

# STATIČKA ANALIZA PRIKLJUČKA NOVIH GENERATORA HE ZAKUČAC NA EES

Mr. sc. Davor BAJŠ - prof. dr. sc. Mislav MAJSTROVIĆ - mr. sc. Goran MAJSTROVIĆ, Zagreb

UDK 621.316.72:517.1  
PRETHODNO PRIOPĆENJE

U članku se opisuju rezultati statičkih analiza (izmjenični tokovi snaga, analize sigurnosti prema  $n-1$  kriteriju) priključka generatora HE Zakučac na EES (prijenosnu mrežu) nakon rekonstrukcije, modernizacije i obnove hidroelektrane koja se priprema. Analize su provedene u više mogućih varijanti priključka generatora HE Zakučac na pojedine naponske razine (220 kV i 110 kV). Rješenje priključka promatrano je s aspekta sigurnosti plasmana proizvodnje u mrežu te mogućnosti sudjelovanja generatora u usluzi regulacije jalove snage i napona.

**Ključne riječi:** analize sigurnosti, regulacija jalove snage i napona, rekonstrukcija, statičke analize

## 1 UVOD

Izvedena koncepcija vodoprivrednog i energetskeg iskorištenja šireg sliva rijeke Cetine rezultirala je izgradnjom nekoliko značajnih višenamjenskih proizvodnih objekata i postrojenja te pripadnih akumulacijskih jezera u vodotoku rijeke Cetine za potrebe EES-a Hrvatske [1]. Najznačajnija od njih svakako je HE Zakučac u kojoj se iskorištava najveći dio energetskeg potencijala rijeke Cetine. Preostali energetskeg potencijal iskorištava se u HE Peruča, HE Orlovac, RHE Buško Blato, HE Đale i HE Kraljevac.

Budući da je gradnja navedenih hidroelektrana ostvarena u razdoblju između 1912. godine (HE Kraljevac) i 1989. godine (HE Đale) neka postrojenja nužno je rekonstruirati, modernizirati i obnoviti. Trenutačno se rekonstruiraju, moderniziraju i obnavljaju HE Peruča i HE Zakučac. HE Zakučac će nakon obnove biti opremljena predvidivo s četiri generatora 135 MW (ukupno 540 MW), a HE Peruča s dva generatora 30,6 MW (ukupno 61,2 MW) [2].

Hidroelektrane na Cetini su priključene na elektroenergetski sustav RH dalekovodima 220 kV i 110 kV naponske razine. Njihova proizvodnja (snaga i energija) ovisna je o raspoloživosti vode i potrebama elektroenergetskog sustava. Radne točke agregata u hidroelektranama trebaju biti definirane tako da se postigne optimalno iskorištavanje raspoložive vode u razmatranom vremenskom horizontu.

Na osnovi dispečerskih iskustava može se konstatirati da priključak pojedinih hidroelektrana (Zakučac, Đale) u pojedinim mogućim pogonskim stanjima ne omogućava

siguran plasman ukupne snage (proizvodnje) hidroelektrane. Glavni uzrok tomu su promijenjene elektroenergetske okolnosti u odnosu na stanje kada je priključak izveden (HE Zakučac), ali i sama koncepcija priključka (HE Đale).

U nastavku se opisuje postojeće rješenje priključka HE Zakučac na EES (prijenosnu mrežu), model EES-a na kojemu su obavljena ispitivanja tokova snaga i ( $n-1$ ) sigurnosti, varijante proračuna, rezultati ispitivanja, određuju se potrebna pojačanja mreže i uspoređuju procijenjene investicije u mrežu nužne za siguran plasman proizvodnje HE Zakučac.

## 2 POSTOJEĆE RJEŠENJE PRIKLJUČKA HE ZAKUČAC NA EES

HE Zakučac se trenutačno sastoji od četiri glavne proizvodne jedinice ukupne nazivne snage glavnih generatora 540 MVA. Nazivna snaga dva agregata iznosi 2x120 MVA (HE Zakučac 1), a preostala dva 2x150 MVA (HE Zakučac 2). Instalirana djelatna snaga generatora grupe 2x120 MVA iznosi 2x108 MW, a grupe 2x150 MVA iznosi 2x135 MW, što daje ukupnu instaliranu djelatnu snagu hidroelektrane od 486 MW. Nazivni faktor snage svih generatora iznosi  $\cos \varphi = 0,9$ .

Dva su generatora, po jedan iz svake grupe agregata (120 MVA + 150 MVA), priključena na 110 kV naponsku razinu, a preostala dva agregata na 220 kV naponsku razinu (slika 1). Nazivni napon svih generatora iznosi 16 kV, a sa sabirnicama 110 kV, odnosno 220 kV povezani su blok transformatorima prijenosnih omjera 16/121 kV i 16/242

Tablica 1 - Osnovni podaci prikljuckih dalekovoda HE Zakučac

Dalekovod	Duljina (km)	Materijal i presjek vodiča	Nazivna (termička) struja (A)*	Godina izgradnje
<b>220 kV</b>				
HE Zakučac – TS Konjsko	24,8	Al/Č 360/57 mm <sup>2</sup>	800 (720 A <sup>***</sup> )	1961.
HE Zakučac – TS Bilice	75	Al/Č 360/57 mm <sup>2</sup>	800 (780 A <sup>***</sup> )	1961.
HE Zakučac – TS Mostar	99,3	Al/Č 360/57 mm <sup>2</sup>	800 (780 A <sup>***</sup> )	1957.
<b>110 kV</b>				
HE Zakučac – TS Meterize 1**	20	Al/Č 240/40 mm <sup>2</sup>	645	1985.
HE Zakučac – TS Meterize 2**	20	Al/Č 240/40 mm <sup>2</sup>	645	1985.
HE Zakučac – TS Meterize 3	18,5	Al/Č 150/25 mm <sup>2</sup>	400	1957.
HE Zakučac – TS Dugi Rat 1	5,2	Cu 95 mm <sup>2</sup> Al/Č 150/25 mm <sup>2</sup> Al/Č 240/40 mm <sup>2</sup>	380	1961./80./89.
HE Zakučac – TS Dugi Rat 2	5	Al/Č 240/40 mm <sup>2</sup>	645	1971.
HE Zakučac – TS Kraljevac 1**	14,9	Al/Č 240/40 mm <sup>2</sup>	645	1990.
HE Zakučac – TS Kraljevac 2**	14,9	Al/Č 240/40 mm <sup>2</sup>	645	1990.

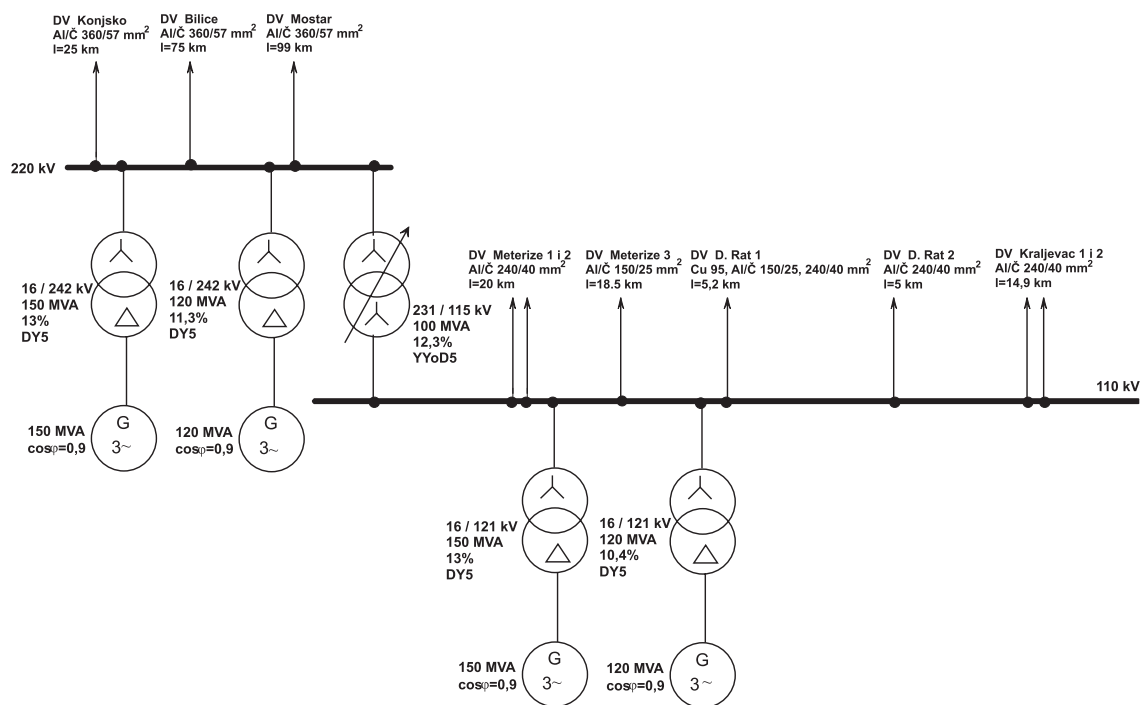
\* podaci PrP Split

\*\* trojka dvosistemskog voda

\*\*\* prema aktualnom podešenju zaštite

kV. Blok transformatori nisu izvedeni kao regulacijski, odnosno ne postoji mogućnost promjene prijenosnog omjera blok transformatora. Dozvoljena odstupanja napona generatora kreću se u rasponu  $-5\% U_n$  do  $+10\% U_n$  za sve generatore. Između sabirnica 220 kV i 110 kV nalazi se mrežni transformator (tri jednofazna transformatora snage  $3 \times 33,3$  MVA) ukupne snage 100 MVA. Prijenosni omjer mrežnog transformatora u HE Zakučac iznosi 231/115/10,5

kV, uz mogućnost automatske regulacije prijenosnog omjera s  $\pm 12$  regulacijskih stupnjeva i 1,35 %-nu promjenu napona po svakom regulacijskom stupnju (ukupan opseg regulacije iznosi  $\pm 16,2\%$ ). Regulacijska preklapka se nalazi na 110 kV strani. U praksi se ne koristi automatska regulacija, a preklapka je blokirana u srednjem položaju (231/115 kV).



Slika 1 - Osnovna jednopolna shema postrojenja HE Zakučac

Postrojenje 220 kV povezano je s ostatkom EES-a preko tri dalekovoda (Konjsko, Bilice, Mostar) duljina 25 km, 75 km te 99 km redom. Svi vodiči izvedeni su od Al/Č 360/57 mm<sup>2</sup> dozvoljene maksimalne struje u normalnom pogonu  $I_{max} = 720$  do 800 A (prema podešenju zaštite). Izuzev dva generatorska polja te spojnog i mjernog polja, postrojenje se sastoji još od sedam 220 kV polja od kojih su četiri polja rezervna. Osnovne podatke priključnih 220 kV dalekovoda HE Zakućac prikazuje tablica 1.

Postrojenje 110 kV povezano je s ostatkom EES-a preko sedam dalekovoda (Meterize – dva DV, Dugi Rat – dva DV, Kraljevac) dužina 20/18,5 km, 5 km te 15 km redom, od kojih su dva dalekovoda (Meterize, Kraljevac) dvosistemska. Većina priključnih DV 110 kV izvedeno je vodičima standardnog presjeka Al/Č 240/40 mm<sup>2</sup>, dozvoljene maksimalne struje u normalnom pogonu  $I_{max} = 645$  A, osim jednosistemske voda prema TS Metrice (Al/Č 150/25 mm<sup>2</sup>,  $I_{max} = 400$  A) i dionice jednog voda prema TS Dugi Rat (Cu 95 mm<sup>2</sup>, Al/Č 150/25 mm<sup>2</sup>,  $I_{max} = 380$  A). Izuzev dva generatorska polja te spojnog i mjernog polja, postrojenje se sastoji još od osam 110 kV polja od kojih je jedno polje rezervno.

Dozvoljena termička struja za određeni tip i presjek vodiča definira se za temperaturu okoline od +40 °C, kao najveća dozvoljena struja koja trajno može teći vodom, a da budu zadovoljeni sigurnosni propisi o dozvoljenom provjesu vodiča i ne budu ugroženi vodiči prekomjernim zagrijavanjem. Stvarno zagrijavanje vodiča i njegov provjes ovise i o klimatskim uvjetima (temperatura okoline, smjer i brzina vjetera, i dr.) i stanju vodiča (dosadašnji pogon, napreznja zbog leda i dr.) pa se u svijetu sve više koristi postupak dinamičkog određivanja termičke struje, odnosno prijenosne moći, kao vremenski promjenljive maksimalne struje koja trajno može teći kroz vodič. Osim toga potrebno je istaknuti da se pri prolazu struje veće od maksimalno dozvoljene trajne vrijednosti vodič neće odmah zagrijati iznad maksimalno dozvoljene temperature, pa se često definira i maksimalna struja koja kratkotrajno može preopteretiti vodič, najčešće u rasponu do 0,5 do 2 h. Kratkotrajno dozvoljena maksimalna struja veća je za 10 % - 20 % u odnosu na termičke vrijednosti. U HOPS-

u se koristi samo jedna vrijednost ( $I_{max}$ ,  $I_t$ ) za dozvoljena trajna opterećenja voda bez obzira na temperaturu okoline, klimatske uvjete i trasu vodiča, pa se u provedenim analizama poštvao taj princip.

Statističku neraspoloživost (h/godišnje) i vjerojatnost ispada (%/godišnje) priključnih dalekovoda HE Zakućac prikazuju tablice 2 i 3, a ukupan broj zastoja tih vodova (1/godišnje) tablica 4 [3]. Podaci navedeni u tablici 2 odnose se na prisilne i planirane zastoje pa je vjerojatnost ispada veća nego što bi bila da se promatraju samo prisilni zastoji što je slučaj prikazan u tablici 3.

Ukupna prosječna neraspoloživost u razdoblju od 1995. do 2001. priključnih 220 kV vodova HE Zakućac kretala se između 4,4 % (Zakućac – Konjsko) do 5,1 % (Zakućac – Mostar i Zakućac – Bilice). Ukupna prosječna neraspoloživost tih vodova radi prisilnih zastoja (slučajni ispadi) iznosila je između 0,8 % (Zakućac – Konjsko i Zakućac – Bilice) te 1,4 % (Zakućac – Mostar). Ukupna prosječna neraspoloživost u razdoblju od 1995. do 2001. priključnih 110 kV vodova HE Zakućac kretala se između 0,4 % (Zakućac – Kraljevac 1) do 2,2 % (Zakućac – Meterize 3). Ukupna prosječna neraspoloživost tih vodova radi prisilnih zastoja (slučajni ispadi) iznosila je između 0 % (Zakućac – Kraljevac) te 1,4 % (Zakućac – Meterize 3). Osim ukupnog vremena unutar koje je neki vod neraspoloživ, važan podatak za ocjenu pouzdanosti voda je i broj njegovih ispada. Općenito možemo zaključiti da pouzdanost priključnih vodova svih HE na Cetini karakteriziraju mala vremena neraspoloživosti vodova, ali povećani broj ispada (starost, nepovoljni klimatski uvjeti).

Promatrajući podatke iz tablica 2 do 4 možemo primijetiti generalno visoku raspoloživost priključnih 220 kV i 110 kV vodova HE Zakućac s obzirom na prisilne zastoje, promatrano u 6-godišnjem razdoblju do 2001. godine, ali relativno veliki prosječni broj ispada godišnje. Planirani zastoji pri tom nisu od presudnog značenja budući da će se takvi zastoji planirati onda kada se ne predviđa visok angažman relevantne hidroelektrane pa neće doći do preljeva vode radi nemogućnosti mreže da preuzme proizvodnju hidroelektrane.

Tablica 2 - Neraspoloživost priključnih vodova HE Zakućac radi prisilnih i planiranih zastoja

	NERASPOLOŽIVOST VODOVA RADI PRISILNIH ZASTOJA														
	2001.		2000.		1999.		1998.		1997.		1996.		1995.		%/god.
220 kV	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	
Zakućac-Mostar	69,7	0,8	28,80	0,3	16,0	0,2	0,2	0,0	80,8	0,9	86,6	1,0	554,9	6,3	1,4
Zakućac-Bilice	82,9	0,9	59,00	0,7	50,3	0,6	13,5	0,2	21	0,2	0,6	0,0	273,1	3,1	0,8
Zakućac-Konjsko	73,3	0,8	80,40	0,9	7,5	0,1	0	0,0	2,2	0,0	0	0,0	329,6	3,8	0,8
Orlovac-Konjsko 1	0,3	0,0	7,10	0,1	11,9	0,1	5,8	0,1	0,4	0,0	76	0,9	1,3	0,0	0,2
Orlovac-Konjsko 2	28,3	0,3	31,40	0,4	7,0	0,1	7,5	0,1	0,3	0,0	2,4	0,0	1,2	0,0	0,1
110 kV															
Zakućac-Meterize 1	58,7	0,7	39,2	0,4	8,3	0,1	0	0,0	0,1	0,0	0,8	0,0	148,1	1,7	0,4
Zakućac-Meterize 2	34,4	0,4	39	0,4	10,6	0,1	0,1	0,0	4,9	0,1	0	0,0	0,6	0,0	0,1
Zakućac-Meterize 3	166,4	1,9	87,7	1,0	247,7	2,8	0,1	0,0	145,3	1,7	18,3	0,2	173,8	2,0	1,4
Zakućac-D. Rat 1	8,3	0,1	25,4	0,3	0,1	0,0	0,6	0,0	0,1	0,0	0	0,0	2,6	0,0	0,1
Zakućac-D. Rat 2	26,7	0,3	62,9	0,7	0,0	0,0	0,5	0,0	0,3	0,0	0	0,0	1,7	0,0	0,2
Zakućac-Kraljevac 1	1,7	0,0	0,3	0,0	0,6	0,0	0	0,0	0,3	0,0	0	0,0	0,9	0,0	0,0
Zakućac-Kraljevac 2	0,0	0,0	336,6	3,8	0,6	0,0	0	0,0	0,1	0,0	0	0,0	1,3	0,0	0,6

Tablica 3 - Neraspoloživost priključnih vodova HE Zakućac radi prisilnih zastoja

NERASPOLOŽIVOST VODOVA RADI PRISILNIH I PLANIRANIH ZASTOJA															
	2001.		2000.		1999.		1998.		1997.		1996.		1995.		PROSJEK
220 kV	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	%/god.
Zakućac-Mostar	82,4	0,9	109,6	1,3	39,90	0,5	43,7	0,5	209	2,4	2069	23,6	554,9	6,3	5,1
Zakućac-Bilice	90,4	1,0	368,9	4,2	89,10	1,0	18,6	0,2	53	0,6	2097,9	23,9	404,3	4,6	5,1
Zakućac-Konjsko	117,1	1,3	148,3	1,7	14,9	0,2	32,7	0,4	32,4	0,4	2033,2	23,2	333,4	3,8	4,4
Orlovac-Konjsko 1	13,1	0,1	257,9	2,9	238,6	2,7	91,6	1,0	266	3,0	81,8	0,9	709,1	8,1	2,7
Orlovac-Konjsko 2	38,8	0,4	280,7	3,2	172,7	2,0	780,1	8,9	266	3,0	10,3	0,1	37,8	0,4	2,6
110 kV	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	h/god	%/kom god	%/god.
Zakućac-Meterize 1	188,4	2,2	85,1	1,0	39,3	0,4	16	0,2	292,9	3,3	23,4	0,3	346,7	4,0	1,6
Zakućac-Meterize 2	151,9	1,7	108,1	1,2	96,7	1,1	12,4	0,1	142,4	1,6	24,9	0,3	65	0,7	1,0
Zakućac-Meterize 3	196,1	2,2	173,1	2,0	293,3	3,3	4,8	0,1	349,6	4,0	60,3	0,7	266,1	3,0	2,2
Zakućac-D. Rat 1	239,2	2,7	80,2	0,9	6,3	0,1	15,6	0,2	78,8	0,9	45,3	0,5	49,6	0,6	0,8
Zakućac-D. Rat 2	42,5	0,5	165,4	1,9	11,6	0,1	7,3	0,1	110,8	1,3	39,4	0,4	90,8	1,0	0,8
Zakućac-Kraljevac 1	21,1	0,2	64,6	0,7	5,5	0,1	4,3	0,0	109,6	1,3	43,7	0,5	22,9	0,3	0,4
Zakućac-Kraljevac 2	3,0	0,0	410,7	4,7	4,4	0,1	38,4	0,4	193,7	2,2	53,6	0,6	12,6	0,1	1,2

Tablica 4 - Ukupan broj prisilnih i planiranih zastoja priključnih vodova HE Zakućac

UKUPAN BROJ PRISILNIH I PLANIRANIH ZASTOJA VODOVA											
	2001.		2000.		1999.		1998.		1995.		PROSJEK
220 kV	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	
Zakućac-Mostar	14	32	25	16	21	10	6	18			
Zakućac-Bilice	19	18	15	15	9	14	17	15			
Zakućac-Konjsko	15	12	3	8	11	4	10	9			
Orlovac-Konjsko 1	5	7	12	9	3	4	7	7			
Orlovac-Konjsko 2	4	9	11	10	3	4	5	7			
110 kV	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	l/god	
Zakućac-Meterize 1	21	21	12	6	9	4	12	12			
Zakućac-Meterize 2	17	22	18	6	9	4	12	13			
Zakućac-Meterize 3	20	28	18	5	16	10	21	17			
Zakućac-D. Rat 1	5	13	4	5	7	5	15	8			
Zakućac-D. Rat 2	10	15	2	6	4	5	13	8			
Zakućac-Kraljevac 1	13	9	7	3	4	4	8	7			
Zakućac-Kraljevac 2	2	12	7	4	6	6	7	6			

U tablici 1 navedene su godine ulaska u pogon priključnih vodova HE Zakućac. Prema [4] očekivana životna dob električkih komponenti nadzemnih vodova iznosi  $46 \pm 15$  godina. U odnosu na očekivanu životnu dob električkih komponenti primjećujemo da je vodu 220 kV Zakućac – Mostar 2003. godine istekla očekivana životna dob, isto kao i 110 kV vodu Zakućac – Meterize 3. Korelacija između starosti voda i prosječne nerasploživosti vidljiva je iz tablica 2 i 3 budući da upravo ovi vodovi imaju najveće nerasploživosti radi prisilnih i planiranih zastoja. U 2007. godini očekivana životna dob istječe vodovima 220 kV Zakućac – Bilice i Zakućac – Konjsko te vodu 110 kV Zakućac – D. Rat. Bitan vod za plasman proizvodnje HE Zakućac je i DV 2x110 kV Meterize – Vrboran sagrađen 1969. godine (istek očekivane životne dobi 2015. godine).

Transformator 220/110 kV u HE Zakućac pušten je u pogon 1961. godine pa uz očekivanu životnu dob od 42 godine [4] možemo izračunati da se 2003. godine i on nalazio na kraju očekivane životne dobi.

Iako je prosječna raspoloživost svih priključnih dalekovoda HE Zakućac u razdoblju od 1995. do 2001. godine bila relativno visoka, možemo očekivati povećanu nerasploživost vodova kojima istječe ili se nalaze blizu očekivane životne dobi (svi 220 kV vodovi, DV 110 kV Zakućac – Meterize, DV 110 kV Zakućac – Dugi Rat 1).

Tijekom 2001. godine u HEP – Direkcija za prijenos sastavljeno je izvješće o stanju VN postrojenja u njihovoj nadležnosti [5]. Objekti prijenosne mreže, kandidati za zamjene i rekonstrukcije (ZiR), svrstani su u tri grupe prioriteta (P1, P2 i P3) pri čemu grupa P1 predstavlja objekte s visokom (trenutnom) potrebom ulaganja u zamjene i rekonstrukcije. U svezi s priključnim dalekovodima HE Zakućac procijenjeno je slijedeće:

- DV 110 kV Zakućac – Meterize 3 svrstan je u najvišu grupu prioriteta za ZiR (P1) s procjenom ukupnog ulaganja u zamjene stupova i vodiča u iznosu od 700 000 €.
- DV 220 kV Zakućac – Mostar, DV 220 kV Zakućac – Bilice i DV 220 kV Zakućac – Konjsko svrstani su u srednju grupu prioriteta (P2) s potrebom ulaganja 863 000 € u zamjenu zaštitnog užeta i vodiča na DV Zakućac
- Mostar, 350 000 € u zamjenu porculanskih izolatora na vodu Zakućac – Bilice te 50 000 € u zamjenu porculanskih izolatora na vodu Zakućac – Konjsko.
- DV 110 kV Zakućac – Dugi Rat 1, DV 2x110 kV Zakućac – Meterize i DV 2x110 kV Zakućac – Kraljevac svrstani su u srednju grupu prioriteta (P2) za ZiR sa ulaganjima u iznosu od 313 000 € u zamjene zaštitnog užeta, vodiča i porculanskih izolatora na vodu prema Dugom Ratu, 125 000 € u zamjene zaštitnog užeta i vodiča na vodu prema Meterizama, te isti iznos u istu svrhu za vod prema Kraljevcu.

Osim priključnih vodova u istom je izvješću sagledano i stanje obližnjih postrojenja 110 kV. Potreba potpune rekonstrukcije sabirničkih sustava 110 kV (bitnih za plasman proizvodnje HE Zakućac) predviđena je u slučajevima TS 110/35 kV Kraljevac (izgrađena 1955. godine) i TS 110/35 kV Meterize (izgrađena 1955. godine), dok je za 110 kV sabirnički sustav TS 110/35 kV Dugi Rat (izgrađen 1955. godine) napomenuta potreba rekonstrukcije jednog dijela postrojenja (preostali dio je rekonstruiran 2000. godine).

### 3 MODEL EES RH I SUSJEDNIH SUSTAVA

#### 3.1 Postavljanje modela i verifikacija

EES Hrvatske u baznom pogonskom stanju modeliran je u PSS/E formatu, kao dio cjelokupne mreže UCTE. Model se sastoji od 400 kV, 220 kV i 110 kV vodova i transformatora koji povezuju različite naponske razine. Elektrane su modelirane kao grupe generatora i blok transformatora, pri čemu su generatorske sabirnice modelirane kao PV čvorovi. Tereti su modelirani na 110 kV naponskoj razini, a čvorovi tereta modelirani su kao čvorovi konstantne snage ( $PQ$  čvorovi).

Detaljno modelirana prijenosna mreža Hrvatske elektroprivrede smještena je unutar sveobuhvatnog modela cijelog UCTE sustava od Portugala do Grčke s naponskim razinama 400 kV i 220 kV. Cjelokupni model UCTE-a korišten u ovoj analizi sastoji se od 3 276 sabirnica, 4 885 grana, 822 agregata i 1 641 opterećenja. Modelirane su 23 europske države ukupnog djelatnog opterećenja 277 588 MW. Mreža većeg dijela UCTE sustava modelirana je prema službenim podacima i godišnjim izvješćima UCTE-a.

Postavljanje i verifikacija modela EES-a Hrvatske izvršeni su s obzirom na zabilježeno pogonsko stanje (bazno stanje) karakteristično po maksimalnom opterećenju EES-a za studeni 2002. godine. Prema podacima iz HOPS-a, preuzetim iz programskog sustava DAM (Dispečerska analiza mreža), maksimalno opterećenje u studenom 2002. godine odnosi se na datum 8. 11. u 17<sup>30</sup> h. Ukupno opterećenje EES-a tada je iznosilo 2 259 MW u sumarnom izvješću, odnosno 2 241 MW kao suma opterećenja čvorova u proračunu tokova snaga. Bilanca EES-a Hrvatske u promatranom stanju 2002-11-08 bila je sljedeća:

Proizvodnja	2 098 MW
Opterećenje	2 259 MW
Gubici	36 MW
Uvoz	99 MW

Razmjene sa susjednim sustavima bile su kako slijedi:

UCTE		BiH	
Uvoz	865 MW	Uvoz	193 MW
Izvoz	789 MW	Izvoz	70 MW
Razmjena	76 MW	Razmjena	123 MW

U razmatranom pogonskom stanju u pogonu je bio jedan agregat HE Zakućac 1 i davao je 82 MW u mrežu. Oba agregata HE Zakućac 2 bila su angažirana s ukupno 214 MW (96 MW + 118 MW). HE Orlovac je davala 146 MW, HE Peruća 19 MW, HE Đale 23 MW a HE Kraljevac 2 MW. Ukupan angažman HE na Cetini iznosio je 486 MW. EES Hrvatske nije preuzimao proizvodnju NE Krško.

Verifikacija modela izvršena je usporedbom rezultata proračuna tokova snaga na modelu za studeni 2002. godine i rezultata tokova snaga za 2002-11-08T17:30 (DAM). Najveća se odstupanja tokova djelatne snage kreću u granicama do 27 MW na interkonektivnim vodovima (DV 400 kV Melina – Divača), odnosno u granicama do

24 MW na internim 400 kV vodovima (Melina – RHE Velebit), do 7 MW na internim 220 kV vodovima (Mraclin – Sisak, Melina – Pehlin 1), te do oko 6 MW na 110 kV vodovima. Najveća odstupanja tokova djelatne snage kroz transformatore 400/x i 220/x kV kreću se u granicama do 14 MW (TS 400/110 kV RHE Velebit). Razlike između estimiranih i izračunatih vrijednosti napona kreću se u granicama do 4 kV u 400 kV mreži (RHE Velebit) te do 1 kV u 110 kV mreži.

Na osnovi usporedbe tokova snaga ocijenjeno je da model zadovoljava za obavljanje analiza čiji su rezultati opisani u nastavku. Svi modeli na kojima se dalje obavljaju analize izvedeni su iz opisanog modela.

#### 3.2 Varijante proračuna

Proračuni su izvršeni za više varijanti stanja EES-a Hrvatske s obzirom na:

- Promatrani vremenski presjek*  
2010. godina (novi agregati u HE Zakućac i HE Peruća).
- Opterećenje EES-a*
  - visoka zimska opterećenja ( $P_{\max \text{ zima}}$ ),
  - niska zimska opterećenja ( $P_{\min \text{ zima}}$ ),
  - visoka ljetna opterećenja ( $P_{\max \text{ ljeto}}$ ),
  - niska ljetna opterećenja ( $P_{\min \text{ ljeto}}$ ),
- Angažman HE na Cetini*
  - karakterističan angažman u stanju ekstremno vlažne hidrologije,
  - maksimalan angažman svih HE na Cetini,
  - maksimalan angažman HE Zakućac u odnosu na angažman zadan pod 3a.
- Priključak generatora HE Zakućac nakon rekonstrukcije*
  - dva generatora priključena na 220 kV, dva generatora na 110 kV naponsku razinu,
  - tri generatora priključena na 220 kV, jedan generator na 110 kV naponsku razinu,
  - sva četiri generatora priključena na 220 kV naponsku razinu.

Daljnje varijante proračuna vezane su za raspoloživost pojedinih grana EES-a (posebno priključnih vodova HE Zakućac). S obzirom na raspoloživost grana EES-a razmatraju se sljedeća stanja:

- sve grane prijenosne mreže raspoložive ( $n$ )
- jedna grana mreže neraspoloživa ( $n-1$ )

Nadalje je pretpostavljeno sljedeće:

Vršno opterećenje za 2010. godinu nastupa zimi i iznosi 3 171 MW [6].

- razina niskog zimskog opterećenja u 2010. godini iznosi 60 % maksimalnog zimskog opterećenja,
- razina visokog ljetnog opterećenja u 2010. godini iznosi 90 % maksimalnog zimskog opterećenja,
- razina niskog ljetnog opterećenja u 2010. godini iznosi 40 % maksimalnog zimskog opterećenja.

Angažmani HE na Cetini za razmatrane varijante proračuna prikazani su tablicama 5 i 6. Inicijalno stanje odnosi

se na karakterističan angažman pri ekstremno vlažnoj hidrologiji.

Pretpostavka autora je da se ukupna snaga hidroelektrana na Cetini, ovisno o njihovom angažmanu, raspoređuje na pojedine agregate kako je prikazano tablicama 7 i 8. U tablicama se također nalaze podaci o maksimalnoj (naduzbuda) i minimalnoj (poduzbuda) jalovoj snazi koju svaki pojedinačni agregat može dati za zadanu razinu djelatne snage pri nominalnom naponu na generatorskim sabirnicama, a prema pogonskim kartama generatora. Tamo gdje je to poznato modelirana su aktualna podešenja limitera poduzbude (HE Zakućac 2, HE Peruća, HE Đale, HE Kraljevac). Maksimalna jalova snaga u naduzbudi pri maksimalnoj djelatnoj snazi generatora ograničena je na iznose do  $0,9 Q_{\max}$  budući da se strojevi u praksi nikada ne opterećuju prividnom snagom.

**Tablica 5** - Angažman HE na Cetini u inicijalnom stanju i maksimalan angažman 2010. godine

HE	Angažman (MW)	
	Inicijalno	Maksimalno
Peruća	35	61,2
Orlovac	210	237
Zakućac	430	540
Kraljevac	17	41,6
Đale	35	40,8
<b>UKUPNO</b>	<b>727</b>	<b>920,6</b>

**Tablica 6** - Pojedinačan maksimalan angažman HE na Cetini 2010. godine

HE	Angažman (MW)				
	1	2	3	4	5
Peruća	61,2	35	35	35	35
Orlovac	210	237	210	210	210
Zakućac	430	430	540	430	430
Kraljevac	17	17	17	41,6	17
Đale	35	35	35	35	40,8
<b>UKUPNO</b>	<b>753,2</b>	<b>754</b>	<b>837</b>	<b>751,6</b>	<b>732,8</b>

**Tablica 7** - Raspodjela ukupne snage hidroelektrana na Cetini na pojedine agregate i granice angažmana jalove snage za inicijalan angažman 2010. godine (727 MW ukupno)

HE	Generator	P (MW)	$Q_{\max}$ (Mvar)	$Q_{\min}$ (Mvar)
Peruća 35 MW	g1 (34 MVA)	17,5	20	-25
	g2 (34 MVA)	17,5	20	-25
Orlovac 210 MW	g1 (83 MVA)	70	30	-40
	g2 (83 MVA)	70	30	-40
	g3 (83 MVA)	70	30	-40
Zakućac 110 215 MW	g1 (170MVA)	107,5	119	-127
	g3 (150MVA)	107,5	77	-18
Zakućac 220 215 MW	g2 (170 MVA)	107,5	119	-127
	g4 (150 MVA)	107,5	77	-18
Kraljevac 17 MW	g1 (26 MVA)	17	16	0
	g2 (26 MVA)	0	-	-
Đale 35 MW	g1 (24 MVA)	17,5	13	-6
	g2 (24 MVA)	17,5	13	-6

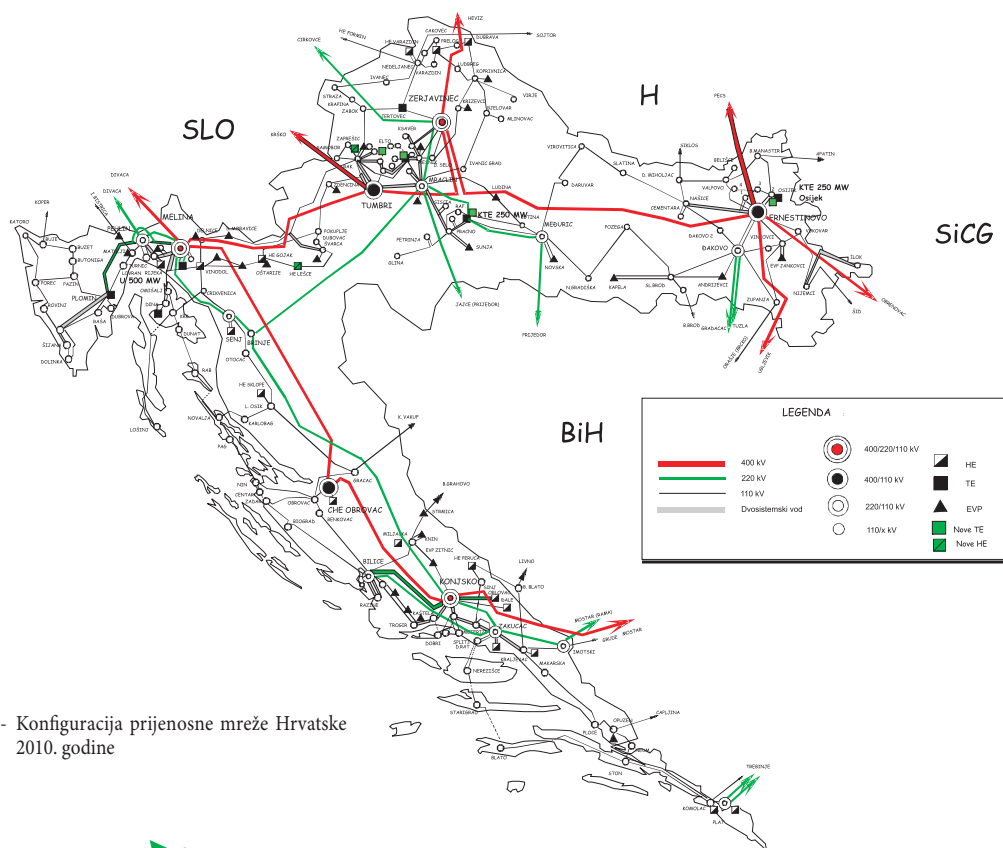
**Tablica 8** - Raspodjela ukupne snage hidroelektrana na Cetini na pojedine agregate i granice angažmana jalove snage za maksimalan angažman 2010. (920,6 MW ukupno)

HE	Generator	P (MW)	$Q_{\max}$ (Mvar)	$Q_{\min}$ (Mvar)
Peruća 35 MW	g1 (34 MVA)	30,6	13	-13
	g2 (34 MVA)	30,6	13	-13
Orlovac 210 MW	g1 (83 MVA)	79	23	-22
	g2 (83 MVA)	79	23	-22
	g3 (83 MVA)	79	23	-22
Zakućac 110 215 MW	g1 (170MVA)	135	99	-92
	g3 (150MVA)	135	59	-18
Zakućac 220 215 MW	g2 (170 MVA)	135	99	-92
	g4 (150 MVA)	135	59	-18
Kraljevac 17 MW	g1 (26 MVA)	20,8	14	0
	g2 (26 MVA)	20,8	14	0
Đale 35 MW	g1 (24 MVA)	20,4	11	-6
	g2 (24 MVA)	20,4	11	-6

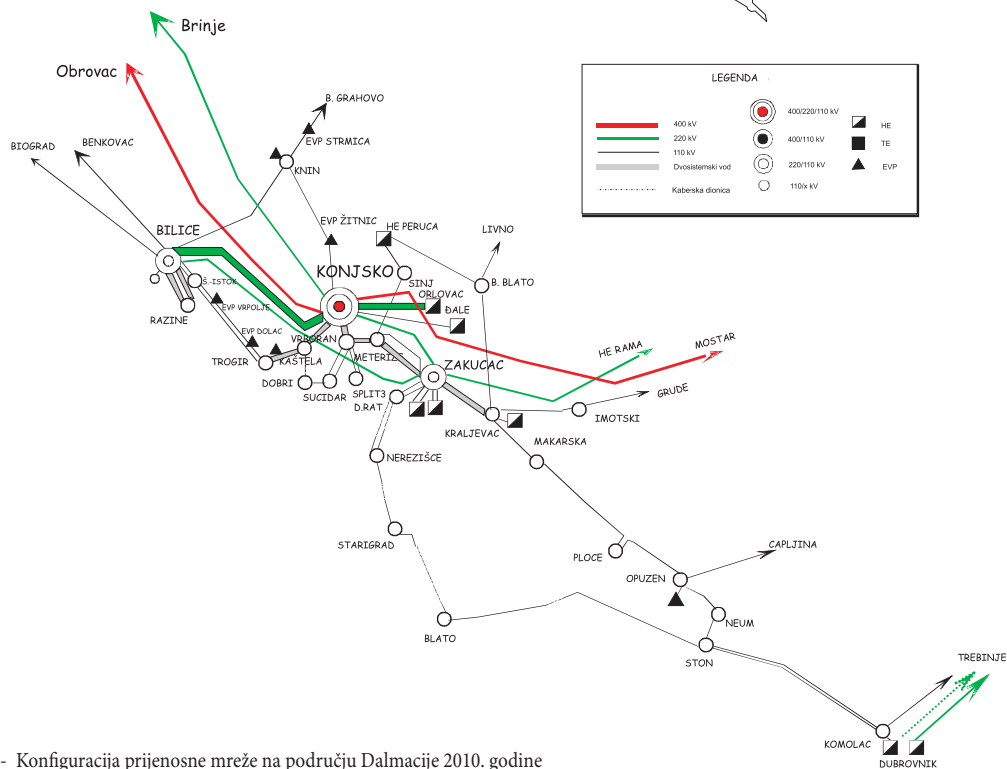
### 3.3 Opis modela

Modeli EES-a Hrvatske za visoka i niska zimska i ljetna opterećenja 2010. godine temelje se na istraživanjima provedenim u dosadašnjim studijama razvoja prijenosne mreže. Karakteristike modela su sljedeće: opterećenja čvorova u EES-u Hrvatske modelirana su na 110 kV naponskoj razini, EES Hrvatske uravnotežen osim u stanju niskih ljetnih opterećenja i maksimalne proizvodnje HE na Cetini kada se izvozi 130 MW u Sloveniju, vršno opterećenje EES-a u iznosu od  $P_{\max \text{ zima } 2010} = 3 \text{ 171 MW}$ , smanjenje opterećenja za 40 % na modelu niskog zimskog opterećenja ( $P_{\min \text{ zima } 2010} = 1 \text{ 903 MW}$ ) u odnosu na model visokog zimskog opterećenja (raspodijeljen proporcionalno na čvorove 110 kV), smanjenje opterećenja za 10 % na modelu visokog ljetnog opterećenja ( $P_{\max \text{ ljeto } 2010} = 2 \text{ 854 MW}$ ) u odnosu na model visokog zimskog opterećenja (raspodijeljen proporcionalno na čvorove 110 kV), smanjenje opterećenja za 60 % na modelu niskog ljetnog opterećenja ( $P_{\min \text{ ljeto } 2010} = 1 \text{ 268 MW}$ ) u odnosu na model visokog zimskog opterećenja (raspodijeljen proporcionalno na čvorove 110 kV), EES Hrvatske preuzima polovicu proizvodnje NE Krško (338 MW) što vrijedi i za zimska i za ljetna opterećenja, u EES-u Hrvatske nove KTE snage 250 MW na lokacijama postojećih TE Sisak te TETO i PTE Osijek, u pogonu novi interkonektivni vod 2x400 kV prema Pečuhu, susjedni EES modelirani prema [7]. Modeliranu konfiguraciju EES-a Hrvatske prikazuje slika 2, a prijenosnu mrežu dijela Dalmacije slika 3. U razmatranom dijelu mreže do promatranog vremenskog presjeka u pogon ulaze:

- TS 110/10(20) kV Dobri (Split Centar),
- KB 110 kV Sućidar – Dobri,
- KB 110 kV Sućidar – Kaštela,
- 2xKB 110 kV Vrboran – Pujanke,
- 2xKB 110 kV Vrboran – Visoka,
- EVP Turnić, EVP Sadine,
- DV 110 kV Konjsko – Turnić – Knin.



Slika 2 - Konfiguracija prijenosne mreže Hrvatske 2010. godine



Slika 3 - Konfiguracija prijenosne mreže na području Dalmacije 2010. godine

U analizi niskih ljetnih opterećenja smanjuju se opterećenja u susjednoj BiH i Sloveniji, budući da tamošnje naponske prilike značajno utječu na situaciju u Hrvatskoj.

### 3.4 Kriteriji ispitivanja

Prijenosna mreža 110 kV, 220 kV i 400 kV Hrvatske elektroprivrede u stanjima karakterističnim po ekstremno vlažnoj hidrologiji (inicijalan angažman HE na Cetini i maksimalan angažman HE na Cetini), a u doba visokih i niskih zimskih i ljetnih opterećenja 2010. godine, ispitivana je uobičajenim kriterijem sigurnosti ( $n-1$ ). Kriterij ( $n-1$ ) kaže da u slučaju neraspoloživosti jedne grane sustava (vod, transformator, generator) mora biti zadovoljeno:

- 1 Opterećenja svih grana moraju ostati unutar dozvoljenih granica prema tablici 20 (termička opterećenja vodova, prividne snage transformatora).
- 2 Naponske prilike u svim čvorovima mreže moraju ostati unutar dozvoljenih granica:
  - 110 kV mreža: 99 kV – 123 kV
  - 220 kV mreža: 198 kV – 245 kV
  - 400 kV mreža: 380 kV – 420 kV
- 3 Ne smije doći do redukcije potrošnje.

U ispitivanjima ( $n-1$ ) sigurnosti u obzir se ne uzimaju teži poremećaji kao što su višestruki ispadi sa zajedničkim povodom (ukoliko nisu uzrokovani ispravnim djelovanjem zaštite), gubitak obje trojke dvosistemskih vodova ili sabirnički kvarovi.

Kao dozvoljene granice opterećenja priključnih vodova HE na Cetini računato je s dozvoljenim termičkim opterećenjem vodova ukoliko aktualne zaštite nisu podešene na manje vrijednosti (primjer DV 220 kV Zakućac – Konjsko). Ispitivanja mreže s obzirom na naponske prilike provedena su na sljedeći način:

- inicijalno se pretpostavlja da su sve preklopke transformatora s mogućnošću promjene prienosnog omjera u beznaponskom stanju (400/220 kV i 400/110 kV) u nultom položaju, isto kao i preklopke regulacijskih transformatora 220/110 kV,
- angažirana jalova snaga svih generatora određena je radi održanja nazivnog napona na generatorskim sabirnicama, unutar dozvoljenih granica određenih pogonskim kartama za određenu razinu angažmana djelatne snage (uključujući aktualna podešenja limitera poduzbude gdje je to poznato),
- hidroelektrane s mogućnošću rada u kompenzatorskom ili pumpnom pogonu (RHE Velebit, RHE Čapljina) inicijalno rade u generatorskom režimu ili su izvan pogona,
- u slučaju postizanja nedozvoljenih naponskih prilika u nekom čvoru razmatranog dijela EES-a promatra se utjecaj automatske regulacije transformatora 220/110 kV (Konjsko),

- ukoliko se automatskom regulacijom transformatora 220/110 kV ne mogu održati povoljne naponske prilike mijenja se prienosni omjer transformatora 400/220 kV u TS Konjsko,
- ukoliko su naponske prilike i dalje nezadovoljavajuće angažira se RHE Velebit pa zatim RHE Čapljina u kompenzatorskom režimu rada,
- ukoliko se i tada ne postižu povoljne naponske prilike traži se  $Q/U$  usluga bliskih sinkronih generatora (Zakućac, Orlovac, Đale, Peruća i Kraljevac) unutar dozvoljenih granica prema pogonskim kartama.

## 4 TOKOVI SNAGA I ANALIZE SIGURNOSTI

### 4.1 Postojeće rješenje priključka HE Zakućac

Analize tokova snaga i naponskih prilika u slučaju postojećeg priključka dva agregata HE Zakućac na 110 kV naponsku razinu te dva agregata na 220 kV naponsku razinu nakon rekonstrukcije, za različita pogonska stanja ovisna o opterećenju EES-a (visoko/vršno zimsko i ljetno, te nisko/minimalno zimsko i ljetno opterećenje), angažmanu HE na Cetini (inicijalan, maksimalan angažman, pojedinačan maksimalan angažman) i raspoloživosti grana mreže ( $n$  raspoloživih grana,  $n-1$  raspoloživih grana) ukazuju na sljedeće:

*Plasman maksimalne proizvodnje HE Zakućac omogućen je ukoliko su raspoložive sve grane mreže.*

Pri raspoloživosti svih grana mreže ne dolazi do slučajeva preopterećenja vodova i transformatora pri maksimalnom angažmanu HE Zakućac i ostalih HE na Cetini. Nepovoljne naponske okolnosti u mreži javljaju se za minimalna ljetna opterećenja kada možemo očekivati previsoke napone u mrežama sve tri naponske razine. Naponi se pogoršavaju u budućnosti (2010.) u odnosu na blisku prošlost (2003.) budući da je u pogon ušla 400 kV mreža BiH koja neopterećena dodatno kviri naponske prilike, a ovisno o tranzitima na širem području jugoistočne Europe.

*Sigurnost plasmana snage HE Zakućac nije zadovoljavajuća.*

Vezano za sigurnost plasmana proizvodnje prema ( $n-1$ ) kriteriju analize pokazuju narušavanje istog vezano za plasman proizvodnje HE Zakućac.

Tablica 9 prikazuje zadovoljenje kriterija ( $n-1$ ) u razmatranom dijelu mreže Dalmacije za analizirana pogonska stanja (isključujući ispad DV 110 kV HE Đale – Konjsko), a vezano za plasman proizvodnje HE Zakućac i ostalih HE na Cetini (promatran inicijalan i maksimalan angažman HE na Cetini).

U prvom stupcu tablice sa DA ili NE označeno je da li je razmatrani kriterij zadovoljen u analiziranom pogonskom stanju (DA) ili nije zadovoljen (NE). Ukoliko u prvom stupcu stoji da ( $n-1$ ) kriterij nije zadovoljen, u drugo



koloni označeni su događaji koji uzrokuju nezadovoljenje razmatranog kriterija. Ovisno o razmatranom pogonskom stanju javlja se četiri kritična događaja:

- 1 Ispad jedne trojke DV 2x110 kV Meterize – Vrboran → dovodi do preopterećenja paralelne trojke.
- 2 Ispad jedne trojke DV 2x110 kV Zakučac – Meterize → dovodi do preopterećenja paralelnog jednosistemske voda Zakučac – Meterize 3.
- 3 Ispad DV 400 kV Konjsko – Obrovac → dovodi do preopterećenja 110 kV vodova vezanih za TS Bilice. Preopterećenje se rješava sekcioniranjem (odvajanjem) 110 kV mreže u TS Bilice.
- 4 Ispad DV 110 kV Zakučac – Dugi Rat 2 → dovodi do preopterećenja 110 kV voda Zakučac – Dugi Rat 1 (dionice Cu 95, Al/Č 150) u stanjima vršnog opterećenja 2010. godine, ukoliko je smanjen angažman generatora 1 HE Dubrovnik (priklučenog na 110 kV naponsku razinu).

Pogonska stanja u kojima je ograničen plasman razmatrane snage HE Zakučac radi lančanih preopterećenja u mreži prikazana su u trećoj koloni *italic* slovima. Ta pogonska stanja su sljedeća:

- 1 Minimalno zimsko opterećenje 2010. godine, maksimalan angažman HE na Cetini,
- 2 Minimalno ljetno opterećenje 2010. godine, maksimalan angažman HE na Cetini.

Problemi u svezi s plasmanom proizvodnje HE Zakučac javljaju se na tri grane mreže:

- 1 DV 2x110 kV Meterize – Vrboran
- 2 transformator 220/110 kV (100 MVA) HE Zakučac
- 3 DV 110 kV Zakučac – Meterize 3

Ovisno o angažiranoj snazi pojedinih agregata HE Zakučac i hidroelektrane u cjelini, opterećenju okolnih čvorova, angažmanu bliskih hidroelektrana i automatskoj regulaciji na transformatorima 220/110 kV u TS Konjsko, u pojedinim pogonskim stanjima može dolaziti do preopterećenja jedne trojke DV 2x110 kV Meterize – Vrboran pri ispadu paralelne trojke. Isključenje preopterećene trojke tog voda može dovesti do preopterećenja transformatora 220/110 kV u HE Zakučac, a njegovim isključenjem i do daljnjih

lančanih preopterećenja u mreži (DV Kraljevac – Imotski – Grude i dr.). Da bi se to spriječilo nužno je tada ograničiti proizvodnju agregata HE Zakučac priključenih na 110 kV naponsku razinu.

Tablica 10 prikazuje opterećenja DV 2x110 kV Meterize – Vrboran (u postocima od dozvoljene granice) pri raspoloživosti obje trojke (stupac 1), te raspoloživosti samo jedne trojke (stupac 2) za sva analizirana pogonska stanja (stupac 3). Opterećenja trojke pri neraspodivnosti paralelne trojke prikazana su za slučaj da je preklopka regulacijskih transformatora 220/110 kV u TS Konjsko blokirana (prvi broj u stupcu 2) i za slučaj da je automatska regulacija aktivirana s ciljem održavanja nazivnog napona na sekundarnoj strani (drugi broj u stupcu 2).

Tablica 10 - Opterećenja DV 2x110 kV Meterize – Vrboran (%  $I_{max}$ ) u provedenim analizama

(n) raspoloživih grana	Ispad jedne trojke	Pogonsko stanje
34 %	68 % - 81 %	$P_{max\ zima\ 2010^*}$ inicijalan angažman
57 %	112 % - 119 %	$P_{max\ zima\ 2010^*}$ maksimalan angažman
49 %	97 % - 91 %	$P_{min\ zima\ 2010^*}$ inicijalan angažman
70 %	138 % - 135 %*	$P_{min\ zima\ 2010^*}$ maksimalan angažman
39 %	77 % - 84 %	$P_{max\ ljeto\ 2010^*}$ inicijalan angažman
61 %	120 % - 122 %	$P_{max\ ljeto\ 2010^*}$ maksimalan angažman
47 %	92 % - 88 %	$P_{min\ ljeto\ 2010^*}$ inicijalan angažman
66 %	130 % - 127 %*	$P_{min\ ljeto\ 2010^*}$ maksimalan angažman

\* Posljedično preopterećenje transformatora 220/110 kV u HE Zakučac u slučaju isključenja druge trojke djelovanjem zaštite

Pogonska stanja u kojima je ograničen plasman razmatrane snage HE Zakučac prikazana su u trećem stupcu *italic* slovima. U tim pogonskim stanjima ispad jedne trojke DV 2x110 kV Meterize – Vrboran dovodi do preopterećenja

Tablica 9 - Zadovoljenje (n-1) kriterija u provedenim analizama

Zadovoljenje	Kritični događaji	Pogonsko stanje
DA (NE)*	Ispad DV 110 kV Zakučac – D. Rat 2	$P_{max\ zima\ 2010^*}$ inicijalan angažman
NE	Ispad trojke DV 2x110 kV Meterize – Vrboran, Ispad DV 110 kV Zakuč. – D. Rat 2*	$P_{max\ zima\ 2010^*}$ maksimalan angažman
NE	Ispad trojke DV 2x110 kV Meterize - Vrboran	$P_{min\ zima\ 2010^*}$ inicijalan angažman
NE	Ispad trojke DV 2x110 kV Meterize - Vrboran	$P_{min\ zima\ 2010^*}$ maksimalan angažman
DA (NE)*	Ispad DV 110 kV Zakučac – D. Rat 2*	$P_{max\ ljeto\ 2010^*}$ inicijalan angažman
NE	Ispad trojke DV 2x110 kV Meterize – Vrboran	$P_{max\ ljeto\ 2010^*}$ maksimalan angažman
DA	-	$P_{min\ ljeto\ 2010^*}$ inicijalan angažman
NE	Ispad trojke DV 2x110 kV Meterize - Vrboran	$P_{min\ ljeto\ 2010^*}$ maksimalan angažman

\* (n-1) kriterij nije zadovoljen u slučaju smanjenog angažmana HE Dubrovnik (generator na 110 kV)

paralelne trojke, a posljedično isključenje i druge trojke dovodi do preopterećenja transformacije 220/110 kV u HE Zakućac radi čega će biti nužno ograničiti snagu agregata priključenih na 110 kV naponsku razinu.

Transformacija 220/110 kV u HE Zakućac ugrožena je još u dva slučaja:

1 Ukoliko je regulacijska preklapka pomaknuta iz srednjeg položaja (nazivni prijenosni omjer) može doći do visokih tokova jalove snage kroz transformator i preopteretiti ga.

2 Ukoliko su pri smanjenom angažmanu HE Zakućac u cjelini, angažirani samo blokovi priključeni na 220 kV naponsku razinu može doći do visokih tokova djelatne snage iz 220 kV u 110 kV mrežu koji ugrožavaju transformaciju u Zakućcu, ovisno o opterećenju okolnih čvorova, angažmanu bliskih HE priključenih na 110 kV mrežu (HE Kraljevac, HE Peruća, HE Đale, HE Dubrovnik) te raspoloživosti transformatora 220/110 kV u TS Konjsko i 220 kV vodova Zakućac – Konjsko i Zakućac – Bilice.

U pojedinim pogonskim stanjima ispad jedne trojke DV 2x110 kV Zakućac – Meterize može preopteretiti paralelan vod s vodičima manjeg presjeka (Al/Č 150/25 mm<sup>2</sup>). Prema informacijama iz PrP Split, tijekom 2005. godine izvršit će se zamjena vodiča na ugroženom vodu čime će se povećati njegova prijenosna moć (BTAL/STALUM, I<sub>1</sub>=600 A).

Provedene analize u pogonskim stanjima bez dodatnih tranzita prijenosnom mrežom ne upućuju na moguće probleme u 220 kV mreži, pa tako i na vodu Zakućac – Konjsko, a vezano za plasman snage HE Zakućac.

Opterećenja voda 220 kV Zakućac – Konjsko (u % od dozvoljene granice), u stanjima (n) raspoloživosti grana, te za slučaj ispada DV 220 kV Zakućac – Bilice (kada se postiže najveće opterećenje razmatranog DV u većini analiziranih pogonskih stanja), prikazani su tablicom 11.

Tablica 11 - Opterećenja DV 220 kV Zakućac – Konjsko (% I<sub>max</sub>) u provedenim analizama

(n) raspoloživih grana	Ispad DV 220 kV Zakućac - Bilice	Pogonsko stanje
35 %	52 %	$P_{\max \text{ zima } 2010^*}$ inicijalan angažman
47 %	64 %	$P_{\max \text{ zima } 2010^*}$ maksimalan angažman
40 %	51 %	$P_{\min \text{ zima } 2010^*}$ inicijalan angažman
52 %	62 % (67 %*)	$P_{\min \text{ zima } 2010^*}$ maksimalan angažman
38 %	53 %	$P_{\max \text{ ljeto } 2010^*}$ inicijalan angažman
50 %	66 %	$P_{\max \text{ ljeto } 2010^*}$ maksimalan angažman
42 %	55 %	$P_{\min \text{ ljeto } 2010^*}$ inicijalan angažman
53 %	68 % (70 %*)	$P_{\min \text{ ljeto } 2010^*}$ maksimalan angažman

\* Opterećenje u slučaju ispada DV 220 kV HE Zakućac – HE Rama

Najveće zabilježeno opterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko pri svim raspoloživim granama iznosi 56 % od dozvoljene granice. Najveće opterećenje tog dalekovoda pri ispadu jedne grane iznosi 78 % od dozvoljenog. Opterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko ovisi još i o angažmanu HE Orlovac, angažmanu bliskih HE u BiH (na istom hidrološkom slivu, HE Grabovica, HE Rama, HE Salakovac, HE Čapljina), mogućem sekcioniranju mreže 110 kV u TS Bilice i dodatnim tranzitima kroz prijenosnu mrežu za potrebe trećih zemalja.

Mogući tranziti prijenosnom mrežom HEP-a za potrebe trećih zemalja (ispitano BiH ⇒ I) dodatno opterećuju priključne vodove HE vodotoka Cetine (prvenstveno HE Zakućac) pri čemu može doći do visokih opterećenja ili preopterećenja DV 220 kV Zakućac – Konjsko.

Pri velikim tranzitima (ispitano 300 MW, 600 MW i 900 MW) opterećenja kritičnih vodova u 110 kV mreži (Zakućac – Meterize – Vrboran) se povećavaju, a ugrožen postaje i DV 220 kV Zakućac – Konjsko pri ispadu DV 220 kV Zakućac – Bilice. Da bi se povećala prijenosna moć razmatranog dalekovoda nužno je zamijeniti strujne mjerne transformatore (postojeći imaju prijenosni omjer 600/1 A/A, prorađna struja ugrađene zaštite na vodu 720 A s vremenom prorade 20 min.) novima koji neće smanjivati dozvoljeno opterećenje voda na iznose manje od njegove termičke granice (780 A, oko 300 MVA).

Tablica 12 - Opterećenja DV 220 kV Zakućac – Konjsko (% I<sub>max</sub>) pri tranzitima snage kroz prijenosnu mrežu HEP-a

(n) raspoloživih grana	Ispad DV 220 kV Zakućac - Bilice		Pogonsko stanje
	HE Orlovac u pogonu	HE Orlovac izvan pogona	
54 %	76 %	91 %	$P_{\max \text{ zima } 2010^*}$ tranzit 300 MW BiH⇒I
59 %	77 %	92 %	$P_{\min \text{ zima } 2010^*}$ tranzit 300 MW BiH⇒I
57 %	78 %	92 %	$P_{\max \text{ ljeto } 2010^*}$ tranzit 300 MW BiH⇒I
60 %	83 %	94 %	$P_{\max \text{ zima } 2010^*}$ tranzit 600 MW BiH⇒I
64 %	84 %	95 %	$P_{\min \text{ zima } 2010^*}$ tranzit 600 MW BiH⇒I
62 %	85 %	96 %	$P_{\max \text{ ljeto } 2010^*}$ tranzit 600 MW BiH⇒I
62 %	86 %	97 %	$P_{\max \text{ zima } 2010^*}$ tranzit 900 MW BiH⇒I
68 %	89 %	99 %	$P_{\min \text{ zima } 2010^*}$ tranzit 900 MW BiH⇒I
66 %	89 %	100 %	$P_{\max \text{ ljeto } 2010^*}$ tranzit 900 MW BiH⇒I

Moguća izgradnja vjetroelektrana velikih snaga na području južne Hrvatske (južno od HE Zakućac) nepovoljno utječe na sigurnost plasmata proizvodnje HE Zakućac.

Moguća izgradnja novih vjetroelektrana na području južne Hrvatske (ispitano 2x45 + 30 MW na mikrolokacijama Dovanj, Lisičine i Dubrovnik) nepovoljno utječe na sigurnost plasmana snage HE Zakućac, budući da se njena proizvodnja dodatno usmjerava na kritičan pravac u 110 kV mreži (HE Zakućac – TS Meterize – TS Vrboran). Radi dodatnog opterećenja tog pravca plasman maksimalne snage HE Zakućac može biti onemogućen u slučajevima ispada jedne trojke DV 2x110 kV Meterize – Vrboran ili DV 2x110 kV Zakućac – Meterize, neovisno o opterećenju sustava u tom trenutku.

#### 4.2 Rješenje priključka s tri ili četiri agregata HE Zakućac na 220 kV mrežu

U ovom poglavlju provjerene su prilike u prijenosnoj mreži u slučaju priključka tri (2x170 MVA + 1x150 MVA) ili četiri (2x170 MVA + 2x150 MVA) hidroagregata HE Zakućac (nakon rekonstrukcije) na 220 kV sabirnice elektrane.

Analize su izvršene za maksimalna i minimalna zimska i ljetna opterećenja 2010. godine pri maksimalnom angažmanu HE vodotoka Cetine. Opterećenja priključnih vodova HE Zakućac pri razmatranom rješenju priključka hidroagregata prikazuju tablice 13 do 16.

Kod priključka 3 hidroagregata HE Zakućac na 220 kV naponsku razinu u stanju maksimalnog zimskog opterećenja 2010. godine nema slučajeva nezadovoljenja ( $n-1$ ) kriterija. Ispad DV 220 kV Zakućac – Konjsko visoko opterećuje transformator 220/110 kV u HE Zakućac (94 MW / 13 Mvar). U slučaju da je HE Orlovac izvan pogona preopterećuju se DV 220 kV Zakućac – Konjsko ( $104 \% I_{max}$ ) pri neraspoloživosti DV 220 kV Zakućac – Bilice i transformator 220/110 kV u HE Zakućac pri neraspoloživosti DV 220 kV Zakućac – Konjsko. U slučaju priključka svih hidroagregata na 220 kV sabirnice pri raspoloživosti svih grana dolazi do visokog opterećenja transformatora 220/110 kV u HE Zakućac. Nezadovoljenje ( $n-1$ ) kriterija javlja se u slučajevima ispada DV 220 kV Zakućac – Bilice (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko  $119 \% I_{max}$  i trafoa u Zakućcu), transformatora 220/110 kV HE Zakućac (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko  $109 \% I_{max}$ ), DV 220 kV HE Zakućac – HE Rama (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko  $106 \% I_{max}$ ), te transformatora 220/110 kV Konjsko (preopterećenje drugog transformatora  $101 \% S_n$  i transformatora 220/110 kV u HE Zakućac  $108 \% S_n$ ).

Kod priključka 3 hidroagregata HE Zakućac na 220 kV naponsku razinu u stanju minimalnog zimskog

Tablica 13 - Opterećenja priključnih grana HE Zakućac (visoko zimsko opterećenje 2010., maksimalan angažman HE Zakućac, 3 ili 4 bloka priključena na 220 kV mrežu, raspoložive sve grane mreže)

Vod (grana)	3 agregata na 220 kV		4 agregata na 220 kV	
	MW / Mvar	$\% I_{max} (S_n)$	MW / Mvar	$\% I_{max} (S_n)$
220 kV HE Zakućac - Konjsko	198 / 27	67	260 / 31	88
220 kV HE Zakućac - Bilice	95 / 19	30	116 / 21	37
220 kV HE Zakućac – HE Rama	59 / -11	22	73 / -13	23
Trafo 220/110 kV	54 / 5	55	92 / 21	94
2x110 kV HE Zakućac - Meterize	2x 31 / -2	23	2x 6 / -7	6
110 kV HE Zakućac - Meterize 3	29 / -6	36	6 / -7	10
110 kV HE Zakućac - Dugi Rat 1	34 / 1	44	32 / 1	43
110 kV HE Zakućac - Dugi Rat 2	38 / 6	30	36 / 6	29
2x110 kV HE Zakućac - Kraljevac	2x 9 / 13	12	2x -1 / 11	8
2x110 kV Meterize – Vrboran	2x 33 / -24	31	2x -6 / -27	21

Tablica 14 - Opterećenja priključnih grana HE Zakućac (nisko zimsko opterećenje 2010., maksimalan angažman HE Zakućac, 3 ili 4 bloka priključena na 220 kV mrežu, raspoložive sve grane mreže)

Vod (grana)	3 agregata na 220 kV		4 agregata na 220 kV	
	MW / Mvar	$\% I_{max} (S_n)$	MW / Mvar	$\% I_{max} (S_n)$
220 kV HE Zakućac - Konjsko	213 / 15	72	275 / 13	92
220 kV HE Zakućac - Bilice	84 / 8	26	105 / 7	32
220 kV HE Zakućac – HE Rama	88 / -9	27	101 / -10	31
Trafo 220/110 kV	20 / -7	21	60 / 0	60
2x110 kV HE Zakućac - Meterize	2x 34 / -8	26	2x 9 / -8	9
110 kV HE Zakućac - Meterize 3	32 / -13	41	9 / -8	14
110 kV HE Zakućac - Dugi Rat 1	16 / -3	21	15 / -3	20
110 kV HE Zakućac - Dugi Rat 2	18 / -1	14	17 / -1	13
2x110 kV HE Zakućac - Kraljevac	2x 7 / 10	9	2x -2 / 11	8
2x110 kV Meterize – Vrboran	2x 52 / -32	46	2x 13 / -28	23

**Tablica 15** - Opterećenja priključnih grana HE Zakućac (visoko ljetno opterećenje 2010., maksimalan angažman HE Zakućac, 3 ili 4 bloka priključena na 220 kV mrežu, raspoložive sve grane mreže)

Vod (grana)	3 agregata na 220 kV		4 agregata na 220 kV	
	MW / Mvar	% $I_{max}(S_n)$	MW / Mvar	% $I_{max}(S_n)$
220 kV HE Zakućac - Konjsko	207 / 24	70	269 / 27	91
220 kV HE Zakućac - Bilice	94 / 17	29	115 / 18	36
220 kV HE Zakućac - HE Rama	59 / -12	19	73 / -14	23
Trafo 220/110 kV	45 / 2	45	84 / 16	86
2x110 kV HE Zakućac - Meterize	2x 32 / -4	24	2x 7 / -7	7
110 kV HE Zakućac - Meterize 3	31 / -8	40	7 / -7	12
110 kV HE Zakućac - Dugi Rat 1	30 / 0	38	28 / 0	37
110 kV HE Zakućac - Dugi Rat 2	33 / 4	25	31 / 4	25
2x110 kV HE Zakućac - Kraljevac	2x 10 / 11	11	2x -2 / 11	8
2x110 kV Meterize – Vrboran	2x 39 / -26	36	2x 0 / -27	21

opterećenja 2010. godine nema slučajeva nezadovoljenja ( $n-1$ ) kriterija. U slučaju da je HE Orlovac izvan pogona DV 220 kV Zakućac – Konjsko se blago preopterećuje pri neraspoloživosti DV 220 kV Zakućac – Bilice. Nezadovoljenje ( $n-1$ ) kriterija, u slučaju priključka svih hidroagregata na 220 kV sabirnice, javlja se u slučajevima ispada DV 220 kV Zakućac – Bilice (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko 119 %  $I_{max}$ ), DV 220 kV Zakućac – Konjsko (preopterećenje transformatora 220/110 kV u HE Zakućac 117 %  $S_n$ ), te DV 220 kV HE Zakućac – HE Rama (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko 116 %  $I_{max}$ ).

Kod priključka 3 hidroagregata HE Zakućac na 220 kV naponsku razinu u stanju maksimalnog ljetnog opterećenja 2010. godine nema slučajeva nezadovoljenja ( $n-1$ ) kriterija. U slučaju da je HE Orlovac izvan pogona preopterećuje se DV 220 kV Zakućac – Konjsko (109 %  $I_{max}$ ) pri neraspoloživosti DV 220 kV Zakućac – Bilice. Nezadovoljenje ( $n-1$ ) kriterija, u slučaju priključka svih hidroagregata na 220 kV sabirnice, javlja se u slučajevima ispada DV 220 kV Zakućac – Bilice (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko 121 %  $I_{max}$  i transformatora 220/110 kV HE Zakućac 102 %  $S_n$ ), DV 220 kV Zakućac – Konjsko (preopterećenje transformatora 220/110 kV u HE

Zakućac 145 %  $S_n$ ), transformatora 220/110 kV HE Zakućac (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko 110 %  $I_{max}$ ), DV 220 kV HE Zakućac – HE Rama (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko 108 %  $I_{max}$  i transformatora 220/110 kV HE Zakućac 102 %  $S_n$ ), transformatora 220/110 kV Konjsko (preopterećenje transformatora 220/110 kV u HE Zakućac 105 %  $S_n$ ), te generatora 1 HE Dubrovnik (preopterećenje transformatora 220/110 kV u HE Zakućac 107 %  $S_n$ ).

Kod priključka 3 hidroagregata HE Zakućac na 220 kV naponsku razinu u stanju minimalnog ljetnog opterećenja 2010. godine nema slučajeva nezadovoljenja ( $n-1$ ) kriterija. U slučaju da je HE Orlovac izvan pogona DV 220 kV Zakućac – Konjsko je blago preopterećen (103 %  $I_{max}$ ) pri neraspoloživosti DV 220 kV Zakućac – Bilice. Nezadovoljenje ( $n-1$ ) kriterija, u slučaju priključka svih hidroagregata na 220 kV sabirnice, javlja se u slučajevima ispada DV 220 kV Zakućac – Bilice (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko 113 %  $I_{max}$ ), DV 220 kV Zakućac – Konjsko (preopterećenje transformatora 220/110 kV u HE Zakućac 120 %  $S_n$ ), te DV 220 kV HE Zakućac – HE Rama (preopterećenje DV 220 kV Zakućac – Konjsko 111 %  $I_{max}$ ).

**Tablica 16** - Opterećenja priključnih grana HE Zakućac (nisko ljetno opterećenje 2010., maksimalan angažman HE Zakućac, 3 ili 4 bloka priključena na 220 kV mrežu, raspoložive sve grane mreže)

Vod (grana)	3 agregata na 220 kV		4 agregata na 220 kV	
	MW / Mvar	% $I_{max}(S_n)$	MW / Mvar	% $I_{max}(S_n)$
220 kV HE Zakućac - Konjsko	220 / -11	72	281 / -25	92
220 kV HE Zakućac - Bilice	80 / -6	24	99 / -10	30
220 kV HE Zakućac – HE Rama	90 / -44	30	104 / -47	34
Trafo 220/110 kV	15 / -26	28	57 / -28	60
2x110 kV HE Zakućac - Meterize	2x 28 / -3	20	2x 3 / 3	2
110 kV HE Zakućac - Meterize 3	27 / -7	32	4 / 3	4
110 kV HE Zakućac - Dugi Rat 1	21 / -20	36	21 / -20	35
110 kV HE Zakućac - Dugi Rat 2	27 / -19	24	27 / -19	23
2x110 kV HE Zakućac - Kraljevac	2x 7 / -5	6	2x -2 / -2	3
2x110 kV Meterize – Vrboran	2x 50 / -24	39	2x 12 / -12	12

*Rjesenje prikljucka tri ili cetiri generatora HE Zakućac na 220 kV sabirnice hidroelektrane zahtijeva pojaćanje 220 kV mreže i transformacije(a) između mreža 220 kV i 110 kV u HE Zakućac i eventualno TS Konjsko.*

Ukoliko bi nakon zamjene starih generatora HE Zakućac nove generatore (ili sve generatore) prikljucili na 220 kV mrežu bilo bi nužno istu pojaćati na pravcu Zakućac – Konjsko. Pojaćanje mreže uvodom/izvodom DV 220 kV Zakućac-Bilice u TS Konjsko ili TS Vrboran, ili uvodom/izvodom DV 220 kV Zakućac-Konjsko u TS Vrboran ne bi omogućavalo siguran plasman tako prikljucene HE. Također bi bilo nužno pojaćati transformaciju 220/110 kV u HE Zakućac (u slučaju prikljucka tri generatora HE Zakućac na 220 kV mrežu) i eventualno TS Konjsko (u slučaju prikljucka četiri generatora HE Zakućac na 220 kV mrežu). Alternativa pojaćanju transformacije 220/110 kV (2x150 MVA sada, 3x150 MVA pojaćano) u TS Konjsko je formiranje TS 220/110 kV Vrboran (2x150 MVA). Oćito je da u slučaju takvog rjesenja prikljucka potrebna ulaganja u pojaćanja mreže znatno nadmašuju iznose potrebne za pojaćanja mreže kod prikljucka dva agregata na 220 kV i dva na 110 kV sabirnice hidroelektrane.

## 5 POJAĆANJA MREŽE RADI SIGURNOG PLASMANA PROIZVODNJE HE ZAKUĆAC NAKON REKONSTRUKCIJE

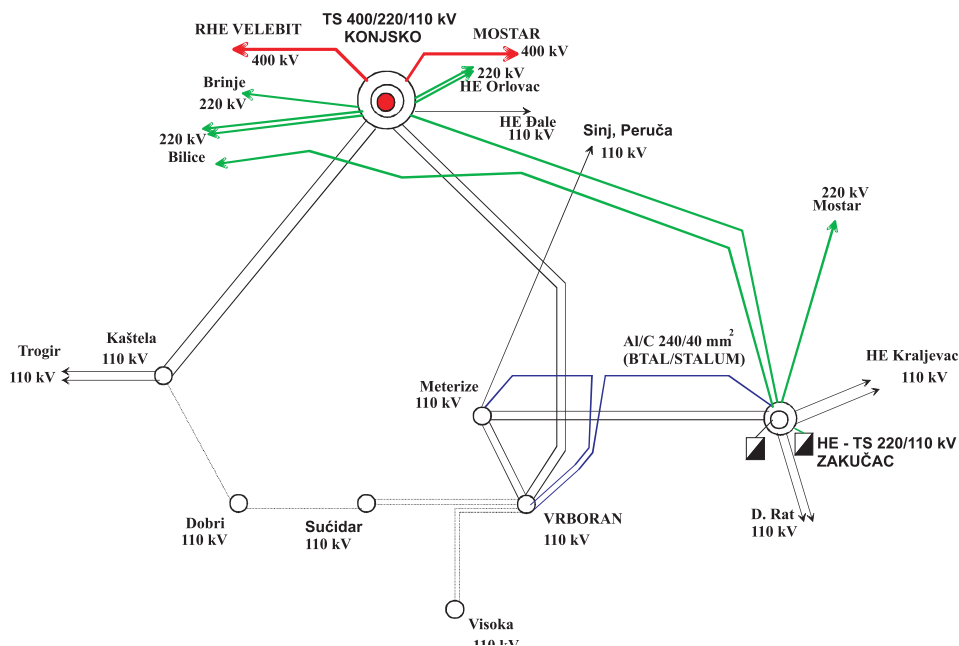
Prethodno opisanim proraćunima utvrđeno je da se ogranićenja u plasmanu proizvodnje HE Zakućac javljaju u 110 kV mreži (DV 2x110 kV Meterize – Vrboran, DV

110 kV Zakućac – Meterize) i na transformaciji 220/110 kV u hidroelektrani. Kao moguća pojaćanja mreže za koja se pretpostavlja da bi mogla otkloniti ogranićenja u plasmanu proizvodnje HE Zakućac analizirani su:

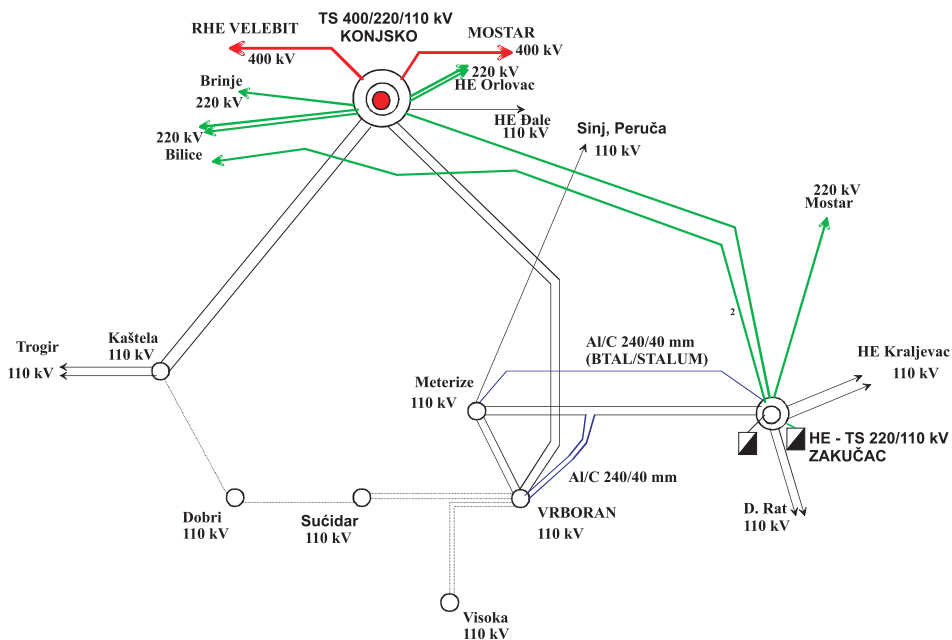
- 1 Pojaćanje veze 110 kV Zakućac – Meterize – Vrboran.
- 2 Uvod/izvod DV 220 kV Zakućac – Konjsko u TS Vrboran.
- 3 Zamjena transformatora 220/110 kV (100 MVA) u HE Zakućac transformatorom 220/110 kV (150 MVA).
- 4 Formiranje TS 220/110 kV Vrboran i uvod/izvod DV 220 kV Zakućac – Bilice u TS Vrboran.
- 5 Uvod/izvod DV 220 kV Zakućac – Bilice u TS Konjsko.
- 6 Izgradnja novog voda Zakućac – Konjsko 2.

Da bi se osigurala ( $n-1$ ) sigurnost plasmana proizvodnje HE Zakućac provedene analize pokazuju da je nužno **izvesti uvod/izvod jedne trojke DV 2x110 kV Zakućac – Meterize ili DV 110 kV Zakućac – Meterize 3 u TS Vrboran. Potpuna sigurnost plasmana snage HE Zakućac postiže se dodatno uz rekonstrukciju (povećanje prijenosne moći kroz zamjenu vodića i stupova ili ugradnju “crnih” vodića na istim stupovima) DV 110 kV Zakućac – Meterize 3.**

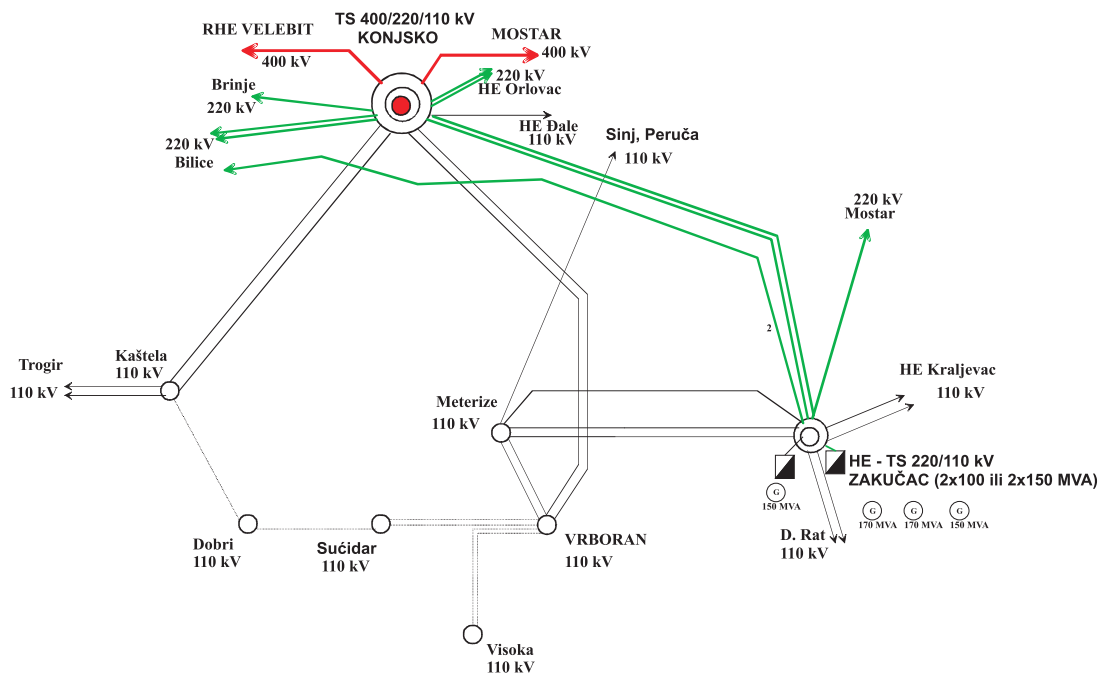
Konfiguraciju prijenosne mreže Dalmacije koja osigurava ( $n-1$ ) sigurnost plasmana proizvodnje HE Zakućac 2010. godine prikazuju slike 4 (uvod DV 110 kV Zakućac – Meterize 3 u TS Vrboran i rekonstrukcija istog – povećanje prijenosne moći) i 5 (uvod jedne trojke DV 2x110 kV Zakućac – Meterize u TS Vrboran).



Slika 4 - Konfiguracija prijenosne mreže dijela Dalmacije 2010. godine prema ( $n-1$ ) sigurnosti plasmana proizvodnje HE na Cetini (var. 1)



Slika 5 - Konfiguracija prijenosne mreže dijela Dalmacije 2010. godine prema (n-1) sigurnosti plasmana proizvodnje HE na Cetini (var. 2)



Slika 6 - Konfiguracija prijenosne mreže dijela Dalmacije 2010. godine prema (n-1) sigurnosti plasmana proizvodnje HE na Cetini (var. 3)

Kao alternativa pojačanjima u 110 kV mreži moguće je definirati konfiguraciju koja također omogućava siguran plasman proizvodnje HE Zakućac, a koja se temelji na pojačanjima 220 kV mreže. Takva konfiguracija bi, u dijelu vezanom za pojačanje priključka HE Zakućac, uključila (slika 6):

- 1 izgradnju novog DV 220 kV Zakućac – Konjsko 2,
- 2 priključak tri generatora HE Zakućac na 220 kV sabirnice elektrane, i
- 3 pojačanje transformacije 220/110 kV (najmanje 2x100 MVA) u HE Zakućac radi osiguravanja fleksibilnog pogona svih agregata u HE Zakućac.

Ovo rješenje zahtijeva znatno veće investicije sa strane PP HE Jug i HOPS / PrP Split (blok transformator 16/242 kV umjesto 16/121 kV, jedno trafo polje 220 kV u HE Zakućac, jedno vodno polje 220 kV u HE Zakućac, jedno vodno polje 220 kV u TS Konjsko, dva nova transformatora 220/110 kV, novi DV 220 kV). Nedostatak takvog rješenja je još i nezadovoljenje ( $n-1$ ) kriterija za slučaj ispada jednog transformatora 220/110 kV u TS Konjsko (moguće preopterećenje paralelnog transformatora) u pogonskim stanjima karakterističnim po visokim opterećenjima i manjku proizvodnje (HE Zakućac – 1 generator, HE Kraljevac, HE Peruća, HE Đale, HE Dubrovnik) generatora priključenih na 110 kV mrežu. Prednost razmatranog rješenja su bolje mogućnosti sudjelovanja HE Zakućac (s tri umjesto s dva generatora) u pružanju usluga sustavu, prvenstveno s aspekta Q/U regulacije.

U slučaju priključka sva četiri agregata HE Zakućac na 220 kV naponsku razinu nužno je izvršiti sve prethodno spomenute zahvate u mreži te dodatno pojačati transformaciju 220/110 kV u TS Konjsko (3x150 MVA) ili prijevremeno (u odnosu na porast konzuma) formirati TS 220/110 kV Vrboran (2x150 MVA).

## 6 POTREBE ZA Q/U REGULACIJSKOM USLUGOM HE NA CETINI

### 6.1 Naponske prilike u mreži

Proračunima tokova snaga opisanim u poglavlju 4 određene su očekivane naponske prilike u 400 kV, 220

kV i 110 kV mreži na području Dalmacije 2010. godine ovisno o opterećenju EES-a (visoko i nisko zimsko i ljetno opterećenje) te angažmanu HE na Cetini (inicijalan angažman, maksimalan angažman). U proračunima je nadalje pretpostavljeno:

- preklopke transformatora 400/220 kV u TS Konjsko nalaze se u srednjem položaju,
- preklopke transformatora 220/110 kV u TS Konjsko nalaze se u srednjem položaju a automatska regulacija se inicijalno ne koristi, odnosno koristi se radi održavanja nazivnog napona (110 kV) na sekundarnoj strani transformatora,
- preklopke transformatora 220/110 kV u TS Bilice nalaze se u srednjem položaju, a automatska regulacija se ne koristi,
- preklopka transformatora 220/110 kV u HE Zakućac nalaze se u srednjem položaju, a automatska regulacija se ne koristi,
- svi generatori angažirani su jalovom snagom unutar dozvoljenog područja pogonskog dijagrama za zadanu djelatnu snagu, radi održavanja nazivnog napona na generatorskim sabirnicama (modelirano je aktualno podešenje limitera poduzbude, ukoliko je ono poznato).

Očekivane naponske prilike na sabirnicama TS Konjsko i HE Zakućac ovisno o korištenju automatske regulacije transformatora 220/110 kV u TS Konjsko prikazane su tablicom 17.

Za analizirana pogonska stanja, a uz rad generatora u dozvoljenom području pogonskih dijagrama radi održavanja nazivnog napona na generatorskim sabirnicama uključujući aktualna podešenja limitera poduzbude, naponske prilike nisu zadovoljavajuće samo u stanju niskih (minimalnog) ljetnog opterećenja 2010. godine. U minimumu opterećenja 2010. godine naponi su previsoki na sve tri naponske razine (400, 220 i 110 kV) ukoliko se automatska regulacija transformatora 220/110 kV u TS Konjsko ne koristi (nazivni prijenosni omjer), dok se u slučaju njenog korištenja naponske prilike u 110 kV mreži održavaju unutar dozvoljenih granica, ali uz dodatno povišenje napona u 400 kV i 220 kV mreži.

Tablica 17 - Naponske prilike u TS Konjsko i HE Zakućac za analizirana pogonska stanja ovisno o regulaciji transformatora 220/110 kV u TS Konjsko (blokрана regulacija u srednjem položaju/automatska regulacija)

Pogonsko stanje	Konjsko			Zakućac	
	400 kV	220 kV	110 kV	220 kV	110 kV
$P_{\max \text{ zima } 2010}^{\circ}$ inicijalan angažman	410/413	235/239	119/112	238/239	119/116
$P_{\max \text{ zima } 2010}^{\circ}$ maksimalan angažman	410/413	235/239	119/112	237/238	119/115
$P_{\min \text{ zima } 2010}^{\circ}$ inicijalan angažman	415/416	238/242	122/115	240/241	121/117
$P_{\min \text{ zima } 2010}^{\circ}$ maksimalan angažman	414/416	237/241	121/113	239/241	121/116
$P_{\max \text{ ljeta } 2010}^{\circ}$ inicijalan angažman	412/415	236/240	120/113	238/239	119/116
$P_{\max \text{ ljeta } 2010}^{\circ}$ maksimalan angažman	411/414	236/240	119/112	238/240	119/115
$P_{\min \text{ ljeta } 2010}^{\circ}$ inicijalan angažman	<b>430/432</b>	<b>246/249</b>	<b>126/116</b>	<b>247/249</b>	<b>125/119</b>
$P_{\min \text{ ljeta } 2010}^{\circ}$ maksimalan angažman	<b>428/430</b>	<b>244/247</b>	<b>125/116</b>	<b>246/248</b>	<b>125/119</b>

Automatskom regulacijom transformatora 220/110 kV u TS Konjsko dolazi do povišenja napona na 400 kV i 220 kV sabirnicama TS Konjsko za najviše 5 kV, a na 220 kV sabirnicama HE Zakućac za najviše 3 kV. Naponi na 110 kV sabirnicama TS Konjsko se mogu održavati do vrijednosti od 116 kV, a na 110 kV sabirnicama HE Zakućac do 119 kV.

Naponske prilike mogu biti još nepovoljnije od prikazanih ukoliko je angažman HE na Cetini smanjen, što je realno stanje budući da su iste ljeti ili zimi noću zbog hidroloških razloga i stanja akumulacija, te potreba EES-a, najčešće izvan pogona.

*Očito je da naponske prilike u razmatranom dijelu mreže neće biti moguće održavati unutar dozvoljenih granica u pogonskim stanjima karakterističnim po niskom opterećenju EES-a i da tada eventualno postoji potreba za Q/U regulacijskom uslugom pojedinih generatora HE na Cetini. Budući da su naponski problemi uzrokovani slabo opterećenom 400 kV mrežom radi čega dolazi do porasta napona na sve tri naponske razine, Q/U uslugu eventualno je moguće tražiti od generatora HE Zakućac i HE Orlovac priključenih na 220 kV mrežu.*

## 6.2 Ovisnost napona o angažmanu jalove snage generatora HE Zakućac

U ovom poglavlju analizirana je ovisnost napona u pojedinim čvorovima mreže o angažmanu jalove snage generatora HE Zakućac priključenih na 220 kV mrežu, odnosno međuovisnost napona u mreži i napona na sabirnicama generatora razmatrane HE. Proračuni su izvršeni za vremenski presjek 2010. godine u pogonskim stanjima karakterističnim po maksimalnom angažmanu HE na Cetini. Promatrani su naponi na 400, 220 i 110 kV sabirnicama TS Konjsko, te 220 kV i 110 kV sabirnicama HE Zakućac (kao referentni čvorovi mreže promatranog dijela EES-a), budući da su naponi u ostatku razmatranog dijela mreže određeni naponskim prilikama u TS Konjsko i HE Zakućac. U proračunima se pretpostavlja da je automatska regulacija napona na transformatorima 220/110 kV Konjsko aktivirana radi održavanja nazivnog napona sekundarne strane tih transformatora.

Tablica 18 prikazuje promjene napona na sabirnicama promatranih transformatorskih stanica pri jediničnoj negativnoj promjeni angažmana jalove snage generatora 2 (novi generator) HE Zakućac ( $\Delta Q_{G2} = -1$  Mvar).

Jedinična promjena angažmana jalove snage generatora 2 HE Zakućac ili generatora HE Orlovac približno jednako utječe na promjene naponskih prilika u razmatranom dijelu mreže. Utjecaj generatora HE Orlovac blago je izraženiji na naponske prilike u TS Konjsko dok je utjecaj generatora HE Zakućac izraženiji na naponske prilike na sabirnicama te hidroelektrane. Zbog znatno većeg raspona mogućeg angažmana jalove snage generatora HE Zakućac u odnosu

na generatore HE Orlovac, logično je da u eventualnoj Q/U regulaciji sudjeluju primarno generatori HE Zakućac.

Tablica 18 - Promjene napona ( $\Delta U_{kv}$ ) u TS Konjsko i HE Zakućac pri jediničnoj negativnoj promjeni angažmana jalove snage generatora 2 HE Zakućac

Pogonsko stanje	Konjsko			Zakućac		$U_{G2}$ pu	$Q_{G2}$ Mvar
	400 kV	220 kV	110 kV	220 kV	110 kV		
$P_{\max \text{ zima } 2010}$	-0,02	-0,02	0,00	-0,04	-0,01	0,999	33,2
$P_{\min \text{ zima } 2010}$	-0,02	-0,03	-0,01	-0,05	-0,01	0,999	21,8
$P_{\max \text{ ljeto } 2010}$	-0,02	-0,03	-0,01	-0,04	-0,01	0,999	29,8
$P_{\min \text{ ljeto } 2010}$	-0,03	-0,03	-0,01	-0,05	-0,01	0,999	-7,8

Promotrimo pogonsko stanje 2010. godine u minimalnom opterećenju EES-a i maksimalnom angažmanu HE na Cetini. Uz automatsku regulaciju napona na transformatorima 220/110 kV Konjsko naponske prilike u TS Konjsko iznositi će 432 kV/247 kV/117 kV a u HE Zakućac 247 kV/121 kV. Uz angažman oba generatora HE Zakućac priključena na 220 kV mrežu u krajnjoj točki dozvoljenog područja pogonskog dijagrama ( $Q = -92$  Mvar,  $Q = -18$  Mvar) naponi u TS Konjsko iznosili bi 428 kV/244 kV/116 kV, a u HE Zakućac 241 kV/120 kV, ali naponi na sabirnicama generatora 2 i 3 HE Zakućac iznosili bi granično dozvoljenih 0,9 pu (generator 170 MVA) i 0,97 pu (generator 150 MVA), što opet smanjuje mogućnost rada generatora u poduzbudi.

Ukoliko bi za isto pogonsko stanje imali tri generatora HE Zakućac priključena na 220 kV mrežu, uz odgovarajuće pojačanje iste (DV 220 kV Zakućac – Konjsko 2), naponi u TS Konjsko bi iznosili 431 kV/247 kV/118 kV, a u HE Zakućac 246 kV/121 kV ukoliko je na sabirnicama generatora HE Zakućac nazivni napon, odnosno 425 kV/240 kV/115 kV u TS Konjsko i 238 kV/119 kV u HE Zakućac ukoliko je na sabirnicama novih generatora minimalno dozvoljeni napon ( $0,9 U_n$ ). Novi generatori u HE Zakućac davali bi tada -75 Mvar po generatoru dok bi generator 150 MVA uz minimalan angažman jalove snage određen podešenjem limitera poduzbude (-18 Mvar) imao napon na sabirnicama generatora u iznosu od  $0,96 U_n$ .

*Možemo zaključiti da bi generatorima HE Zakućac priključenim na 220 kV mrežu (eventualno uz ispomoć generatora HE Orlovac) mogli smanjiti napone u 220 kV i 110 kV mrežama ispod dozvoljenih gornjih granica, ali ne sa sigurnošću i u 400 kV mreži. Priključak trećeg i četvrtog generatora HE Zakućac na 220 kV mrežu povećava mogućnosti regulacije napona u mrežama 220 kV i 110 kV. Za održavanje naponskih prilika u 400 kV mreži nužno je angažirati generatore RHE Velebit u kompenzatorskom režimu rada, kupovati uslugu regulacije napona od susjedne BiH (RHE Čaplina) ili instalirati prigušnicu na 400 kV sabirnice RHE Velebit ili TS Konjsko [8, 9].*



## 7 ZAKLJUČNO

Radi određivanja rješenja priključka HE Zakučac na EES nakon njene rekonstrukcije izvršeni su statički proračuni tokova snaga i naponskih prilika u prijenosnoj mreži. Model mreže na kojemu su izvršeni proračuni sastoji se od 400, 220 i 110 kV mreže Hrvatske smještene unutar šireg UCTE sustava modeliranog od Portugala do Grčke. Elektrane su modelirane kao grupe generatora i blok transformatora, a tereti kao konstantna snaga u čvorovima 110 kV mreže. Model je verificiran s obzirom na postignuto pogonsko stanje u studenom 2002. godine, usporedbom izmjerenih i estimiranih tokova snaga pojedinim granama i napona čvorova s vrijednostima proračunatim na modelu.

Varijante proračuna definirane su s obzirom na promatrani vremenski presjek (2010. godina), pretpostavljeno rješenje priključka HE Zakučac na EES (postojeće rješenje, rješenje s tri ili četiri agregata priključena na 220 kV sabirnice elektrane), opterećenje EES-a (maksimalno i minimalno zimsko i ljetno opterećenje), angažman HE na Cetini (inicijalan, maksimalan angažman, pojedinačan maksimalan angažman) i raspoloživost grana mreže (*n* grana raspoloživo, *n*-1 grana raspoloživo). Ulazni podaci za proračun preuzeti su iz dosadašnjih studija (Plan razvitka EES-a Hrvatske do 2020. godine) i HEP-ovih izvješća (Statistika pogonskih događaja, Tehnička izvješća PrP Split i dr.).

Proračuni za vremenski presjek 2010. godine pretpostavljaju pogon novih generatora u HE Zakučac i HE Peruča koji zamjenjuju postojeće generatore (generatore 120 MVA u HE Zakučac i generatore 26 MVA u HE Peruča). Dozvoljena područja rada generatora HE na Cetini određena su na temelju pogonskih karata. Modelirana su aktualna podešenja limitera poduzbude pojedinih generatora.

Sigurnost plasmana snage (proizvodnje) HE na Cetini ispitana je za analizirana pogonska stanja na temelju (*n*-1) kriterija koji se odnosi na zadovoljavanje postavljenih tehničkih uvjeta u pogledu opterećenja grana i naponskih prilika u čvorovima mreže pri neraspoloživosti jedne grane ili generatora u elektroenergetskom sustavu. Kao granice dozvoljenih opterećenja grana promatrana su aktualna podešenja zaštita, termičke granice vodova, odnosno prividne snage transformatora.

Analize tokova snaga i naponskih prilika za razmatrana pogonska stanja ukazuju na sljedeće:

- Plasman proizvodnje HE Zakučac omogućen je ukoliko su raspoložive sve grane mreže.
- Sigurnost plasmana snage HE Zakučac nije zadovoljavajuća bez obzira na raspored priključka agregata po pojedinim naponskim razinama.

Vežano za sigurnost plasmana proizvodnje prema (*n*-1) kriteriju analize pokazuju narušavanje istog u određenim pogonskim stanjima. Ovisno o razmatranom pogonskom

stanju javlja se tri kritična događaja kod postojećeg priključka agregata:

- 1 Ispad jedne trojke DV 2x110 kV Meterize – Vrboran dovodi do preopterećenja paralelne trojke.
- 2 Ispad jedne trojke DV 2x110 kV Zakučac – Meterize dovodi do preopterećenja paralelnog voda Zakučac – Meterize 3.
- 3 Ispad DV 110 kV Zakučac – Dugi Rat 2 može dovesti do preopterećenja paralelnog voda Zakučac – Dugi Rat 1.

Pogonska stanja u kojima je ograničen plasman proizvodnje HE Zakučac su sljedeća:

- 1 Minimalno zimsko opterećenje 2010. godine, maksimalan angažman HE Zakučac.
- 4 Minimalno ljetno opterećenje 2010. godine, maksimalan angažman HE Zakučac.

Najveći problemi u svezi s plasmanom proizvodnje HE Zakučac javljaju se na dva elementa (jedinice) mreže:

- 1 DV 2x110 kV Meterize – Vrboran
- 2 transformator 220/110 kV (100 MVA) HE Zakučac

Ovisno o angažiranoj snazi pojedinih agregata HE Zakučac i hidroelektrane u cjelini, opterećenju okolnih čvorova, angažmanu bliskih hidroelektrana i automatskoj regulaciji na transformatorima 220/110 kV u TS Konjsko u pojedinim pogonskim stanjima može dolaziti do preopterećenja jedne trojke DV 2x110 kV Meterize – Vrboran pri ispadu paralelne trojke. Isključenje preopterećene trojke tog voda može dovesti do preopterećenja transformatora 220/110 kV u HE Zakučac, a njegovim isključenjem i do daljnjih lančanih preopterećenja u mreži (DV Kraljevac – Imotski – Grude i dr.). Da bi se to spriječilo nužno je tada ograničiti proizvodnju agregata HE Zakučac priključenih na 110 kV naponsku razinu. Moguća izgradnja novih vjetroelektrana na području južne Hrvatske (Pelješac, Ston, Dovanj, Dubrovnik) nepovoljno utječe na sigurnost plasmana HE Zakučac, budući da se njena proizvodnja dodatno usmjerava na kritičan pravac u 110 kV mreži (HE Zakučac - TS Meterize - TS Vrboran). Mogući nepovoljni utjecaj na sigurnost plasmana snage HE Zakučac ovisi o snagama novih vjetroelektrana priključenih na 110 kV naponsku razinu ili na mrežu distribucije.

Transformacija 220/110 kV u HE Zakučac ugrožena je još u dva slučaja:

- 1 Ukoliko je regulacijska preklopka pomaknuta iz srednjeg položaja (nazivni prijenosni omjer) može doći do visokih tokova jalove snage kroz transformator i preopteretiti ga.
- 2 Ukoliko su pri smanjenom angažmanu HE Zakučac u cjelini, angažirani samo blokovi priključeni na 220 kV naponsku razinu može doći do visokih tokova djelatne snage iz 220 kV u 110 kV mrežu što će preopteretiti transformaciju u Zakučcu, a ovisno o opterećenju okolnih čvorova, angažmanu bliskih HE priključenih na 110 kV mrežu (HE Kraljevac, HE Peruča, HE Đale, HE Dubrovnik) te raspoloživosti transformatora 220/110

kV u TS Konjsko i 220 kV vodova Zakućac – Konjsko i Zakućac – Bilice.

Provedene analize upućuju na moguća visoka opterećenja DV 220 kV Zakućac – Konjsko.

Dozvoljena opterećenja voda 220 kV Zakućac – Konjsko ograničena su postojećom izvedbom ugrađenih strujnih mjernih transformatora radi kojih je zaštita podešena na prorađnu vrijednost od 720 A, što je manje od termičke granice voda koja iznosi najmanje 780 A. Uz takvo podešenje zaštite moguća su preopterećenja razmatranog voda koja dovode do nemogućnosti plasmana proizvodnje HE Zakućac, uzrokovana prvenstveno velikim tranzitima preko prijenosne mreže za potrebe trećih zemalja. Da bi se dozvoljena opterećenja voda Zakućac – Konjsko povećala nužno je povećati nazivnu struju strujnih mjernih transformatora i podesiti zaštitu na vrijednost ne manju od dozvoljenog termičkog opterećenja voda.

**Da bi se osigurala (n-1) sigurnost plasmana proizvodnje HE Zakućac u rješenju prikljucka dva agregata na 110 kV, a dva na 220 kV naponsku razinu, nužno je izvesti uvod/izvod jedne trojke DV 2x110 kV Zakućac – Meterize ili DV 110 kV Zakućac – Meterize 3 u TS Vrboran. Potpuna sigurnost plasmana snage HE Zakućac postiže se dodatno uz rekonstrukciju (povećanje prijenosne moći kroz zamjenu vodiča i stupova ili ugradnju "crnih" vodiča na istim stupovima) DV 110 kV Zakućac – Meterize 3.**

Kao alternativa gore navedenim pojačanjima 110 kV mreže vezano za sigurnost plasmana snage i proizvodnje HE Zakućac, ali s većim investicijskim troškovima, pojačanje je 220 kV mreže (izgradnja novog DV Zakućac – Konjsko 2, prikljuckak tri ili sva četiri generatora HE Zakućac na 220 kV sabirnice hidroelektrane, ugradnja transformacije 220/110 kV u Zakućcu – minimalno 2x100 MVA (dodatno pojačanje transformacije 220/110 kV u Konjskom u slučaju prikljucka sva četiri agregata HE Zakućac na 220 kV mrežu). Pri izboru između dvije gore opisane varijante prikljucka HE Zakućac treba voditi računa i o potrebnim investicijama u mrežu, budući da se radi o izgradnji DV 2x110 kV (L~2 do 3 km) u prvoj varijanti, te minimalno DV 220 kV (L~25 km) u drugoj varijanti. Izuzimajući ostale troškove (pojačanje transformacija 220/110 kV u Zakućcu i/ili Konjskom, polja, blok transformator, ulaganja u okolna postrojenja) razlika troškova bi iznosila oko 2 400 000 € (oko 2 800 000 € za DV 220 kV Zakućac – Konjsko 2 minus oko 400 000 € za uvod/izvod DV 2x110 kV Zakućac – Meterize u TS Vrboran).

Uz postojeći prikljuckak dva generatora HE Zakućac na 220 kV mrežu i dva na 110 kV mrežu nije opravdano pojačavati 220 kV mrežu (TS 220/110 kV Vrboran, uvod/izvod DV 220 kV Zakućac – Konjsko u TS Vrboran ili uvod/izvod DV 220 kV Zakućac – Bilice u TS Vrboran ili uvod/izvod DV 220 kV Zakućac – Bilice u TS Konjsko) radi sigurnosti plasmana snage i proizvodnje HE Zakućac.

Analize pokazuju da kod prikljucka dva generatora HE Zakućac na 220 kV mrežu i dva na 110 kV mrežu pojačanja 220 kV mreže očekivano neće otkloniti ograničenja koja se javljaju u 110 kV mreži i na transformaciji 220/110 kV u HE Zakućac. Različite varijante pojačanja 220 kV mreže ima smisla promatrati samo u slučaju prikljucka barem još jednog generatora HE Zakućac na 220 kV mrežu.

Naponske prilike u razmatranom dijelu mreže neće biti moguće održavati unutar dozvoljenih granica u pogonskim stanjima karakterističnim po niskom opterećenju EES-a i tada eventualno postoji potreba za Q/U regulacijskom uslugom pojedinih generatora HE na Cetini. Budući da su naponski problemi uzrokovani slabo opterećenom 400 kV mrežom radi čega dolazi do porasta napona na sve tri naponske razine, Q/U uslugu eventualno je moguće tražiti od generatora HE Zakućac i HE Orlovac prikljuckanih na 220 kV mrežu.

Odstupanja napona na modelu izvan dozvoljenih granica detektirana su samo u stanjima niskih ljetnih opterećenja sustava kada zbog slabo opterećenih vodova 400 kV dolazi do previsokih iznosa napona u mrežama sve tri naponske razine. Koristeći mogućnost promjene prijenosnog omjera transformatora 400/220 kV u TS Konjsko i automatske regulacije transformatora 220/110 kV u istoj transformatorskoj stanici, napone u mrežama 220 kV i 110 kV moguće je održavati unutar dozvoljenih granica bez posebnih regulacijskih zahtjeva na okolne generatore. Koristeći generatore HE Zakućac prikljuckane na 220 kV mrežu (eventualno uz ispomoć generatora HE Orlovac) mogli bismo smanjiti napone u 220 kV i 110 kV mrežama ispod dozvoljenih gornjih granica, ali ne sa sigurnošću i u 400 kV mreži. Za održavanje naponskih prilika u 400 kV mreži nužno je angažirati generatore RHE Velebit u kompenzatorskom režimu rada, kupovati uslugu regulacije napona od susjedne BiH (RHE Čapljina) ili instalirati prigušnicu ili statički var kompenzator na 400 kV sabirnice RHE Velebit ili TS Konjsko.

Generatore HE Zakućac (i eventualno generatore HE Orlovac) moguće je koristiti za uslugu Q/U regulacije radi održavanja napona u mrežama 220 kV i 110 kV Dalmacije, ublažavanja napona u mreži 400 kV te u poremećenim stanjima EES-a (npr. otočni pogon Dalmacije).

Korištenje generatora HE Zakućac prikljuckanih na 220 kV mrežu u sekundarnoj Q/U regulaciji s obzirom na željeni napon pilot čvora (220 kV Konjsko) ne izgleda nužno budući da očekivane naponske prilike odstupaju od dozvoljenih vrijednosti u relativno kratkom razdoblju tijekom godine (niska ljetna opterećenja) kada je i mogućnost angažmana HE na Cetini smanjena radi najčešće loših hidroloških okolnosti. Osim toga, kratkotrajna prekoračenja dozvoljenih gornjih granica napona u okvirima izračunatih maksimalno očekivanih vrijednosti ne ugrožavaju opremu što otklanja potrebu za brzom

$Q/U$  automatskom regulacijom. U slučaju potrebe za takvom uslugom od generatora HE Zakučac i HE Orlovac ocjenjujemo prihvatljivim ručno podešenje angažmana jalove snage generatora, odnosno napona na generatorskim sabirnicama, nakon naloga dispečera. Potrebno je pri tom napomenuti da različiti strojevi priključeni na različite naponske razine imaju različite faktore korisnosti što otežava optimizaciju rada hidroelektrane.

## LITERATURA

- [1] Razvoj elektrifikacije Hrvatske, II dio, Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1984.
- [2] Analiza priključka hidroelektrana vodotoka Cetine na EES s osnova moguće proizvodnje i sigurnosti plasmana električne snage i energije, Energetski institut Hrvoje Požar, 2004.
- [3] Statistika pogonskih događaja u prijenosnoj mreži – razdoblje od 1995. do 2001., HEP – Direkcija za prijenos i upravljanje, Zagreb, 1996. – 2002.
- [4] Ageing of the system – Impact on planning, CIGRE Paris, WG 37-27, publikacija br. 176, 2000.
- [5] Izvješće o stanju VN postrojenja s osvrtom na sigurnost napajanja potrošača te procjena troškova nužnih zamjena i rekonstrukcija te sanacija ratnih šteta, HEP – Direkcija za prijenos, 2001.
- [6] Razvitak elektroenergetskog sustava Hrvatske do 2030. godine – Master plan (novelacija), Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2001.
- [7] Project: Regional Transmission System Planning, Seci Regional Electricity Interconnection Study, ISTG (EIHP, ZEK, NEK, EKC), 2002
- [8] Analiza i načini rješavanja kompenzacije reaktivne snage na lokaciji RHE Velebit: Analiza Naponskih Prilika U RHE Velebit s prijedlogom idejnog rješenja kompenzacije, EIHP, Zagreb, 1999.
- [9] Analiza potreba ugradnje kompenzacijskih uređaja u prijenosnoj mreži HEP-a za planirani razvoj mreže u kratkoročnom i srednjoročnom razdoblju, EIHP, Zagreb, 2002.

Naslov pisaca:

**Mr. sc. Davor Bajs, dipl. ing.**  
**prof. dr. sc. Mislav Majstrovic, dipl. ing.**  
**mr. sc. Goran Majstrovic, dipl. ing.**  
**Energetski institut Hrvoje Požar**  
**Savska 163, 10000 Zagreb, Hrvatska**  
**[www.eihp.hr/~dbajs](http://www.eihp.hr/~dbajs)**  
**[www.eihp.hr/~mmajstro](http://www.eihp.hr/~mmajstro)**  
**[www.eihp.hr/~gmajstro](http://www.eihp.hr/~gmajstro)**

Uredništvo primilo rukopis:  
2005-08-30