

Dr.sc. M. Majstrović <sup>1</sup>  
D. Bajs <sup>2</sup>  
Mr.sc. R. Goić <sup>1</sup>  
Mr.sc. E. Sutlović <sup>1</sup>  
E. Mudnić <sup>3</sup>

## UTJECAJ MJESTA KRATKOG SPOJA NA PONAŠANJE REVITALIZIRANIH GENERATORA HE ZAKUČAC I GENERATORA HE ORLOVAC U TRANZIJENTNOM PERIODU

### SAŽETAK

Analiza stabilnosti elektroenergetskog sustava (EES-a) u tranzijentnom periodu jedna je od značajnijih analiza i radi se u svakom EES-u. Kod ove analize promatraju se brze promjene, kao posljedica uglavnom kratkih spojeva u mreži, koje izazivaju njihanja rotora generatora. Pojedina elektrana utječe na pomenutu stabilnost preko električnih i mehaničkih konstanti generatora i pogonskih strojeva te regulatora uzbude generatora i turbinskih regulatora. Ovo zajedno s postojećim električnim vezama između generatora (transformatori, vodovi ...) te određenim tipom poremećaja određuje da li će stabilnost sustava biti sačuvana. U ovom radu se analizira utjecaj mjesta kratkog spoja na ponašanje revitaliziranih generatora HE Zakučac i generatora HE Orlovac u tranzijentnom periodu.

**Ključne riječi:** stabilnost elektroenergetskog sustava, tranzijentni period, kratki spojevi u mreži

## INFLUENCE OF SHORT CIRCUIT LOCATION TO GENERATORS TRANSIENT STABILITY IN HYDROELECTRIC PLANTS ZAKUČAC AND ORLOVAC

### ABSTRACT

Power board planning departments study transient stability phenomena. Transient disturbance such as fault on transmission facilities causes a large excursion of generator rotor angles and power flows and bus voltages and other system variables. In this paper will be presented influence short circuit location to generators transient stability in hydroelectric plants Zakučac and Orlovac.

**Key words:** power system stability, transient stability, short circuit

### 1. UVOD

---

<sup>1</sup> Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split

<sup>2</sup> Energetski institut "H. Požar" Zagreb

<sup>3</sup> Fractal Split

U slučaju nastanka velikog poremećaja u visokonaponskoj mreži, poput kratkog spoja na nekom od vodova, može doći do gubitka sinkronizma jednog (ili više) generatora ovisno o mjestu nastanka i vremenu trajanja kvara. U vremenu od nekoliko desetinki sekunde koliko poremećaj traje, zbog neravnoteže mehaničkog momenta i električnog protumomenta generatora dolazi do ubrzavanja rotora posljedica čega je gubitak sinkronizma s ostalim generatorima i djelovanje zaštite koja ga isključuje s mreže. U tom slučaju kažemo da prijelazna (tranzijentna) stabilnost elektroenergetskog sustava nije očuvana. Budući da je većina kratkih spojeva u mreži prolaznog karaktera i uz ispravno podešenje odgovarajuće zaštite bezopasna po prijelaznu stabilnost sustava, ipak u nekim slučajevima može doći do ozbiljnih posljedica pa i one najveće - raspada sustava.

Električki bliske HE Zakučac i HE Orlovac direktno su povezane u 220 kV mreži vodom Zakučac-Konjsko pa su mogući kvarovi upravo na tom vodu posebno interesantni za analizu ponašanja okolnih generatora u tranzijentnom periodu. Radi toga su izvršeni proračuni prijelazne stabilnosti za konfiguraciju elektroenergetskog sustava Hrvatske u bližoj budućnosti ("nazivna 2000. godina") koja uz obnovu svih elemenata prijenosne mreže stradalih tijekom rata (bez značajnijih novih elemenata) pretpostavlja i revitalizaciju generatora iz prve etape gradnje HE Zakučac uz povećanje njihove instalirane snage na 2x161 MVA.

## **2. TROPOLNI KRATKI SPOJEVI NA VODU ZAKUČAC-KONJSKO UZ ISKLAPANJE KVARA DISTANTNOM ZAŠTITOM**

U proračunima su simulirani tropolni kratki spojevi na 220 kV vodu Zakučac-Konjsko. Slikama su prikazani kutevi njihanja rotora u vremenu (u odnosu na referentni sinkroni stroj u sustavu) koji ukazuju na gubitak ili očuvanje stabilnosti generatora prilikom određenog kvara. Referentni sinkroni stroj je programom definiran kao zamišljeni stroj koji rotira frekvencijom sustava.

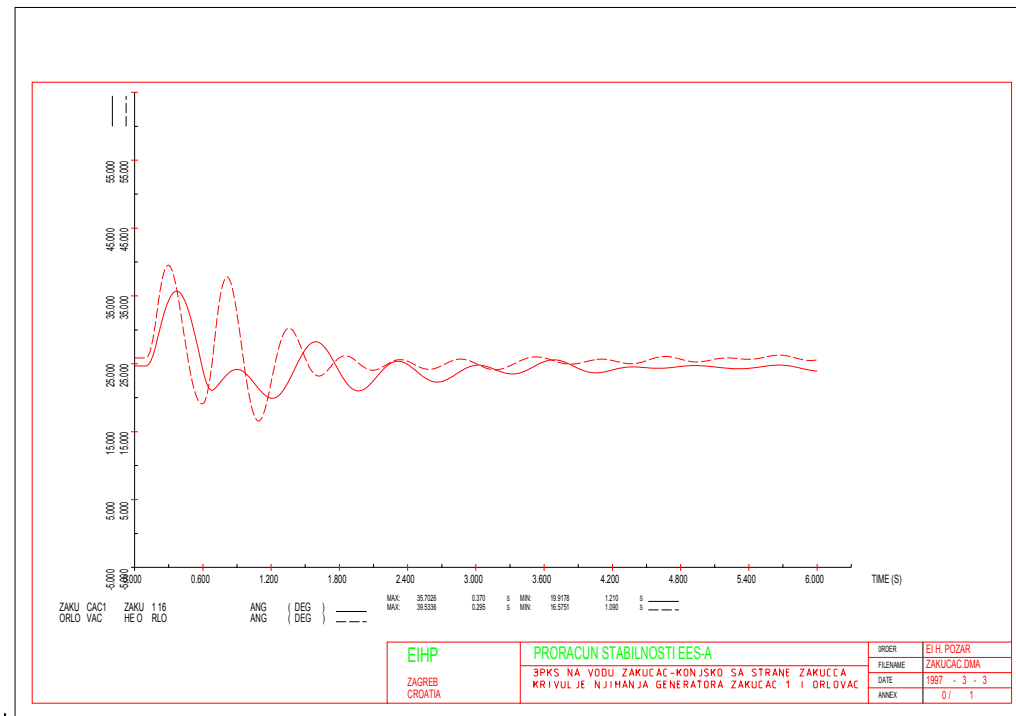
Bliske kvarove na vodovima u Dalmaciji zaštita isključuje u 1. stupnju, što znači da je vrijeme prorade zaštite i djelovanja prekidača maksimalno 80 - 100 ms (4 do 5 perioda). Nakon djelovanja zaštite primjenjuje se brzi tropolni APU (automatsko ponovno uklapanje) i to u razmaku od 400 ms. Pri proračunima stabilnosti sustava pretpostavljeno je da u tom trenutku kvar još traje, tako da zaštita djeluje još jednom, kao i APU, nakon čega je kvar otklonjen. Uz takvo podešenje zaštite generatori HE Zakučac i HE Orlovac zanjišu kod nastanka tropolnih kratkih spojeva na vodu Zakučac-Konjsko, ovisno da li se kvar desio sa strane Zakučca ili sa strane Konjskog, kako je prikazano slijedećim slikama.

## **3. GRANIČNE VRIJEDNOSTI KRITIČNIH VREMENA**

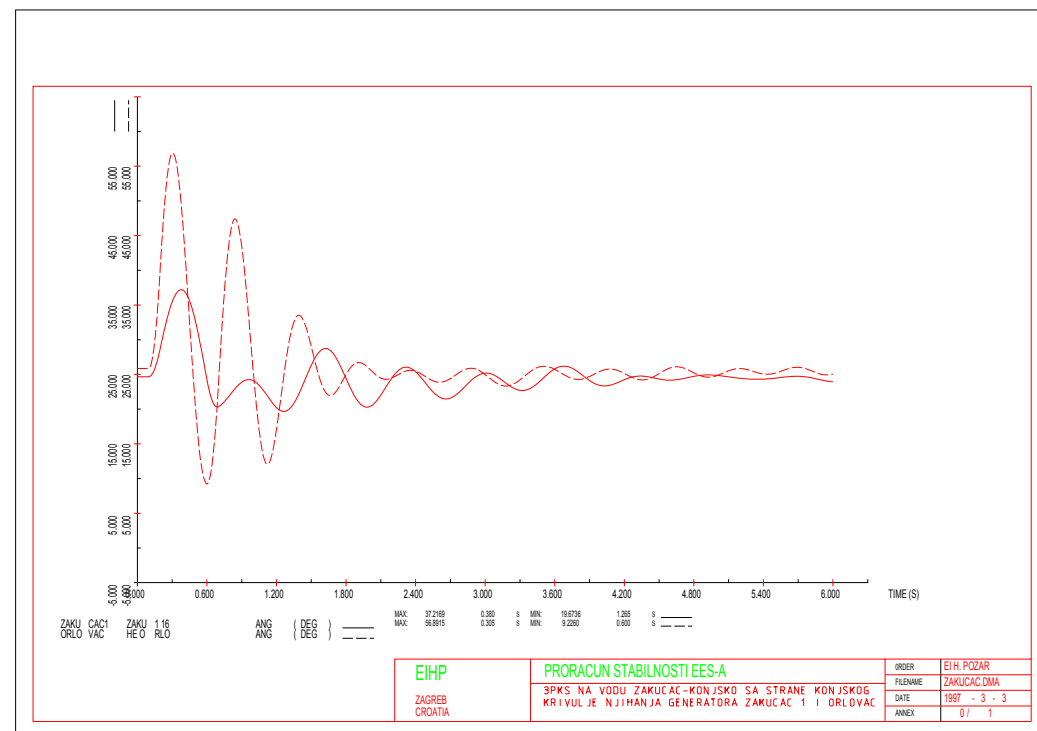
Granične vrijednosti kritičnih vremena su najduža vremena unutar kojih se mora otkloniti određeni kvar da bi generatori u elektroenergetskom sustavu zadržali stabilnost tokom prijelazne pojave, pa su stoga dobar pokazatelj poželjnog vremena djelovanja zaštite koja se primjenjuje. Očito je da otklanjanje kvara u kraćem vremenu garantira očuvanje stabilnosti generatora, pa je primjenom bržeg sustava zaštite moguće konstruirati generator s nepovoljnijim parametrima (kao što su manji  $mD^2$  ili veća  $X_d'$ ), s aspekta stabilnosti. Ukupno vrijeme otklanjanja kvara se sastoji od vremena djelovanja releja potrebnog da ustanovi nastanak kvara i slanja signala prekidačima, koji izoliraju elemenat u kvaru od ostatka sustava. To je u biti vrijeme proteklo od nastanka kvara do otvaranja kontakata i gašenja luka.

Primjena brze zaštite od kvarova na vodovima kojima su HE Zakučac i HE Orlovac spojene na elektroenergetski sustav, koja bliske kvarove isključuje u 1. stupnju nakon 80 do 100 ms (vrijeme djelovanja zaštite i prekidača), vrlo je povoljna na održanje sinkronizma generatora prilikom prijelaznih pojava. Na veliku rezervu do ispada generatora iz sinkronizma ukazuju granične vrijednosti kritičnih vremena iz tablica 1 i 2.

Pri predloženim parametrima generatora i za oba razmatrana sustava uzbude (statički sustav nezavisne uzbude i statički sustav samouzbude), generatori HE Zakučac zadržavaju stabilnost u svim slučajevima bliskih tropolnih i jednopolnih kratkih spojeva na vodovima, ukoliko se oni isključuju djelovanjem zaštite i prekidača u vremenu od najdulje 260 ms, dok generatori HE Orlovac zadržavaju stabilnost ukoliko se kvar isključi u vremenu manjem od 190 ms.



Slika 1. Krivulje njihanja generatora 1 HE Zakućac i generatora HE Orlovac u slučaju nastanka trolejnog kratkog spoja na vodu Zakućac-Konjsko sa strane Zakućca



Slika 2. Krivulje njihanja generatora 1 HE Zakućac i generatora HE Orlovac u slučaju nastanka trolejnog kratkog spoja na vodu Zakućac-Konjsko sa strane Konjskog

Tablica 1. Granične vrijednosti kritičnih vremena za bliske kratke spojeve na vodovima iz HE Zakučac (ms)

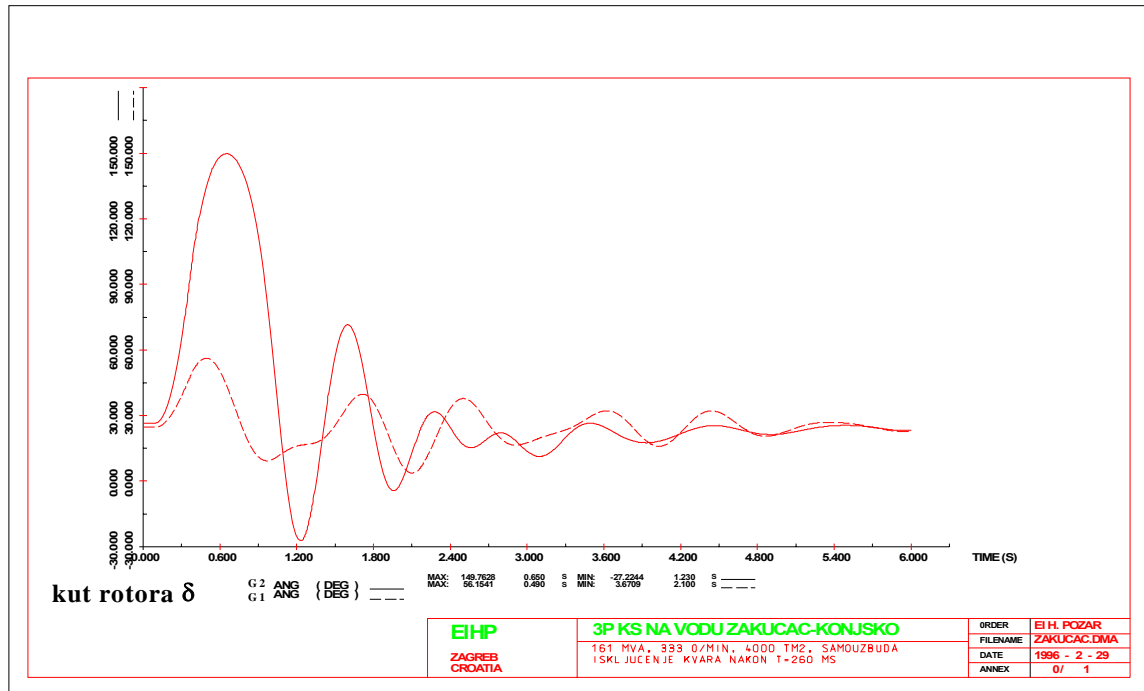
VOD PREMA	redni broj	TROPOLNI KRATKI SPOJEVI		JEDNOPOLNI KRATKI SPOJEVI	
		nezavisna uzbuda	samouzbuda	nezavisna uzbuda	samouzbuda
<b>MOSTAR</b>	1	265	260	315	310
<b>KONJSKO</b>	1	265	260	310	310
<b>BILICE</b>	1	270	265	310	310
<b>DUGI RAT</b>	1	270	265	295	290
	2	270	265	295	290
<b>KRALJEVAC</b>	1	270	265	295	290
	2	270	265	295	290
<b>METERIZE</b>	1	265	260	295	290
	2	265	260	295	290
	3	270	260	295	290

Tablica 2. Granične vrijednosti kritičnih vremena za bliske kratke spojeve na vodovima iz HE Orlovac (ms)

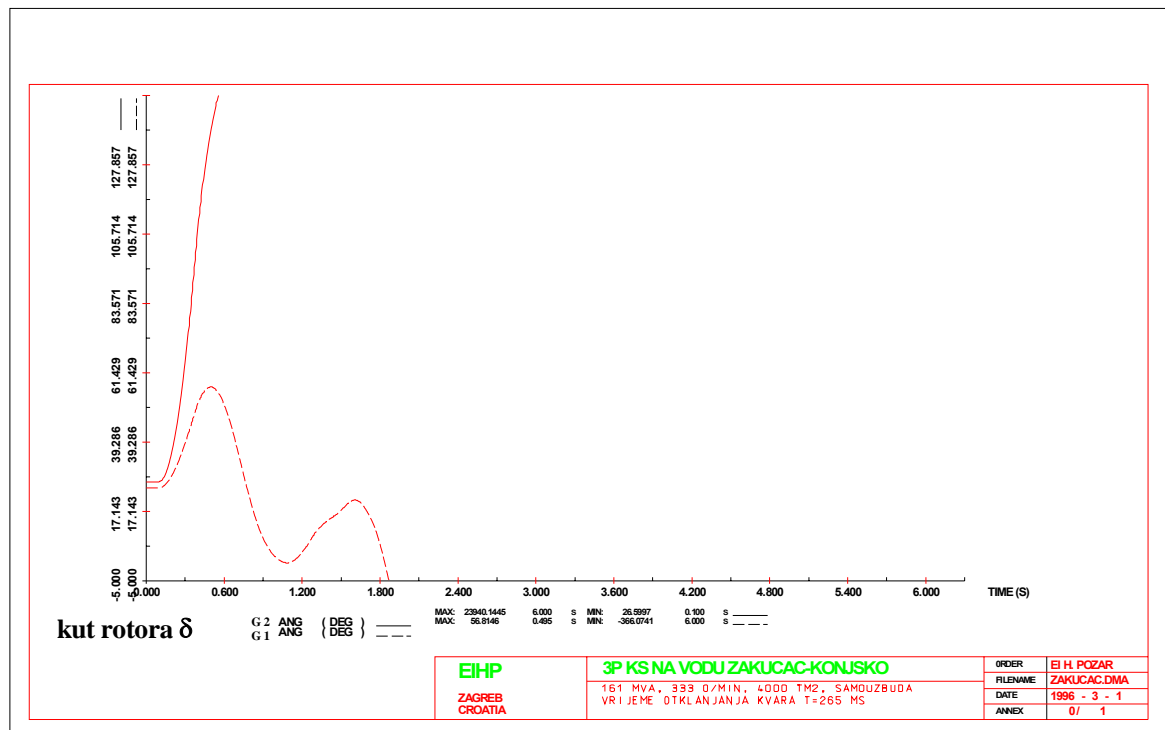
VOD PREMA	redni broj	$T_k$ (ms)
<b>KONJSKO</b>	1	190
	2	190

Radi ilustracije slike 3 i 4 prikazuju ponašanje generatora prilikom tropolnog kratkog spoja na vodu Zakučac-Konjsko u neposrednoj blizini sabirnice 220 kV HE Zakučac, uz primjenjeni sustav samouzbude na revitaliziranim generatorima HE Zakučac, i vremenima otklanjanja kvara  $T_z=260$  ms i  $T_z=265$  ms. Vidljivo je da u prvom slučaju generatori HE Zakučac ostaju u sinkronizmu nakon što u prvom njihaju dostignu kut opterećenja od  $150^\circ$  u odnosu na referentni stroj u sustavu, dok je u drugom slučaju stabilnost nepovratno izgubljena.

Gore navedene granične vrijednosti kritičnih vremena odnose se na kratke spojeve na vodovima u neposrednoj blizini sabirnice HE Zakučac ili sabirnice HE Orlovac, kao najnepovoljniji slučajevi za ispad njihovih generatora iz sinkronizma. Kritična vremena za bliske tropolne kratke spojeve na vodu Zakučac-Konjsko (sa strane Zakučca) iznose  $T_k=265$  ms za sustav nezavisne uzbude, i  $T_k=260$  ms za sustav samouzbude na generatorima 1 i 2 što znači da svi generatori HE Zakučac ostaju u sinkronizmu, a sustav ostaje stabilan ukoliko je vrijeme otklanjanja kvara manje od 260 ms. U slučaju nastanka udaljenih kratkih spojeva na krajevima vodova iz HE Zakučac kritične su vrijednosti graničnih vremena znatno dulje, pa će stoga generatori teže ispasti iz sinkronizma. U slučaju nastanka tropolnog kratkog spoja na vodu Zakučac-Konjsko sa strane TS Konjsko, generatori 2 i 3 HE Zakučac će izgubiti stabilnost ukoliko kvar nije otklonjen u vremenu od najviše 350 ms, no u znatno kraćem će vremenu iz sinkronizma ispasti generatori HE Orlovac, pa će stoga prijelazna stabilnost toga dijela elektroenergetskog sustava biti ugrožena. Vrijeme trajanja kvara unutar kojega generatori HE Orlovac gube stabilnost iznosi 210 ms, što je ilustrirano slikom 5 koja prikazuje krivulje njihanja generatora HE Orlovac, te generatora 1 i 2 HE Zakučac, u odnosu na generator HE Senj.



Slika 3. Krivulje njihanja generatora 1 i 2 HE Zakućac u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Zakućac-Konjsko i vrijeme otklanjanja kvara  $T_z=260$  ms

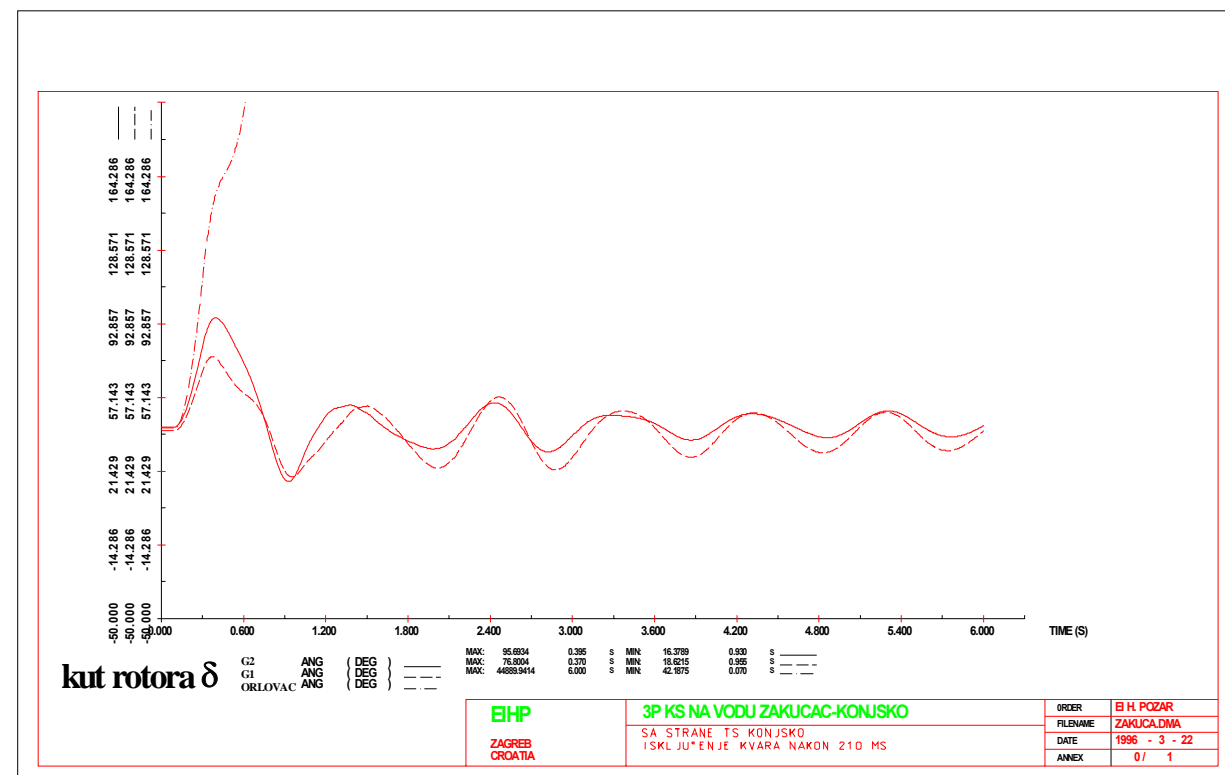


Slika 4. Krivulje njihanja generatora 1 i 2 u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Zakućac-Konjsko i vrijeme otklanjanja kvara  $T_z=265$  ms

U slučaju isključenja opisanog kvara u vremenu od 210 ms generatori HE Orlovac ispadaju iz sinkronizma, no svi generatori HE Zakučac održavaju sinkronizam i nastavljaju normalno raditi na elektroenergetski sustav.

Tablica 3. Granične vrijednosti kritičnih vremena za udaljene tropolne kratke spojeve na vodovima iz HE Zakučac (ms)

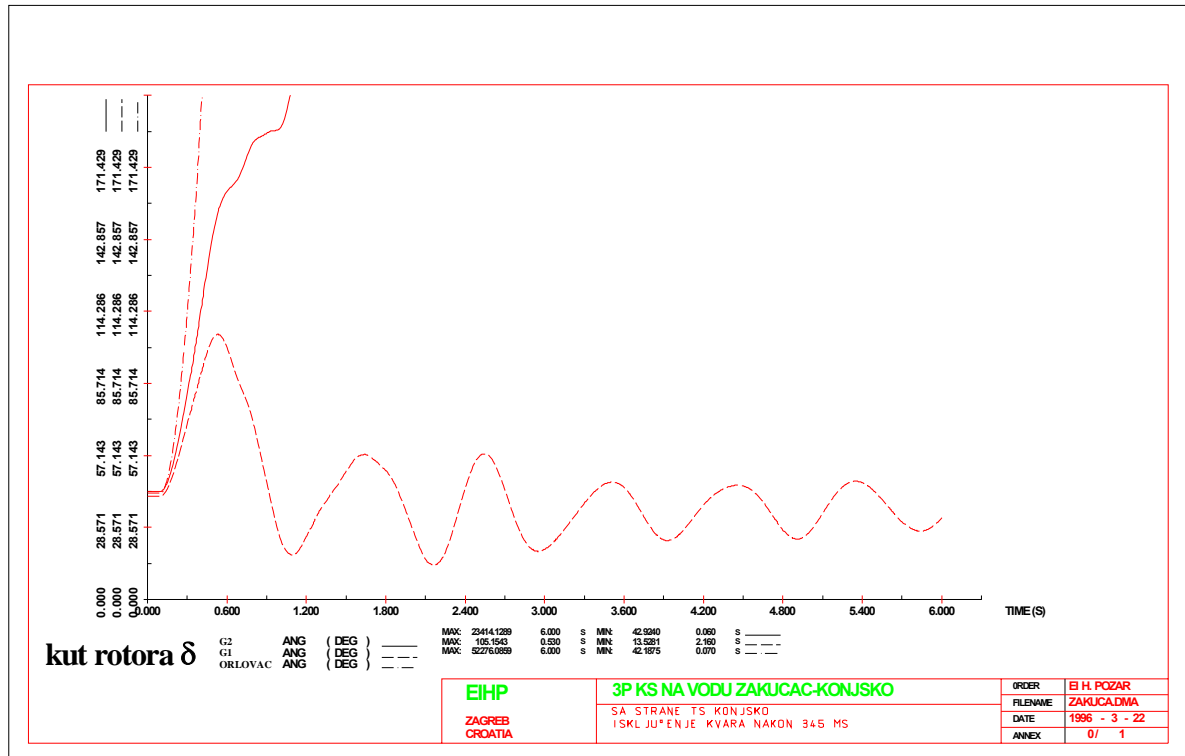
VOD PREMA	red. br.	nezavisna uzbuda	samouzbuđa
<b>MOSTAR</b>	1	-	-
<b>KONJSKO</b>	1	340	340
<b>BILICE</b>	1	-	-
<b>DUGI RAT</b>	1	355	350
	2	350	345
<b>KRALJEVAC</b>	1	510	505
	2	510	505
<b>METERIZE</b>	1	410	410
	2	410	410
	3	410	410



Slika 5. Krivulje njihanja generatora 1 i 2 HE Zakučac, i generatora HE Orlovac u slučaju trofaznog kratkog spoja neposredno uz sabirnice 220 kV TS Konjsko, otklonjenog u vremenu od 210 ms

No u slučaju isključenja kvara u vremenu dužem od 345 ms, uz generatore HE Orlovac doći će do ispada iz sinkronizma generatora 2 i 3 HE Zakučac, što će rezultirati gubitkom značajne snage (500 MW) u sustavu, sa svim posljedicama u pogonu koje iz toga proizlaze.

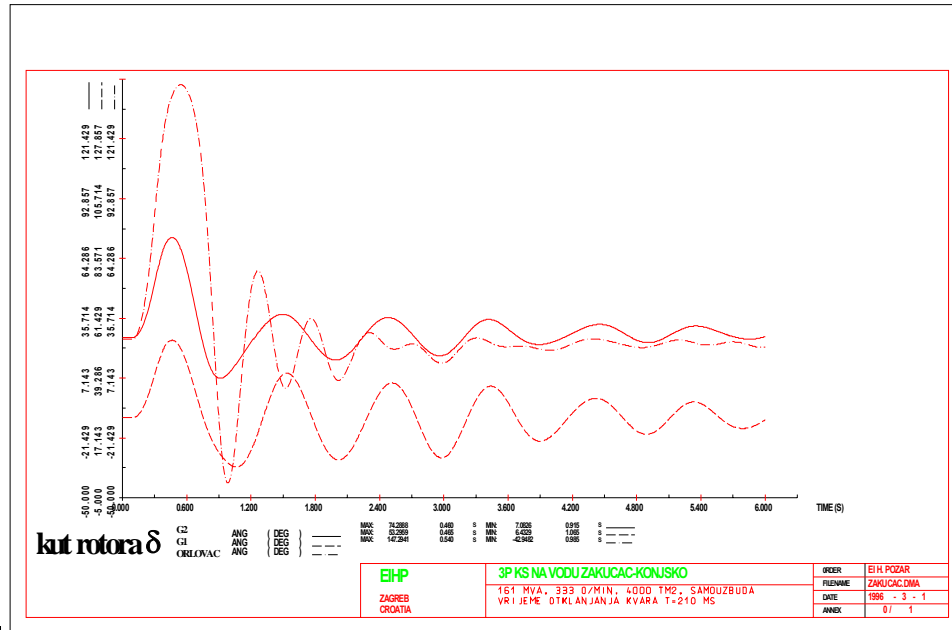
Treba napomenuti da su ova razmatranja samo teoretska budući da bi prije ispada generatora HE Orlovac iz sinkronizma vod Zakučac-Konjsko bio izoliran djelovanjem zaštite nakon najviše 100 ms, ali su korisna radi sagledavanja ukupnih prilika tokom većih poremećaja u elektroenergetskom sustavu na području Dalmacije, kao i ponašanja generatora HE Zakučac u slučaju ispada iz sinkronizma generatora susjedne HE Orlovac.



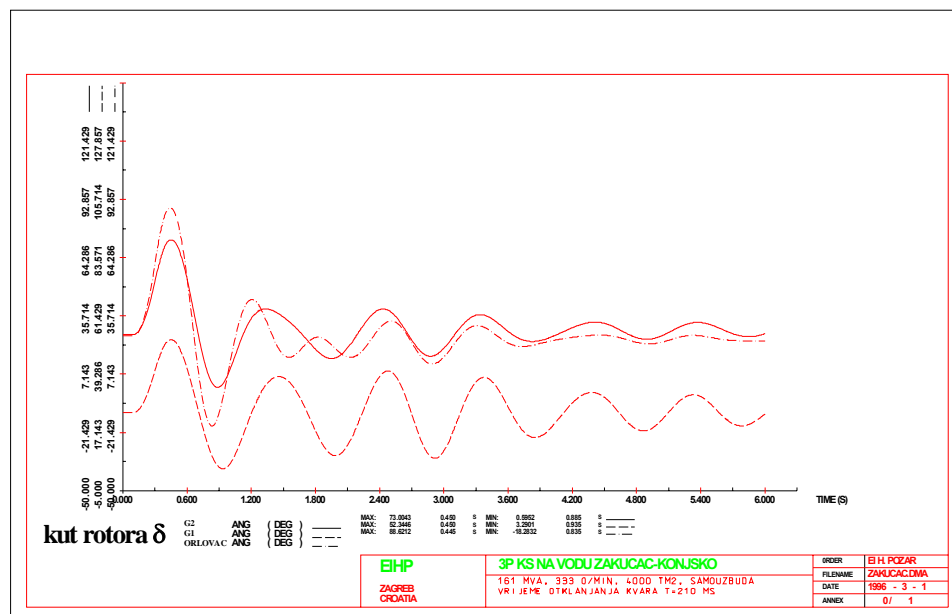
Slika 6. Krivulje nihanja generatora 1 i 2 HE Zakučac, i generatora HE Orlovac u slučaju tropolnog kratkog spoja neposredno uz sabirnice 220 kV TS Konjsko, otklonjenog u vremenu od 345 ms

Lošije karakteristike HE Orlovac obzirom na povećanje prijelazne stabilnosti sustava, vezane su uz zastarjeli elektrostrojni sustav uzbude tipa AMP 12-15HK, i premalu vrijednost  $mD^2$  koja iznosi  $630 \text{ tm}^2$ , što ilustriraju slike 7 i 8 koje pokazuju ponašanje sustava pri istom slučaju i vremenu otklanjanja kvara od 210 ms, ali uz pretpostavljeni revitalizirani sustav uzbude generatora HE Orlovac, identičan ispitivanome sustavu samouzbuđenja na generatorima 1 i 2 u HE Zakučac i istim  $mD^2$ , a u drugom slučaju povećanim na  $1000 \text{ tm}^2$ .

Iz slika je vidljivo da zamjenom sustava uzbude postizemo očuvanje stabilnosti svih generatora u opisanoj situaciji, pri čemu rotori generatora HE Orlovac zanjišu do vrlo visokih vrijednosti što ukazuje na malu "rezervu" do ispada iz sinkronizma, a da tek i povećanjem veličine  $mD^2$  uz istu brzinu vrtnje  $n=500 \text{ min}^{-1}$  postizemo zadovoljavajuće karakteristike generatora pri nastanku opisanih prijelaznih pojava u mreži.



Slika 7. Krivulje nihanja generatora 1 i 2 HE Zakučac, i generatora HE Orlovac u slučaju trofaznog kratkog spoja neposredno uz sabirnice 220 kV TS Konjsko, otklonjenog u vremenu od 210 ms, uz pretpostavku primjene sustava samouzbuđivanja na generatorima HE Orlovac i istim  $mD^2=630 \text{ tm}^2$



Slika 8. Krivulje nihanja generatora 1 i 2 HE Zakučac, i generatora HE Orlovac u slučaju trofaznog kratkog spoja neposredno uz sabirnice 220 kV TS Konjsko, otklonjenog u vremenu od 210 ms, uz pretpostavku primjene sustava samouzbuđivanja na generatorima HE Orlovac i povećanim  $mD^2=1000 \text{ tm}^2$

#### 4. ZAKLJUČAK

Analize prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava zbog kvarova na vodu Zakučac-Konjsko pokazuju da ona nije ugrožena uz djelovanje postojeće zaštite, ali da je rezerva prijelazne stabilnosti, nakon revitalizacije generatora iz prve faze HE Zakučac, bitno smanjena radi premale vrijednosti  $mD^2$  agregata i zastarjelog elektrostrojnog sustava uzbude generatora HE Orlovac. Radi toga su granične vrijednosti kritičnih vremena ovisno o mjestu nastanka kvara na razmatranom vodu bitno različite i kreću se od 210 ms za kratki spoj sa strane Konjskog do 260 ms za kratki spoj sa strane Zakučca. Provedena razmatranja ukazuju na moguću potrebu revitalizacije i HE Orlovac (s aspekta povećanja prijelazne stabilnosti sustava) barem kroz zamjenu zastarjelih sustava uzbude generatora modernijim statičkim tiristorskim sustavima.

#### LITERATURA

1. Dr. M. Majstrovic, Mr. E. Sutlović, D. Bajš, R. Goić, E. Mudnić, ANALIZA I ODREĐIVANJE PARAMETARA REVITALIZIRANIH AGREGATA 1 I 2 HE ZAKUČAC I REVITALIZIRANIH AGREGATA HE PERUČA S OBZIROM NA ZAHTJEVE EES-a, Energetski Institut "Hrvoje Požar", Zagreb, 1996.
2. IDEJNI PROJEKT REVITALIZACIJE SINKRONIH GENERATORA, SUSTAVA UZBUDE, BLOK TRANSFORMATORA I VN KABELA U HE ZAKUČAC, KONČAR Institut za elektrotehniku, Zagreb, travanj 1995.
3. POSCOLAB, ABB High Voltage Technologies, Zurich, 1995.
4. TOKSwin, Fractal Split, 1995.

#### PITANJE ZA DISKUSIJU

- Da li se u EES-u Hrvatske sustavno analiziraju kritična vremena u funkciji mjesta kvara?
- Da li su izrađeni odn. da li postoje zahtjevi sa strane EES Hrvatske glede izbora parametara generatora u elektranama u odnosu na prijelaznu stabilnost?