežu ili se koristi poseban transformator za podizanje napona. Mreža zajedno sa DI-om napaja potrošnju lociranu niz odgovarajući distributivni vod. Ukoliko je proizvodnja električne energije DI-a veća od potrošnje niz odgovarajući distributivni vod, višak energije se injektira u mrežu. Ovaj način priključivanja je povoljan sa aspekta jednostavnosti priključka i ekonomičnosti, jer se DI priključuje u najbližu tačku mreže (nema potrebe za dodatnom konstrukcijom). Negativna strana je manji uticaj na naponske prilike u mreži.

Sa aspekta narušavanja koordinacije relejne zaštite sa sistemom APU-a, kod ovog načina priključivanja DI-a, prisutne su značajne komplikacije. Kao što je prikazano na Sl. 2 zaštita glavnog distributivnog voda najčešće koristi brzo isključenje prekidača, prekostrujni relej i opremu za APU.



Sl. 2. Logika i elementi relejne zaštite distributivne mreže sa DI-om

Zahvaljujući DI-u prikazana mreža (Sl.1) postaje dvostrano napajana. U slučaju kvara na nekoj od lokacija i pokretanja ciklusa APU-a, DI može biti oštećen usljed tranzijentnih pojava

na vodu. Prema standardu IEEE 1574 [10] zahtijeva se što kraće odvajanje DI-a od mreže u slučaju kvara na istom vodu.

A. Nesinhrono APU

Ukoliko se prolazni kvar desi na poziciji K2 (Sl.2), prekidač 3 reaguje usljed reagovanja zaštite glavnog distributivnog voda prije ciklusa APU-a. Kada prolazni kvar nestane, a DI je i dalje povezan sa mrežom, dolazi do pojave ostrvskog rada u razmatranom dijelu mreže. U toku mrtvog vremena mogla se pojaviti određena fazna razlika između napona mreže i DI-a (generator usporava ili ubrzava). Ako se u takvom slučaju dogodi APU, pojaviće se velika udarna struja (prisutna je značajna naponska razlika na kontaktima prekidača), koja dalje može uzrokovati neselektivno reagovanje prekostrujne zaštite, čime je sistem APU-a izgubio funkciju brzog uspostavljanja napajanja nakon prolaznog kvara. Ukoliko su proizvodni kapaciteti DI-a veliki u datom trenutku, može se dogoditi velika šteta u mreži. U najgorem slučaju, kada su naponi mreže i ostrva prilikom APU-a u protivfazi, dolazi do velikih strujnih, naponskih i momentnih tranzijenata (pojavljuje se dvostruko veći linijski napon). Šteta se može dogoditi i na DI-u, kao i na svim ostalim elementima mreže. Iako postoji malo dokumentacije o konkretnoj šteti turbinskih generatora, kumulativni uticaj ovakvih napreznja se definitivno mora uzeti u obzir.

B. Neselektivno reagovanje zaštite i inicijalizacija APU-a

Kada se dogodi prolazni kvar na poziciji K3 (Sl.2), dolazi do brzog isključenja prekidača zaštite 4 i inicijalizacije brzog sistema APU-a. Usljed uticaja DI-a na struju kvara može se dogoditi neselektivno reagovanje zaštite 3 (početak voda sa DI-om), praćeno brzom inicijalizacijom sistema APU-a zaštite 3, što je neselektivna pojava. Ukoliko je kvar trajan, ciklus APU-a zaštite 4 će biti bezuspješan. Kvar se u ovom slučaju jedino može ukloniti selektivnom prekostrujnom zaštitom. Neselektivno reagovanje zaštite može biti izazvano polaznim ili tranzijentnim strujama određenih elemenata u mreži, poput motora, transformatora ili velikih kondenzatora.

C. Ponovno uspostavljanje električnog luka

U slučaju prolaznog kvara na lokaciji K1 (Sl.2), nakon što prekidač zaštite 3 isključi kvar, neophodno je obezbijediti mrtvo vrijeme prije ciklusa APU-a da bi se sekundarni električni luk ugasio. Međutim, DI i dalje napaja mjesto kvara (nakon isključenja prekidača na početku voda). Na ovaj način je produženo trajanje sekundarnog električnog luka. Ukoliko se pri ovakvim uslovima dogodi APU, u trenutku povezivanja mreže vrlo je vjerovatno ponovno paljenje primarnog luka. Ukoliko je porast struje veliki, može doći do proboja izolacije i nastanka trajnog kvara. Zbog toga je neophodno razdvojiti DI i mjesto kvara prije ciklusa APU-a.

III. Nenamjeran ostrvski rad

Nenamjeran ostrvski rad se dešava kada dio distributivnog sistema postane izolovan od ostatka mreže, ali i dalje napajan od strane distribuiranih izvora. Tipičan uzrok je isključenje glavnog prekidača voda zbog potreba rasterećenja ili održavanja. Rad u ostrvskom režimu nije povoljan iz sljedećih razloga:

- Rekonekcija dijela mreže koji radi u ostrvskom režimu može biti veoma komplikovana, pogotovo u slučaju upotrebe APU-a,
- Operator sistema ne može garantovati zadovoljavajući kvalitet električne energije u ostrvskom dijelu distributivne mreže. Mogu se pojaviti abnormalne promjene napona i frekvencije, a snaga tropskog kratkog spoja mreže može biti veoma mala, što može izazvati dodatne probleme prekostrujnoj zaštiti.
- Mogu se pojaviti problemi bezbjednosti za stručno osoblje.

Prema velikom broju studija, ostrvskim radom se naziva događaj koji traje više od 5 s, međutim ovakvi događaji su rijetki, dok je kratkotrajni ostrvski rad veoma česta pojava. Postoje mnogi standardi i pravila u vezi sa ostrvskim radom dijela distributivne mreže. Najčešći zahtjevi su [10]:

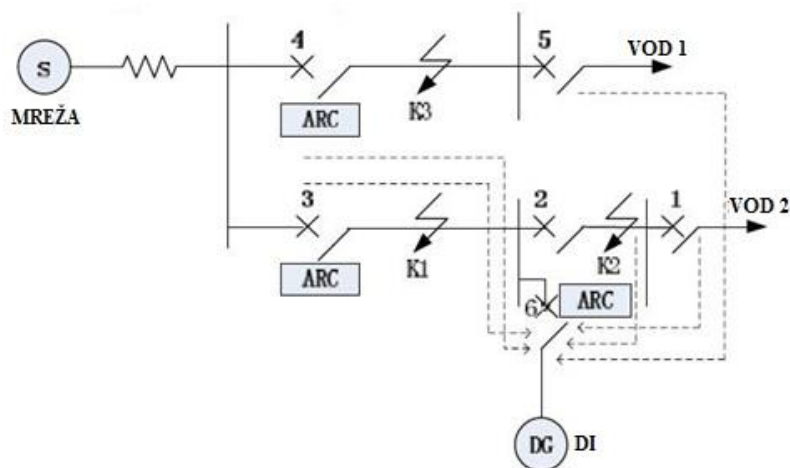
- DI je neophodno odvojiti od mreže u slučaju abnormalne promjene frekvencije ili napona.
- Ako su jedna ili više faza distributivnog voda odvojeni od napojne mreže, DI se mora takođe odvojiti od mreže u što bržem vremenskom roku.
- U slučaju upotrebe APU-a, DI se mora odvojiti od mreže prije ponovnog uključanja (dok su kontakti reklozera još uvijek otvoreni).

A. Metode zaštite od ostrvskog rada

Osnovna mana klasičnih zaštita od ostrvskog rada (npr. preko/pod naponska ili frekventna zaštita) je neosjetljivost u slučaju male razlike između proizvodnje i potrošnje električne energije u ostrvskom dijelu mreže. Postoji nekoliko savremenih metoda zaštita od ostrvskog rada. One se mogu podijeliti na: pasivne, aktivne i metode sa komunikacionim kanalima. Tipični primjeri pasivnih metoda su stopa promjene frekvencije (ROCOF – rate of change of frequency) i vektorski pomjeraj (vector shift). U praksi se pokazalo da pasivne metode mogu biti neosjetljive u pojedinim slučajevima nastanka ostrvskog rada [5,6]. Aktivne metode su bazirane na aktivnoj destabilizaciji ostrva i mjerenju odziva sistema usljed injektiranja određenih signala od strane zaštite od ostrvskog rada. Osnovne mane aktivnih metoda su primjenjivost samo kod DI-a sa priključnim inverterom i pogoršanje kvaliteta električne energije. Metode koje koriste komunikacione kanale su superiorne u odnosu na pasivne, jer nemaju mrtvu zonu [11,12]. Primjenjuju se samo kod DI-a velike snage, zbog visokih cijena implementacije.

B. Zaštita od ostrvskog rada na bazi komunikacionih kanala

Jedno od najfunkcionalnijih rješenja kod problematike ostrvskog rada jeste uspostava komunikacionih kanala za koordinaciju zaštita. Komunikacija se uspostavlja između izvornih zaštita vodova i zaštita DI-a, čime se utiče na postojeću koordinaciju zaštita i sistema APU-a. Jedna od najvažnijih primjena jeste upotreba signala postojećih zaštita vodova za inicijalizaciju reagovanja zaštita DI-a, kao što je prikazano na Sl.3.



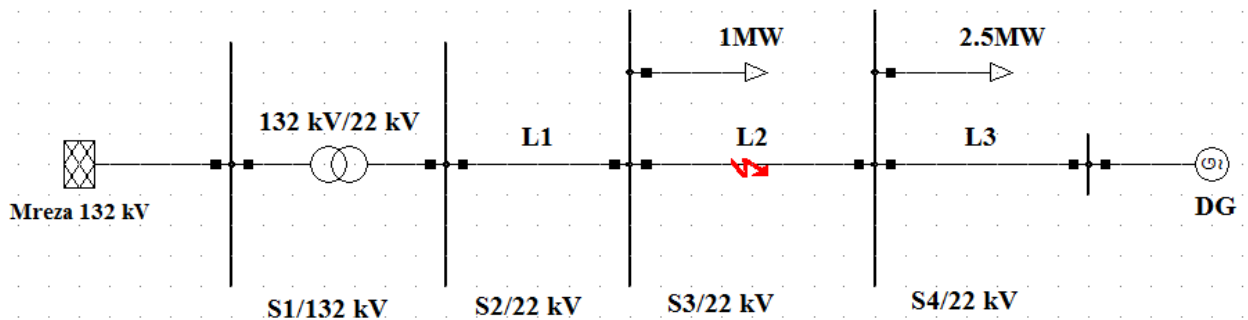
Sl. 3. Komunikacija između relejnih zaštita u distributivnoj mreži sa DI-om

Kao što je prikazano na Sl.3, bilo da se kvar desi na vodu 1 ili vodu 2, na lokacijama K₁, K₂ ili K₃, glavne zaštite na početku vodova (zaštita 3 ili 4) će koristiti ubrzano reagovanje. Međutim, prije početka ciklusa APU-a, biće poslat komunikacioni signal zaštiti 6 za odvajanje DI-a od mreže. Zaštite 3 i 4 su opremljene funkcijom provjere napona na kontaktima prekidača, a zaštita 6 je opremljena funkcijom provjere sinhronizacije. Ako je

kvar prolazan, zaštita 3 (ili 4) provjerava uslov nestanka napona i u isto vrijeme šalje signal zaštiti 6 da se otpočne provjera sinhronizacije. Kada je kvar trajan, neophodno je blokirati uključenje DI-a (zaštita 6). Istovremeno zaštita 6 prosljeđuje informaciju i ubrzava reagovanje zonske zaštite za izolaciju mjesta kvara. Npr. u slučaju kvara na lokaciji K_2 , nakon dobijene informacije od zaštite 3 da se radi o trajnom kvaru, zaštita 6 šalje ubrzani signal za reagovanje zaštita 1 i 2, čime se mjesto kvara izoluje.

IV. Modelovanje radijalne distributivne mreže sa distribuiranim izvorom energije

U programu Power Factory [13] izvršeno je modelovanje radijalne distributivne mreže sa DI-om, kao što je prikazano na sljedećoj slici:



Sl. 4. Model radijalne distributivne mreže sa DI-om

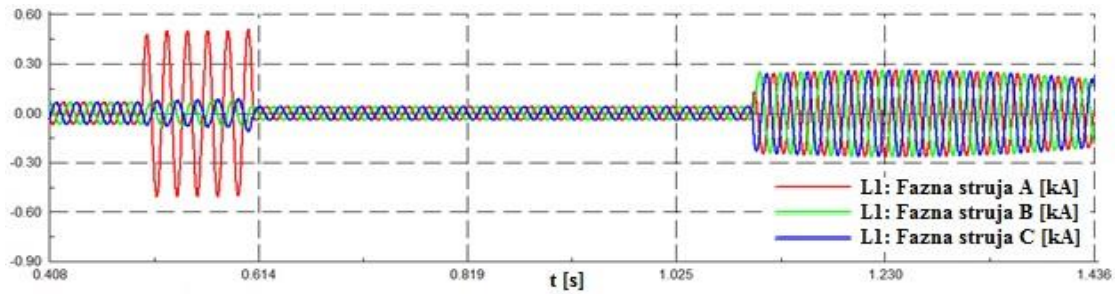
Radi se o distributivnoj mreži nazivnog napona 22 kV. Napojna mreža je modelovana pomoću Tevenenovog ekvivalenta sa snagom trolnog kratkog spoja od 650 MVA i odnosom $X/R=3.7$. Za model priključnog transformatora 132/22 kV odabrana je sprega Dyn1, dok je vrijednost serijske impedanse 9%. Za modele dionica vodova L1, L2 i L3 odabrani su parametri realnih vodova kompanije Eskom pod nazivom „Fox“ [14]. Vrijednosti impedansi vodova direktnog i nultog redoslijeda su $0.86+j0.39 \Omega/m$ i $0.78+j1.56 \Omega/m$, respektivno. Dužina svake dionice je 20 km. Za potrošnju je odabran model konstantne snage, 1 MW na sabirnicama S3 i 2.5 MW na sabirnicama S4. DI je modelovan sinhronom mašinom snage 2 MW, konstantnog faktora snage, vrijednosti 1, i nazivnog napona 22 kV. Vrijednosti parametara modela DI-a su dati u [15]. Generalna je preporuka, pri analizi rada relejne zaštite, modelovati DI sinhronim generatorom, jer rotacione mašine najviše doprinose struji kvara. Pozicija analiziranih kvarova je na sredini dionice L2.

V. Rezultati simulacione analize

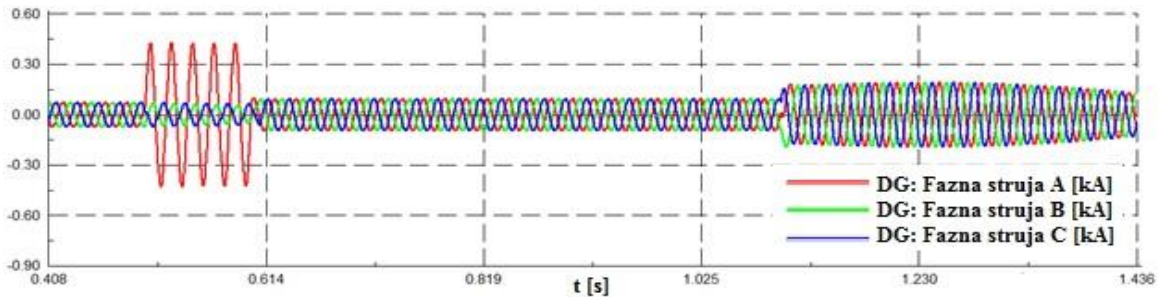
U svrhu analize efikasnosti sistema APU-a izvršene su dvije simulacije: prolazni jednopolni kratak spoj i trajni trolni kratak spoj. Treća simulacija je izvršena sa ciljem identifikacije pokazatelja ostrvskog rada DI-a.

A. Simulacija 1: prolazni jednopolni kratak spoj

Na Sl.5 i Sl.6 prikazane su vremenske promjene faznih struja na početku distributivnog voda i na priključcima DI-a pri jednopolnom kratkom spoju i ciklusu APU-a, respektivno.

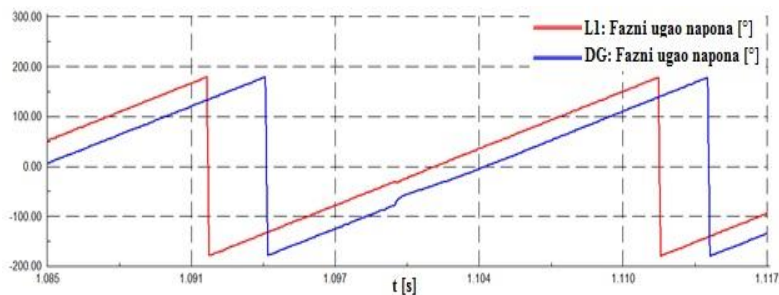


Sl. 5. Vremenske promjene faznih struja na početku distributivnog voda



Sl. 6. Vremenske promjene faznih struja na priključcima DI-a

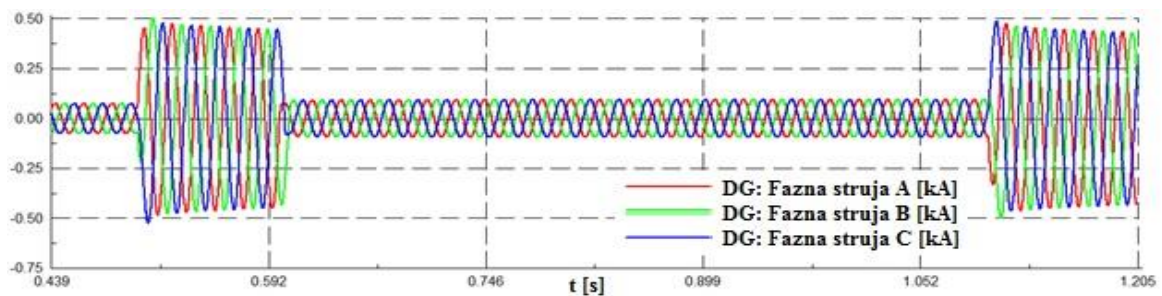
Sa prethodnih slika se može zapaziti da je jednopolni kratak spoj inicijalizovan u trenutku $t=0.5$ s (faza A) i da je došlo do trofaznog isključenja struje u trenutku $t=0.6$ s. Beznaponska pauza je trajala 500 ms i u trenutku $t=1.0$ s je došlo do trofaznog APU-a. Kao posljedica ponovnog priključenja dijela mreže koji je radio u ostrvskom režimu pojavljuju povišene vrijednosti struja koje mogu izazvati neselektivno reagovanje prekostrujne zaštite. Na Sl.7 prikazana je razlika faznih uglova napona distributivne mreže i ostrvskog dijela sa DI-om u okolini trenutka ponovnog uključanja. Jasno je vidljivo da se radi o nesinhronom APU-u.



Sl. 7. Razlika faznih uglova napona distributivne mreže i ostrvskog dijela sa DI-om

B. Simulacija 2: trajni trofazni kratak spoj

Na Sl.8 prikazane su vremenske promjene faznih struja na priključcima DI-a pri trofaznom kratkom spoju.

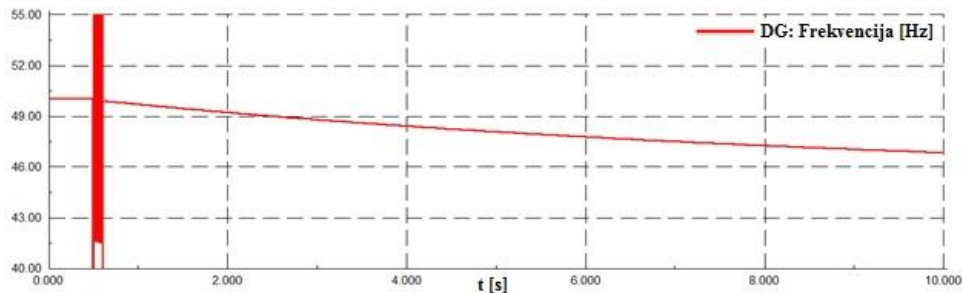


Sl. 8. Vremenske promjene faznih struja na priključcima DI-a pri trofaznom kratkom spoju

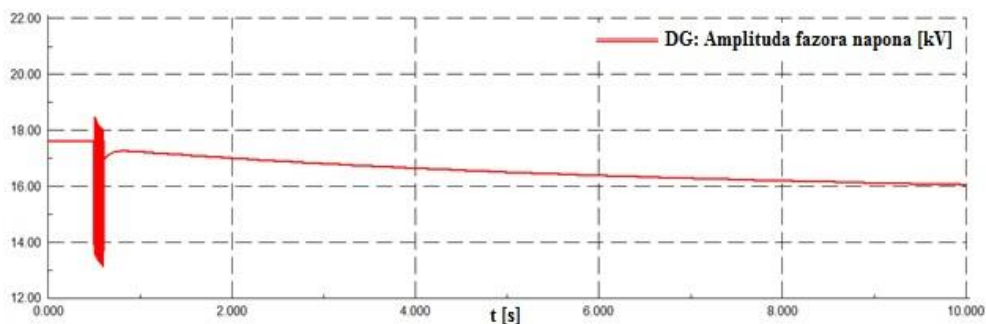
Sl.8 prikazuje vremenske promjene struja pri ponovnom uključanju DI-a na trolezni kratak spoj. Velike vrijednosti struja izazivaju dodatna naprezanja DI-a i ostale opreme u mreži.

C. Simulacija 3: ostrvski rad DI-a

Sljedeća simulacija analizira ostrvski rad DI-a koji nastupa nakon što prekidači isključe struju troleznog kratkog spoja (analiza bez APU-a). Na Sl.9 prikazana je promjena frekvencije u tački priključenja DI-a na mrežu u ostrvskom režimu rada. Sl. 10 prikazuje promjenu amplitude fazora napona direktnog redoslijeda na priključcima DI-a u ostrvskom režimu rada.



Sl. 9. Vremenska promjena frekvencije u tački priključenja DI-a na mrežu u ostrvskom režimu rada



Sl. 10. Vremenska promjena amplitude fazora napona direktnog redoslijeda na priključcima DI-a u ostrvskom režimu rada

Na osnovu grafika na Sl.9 vidljiv je značajan pad frekvencije u ostrvskom dijelu mreže, što predstavlja posljedicu nastalog debalansa između proizvodnje i potrošnje. Sl.10 ilustruje opadanje napona na priključcima DI-a što može biti koristan pokazatelj ostrvskog rada mreže. Ovakve promjene napona i frekvencije nisu dozvoljene u distributivnoj mreži, zbog čega je ostrvski rad DI-a zabranjen.

VI. Zaključak

Integracija distribuiranih izvora energije u distributivnu mrežu sa konvencionalnom relejnom zaštitom izaziva mnoge probleme. U radu je analiziran problem koordinacije relejne zaštite distribuiranog izvora energije i sistema za APU-a glavnog distributivnog voda. Kroz simultanu teoretsku i simulacionu analizu prikazane su posljedice nesinhronog APU-a. Dugotrajan ostrvski rad dijela distributivne mreže sa distribuiranim izvorom energije se ne smije dopustiti. Dat je poseban osvrt na metode zaštite distribuiranog izvora energije od ostrvskog rada. Kao generalan cilj nameće se efikasna i brza zaštita za isključenje distribuiranog izvora sa mreže prije APU-a prekidača na početku glavnog distributivnog voda.

VII. Literatura

- [1] **P L.K.Kumpulainen, K.T. Kauhaniemi**, Analysis of the impact of distributed generation on automatic reclosing, IEEE, PES Power Systems Conference and Exposition, Vol. 1, October 2004, pp. 603–608.

- [2] **L.K. Kumpulainen, K.T. Kauhaniemi**, Aspects of the effects of distributed generation in single-line-to-earth faults, International Conference on Future Power Systems, November 2005.
- [3] **L. K. Yuan, X. Mingchao**, Impacts of DG on Automatic Reclosing of Distribution Networks, The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection 2011, pp. 351-355.
- [4] **Vieira, J.C.M., Freitas, W., Huang, Z., Xu, W., Morelato, A.**, Formulas for predicting the dynamic performance of ROCOF relays for embedded generation applications, IEE Generation, Transmission and Distribution, pp. 399-406, 2006.
- [5] **C. M. Affonso , W. Freitas , W. Xu and L. C. P. da Silva**, Performance of ROCOF relays for embedded generation applications, Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Distrib., vol. 152, no. 1, pp.109 -114 2005.
- [6] **Freitas, W., Xu, W.**, False Operation of Vector Surge Relays, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, NO. 1, January 2004.
- [7] **J. C. M. Vieira , W. Freitas , W. Xu and A. Morelato**, An investigation on the non-detection zones of synchronous distributed generation anti-islanding protection, IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no. 2, pp.593 -600 2008.
- [8] **A. Dy'sko, C. Booth, O. Anaya-Lara, G.M. Burt**, Reducing unnecessary disconnection of renewable generation from the power system, IET Renew. Power Gener.1 (1) (2007) 41–48.
- [9] **Hartmann, W.G**, How not to nuisance-trip distributed generation, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2005 IEEE.
- [10] **IEEE Standard 1574** for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE, Standards Coordinating Committee 21, Jul. 2003.
- [11] **Zeng X., Li K.K., Chan W.L., Sheng S.**, Multi-Agents Based Protection for Distributed Generation Systems, IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004), Hong Kong, April 2004.
- [12] **N. Perera, A. D. Rajapakse and T. E. Buchholzer**, Isolation of faults in distribution networks with distributed generators, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 4, pp.2347 -2355 2008.
- [13] **Power Factory** – Version 14.1, DIgSILENT GmbH, 2011.
- [14] **Escom**, distribution standard – part 4: medium voltage reticulation section 0: general information and requirements for overhead lines up to 33kV, 2011.
- [15] **Escom**, distribution guide - part 1: network planning guideline for embedded generation, 2008.