

# **ANALIZA TRANZIJENTNE STABILNOSTI MALE HIDROELEKTRANE SA ASINHRONIM GENERATOROM PRI PROPADIMA NAPONA U PRIKLJUČNOJ DISTRIBUTIVNOJ MREŽI**

M. Tanasković, Elektroistok Inženjering, Beograd  
Ž. Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Beograd

## **UVOD**

Ispitivanje tranzijentne stabilnosti male hidroelektrane (MHE) od podjednake je važnosti kako i za vlasnika elektrane tako i za distributivno preduzeće. Poremećaji u elektrodistributivnoj (ED) mreži mogu uzrokovati ispad MHE ili opasna radna stanja koja mogu izazvati havarije na hidroagregatu.

Cilj ovog rada je analiza uticaja dubine i trajanja propada napona na tranzijentnu stabilnost MHE sa asinhronim generatorom priključene na ED mrežu. Pored poremećaja izazvanih kratkim spojevima u ED mreži, razmatraju se i prelazni procesi u normalnim radnim režimima, uzrokovani priključenjem industrijskih potrošača na ED mrežu. U okviru ovog rada, analiziraće se uticaj polaska asinhronog motora snage približne instalisanjoj snazi MHE na tranzijentnu stabilnost MHE.

Tranzijentna stabilnost je sposobnost agregata da ostane u sinhronizmu kada je izložen dinamičkom poremećaju u priključnoj ED mreži. U ispitivanjima tranzijentne stabilnosti dužina vremena ispitivanja je je tipično 3-5 s nakon nastanka poremećaja [1].

Nakon poremećaja u ED mreži, u asinhronoj mašini dolazi do elektromehaničkog prelaznog procesa. Kod asinhronog generatora se ne razlikuju subtranzijentni i tranzijentni period s obzirom da na rotoru postoji samo kratkospojeni kavezni namot [2].

U ovom radu izvršena je analiza tranzijentne stabilnosti MHE priključene na realnu ED mrežu 10 kV. Modelovanje ED mreže i hidroagregata, kao i analize stabilnosti izvršene su primenom programskog paketa DIGSILENT Power Factory.

## **OSNOVNI PODACI O MHE**

Test postrojenje je jednoagregatno, mala hidroelektrana je derivacionog tipa sa 1,2 km dugim derivacionim cevovodom od vodozahvata na reci do vodone komore u neposrednoj blizini mašinske hale i sa neto padom od 10,08m.

Tubina je tipa Kaplan vertikalne izvedbe, brzine obrtanja 772.5 ob/min i maksimalne snage 94 kW.

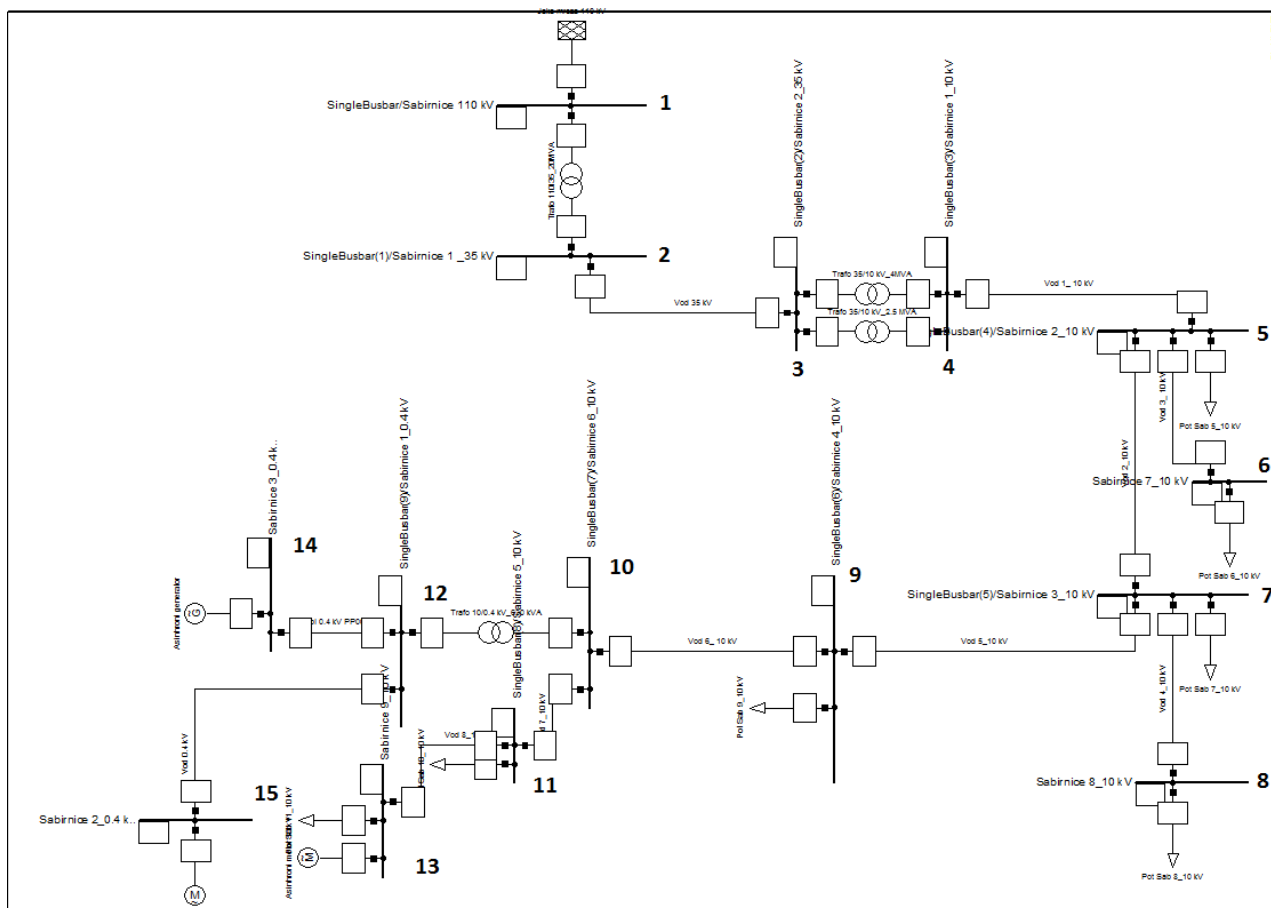
Za generator je izabrana asinhrona mašina nominalne brzine 759.5 ob/min, nominalne aktivne snage u generatorskom režimu rada od 94 kW, nazivnog napona 400 V, frekvencije 50 Hz, sa izvedenim poljem za kompenzaciju reaktivne energije.

Tačka priključenja MHE na elektroenergetski sistem je u transformatorskoj stanici TS 1 1x630 kVA, 10/0.4 kV. Mala hidroelektrana je fizički priključena na naponskom nivou od 0.42 kV.

Veza od mašinske hale do trafostanice je izvedena podzemnim kablovskim vodom, kablom tipa PP00/A 4x150mm<sup>2</sup> u ukupnoj dužini od 348m. Mala hidroelektrana je potpuno osposobljena da radi u automatskom režimu rada paralelno sa elektrodistributivnom mrežom sa instaliranom relejnom zaštitom svih vitalnih električnih parametara.

## **OPIS TEST MREŽE**

Analiza tranzijentne stabilnosti izvršena je na primeru test mreže, prikazane na slici 1.



Slika 1. Topologija test mreže

U ovoj analizi pretpostavljeno je da se napojne 110 kV sabirnice mogu smatrati kao kruta mreža. Iz ovog čvorišta se, preko TS 3 110/35 kV/kV i voda 35 kV napaja TS 2 35/10 kV/kV. TS 2 napaja i TS 1 10/0.42 kV/kV preko koje je MHE i priključena na ED mrežu. U TS 3 instaliran je jedan energetski transformator snage 20 MVA, u TS2 dva energetska transformatora snaga 4 MVA i 2.5 MVA, dok je u TS 1 instaliran jedan energetski transformator snage 630 kVA. Nadzemni vodovi 10 kV koji napajaju potrošačka područja su izvedeni provodnicima AlČ 70/12 mm<sup>2</sup>. Nadzemni vod 35 kV izveden je provodnicima AlČ 95/15 mm<sup>2</sup>.

Parametri elemenata razmatrane mreže dati su u nastavku (dužine vodova 35 kV i 10 kV date su tabeli 1):

- Vod 35 kV: pogonska otpornost  $R'(20^{\circ}\text{C})=0,306$  [ $\Omega/\text{km}$ ], pogonska reaktansa  $X'=0,357$  [ $\Omega/\text{km}$ ], nulta otpornost  $R'_0=0,456$  [ $\Omega/\text{km}$ ], nulta reaktansa  $X'_0=1,071$  [ $\Omega/\text{km}$ ].
- Vod 10 kV: pogonska otpornost  $R'(20^{\circ}\text{C})=0,413$  [ $\Omega/\text{km}$ ], pogonska reaktansa  $X'=0,323$  [ $\Omega/\text{km}$ ], nulta otpornost  $R'_0=0,563$  [ $\Omega/\text{km}$ ], nulta reaktansa  $X'_0=0,969$  [ $\Omega/\text{km}$ ].
- Transformator 110/35 kV/ kV, 20 MVA: naznačena prividna snaga  $S_n=20$  MVA, sprega YNyno, procentualni napon kratkog spoja  $u_k=11$  %.
- Transformator 35/10 kV/ kV, 4 MVA: naznačena prividna snaga  $S_n=4$  MVA, sprega Dyn5, procentualni napon kratkog spoja  $u_k=5$  %.
- Transformator 35/10 kV/ kV, 2.5 MVA: naznačena prividna snaga  $S_n=4$  MVA, sprega Dyn5, procentualni napon kratkog spoja  $u_k=4$  %.
- Asinhroni motor: naznačena snaga  $P_n = 20$  kW,  $\cos\varphi=0,85$ ,  $U_n=0.4$  kV sprega statorskih namotaja – trougao, jedan kavezni namotaj na rotoru.
- Asinhroni motor: naznačena snaga  $P_n = 100$  kW,  $\cos\varphi=0,8$ ,  $U_n=10$  kV sprega statorskih namotaja – trougao, jedan kavezni namotaj na rotoru.
- Potrošnja je modelovana konstantnom snagom. Podaci o potrošnji po čvorovima dati su u tabeli 2.

Tabela 1 Dužine nadzemnih vodova

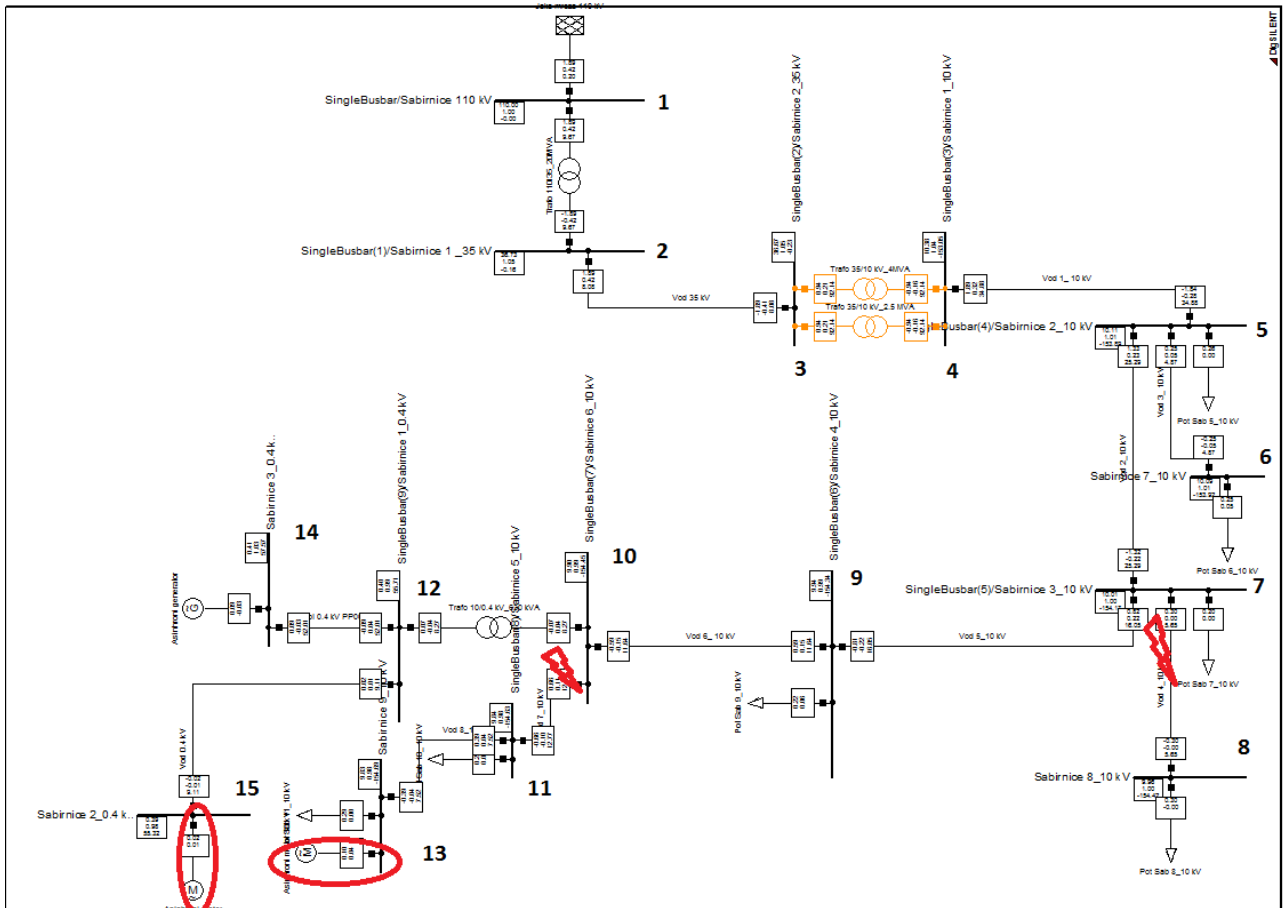
<b>Vod</b>	<b>Napon voda (km)</b>	<b>Dužina (km)</b>
Vod	35	3
Vod 1	10	3.212
Vod 2	10	1.514
Vod 3	10	1.154
Vod 4	10	4.466
Vod 5	10	1.676
Vod 6	10	1.534
Vod 7	10	1.734
Vod 8	10	1.585

Tabela 2 Potrošnje po čvorovima

<b>Broj čvora</b>	<b>Prividna snaga (kVA)</b>	<b>Faktor snage</b>
5	250	1,0
6	380	0,98
7	200	1,0
8	400	1,0
9	300	0,96
10	275	0,97
11	380	1,0
13	300	0,8
15	20	0,85

## **SIMULACIJE PROPADA NAPONA**

Propadi napona u distributivnoj mreži su najčešće izazvani direktnim priključenjem asinhronih motora velike snage ili udaljenim kvarovima (kratkim spojevima) u distributivnoj mreži [3]. U ovoj analizi simuliran je polazak asinhronog motora naponskog nivoa 0.4 kV koji je priključen na sabirnicama 15 i asinhronog motora koji je priključen na 10 kV sabirnice 13. U simulacijama su analizirani trofazni kratki spojevi, kao najkritičniji kvar u pogledu stabilnosti. Kao blizak kvar posmatra se kratak spoj na vodu 7, dok se kao udaljeni posmatra kratak spoj na vodu 4. Na slici 2. prikazan je model analizirane test mreže sa tokovima snaga u normalnom radnom režimu i naznačenim mestima na kojima je simuliran kratak spoj.



Slika 2. Proračun tokova snaga u analiziranoj test mreži

### Polazak asinhronog motora

Imajući u vidu da industrijski potrošači imaju značajan udeo u potrošnji u distributivnim mrežama kao i da startovanje asinhronih motora izaziva 5 – 7 puta veće struje od nominalnih, od posebnog je značaja ispitati tranzijentnu stabilnost MHE pri ovakvim poremećajima rada u mreži. Posmatraju se asinhroni motor priključen na sabirnice 13, nominalne snage 100 kW koji radi sa faktorom snage  $\cos\varphi=0.8$  i asinhroni motor u sabirnicama 15, nominalne snage 20 kW, nominalnog napona 0.4 kV koji radi sa faktorom snage  $\cos\varphi=0.85$ . Oba asinhrona motora se puštaju u trenutku  $t_{uklj}=0.5$  s. Trajanje simulacije je 5 s.

Na slici 3 prikazana je zavisnost napona na priključcima asinhronog generatora.

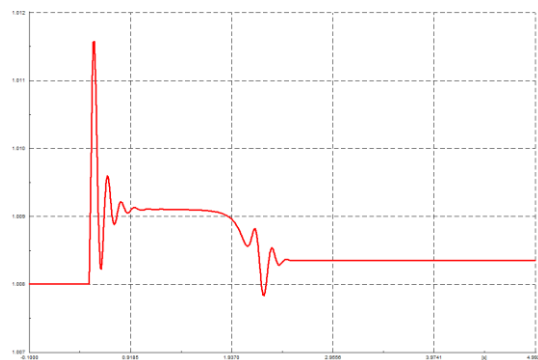


Slika 3. Vremenska zavisnost napona asinhronog generatora

U trenutku uključivanja napon generatora opao je za 10% u odnosu na radno stanje koje je prethodilo uključivanju asinhronih motora. Ovaj pad napona je posledica velikih polaznih struja motora. Smanjeni napon na priključcima generatora traje 1 s, nakon čega nastupa ponovo stacionarno stanje. Vrednost napona u novom stacionarnom stanju je nešto niža u odnosu na stacionarno stanje koje je prethodilo uključivanju motora. Na slici 4 i 5 prikazane se vremenske zavisnosti brzine i struje statorskog napona asinhronog generatora, respektivno.



Slika 4. Vremenska zavisnost struje asinhronog generatora



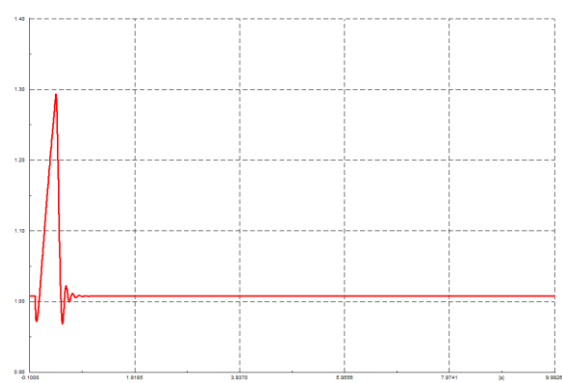
Slika 5. Vremenska zavisnost brzine asinhronog generatora

Posmatrajući ova dva grafika vidi se da uključivanje asinhronih motora izaziva vrlo male tranzijente u struji i brzini asinhronog generatora koji se posle 1 s prigušuju nakon čega nastupa stacionarno stanje u kojem generator ima neznatno veću brzinu zbog smanjenog prevalnog momenta kao posledice smanjenja napona u tački priključenja MHE.

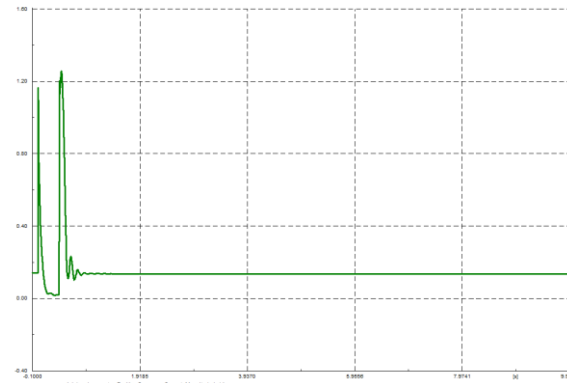
### Uticaj dubine i dužine trajanja propada napona na stabilnost hidroagregata

Simuliraju se dva trofazna kratka spoja, jedan na vodu 7, bliže sabirnicama 10 (kvar blizak MHE) i drugi na vodu 4, bliže sabirnicama 7 (kvar udaljen od MHE). Oba kvara simulirana su u trenutku  $t_k=0$ .

Blizak kvar se isključuje u trenutku  $t_{isk}=0.4$  s što je kritično vreme isključenja kvara u pogledu stabilnosti MHE. Za duže vreme trajanja kvara ima se veliki pobeg turbine i mašina ispada iz sinhronizma. Na slikama 6 i 7 prikazane su vremenske zavisnosti promene brzine i struje statora asinhronog generatora, respektivno.



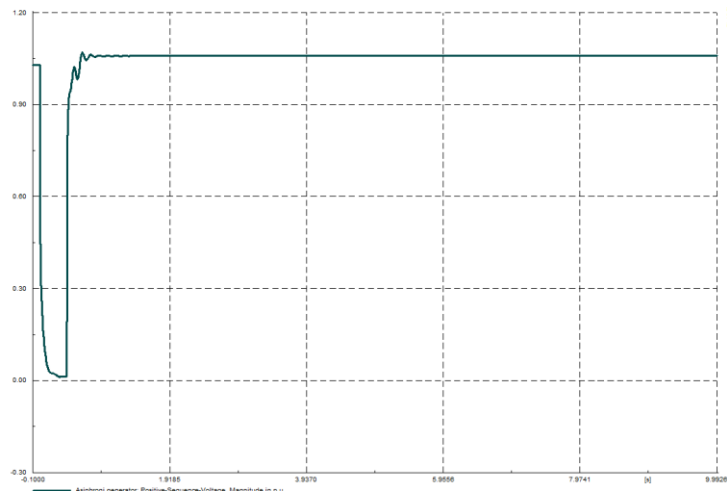
Slika 6. Vremenska zavisnost brzine asinhronog generatora



Slika 7. Vremenska zavisnost struje asinhronog generatora

U toku trajanja kvara brzina generatora se poveća za 30%. Nakon jedne oscilacije rotora, brzina asinhronog generatora se vraća na vrednost koja je prethodila režimu pre kvara i MHE ostaje u granicama stabilnog rada. Pri nastanku kvara struja u statorskim namotajima se povećala za 120% iz razloga što i MHE kao i ostali izvori u mreži napajaju mesto kvara. Odmah nakon isključenja kvara vrednost struje opada na vrednost u radnom režimu pre nastanka kvara.

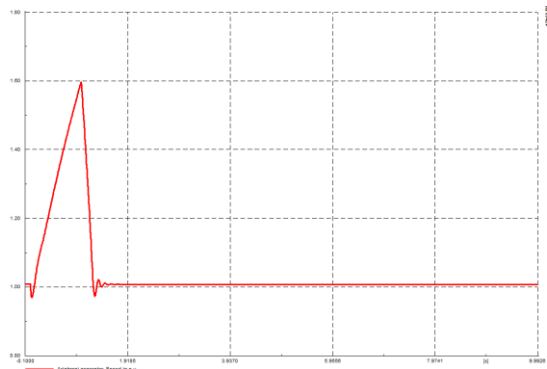
Na slici 8 data je vremenska zavisnost napona na priključcima asinhronog generatora.



Slika 8. Vremenska zavisnost napona asinhronog generatora

Imajući u vidu da je reč o kvaru bliskom MHE, jasno je da pri trofaznom kratkom spoju napon na sabirnicama MHE opada na vrednost približnu nuli. S obzirom da je trajanje poremećaja kratko, mašina uspeva da se izbori sa ovakvim poremećajem i ostane u granicama stabilnog rada.

Udaljen kvar se isključuje u trenutku  $t_{isk}=1$  s što je kritično vreme isključenja kvara u pogledu stabilnosti MHE. Na slikama 9 i 10 prikazane su vremenske zavisnosti promene brzine i struje statora asinhronog generatora, respektivno.



Slika 9. Vremenska zavisnost brzine asinhronog generatora



Slika 10. Vremenska zavisnost struje asinhronog generatora

S obzirom na duže vreme trajanja kvara u slučaju udaljenog kvara ima se veći porast brzine (za oko 60%). Ovaj porast ne dovodi do ispada iz sinhronizma jer je u slučaju udaljenog kvara napon na sabirnicama veći (otprilike 15% vrednosti napona koja je prethodila poremećaju). Grafik zavisnosti napona prikazan je na slici 11.

Struja asinhronog generatora u trenutku nastanka kvara sada je skočila za 80% jer je udeo asinhronog generatora u mestu napajanja kvara sada manji nego u slučaju bliskog kvara.



Slika 11. Vremenska zavisnost napona asinhronog generatora

Treba napomenuti da je u prethodnim analizama pretpostavljeno da je pogonski moment turbine konstantan tokom trajanja poremećaja. S obzirom na velike pobege turbine obično se moment značajno smanji, ali se na ovaj način išlo na stranu sigurnosti u proračunu tranzijentne stabilnosti.

## ZAKLJUČAK

Distributivna preduzeća (domaća i strana) nemaju jasno definisane propise u pogledu tranzijentne stabilnosti. Imajući u vidu sve veći udeo distribuiranih izvora u proizvodnji električne energije, pitanje tranzijentne stabilnosti postaje sve aktuelnije. S obzirom da na tranzijentnu stabilnost nekog distribuiranog izvora energije pored trajanja kvara koji je regulisan podešenjem relejne zaštite, veoma utiču i mesto kvara i konfiguracija same distributivne mreže, jako je teško postaviti precizne uslove u pogledu tranzijentne stabilnosti.

Iz prethodno rečenog može se doći do zaključka da je za svaku MHE neophodno izvršiti detaljnu analizu kako bi se doneli zaključci o ponašanju MHE tokom prelaznih procesa u analiziranoj distributivnoj mreži. Zajedničko za sve ove analize je vrsta kvara koja se analizira. Sa aspekta očuvanja sinhronizma, najkritičnija vrsta kvara je trofazni kratak spoj, jer se sva proizvedena energija koristi delom na ubrzanje zamajnih masa i delom za napajanje mesta kvara.

S obzirom da u našoj 35 kV mreži postoji APU, pored trofaznih kvarova od interesa je posmatrati i prolazne kvarove u ovoj mreži koji se elimišu kratkom beznaponskom pauzom.

Vremena trajanja kvara u našoj distributivnoj mreži definisana su sa aspekta termičkih i dinamičkih naprezanja opreme i ne podležu izmenama zbog ispunjenja uslova tranzijentne stabilnosti MHE. Jedan od načina da se doprinese stabilnosti distribuiranih izvora energije pri prelaznim procesima u distributivnoj mreži jeste pre svega adekvatan izbor mesta priključenja MHE, odnosno izgradnja priključnih vodova.

Puštanje asinhronih motora u blizini MHE dovodi do pojave tranzijenata u naponu, struji i brzini asinhronog generatora. Te promene nisu velikog inteziteta i prigušuju se nakon 1 s od puštanja industrijskih potrošača u pogon. Ovakvi prelazni procesi ne ugrožavaju tranzijentnu stabilnost MHE.

Poremećaji kao što su kvarovi u mreži mogu uticati na stabilnost MHE. Da li će MHE zadržati stabilan rad pri prolaznim kvarovima zavisi pre svega od pozicije kvara u mreži i njegovog trajanja. Bliski kvarovi čije eliminisanje ne dovodi do ostrvskog rada MHE mogu biti trajanja do 0.4 s. Kasnija isključenja dovode do ispada iz sinhronizma MHE.

Svi bliski kvarovi čije eliminisanje dovodi do ostrvskog rada MHE neminovno dovode do ispada MHE iz sinhronizma.

Udaljeni kvarovi mogu biti znatno dužeg trajanja jer pri ovakvim kvarovima napon na sabirnicama MHE ne pada na nulu pa mašina duže vreme može „podneti“ poremećaj a da ne ispane iz sinhronizma.

## LITERATURA

- [1] N. Rajaković, *Analiza elektroenergetskih sistema 2*, Beograd, 2008.
- [2] N. Rajaković, *Analiza elektroenergetskih sistema 1*, Beograd, 2002.

- [3] M.Tanasković, Ž. Đurišić: *Analiza tranzijentne stabilnosti male hidroelektrane pri propadima napona u priključnoj distributivnoj mreži*, CIGRE, Zlatibor 2017.
- [4] M.Tanasković, Ž. Đurišić: *Analiza tranzijentne stabilnosti male hidroelektrane*, Savetovanje Energetika, Zlatibor 2016.
- [5] M. Čalović, *Regulacija Elektroenergetskih sistema*, Beograd, 1997.
- [6] N. Rajaković, D. Tasić, *Distributivne i industrijske mreže*, Beograd, 2008.
- [7] V. Knazkins, *Stability of Power Systems with Large Amounts of Distribution Generation*, Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden 2004.
- [8] I. Loen, *Stability Analysis of Small Hydro Power Plants*, Norwegian University of Science and Technology, Master of Energy and Environmental Engineering, 2014.