

UTICAJ MINI ELEKTRANA NA RAD POSTOJEĆE RELEJNE ZAŠTITE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Saša Stojković¹, Tehnički fakultet, Čačak, Srbija

1. UVOD

Na današnjem stepenu tehnološkog i tehničkog razvoja društva smatra se da je najbitniji način rešavanja globalnih energetske i ekološke probleme intenzivno uvođenje distribuirane proizvodnje električne energije, priključene na distributivnu mrežu. Poznato je, međutim, i da je distribuirana proizvodnja električne energije donela i značajne tehničke probleme, kao i probleme vezane za zaštitu i upravljanje [2]-[7]. Naime, klasične distributivne mreže su radijalne i sa jasnim tokom energije od prenosne mreže prema potrošačima. Projektovanje, eksploatacija i relejna zaštita takvih mreža potpuno su uhodane i poznate aktivnosti. Uvođenje distribuirane proizvodnje u tu mrežu (na srednjem i niskom naponu) menja u izvesnim slučajevima smer tokova snaga i struje kratkih spojeva u pojedinim elementima mreže, zbog čega pristup projektovanju i eksploataciji ovakve mreže mora biti temeljno analiziran.

Asinhroni generator svojim radom utiče na naponske prilike i tokove snaga u niskonaponskoj mreži, gde je priključen, pa tome treba posvetiti odgovarajuću pažnju. Generatori u okviru distribuirane proizvodnje utiču i na kvalitet električne energije, pre svega, na naponske propade, prenapone usled sklopnih operacija, flikere i više harmonike. Drugi, veoma važan uticaj, je uticaj distribuiranih generatora na povećanje struje kratkih spojeva u distributivnoj mreži [11]. Taj uticaj važan je, kako za proveru elektrodinamičkih naprezanja opreme, tako i za izbor i podešavanje uređaja relejne zaštite. Treće, relejna zaštita ovakvih mreža veoma se razlikuje od zaštite radijalne mreže bez izvora, i to iz više razloga. Distributivna mreža nije više radijalna i struje kratkih spojeva u delovima mreže ne moraju imati samo jedan smer. Kada se mesto kratkog spoja nađe između izvora u velikim elektranama i distribuiranog generatora, napajanje mesta kvara je dvostrano. To menja koncepciju relejne zaštite. Dakle, osim što treba asinhroni (ili neki drugi distribuirani) generator isključiti pri kvarovima u njemu samom, treba ga isključiti i pri bilo kojem kvaru u distributivnoj mreži. Delovanje zaštite zavisi i od mesta i vrste kvara. U nekim slučajevima postoje problemi sa ostvarivanjem selektivnosti zaštite, a posebno je interesantna tzv. "zaštita od gubitka mreže", tj. zaštita od ostrvskog rada. Ostrvski rad bi, zbog primene tehnike automatskog ponovnog uključanja u sredjenaponskoj

¹ Dr Saša Stojković, Tehnički fakultet, Svetog Save 65, Čačak, Srbija

mreži, mogao da dovede do dovođenja pod napon asinhronog generatora u uslovima opozicije faza, što je veoma opasno, i za njega, i za potrošače. Jedna od najvećih prednosti upotrebe asinhronih generatora je da su to, ustvari, asinhroni motori, čija je proizvodnja dobro organizovana u našoj zemlji. Međutim, asinhroni generator ponaša se pri kratkim spojevima različito od sinhronog, što ima veliki uticaj na relejnu zaštitu i upravljanje. Relejnu zaštitu mikro hidroelektrane treba posmatrati sa više aspekata:

- Zaštita generatora pri kvaru u njemu samom,
- Zaštita distributivne mreže od struja koje pri kvarovima u njoj dolaze iz generatora,
- Tzv. „zaštita od gubitka napajanja“, ili, drugim rečima, zaštita od ostrvskog rada, i
- Uticaj asinhronog generatora na postojeću zaštitu.

Tehnički problemi vezani za relejnu zaštitu su višestruki. Prvi problem vezan je za prirodu struja kratkih spojeva koje na mesto kvara daje asinhroni generator. Pri trofaznom kratkom spoju mašina gubi pobudu, pa struja kvara veoma brzo nestaje[12]. Pri nesimetričnim kvarovima nastaju uslovi da mašina može da nastavi da radi, ali uz napone i struje koji su opasni po mašinu ili potrošače. Naročito je nepovoljno kada do kvara u srednjenaponskoj ili niskonaponskoj mreži dođe na mestu koje je električno udaljeno od generatora. Generator može da nastavi da radi sa neznatno promenjenim parametrima, što detekciju kvara čini težom. Pregorevanje osigurača u jednoj fazi takođe može bitno da utiče na zaštitu u mikroelektrani. Posebno je važna zaštita od gubitka napajanja (engl. „loss of mains protection“), koja je specifična samo za distribuiranu proizvodnju [8]. Njen engleski (drugi) naziv je „Rate of change of frequency (ROCOF) protection“, jer je sistemska zaštita, koja se zasniva na analizi promene frekvencije prilikom elektromehaničkih prelaznih procesa. Ukoliko nastane kvar u distributivnoj mreži, zaštita mreže omogućuje prekidanje napajanja mesta kvara sa strane mreže. To je prekostrujna zaštita, ukoliko je kvar na srednjenaponskom vodu, ili osigurač, ako je kvar na niskonaponskom vodu. Asinhroni generator, međutim, kada ima kondenzator za obezbeđivanje reaktivne energije za svoj rad, zavisno od opterećenja, može da nastavi napajanje dela mreže. To je ostrvski rad. Pri tome, snaga generatora može biti manja ili veća od potrošnje, što dovodi do promene napona ili frekvencije, zavisno od odnosa snaga mašine i potrošnje. Ukoliko nema dovoljno aktivne snage da generator pokrije potrošnju, opada frekvencija. Takođe, ukoliko nema dovoljno reaktivne snage, opada napon. Promena napona i frekvencije izvan dozvoljenih granica ugrožava potrošače, pa generator mora biti isključen sa mreže, iako nije u kvaru. Osim toga, on mora biti isključen u toku beznaponske pauze, jer automatsko ponovno uključivanje srednjenaponskog izvoda može nastati kada se fazni stavovi napona sa strane mreže i sa strane generatora razlikuju. To može biti opasno i za generator, i za potrošače. Međutim, u mreži nastaju i uključjenja i isključenja manjih ili većih potrošača, što nije kvar, a frekvencija se privremeno menja. Na te promene frekvencije zaštita ne treba da reaguje jer bi to bilo nepotrebno i lažno reagovanje.

Zbog toga, podešavanje zaštite male elektrane nije jednostavno. Osim toga, potrebno je analizirati, ne samo uslove rada ove zaštite pri različitim kvarovima u mreži, na spojnom vodu, ili u samom generatoru, već i uticaj zaštite male elektrane na postojeću zaštitu u distributivnoj mreži. Smatra se da analiza rada zaštite ne može biti izvođena tradicionalnim načinom, kada se smatralo da je distributivna mreža daleko od izvora i u blagotvornim uslovima bez problema stabilnosti. Zaštita distributivnih mreža sa malim elektranama treba da bude analizirana dinamički, sa analizom posledica delovanja relejnih uređaja, kako na mrežu, tako i na generator male elektrane. U ovom radu analiziran je isključivo uticaj male elektrane na postojeću relejnu zaštitu distributivne mreže.

2. ATP-EMTP SIMULACIONI MODEL

Uticaj zaštite male elektrane (vetrogeneratora snage 2 MW) analiziran je tako što je zamišljeno da se vetrogenerator priključuje na jedan od dva izvoda u realnoj transformatorskoj stanici „Požarevac 4“, za koju postoje detaljni podaci o opremi i izvodima [9]. Svi detalji o vodovima i opremi prikazani su u [9] – [12] i ovde, zbog ograničenog prostora, neće biti ponovljeni.

Jedan od 10 kV izvoda (br. 4, [9]) modelovan je detaljno. Izvod br. 6 je jednostavan – sastoji se od kabla dužine 740 m, čiji su podaci dati u [9]. Njegova potrošnja je 630 kVA, a, radi jednostavnosti, pretpostavljeno je da je opterećenje čisto aktivno. Ostalih pet izvoda prikazano je preko potrošnje $P=5$ MW, $\cos\phi=0,9$. Pretpostavljeno je da je potrošnja u svim slučajevima ista i konstantna. Modelovan je, ne samo srednjenaponski, već i niskonaponski deo izvoda br. 4. Niskonaponski deo prikazan je na sl.

1 detaljima A i C. Na sl. 2 prikazani su izvod br. 4 i potrošnja od 5 MW, a na sl. 1 prikazan je i izvod br. 6 (levo na slici, sa čvorovima Novi1 i Novi2).

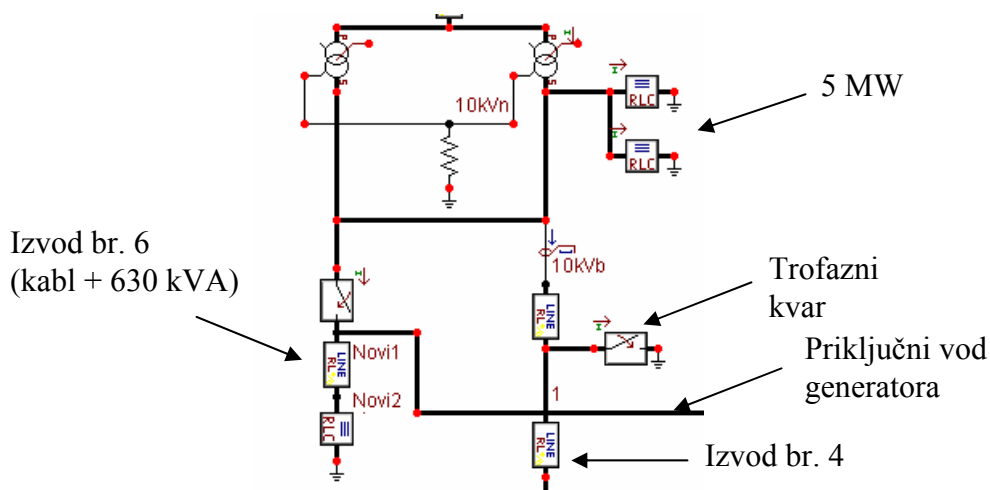
Vetrogenerator snage $P=2$ MW je asinhrona mašina sa kratkospojenim rotorom i konstantnom brzinom, kompenzovana kondenzatorskom baterijom kapaciteta $C=0,5$ MVar. Svi podaci o asinhronom generatoru su iz [14, str. 608]: naznačena snaga: 2 MW, naznačeni napon: 690 V, naznačeno klizanje: 0,02, moment inercije rotora generatora: 0,5 s, otpornost statora: 0,048 p.u., reaktansa statora: 0,075 p.u., reaktansa magnećenja: 3,80 p.u., otpornost rotora, svedena na stator: 0,018 p.u., reaktansa rotora, svedena na stator: 0,12 p.u. Prenosni odnos transformatora snage 2,7 MW je 0,69/10 kV/kV. Relativna reaktansa transformatora je 6 %. Simulacije su izvedene softverom za elektromagnetne i elektromehaničke prelazne procese ATP-EMTP [1]. Simulacije su izvođene bez vetrogeneratora, sa jednim, ili sa dva generatora snage po 2 MW.

3. UTICAJ VETROGENERATORA NA POSTOJEĆU RELEJNU ZAŠTITU

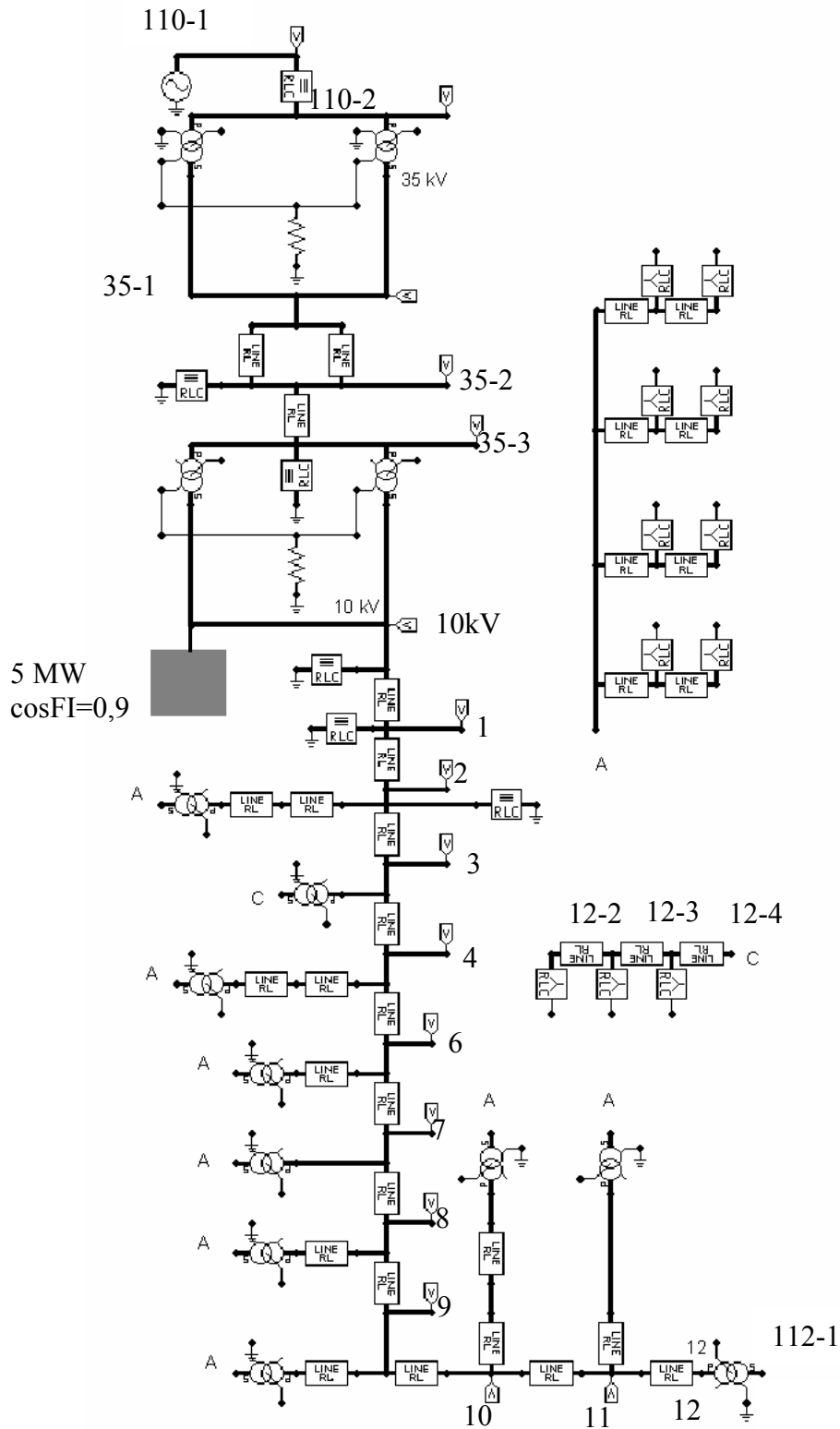
3.1 Neselektivno isključenje

Prvi problem koji distribuirani generator unosi u rad postojeće zaštite može biti neselektivno isključenje postojećim prekostrujnim ili zemljospojnim relejima na izvodima. Parametri releja su [9] sledeći. Izvod 10 kV br. 6 ima kratkospojni relej podešen na 1400 A i prekostrujni, podešen na 340 A, sa vremenskim kašnjenjem od 0,5 s. Zemljospojnom zaštitom nećemo se baviti jer je mreža 10 kV zamišljena kao uzemljena preko impedanse, dok je realna mreža u TS „Požarevac 4“ izolovana. Desni vod na sl. 2 (izvod br. 4) ima kratkospojni relej podešen na 800 A i prekostrujni, podešen na 340 A, sa kašnjenjem 0,5 s.

Sistemska zaštita priključnog voda male elektrane je podfrekventna, nadfrekventna, podnaponska, prenaponska, kao i prekostrujna i zemljospojna zaštita. Poslednje dve zaštite podešavaju se, kao i zaštite izvoda, prema Tehničkoj preporuci TP 4a1 [13]. To znači da prekostrujna zaštita priključnog voda ima vrednost podešenja struje za oko 40 % više od pogonske struje generatora, koja iznosi (za uslove u ovoj mreži) oko 133 A. Drugim rečima, smatraćemo da je podešena vrednost prekostrujnog releja priključnog voda 186 A. Često se kao posebna koristi zaštita od gubitka napajanja (od izolovanog rada dela mreže sa generatorom, posle isključenja distributivne mreže, engl. „loss of mains protection“).



Sl. 1 Izvodi br. 6 i br. 4, simulisani u ATP-EMTP-u



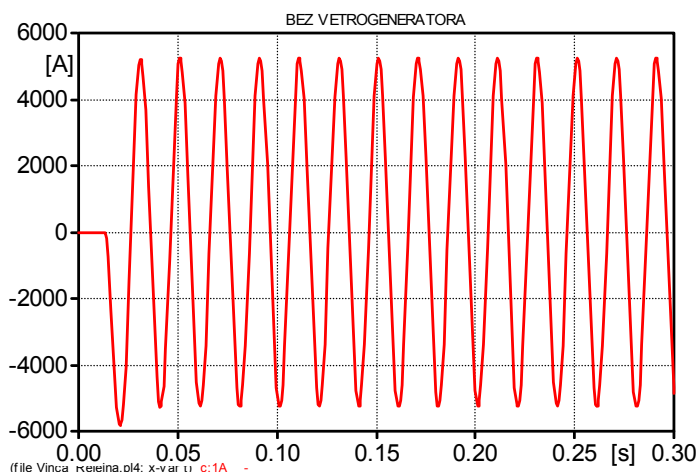
SI.2 ATP-EMTP Simulacioni model

Za zaštitu generatora obično se koriste zaštita od struja inverznog redosleda, zaštita od gubitka pobude (za sinhronne mašine), diferencijalna i zaštita od povratne snage. Izbor i podešavanje tih zaštita nisu tema ovog rada.

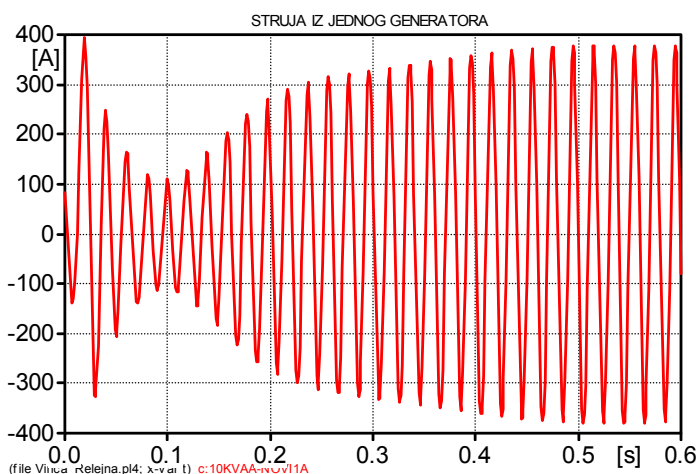
Kratkospojni i prekostrujni relej na nekom izvodu može, zbog uticaja distribuiranog generatora, da isključi neselektivno jer je postojeća zaštita neusmerena. Najnepovoljniji slučaj prikazan je na sl. 1. Na

početak voda 6 priključen je jedan ili dva generatora snage po 2 MW (u [8] je pokazano da, zbog naponskih prilika, u ovom slučaju može biti priključen samo jedan generator snage 2 MW, pa je ovaj slučaj hipotetički, radi analize uticaja na zaštitu). Na izvodu br. 4 nastaje trofazni kratak spoj iza prve deonice, prikazano prekidačem na sl. 2. Na sl. 3 prikazana je struja ovog kvara kada bi on trajao 0, 3 s, bez priključenih distribuiranih generatora. U trenucima kada reaguje zaštita, efektivna vrednost struje kvara je 3702 A, sasvim dovoljno za reagovanje kratkospojne zaštite, koja reaguje na 800 A.

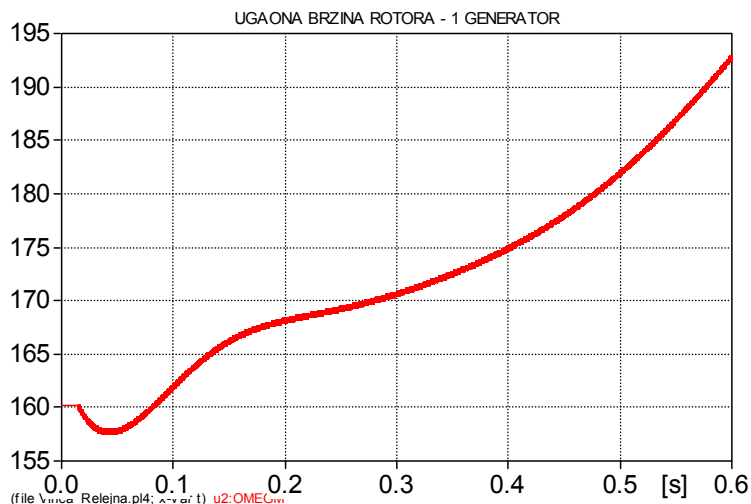
Međutim, pitanje je šta se dešava kada je u čvor „Novi1“ izvoda br. 6 priključen jedan generator. Struja kvara koju daje taj asinhroni generator prikazana je na sl. 4. Kada generator ne bi bio isključen u toku 0,6 s, efektivna vrednost struje koju on daje na mesto kvara između $t=0,5$ s i 0,6 s iznosi 267 A. To je nedovoljno da kratkospojna zaštita (1400 A) i prekostrujna zaštita voda 6 (340 A) reaguju. Ipak, generator se isključuje znatno ranije prekidačem u priključnom vodu jer prekostrujna zaštita priključnog voda reaguje pri struji 186 A u trenutku $t=0,177$ s. Kada bi ova zaštita zatajila, reagovala bi zaštita od previsokog broja obrtaja generatora. Pretpostavimo da je podešena na vrednost višu za 20 % od normalne ugaone brzine, koja iznosi 160 rad/s, dakle, 192 rad/s. Na sl. 5 prikazana je promena ugaone brzine (rotor je lak, pa najpre malo usporava, da bi se kasnije ubrzavao). Zaštita od previsoke brzine isključila bi generator posle $t=0,596$ s. Reagovanje brzinske zaštite je tzv. princip odložene zaštite, koji se veoma koristi za zaštitu distribuiranih generatora od kvarova van njih. Generator utiče svojim prelaznim procesom na vrednost struje kvara, koja ima vrednosti između 3729 A i 3600 A, ali kriva ukupne struje kvara, zbog preglednosti, nije prikazana, a slična je onoj na sl. 3.



Sl. 3 Struja trofaznog kratkog spoja bez priključenih generatora



Sl. 4 Struja iz jednog generatora



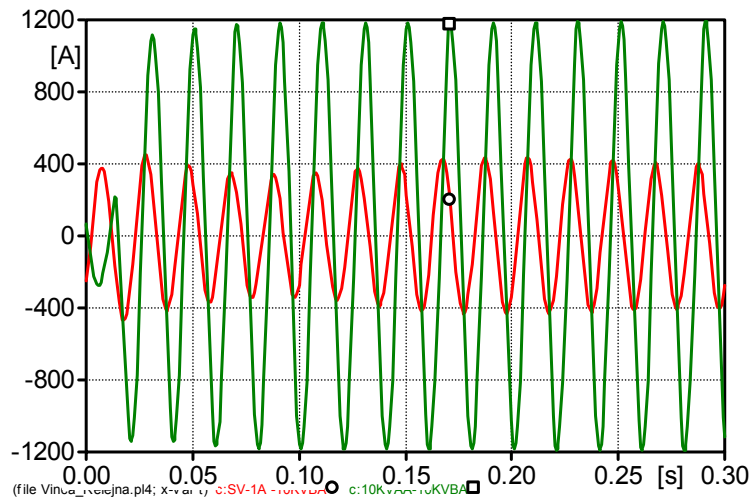
Sl. 5 Ugaona brzina rotora (rad/s) kada radi jedan generator

Međutim, kada se priključe dva generatora od 2 MW u isti čvor, situacija je nepovoljnija. Efektivna vrednost struje kvara koju daju generatori iznosi 500 A, pa bi prekostrujna zaštita izvoda 6 neselektivno isključila taj izvod ukoliko generator ne bi bio isključen nekom drugom zaštitom (brzinskom). Smer struje koju generator daje je prema sabirnicama, dakle, suprotan od onog za koji je zaštita projektovana. Opasna ugaona brzina od 192 rad/s dostiže se posle $t=0,552$ s. U literaturi se kao rešenje predlaže usmerena prekostrujna zaštita izvoda, umesto neusmerene. Za druga mesta kvarova ili druge vrste kvarove situacija je drugačija, pa je potrebno izvršiti više simulacija radi analize uslova rada postojeće zaštite. Prikazani slučaj je najnepovoljniji. To je slučaj kada je generator priključen blizu početka voda, sa jedne strane prekidača, a kvar je na drugom izvodu, takođe na početku izvoda jer je struja kvara tada najveća.

3.2 Uticaj međunapajanja usled distribuiranih generatora na rad postojeće relejne zaštite

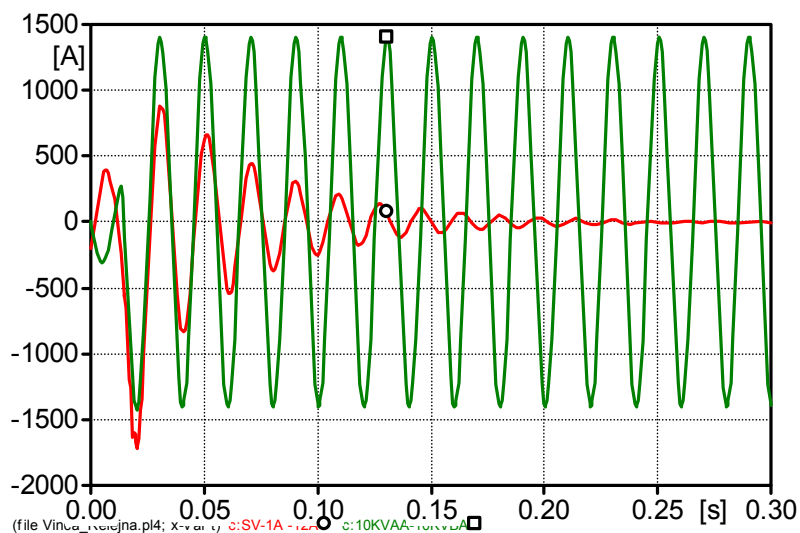
Drugi važan uticaj distribuiranih generatora na rad postojećih uređaja relejne zaštite je kada je kvar na istom vodu na kojem je priključen generator. Najnepovoljniji slučaj je kada je generator priključen na početku voda (što je najčešće slučaj), a kvar je na kraju voda. U tom slučaju asinhroni generator je na približno normalnom naponu, pa napaja mesto kvara. Međutim, to je važno za podešavanje zaštite priključnog voda [12], ali utiče na struju kvara koja teče kroz releje izvoda. Uticaj je zbog promene impedanse i naponskih prilika u odnosu na slučaj bez generatora.

Na početak izvoda, iza prekidača, priključena su dva vetrogeneratora snage po 2 MW. Na sl. 6 prikazana je ukupna struja koju na mesto kvara daju oba generatora (kriva označena kružićem), kao i struja kvara koja prolazi kroz releje na početku izvoda. Vidi se da se, posle kraćeg elektromehaničkog prelaznog procesa, struja kvara iz generatora ustaljuje zbog dovoljnog napona. Analiza pokazuje da bez generatora efektivna struja kvara koja prolazi kroz relej iznosi 988,7 A, što je dovoljno da se pobudi, kako kratkospojna (800 A), tako i prekostrujna zaštita voda (340 A). Međutim, kada se priključe dva generatora, kroz releje prolazi struja od 842 A, ili 85 % vrednosti struje bez generatora. U ovom konkretnom slučaju zaštita može da se pobudi (i kratkospojna, i prekostrujna), ali je osetljivost kratkospojne zaštite znatno smanjena. Pri dvofaznom kratkom spoju kratkospojna zaštita ne bi mogla da reaguje. Osetljivost zaštite menja se i sa mestom priključenja generatora, kao i sa mestom kvara.



Sl. 6 Struja kvara iz dva generatora (kružić) i kroz releje (kvadratić)

Na sl. 7 prikazan je slučaj kada je trofazni kratak spoj u čvoru 12 (sl. 1), gde su priključeni i generatori. Mašine brzo gube pobudu, kratkospojna ili podnaponska zaštita ih isključuju, a struja kroz relej u trenucima reagovanja prekostrujne zaštite (0,5 s) je 991 A, dakle, kao i kada nema generatora.



Sl. 7 Struja kvara iz dva generatora (kružić) i kroz releje (kvadratić) kada su generatori priključeni gde je i trofazni kratak spoj

4. ZAKLJUČCI

Distribuirani generatori utiču na rad postojeće relejne zaštite distributivnih mreža. U najvećem broju slučajeva, problemi ili ne postoje, ili se mogu rešiti. U retkim slučajevima pribegava se neselektivnom delovanju zaštite kao prihvatljivom rešenju.

Za pravilno rešavanje problema usaglašavanja postojeće zaštite sa zaštitom distribuiranog generatora potrebno je imati jasnu sliku o elektromehaničkim prelaznim procesima u distributivnoj mreži (kratki spojevi i ponašanje rotora generatora). To se može izvesti primenom adekvatnog softvera. Softverski alati tipa EMTP svakako zadovoljavaju jer su i projektovani za tu namenu.

Najčešći uticaj generatora na postojeću relejnu zaštitu su neselektivno isključenje, skraćivanje doseg (onemogućavanje rada zaštite zbog međunapajanja) i problem automatskog ponovnog uključenja u opoziciji faza.

5. LITERATURA

1. Alternative Transients Program (ATP) Rule Book, Canadian/American EMTP User Group 1987-92
2. N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirscher, G. Strbac: Embedded Generation, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 2000
3. S. Salman, I. Rida: Investigating the Impact of Embedded Generation on Relay Settings of Utilities' Electrical Feeders, IEEE Tr. On Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001
4. L. Kumpulainen, K. Kauhaniemi, P. Verho, O. Vahamaki: New requirements for system protection caused by distribution generation, 18th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Turin, 6-9 June 2005, Paper 0430
5. E. Coster, J. Myrzik, W. Kling: Effect of distributed generation on protection of medium voltage cable grids, 19th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Vienna, 21-24 May 2007, Paper 0079
6. T. Keil, J. Jager, A. Shustov, T. Degner: Changing network conditions due to distributed generation – systematic review and analysis of their impact on protection, control and communication systems, 19th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Vienna, 21-24 May 2007, Paper 0527
7. L. Pozzati, A. Barin, C. Carvalho, L. Cancha, R. Machado, A. Abaide, F. Farret, C. Fernandes: Determination of a minimum protective system for distribution systems embedded with small sources of distributed generation, 19th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Vienna, 21-24 May 2007, Paper 0614
8. S. Stojkovic: ATP-EMTP Based case study of wind power plant interconnection to the distribution system in Serbia, International Symposium POWER PLANTS 2006 September 19-22, 2006, Vrnjaka Banja, Serbia, Oral presentation
9. V. Vučković: Relejna zaštita u distributivnoj transformatorskoj stanici "Požarevac 4", diplomski rad, Tehnički fakultet, Čačak, 2004, str. 4-13
10. S. Stojković: Uticaj mikro hidroelektrane na tokove snaga i naponske prilike u distributivnoj mreži, 27. Simpozijum JUKO CIGRE 29 maj-03. jun 2005. godine, Zlatibor, referat R C6-0711.
11. S. Stojković: Uticaj mikro hidroelektrane na struje kratkih spojeva u distributivnoj mreži, Elektroprivreda, Br. 1, 2006., str. 54-61
12. S. Stojković: Upravljanje i relejna zaštita mikro hidroelektrane, 13. Simpozijum JUKO CIGRE „Upravljanje i telekomunikacije u EEC-u“, Tara, 29. maj-02. jun, 2006, Grupa B5, referat br. 4, str. 39-47
13. JP EPS – Direkcija za distribuciju el. energije: Tehnička preporuka br. 16: Osnovni tehnički zahtevi za priključenje malih elektrana na mrežu elektrodistribucije Srbije
14. T. Ackermann: Wind Power in Power Systems, John Wiley&Sons, England, 2005

ZAHVALNOST

Autor se najljubavnije zahvaljuje Ministarstvu za nauku i ekologiju Republike Srbije za finansijsku podršku projekta EE-273013B "Istraživanje tehnokonomskih potencijala proizvodnje električne energije vetrogeneratorima na lokaciji TE Kostolac".