

# OPTIMALNA VELIČINA I LOKACIJA UGRADNJE KOMPENZACIJSKIH UREĐAJA U PRIJENOSNOJ MREŽI HEP-a

Mr. sc. Davor Bajs – prof. dr. sc. Mislav Majstrovic – mr. sc. Goran Majstrovic, Zagreb

UDK 621.316.1:621.3.083.5  
STRUČNI ČLANAK

Prezentira se analiza optimalne veličine i lokacije ugradnje kompenzacijskog(ih) uređaja u prijenosnoj mreži Hrvatske elektroprivrede, za planirani razvoj mreže u kratkoročnom i srednjoročnom razdoblju. Analiza je provedena na temelju matematičkog modela opisanog u prethodnom članku. Na osnovi velikog broja mogućih i očekivanih pogonskih stanja daje se prijedlog kompenzacije, te se analizira utjecaj pojedinih mjera i korištenja postojećih resursa radi održavanja naponskih prilika unutar dozvoljenih granica.

**Ključne riječi:** kompenzacijski uređaj, kratkoročno i srednjoročno razdoblje, naponske prilike.

## 1. UVOD

Prostorna raspodjela proizvodnih postrojenja i većih potrošačkih centara u Republici Hrvatskoj međusobno povezanih prijenosnom mrežom longitudinalne strukture najvišeg 400 kV napona, velika ovisnost o hidrologiji i izvedba priključka postojećih elektrana pretežito na 220 kV i 110 kV mreže, te karakteristike potrošnje s velikim varijacijama između maksimalnih i minimalnih dnevnih, sezonskih i godišnjih opterećenja, uzrokuju značajne promjene naponskih prilika u 400 kV mreži, posebno na njenom južnom kraku (TS Melina, RHE Obrovac, TS Konjsko).

Izvršene analize pokazuju da će se problematika previsokih napona u prijenosnoj mreži HEP-a još više potencirati obnovom 400 kV mreže na području Bosne i Hercegovine, odnosno rekonstrukcijom današnje druge sinkrone zone UCTE (Srbija, Crna Gora, Makedonija, Grčka, Bugarska i Rumunjska).

Problematika nepovoljnih naponskih okolnosti, prvenstveno s aspekta previsokih napona na južnom kraku prijenosne 400 kV mreže, razmatrana je u više studija, elaborata i članaka posljednjih nekoliko godina [2], [3]. Godine 2000. održan je i okrugli stol u organizaciji HK Cigre, na kojemu je raspravljana problematika nepovoljnih naponskih okolnosti u prijenosnoj mreži HEP-a, te problematika prijelazne i dinamičke stabilnosti EES-a. Na spomenutom okruglom stolu HK Cigre zabilježeno je i sljedeće razmišljanje: "Na osnovi svega prethodno iznesenog, mišljenja smo da rješavanje problematike nepovoljnih naponskih prilika u dijelu 400 kV mreže na području R. Hrvatske, a posebice na njenom južnom kraku, te problematike stabilnosti EES-a ne treba odgađati, te da je nužno izvršiti sve preostale analize i eventualno nadopu-

*niti dosadašnje novijim saznanjima o razvoju prijenosne mreže i EES-a u cjelini, nakon čega je potrebno izvesti optimalne zahvate u mreži koji bi sanirali postojeće stanje, te osigurali povoljan naponski profil i dovoljnu rezervu s aspekta očuvanja prijelazne i dinamičke stabilnosti EES-a ovisno o njegovu razvoju u bližoj i daljoj budućnosti".*

## 2. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model na osnovi kojega su izvršeni proračuni detaljno je opisan u prethodnom članku. Matematički postupak je programiran, a korišteni programski paket je nazvan *Optlok*. Optlok koristi proračune tokova snaga i naponskih prilika izračunatih u programskom paketu *TOKSwin*, te na temelju matematičkog postupka opisanog u [1] daje kao izlazni rezultat optimalnu(e) lokaciju(e) i veličinu(e) kompenzacijskog(ih) uređaja. Optimalna lokacija i veličina kompenzacijskog uređaja se određuje na osnovi:

- zadovoljenja naponskih prilika u mreži,
- gubitaka radne snage u mreži, i
- izbjegavanja sloma napona.

Kao početni korak u čitavom postupku nužno je formirati model EES u programskom paketu *TOKSwin*, te određeni broj mogućih pogonskih stanja kojima se pridružuju težinski faktori, kao mjera vjerojatnosti nastanka pojedinog pogonskog stanja. Budući da je neracionalno modelirati sva moguća pogonska stanja u mreži kroz godinu dana, te im pridruživati određene vjerojatnosti (zbroy svih vjerojatnosti bi tada bio 1), koriste se težinski faktori kao mjera "međusobne" vjerojatnosti nastanka određenog pogonskog stanja

i/ili mjera značajnosti za sustav pojedine varijante. Tako je npr. pogonsko stanje s težinskim faktorom 4 dvaput vjerojatnije od onoga s težinskim faktorom 2, odn. 4 puta vjerojatnije od onoga s težinskim faktorom 1.

Prilikom modeliranja mogućih pogonskih stanja potrebno je obratiti pažnju na opterećenja grana u mreži, te angažman regulacijske elektrane. Ukoliko je u kasnijem postupku pri ugradnji određenog kompenzacijskog uređaja angažman regulacijske elektrane izvan dozvoljenih granica, ili ukoliko je neka grana mreže opterećena iznad dozvoljene granice, postupak odbacuje tu varijantu kompenzacije koja se tada ispitala.

Nakon modeliranja određenog broja mogućih pogonskih stanja i pridruživanja težinskih faktora svakome od njih, definiraju se moguće veličine i svojstva kompenzacijskih uređaja koji se ispituju. Razlog tomu je težnja za pronalaženjem realnog (praktičnog) optimuma, te izbjegavanje rezultata tipa decimalnog broja. Svojstva kompenzacijskog uređaja govore o njegovom induktivnom (prigušnica) ili kapacitivnom (kondenzator) djelovanju.

Nakon definiranja mogućih (ispitivanih) pogonskih stanja i veličina kompenzacijskih uređaja, obavlja se priprema podataka za proračun. Ta priprema podrazumijeva proračun tokova snaga, odnosno određivanje svih potrebnih varijabli stanja (naponi (moduli i kutevi), radna, jalova snaga, angažman regulacijske elektrane), za sva modelirana pogonska stanja. Nakon toga pristupa se proračunu optimalne lokacije i veličine kompenzacijskog uređaja s aspekta prethodno nabrojena tri kriterija, a za željeni (definirani) broj kompenzacijskih uređaja u mreži. Završni korak analize je određivanje optimalne lokacije i veličine kompenzacijskog uređaja s aspekta zadovoljenja sva tri postavljena kriterija.

### 3. MODEL ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Planirana i analizirana konfiguracija prijenosne mreže HEP-a, naponskih razina 400, 220 i 110 kV, a za promatrane vremenske presjeka ("nazivna" 2005. i 2010. godina), prikazana je slikama 1 i 2 (u Prilogu na str. 139. i 140). Pretpostavka je da će se do razmatranog početnog vremenskog presjeka ("nazivna" 2005. godina) obnoviti cjelokupna 400 kV i 110 kV mreža u Slavoniji (TS 400/110 kV Ernestinovo i rasplet 110 kV vodova prema prijeratnom stanju), izgraditi TS 400/220/110 kV Žerjavinec, te da će se na UCTE povezati EES-i BiH, Jugoslavije, Makedonije, Rumunjske, Bugarske i Grčke (cjelokupna 400 i 220 kV mreža BiH je obnovljena). Pretpostavljeno je da će u EES Hrvatske između 2005. i 2010. godine ući u pogon nova KTE Rijeka u krugu postojeće TE Rijeka (360 MW, 180 Mvar kap., 270 Mvar ind. – podaci ABB, [14], priključena na 400 kV sabirnice TS Melina.

Model EES-a RH obuhvaća cjelokupnu prijenosnu 400, 220 i 110 kV mrežu HEP-a. Elektrane su modeli-

rane preko generatora i blok transformatora, zajedno s priključnim dalekovodima. Potrošači su modelirani na 110 kV naponskoj razini. Svi mrežni transformatori, izuzev onih u TS Tumbri na koje se priključuje postojeća prigušnica, modelirani su kao dvonamotni, što znači da se nisu ispitale varijante ugradnje kompenzacijskih uređaja na tercijare tih transformatora, budući da je ocijenjeno (na temelju dosadašnjih studija) da bi takav slučaj rezultirao ekonomski neisplativim rješenjem s nerealno velikim brojem konačnih čvorova za ugradnju kompenzacijskih uređaja. Prigušnica u TS 400/110 kV Tumbri (priključena na tercijare transformatora) inicijalno je odspojena, budući da su naponske prilike u toj TS unutar dozvoljenih granica, a da ona ne utječe značajno na popravljavanje naponskog profila na južnom kraku 400 kV mreže koja je kritična s aspekta pojave previsokih napona (priključenjem prigušnice u TS Tumbri napon u svim TS 400/(220)/110 kV se smanjuje za 1 – 2 kV na 400 kV razini). Prigušnica 100 Mvar u Ernestinovu (predviđena za ugradnju), priključena na 110 kV sabirnice, inicijalno je odspojena budući da su naponske prilike u toj TS zadovoljavajuće (pretpostavka je da TE Nikola Tesla regulira napon oko nazivnih vrijednosti u čvoru Obrenovac). Kondenzatorska baterija priključena na 110 kV sabirnice TS 220/110 kV Đakovo uključena je na modelu u vršnom režimu rada.

Budući da je cilj provedenih analiza bilo sagledavanje potrebe za ugradnjom jednog ili više kompenzacijskih uređaja na optimalnoj lokaciji(ama), pretpostavka je da će se svi postojeći resursi u sustavu koristiti prema svojim tehničkim mogućnostima. To znači da su pojedini generatori na modelu u mogućnosti davati jalovu induktivnu i kapacitivnu snagu (određeno prema tvorničkim pogonskim kartama pojedinih generatora dostupnih autorima ovog članka), te da su preklopke transformatora s mogućnošću promjene prijenosnog omjera, (400/220 i 400/110 kV transformatora u beznaponskom stanju, te 220/110 kV transformatora automatski, postavljene u optimalan položaj s obzirom na nazivni napon sekundara. Ta pretpostavka nije u skladu s postojećom praksom prema kojoj su te preklopke stalno u nultom položaju (mogućnosti utjecaja na tokove jalove snage i naponske prilike se ne koriste na taj način), ali preporuka je da se ubuduće one postavljaju u "optimalan" položaj barem dva puta godišnje (zimski i ljetni režim rada).

Za razmatrani problem u ovom članku od velike je važnosti odrediti mogući angažman elektrana (pojedinih generatora) u kapacitivnom i induktivnom dijelu pogonskog dijagrama, odnosno dozvoljeno područje rada generatora. Za postavljanje ispravnog modela vrlo je važno posjedovati ažurirane pogonske karte svih generatora u EES-u, što nažalost danas nije slučaj. Praksa je takva da se generatori u EES-u Hrvatske ne angažiraju u kapacitivnom dijelu pogonskog dijagrama [3] iz uglavnom neopravdanih razloga (nepoznato podešenje limitera poduzbude, neodređena praktična

granica stabilnosti, i dr.). Za očekivati je da će se stanje u svezi s tom problematikom bitno promijeniti uvođenjem otvorenog tržišta električnom energijom u kojemu će se pomoćne usluge (*eng. ancillary services*) financijski vrednovati, a u takve spadaju i primarna, te sekundarna i tercijarna regulacija reaktivne snage i napona.

Za ispravno određivanje optimalnih lokacija kompenzacijskog uređaja u EES-u Hrvatske nužno je modelirati (s većom ili manjom detaljnošću) susjedne elektroenergetske sustave, budući da oni imaju veliki utjecaj na naponski profil u promatranoj mreži. Model elektroenergetskih sustava ovog dijela Europe obuhvaća 400, 220 i 110 kV mrežu Hrvatske, 400 i 220 kV mreže Bosne i Hercegovine i Slovenije, 400 kV mreže Srbije i Crne Gore, te dio 400 kV mreže Mađarske (potez Heviz-Paks-Sandorfalva). Procijenjeno je da je takav model zadovoljavajući s obzirom na razmatrani problem. Model susjednih EES-a postavljen je na temelju podataka iz [4]. U navedenoj literaturi nalaze se opisi modela elektroenergetskih sustava Slovenije, Hrvatske, Mađarske, Rumunjske, Bugarske, Srbije, Bosne i Hercegovine, Crne Gore, Makedonije, Albanije, Grčke i Turske, te ekvivalenti mreža UCTE i zapadne Ukrajne, za "nazivnu" 2005. godinu prema službenim planovima pojedinih elektroprivreda. Modeli EES-a se nalaze u formatu za programski paket PSS/E, pa su stoga podešeni za prikaz u TOKSwin-u. Svaki model pojedinog sustava sadrži službeno planiranu konfiguraciju mreže za razmatrani vremenski presjek, opterećenja modelirana na 400 kV i 220 kV naponskoj razini, prikaz elektrana kao grupa generatora i blok transformatora, angažman elektrana za bazno stanje (uravnoteženi sustavi), mogućnosti rada generatora u nadubudi ili podubudi, te dugoročne ugovore o razmjeni električne energije. Za ispitivanu "nazivnu" 2010. godinu pretpostavljeno je da konfiguracije mreža susjednih modeliranih EES-a ostaju iste u odnosu na "nazivnu" 2005. godinu, a da će opterećenje u svakom modeliranom susjednom EES-u rasti po stopi od 2.5 % godišnje.

Osnovni princip po kojemu su modelirani susjedni EES-i je taj da se naponske prilike u svakom pojedinom susjednom sustavu moraju nalaziti unutar dozvoljenih granica, ukoliko je to moguće postići korištenjem postojećih resursa u mreži ili uz ispomoć njima susjednih sustava. To znači da su eventualna odstupanja napona u EES-u Hrvatske uglavnom posljedica karakteristika našeg EES-a, a ne uzrokovana problemima u našem okruženju. To je vrlo bitna pretpostavka budući da zbog strukture prijenosne mreže Hrvatske (longitudinalna struktura, četiri električki povezana susjedna sustava) naponski profil u graničnim čvorovima (praktički u čitavoj 400 kV mreži) direktno ovisi o naponskom profilu u pojedinom susjednom EES-u. Tako je npr. napon u TS Ernestinovo direktno ovisan o naponu u Sremskoj Mitrovici (Obrenovcu), u TS Žerjavinec o naponu u TS Heviz, u

TS Tumbri o naponu u NE Krško, TS Melina je ovisna o naponskim prilikama u TS Divača, a naponi u TS Konjsko o naponu na sabirnicama TS Mostar. Naravno da vrijedi i obrnut utjecaj, što je značajan razlog da se pristupi saniranju nepovoljnih naponskih prilika u EES-u Hrvatske kako bi se uostalom zadovoljila pravila rada sustava u interkonekciji UCTE [5] – pogl 4. Voltage and reactive power control). Za većinu razmatranih pogonskih stanja naponske prilike u susjednim EES-ima su unutar dozvoljenih granica, iako u pojedinim slučajevima pri minimalnom opterećenju (ljetni noćni režim rada) blizu dozvoljene gornje granice. Zadovoljavajuće naponske prilike u susjednim EES-ima se postižu bilo radom generatora u dozvoljenom području rada prema [4], bilo radom pojedinih elektrana u kompenzacijskom režimu (primjer RHE Čapljina u BiH), bilo prijenosom dovoljnih količina reaktivne snage iz njima susjednih EES-a (primjer Srbija – Bugarska).

#### 4. VARIJANTE PRORAČUNA

Optimalne lokacije i veličine kompenzacijskih uređaja određene su uzimajući u obzir što veći broj mogućih pogonskih stanja kojima je pridružen određeni težinski faktor (prema slobodnoj procjeni planera). Pogonska stanja se međusobno razlikuju po:

- Vremenskom presjeku promatranja ("nazivna" 2005., "nazivna" 2010. godina).
- Opterećenju u sustavu (maksimalno, minimalno).
- Hidrologiji (normalna, ekstremno vlažna, ekstremno suha).
- Razmjenama snage sa susjednim EES-ima (Mađarskom, BiH, Srbijom).
- Tranzitima za treće sustave (Italija, BiH, Srbija, Bugarska).
- Angažmanu RHE Obrovac i RHE Čapljina (nisu angažirane, angažirane u generatorskom režimu rada, angažirane u motorskom režimu rada, angažirane u kompenzacijskom režimu rada).

Planirano opterećenje hrvatskog EES-a, te raspodjela opterećenja na pojedine čvorove 110 kV preuzeto je iz [12]. Pretpostavljeno je da minimum opterećenja iznosi 40 % maksimuma. Angažman hidroelektrana u vrijeme normalne, vlažne i suhe hidrologije određen je na osnovi podataka prikazanih u [11]. Termoelektrane se angažiraju prema minimalnim troškovima proizvodnje. Pogonska stanja su modelirana uzimajući u obzir mogućnosti razmjene energije/snage sljedećih iznosa:

- uvoz 1000 MW / 900 MW / 800 MW / 700 MW / 600 MW / 400 MW / 250 MW iz pravca EES Mađarske (na modelu prikazano povećanjem angažmana NE Paks)
- uvoz 800 MW / 700 MW / 600 MW / 500 MW / 400 MW / 300 MW iz EES BiH i Srbije (na modelu prika-

zano povećanjem angažmana elektrana u vlasništvu HEP-a i djelomice povećanjem angažmana TE Nikola Tesla)

- uvoz 700+500 MW / 600+400 MW / 500+400 MW / 400+300 MW / 300+200 MW iz pravca EES Mađarske, te BiH i Srbije (na modelu prikazano povećanjem angažmana NE Paks, te elektrana u vlasništvu HEP-a na području BiH i Srbije).

Promatrani su također sljedeći iznosi mogućih tranzita preko prijenosne mreže HEP-a:

- 700 MW BiH, Srbija, Bugarska → Italija
- 700 MW Italija → BiH, Srbija, Bugarska
- 600 MW BiH, Srbija, Bugarska → Italija
- 600 MW Italija → BiH, Srbija, Bugarska
- 500 MW BiH, Srbija, Bugarska → Italija
- 500 MW Italija → BiH, Srbija, Bugarska
- 400 MW BiH, Srbija, Bugarska → Italija
- 400 MW Italija → BiH, Srbija, Bugarska.

S obzirom na angažman RHE Obrovac (Velebit) i RHE Čapljina promatrane su sljedeće mogućnosti njihova rada:

1. generatorski rad do instalirane snage
2. kompenzacijski rad (RHE Obrovac do 80 Mvar, RHE Čapljina do 160 Mvar)
3. pumpni rad (RHE Obrovac do 240 MW, RHE Čapljina do 400 MW).

Ukupan broj modeliranih pogonskih stanja iznosi 224. Na "nazivnu" 2005. godinu odnosi se 112 pogonskih stanja, isto kao i za "nazivnu" 2010. godinu. Za svaki promatrani vremenski presjek modelirano je 36 pogonskih stanja u maksimumu opterećenja i 76 u minimumu opterećenja. Varijante proračuna s pridruženim težinskim faktorima mogu se pronaći u [2].

Za potrebe analiza u ovom članku razmatra se dva osnovna tipa kompenzacijskih uređaja:

1. kompenzacijski uređaj kapacitivnog djelovanja (paralelne prigušnice)
2. kompenzacijski uređaj induktivnog djelovanja (paralelne kondenzatorske baterije).

Prema terminologiji UCTE [5] korištenje ovih vrsta kompenzacijskih uređaja radi regulacije napona i reaktivnih snaga se svrstava u tercijarnu regulaciju.

Primjena ostalih uređaja za kompenzaciju reaktivne snage (sinkroni kompenzatori, statički VAR kompenzatori, FACTS uređaji), a koji se mogu izvesti iz dva osnovna tipa ovdje analizirana, u ovom članku nije razmatrana budući da se radi o sofisticiranim i relativno skupim uređajima s mogućnošću proizvodnje jalove induktivne i kapacitivne snage, a čija primjena ovisi i o drugim aspektima eksploatacije EES-a koji se ovdje ne promatraju (prijelazna i dinamička stabilnost, regulacija tokova aktivnih snaga i dr.). Generalno gledajući, nema nikakve prepreke da se i oni koriste za proizvodnju potrebne induktivne i/ili kapacitivne

snage, a osnovu za razmatranje potreba njihove ugradnje mogu predstavljati rezultati ovdje opisanih analiza u kojima se na istom čvoru pojavljuje potreba ugradnje kompenzacijskog uređaja dvosmjernog djelovanja (kapacitivno, induktivno) za različite grupe pogonskih stanja.

Analizirana su tri standardna modula (veličina) kompenzacijskih uređaja (paralelnih prigušnica i kondenzatorskih baterija): 50 Mvar, 100 Mvar i 150 Mvar.

Kao potencijane lokacije za ugradnju kompenzacijskih uređaja analizirani su svi mrežni 400 kV i 220 kV čvorovi u EES-u Hrvatske koji su izgrađeni do "nazivne" 2005. godine, a u kojima nisu priključene elektrane, s izuzetkom RHE Obrovac. Budući da se traži optimalan raspored i veličina kompenzacijskih uređaja za vremenske presjke 2005. i 2010. godine, u obzir se ne uzimaju čvorovi mreže (TS) izgrađeni poslije 2005. godine.

Čvorovi mreže 110 kV se ne uzimaju u obzir kao moguće lokacije ugradnje kompenzacijskih uređaja budući da su eventualni problemi s naponskim profilom na toj naponskoj razini uzrokovani poremećajima u 400 kV i 220 kV mrežama. Uzimanje i te naponske razine u obzir uzrokovalo bi (analogno ispitivanjima tercijara mrežnih transformatora) preveliki broj lokacija kompenzacijskih uređaja što se ocjenjuje neekonomičnim.

Popis potencijalnih lokacija je sljedeći:

<b>400 kV mreža</b>	<b>220 kV mreža</b>
TS Ernestinovo,	TS Međurić, TS Žerjavinec,
TS Žerjavinec,	TS Mraclin, RP Brinje,
TS Tumbri,	TS Melina,
TS Melina,	TS Pehlin,
RHE Obrovac,	TS Konjsko,
TS Konjsko	TS Bilice.

Sabirnice 220 kV u TS 220/110 kV Đakovo se ne uzimaju u obzir kao potencijalna lokacija kompenzacijskog uređaja budući da nisu izravno povezane s ostatkom 220 kV mreže EES-a RH. Matematički model koji se koristi radi određivanja optimalne lokacije i snage kompenzacijskog uređaja može rezultirati maksimalnim brojem kompenzacijskih uređaja smještenih na različite lokacije u mreži, jednak broju potencijalnih čvorova za ugradnju. Zato su ispitane tri moguće varijante s obzirom na broj ugrađenih kompenzacijskih uređaja, a koje su ocijenjene realnim i izvedivim: 1, 2 i 3 kompenzacijska uređaja u mreži

## 5. ANALIZA NAPONSKIH PRILIKA I TOKOVA SNAGA

### 5.1. Verifikacija modela

Radi verifikacije postavljenog modela za određivanje optimalne veličine i lokacije kompenzacijskog uređaja modelirano je stanje EES-a u maksimumu i minimumu opterećenja 2001. godine prema podacima dobivenim iz dispečerskog centra. Modeliranje je izvršeno u tri

koraka, ovisno o predstavljanju elektrana i susjednih EES-a. U završnom koraku na modelu su elektrane predstavljene kao grupe generatora i blok transformatora, a susjedni EES-i su modelirani u cijelosti.

Izmjerene veličine i rezultati na modelima su prikazani tablicama 1 i 2. Na osnovi usporedbe rezultata ocijenjeno je da je postignuti model dovoljno kvalitetan da posluži za ovdje prikazane analize.

**Tablica 1. Naponske prilike u mreži na modelu EES-a u maksimumu 2001.**

Sabirnica	Maksimum 2001 (17. 12. u 17 <sup>26</sup> )		Minimum 2001 (25. 6. u 3 <sup>30</sup> )	
	Naponi – izmjereni (kV)	Naponi – model (kV)	Naponi – izmjereni (kV)	Naponi – model (kV)
<b>400 kV</b>				
Tumbri	397.3	396	409.8	410
Melina	397.3	396	410.4	410
Obrovac	400.3	401	412.2	410
Konjsko	400.5	402	413.1	410
<b>220 kV</b>				
Mraclin	228.5	226	239.4	237
TE Sisak	230.3	231	238.5	238
Medurić	229.5	229	241.4	240
Đakovo	222.7	216	235.0	231
Brinje	231.6	231	238.0	238
HE Senj	231.4	231	237.5	238
Melina	227.9	227	235.8	236
Pehlin	226.7	226	235.1	236
Plomin	226.2	225	233.9	233
Konjsko	230.4	232	238.3	236
HE Zakučac	231.8	231	237.9	235
Bilice	229.7	231	239.4	237
<b>110 kV</b>				
Tumbri	114.0	114	117.6	118
Mraclin	114.5	115	117.0	117
Botinec	112.8	113	117.0	117
Nedeljanec	109.2	113	115.7	116
Đakovo	110.3	110	115.9	115
Osijek 2	105.0	106	115.1	114
Vinkovci	107.1	107	108.9	107
Melina	111.8	110	116.9	117
HE Rijeka	110.8	109	116.3	115
Obrovac	109.7	113	121.8	121
Konjsko	112.3	110	117.7	115
HE Zakučac	112.5	113	116.7	115
Sučidar	110.7	110	117.4	115

Tablica 2. Tokovi snaga pojedinim vodovima na modelu EES-a u maksimumu 2001.

Vod	Maksimum 2001 (17. 12. u 17 <sup>26</sup> )		Minimum 2001 (25. 6. u 3 <sup>30</sup> )	
	Tokovi snaga – izmjereni (MW/Mvar)	Tokovi snaga – model (MW/Mvar)	Tokovi snaga – izmjereni (MW/Mvar)	Tokovi snaga – model (MW/Mvar)
<b>400 kV</b>				
Tumbri – Heviz	– 780 / 115	– 778 / 125	– 326 / 20	– 324 / 20
Tumbri – Krško	2 x (– 182 / – 47)	2 x (– 177 / – 51)	2 x (– 208 / 14)	2 x (– 199 / 18)
Tumbri – Melina	549 / – 44	537 / – 42	479 / – 58	467 / – 57
Melina – Divača	398 / 1	387 / 26	217 / 20	205 / 14
Melina – Obrovac	74 / – 76	80 / – 90	205 / – 78	205 / – 66
Obrovac – Konjsko	23 / – 33	29 / – 45	121 / – 53	125 / – 31
<b>220 kV</b>				
Mraclin* – Đakovo	124 / 2	116 / 0	87 / – 6	81 / – 11
Mraclin* – Cirkovce	– 86 / – 3	– 64 / 24	– 28 / 8	– 28 / 5
Mraclin – Brinje	16 / – 33	3 / – 41	–	–
Mraclin – TE Sisak	– 63 / – 13	– 59 / – 57	– 56 / 19	– 55 / – 8
Đakovo – Tuzla	– 151 / – 13	– 151 / – 12	36 / – 8	34 / 10
Brinje – Konjsko	22 / – 16	22 / – 22	44 / – 24	43 / – 16
HE Senj – Melina	52 / 22	45 / 20	– 57 / 26	– 56 / 30
HE Senj – Brinje	6 / – 8	19 / – 4	44 / – 26	43 / – 18
Melina – Pehlin 1	169 / 17	157 / 31	11 / 20	7 / – 19
Melina – Pehlin 2	133 / 20	120 / 29	15 / 26	8 / – 25
Plomin – Pehlin	31 / – 14	20 / – 16	94 / – 31	91 / – 52
Plomin – Melina	– 14 / – 22	– 20 / – 21	63 / – 34	62 / – 34
Pehlin – Divača	165 / 15	135 / 45	89 / 32	80 / 34
Konjsko – Bilice	2 x (36 / – 3)	2 x (36 / – 3)	2 x (5 / – 17)	2 x (5 / – 16)
Konjsko – Mostar	– 48 / 7	– 48 / 39	49 / 24	50 / 38
Konjsko – HE Zakučac	– 70 / – 20	– 68 / 19	48 / – 1	49 / 6
HE Zakučac – Mostar	– 22 / 15	– 19 / 31	32 / 16	33 / 26
<b>110 kV</b>				
Tumbri – Mraclin	2 x (77 / – 27)	2 x (80 / – 34)	2 x (33 / – 2)	2 x (31 / – 5)
Tumbri – Botinec	155 / 19	157 / 21	63 / 10	63 / 8
Đakovo – S. Brod	10 / 17	8 / 20	0 / 0	– 1 / 0
Đakovo – Osijek 2	72 / 14	74 / 8	–	–
Đakovo – Vinkovci	109 / 1	105 / 5	30 / 54	30 / 54
Melina – HE Rijeka	41 / 11	38 / 13	3 / 11	6 / 62
Crikvenica – Krk	45 / – 7	48 / – 7	28 / – 16	22 / – 21
Obrovac – Benkovac	8 / 6	8 / 12	17 / 16	17 / 16
Konjsko – Vrboran	2 x (52 / 11)	2 x (52 / – 17)	2 x (43 / 0)	2 x (43 / 0)
Zakučac – Kraljevac	2 x (35 / 9)	2 x (36 / 9)	–	–

## 5.2. Analiza naponskih prilika

U 224 modelirana pogonska stanja detektirano je odstupanje napona od dozvoljenih gornjih granica (420 kV i 245 kV) u 41 pogonskom stanju 2005. i 48 pogonskih stanja 2010. godine (ukupno 89 pogonskih stanja s nedozvoljenim naponima – prekoračenja gornje granice u 400 kV i 220 kV mreži).

Za analizirane presječne godine pri maksimalnom opterećenju sustava ne dolazi do odstupanja naponskog profila od dozvoljenih granica na sve tri naponske razine (400, 220, 110 kV). Najniži naponi u 400, 220 i 110 kV mreži se kreću oko nazivnih vrijednosti. U minimumu opterećenja pojavljuje se problem povišenja napona u 400 kV mreži za većinu analiziranih pogonskih stanja. Napone u 220 kV mreži moguće je održavati unutar dozvoljenih granica za većinu analiziranih pogonskih stanja ispravnim podešenjem preklopki za regulaciju prijenosnog omjera transformatora 400/220 kV (u beznaponskom stanju). Naponi u 110 kV mreži nalaze se ispod dozvoljenih granica zbog optimalnog položaja preklopki transformatora 400/110 kV i automatske regulacije transformatora 220/110 kV. Najveći zabilježeni napon u 400 kV mreži "nazivne" 2005. iznosi 432 kV (RHE Obrovac), a "nazivne" 2010. godine 437 kV (TS Konjsko).

Previsoki naponi javljaju se isključivo na južnom kraku mreže (Konjsko, Obrovac, Melina), a u nekoliko varijanti zabilježen je previsok napon i u TE Sisak, TS Međurić i TS Đakovo.

## 5.3. Analiza opterećenosti elementa sustava i gubitaka radne snage

Opterećenja svih grana mreže (vodovi, mrežni transformatori, blok transformatori), u svim ispitivanim pogonskim stanjima, nalaze se unutar dozvoljenih granica, ukoliko su sve grane mreže raspoložive. Od svih ispitanih pogonskih stanja na modelu EES-a "nazivne" 2005. godine opterećenje 400 kV grana je manje od 28 % od njihove termičke granice, što znači da su one u normalnim okolnostima (raspoložive sve grane mreže) opterećene manje od 1/3 njihove prijenosne moći. Najveće zabilježeno opterećenje u postocima od termičke granice u 220 kV mreži iznosi 55 % I<sub>n</sub>. Gubici radne snage na modelu "nazivne" 2005. godine se kreću u rasponu od 45.5 MW do 65.2 MW u maksimumu opterećenja, odnosno od 15.3 MW do 22.4 MW u minimumu opterećenja.

Na modelu EES-a "nazivne" 2010. godine opterećenje 400 kV grana je manje od 40 % od njihove termičke granice, što znači da su one u normalnim okolnostima (raspoložive sve grane mreže) opterećene manje od 2/5 njihove prijenosne moći. Najveće zabilježeno opterećenje u postocima od termičke granice u 220 kV mreži iznosi 59 % I<sub>n</sub>. Gubici radne snage na modelu "nazivne" 2010. godine se kreću u rasponu od 51.2 MW do 85.4 MW u maksimumu opterećenja, odnosno od 15.6 MW do 24.3 MW u minimumu opterećenja.

To nadalje znači da su svi interni 400 kV vodovi u EES-u Hrvatske, pri svim analiziranim pogonskim stanjima, u normalnom pogonu (raspoložive sve grane mreže) opterećeni manje od njihove prirodne snage prijenosa pa se ponašaju kao proizvođači jalove induktivne snage (povišeni naponi i ostali efekti koji uz to idu).

## 6. OPTIMALNA VELIČINA I LOKACIJE KOMPENZACIJSKIH UREĐAJA

Optimalne lokacije (najviše 3) i veličine ugradnje kompenzacijskih uređaja s aspekta naponskih prilika, gubitaka radne snage i blizine sloma napona, određene su za različite grupe analiziranih pogonskih stanja:

1. Maksimalno opterećenje "nazivne" 2005. godine (36 pogonska stanja)
2. Minimalno opterećenje "nazivne" 2005. godine (76 pogonska stanja)
3. Maksimalno opterećenje "nazivne" 2010. godine (36 pogonska stanja)
4. Minimalno opterećenje "nazivne" 2010. godine (76 pogonska stanja)
5. Maksimalno opterećenje "nazivne" 2005. i 2010. godine (72 pogonska stanja)
6. Minimalno opterećenje "nazivne" 2005. i 2010. godine (152 pogonska stanja)
7. Maksimalna i minimalna opterećenja "nazivne" 2005. i 2010. godine (224 pogonska stanja).

Optimalne lokacije i veličine kompenzacijskih uređaja za različite gore navedene grupe pogonskih stanja prikazuje tablica 3. Za određivanje optimalnih lokacija i veličina izgradnje kompenzacijskih uređaja s aspekta naponskih prilika kao mjerodavnu ocjenjujemo grupu pogonskih stanja karakterističnih po minimalnom opterećenju nazivne 2005. i 2010. godine (osjenčano u tablici). U slučaju uzimanja u obzir, kao mjerodavne za određivanje optimalne lokacije i veličine kompenzacijskih uređaja s aspekta naponskih prilika, grupe pogonskih stanja karakterističnih i po maksimalnom opterećenju EES-a, rezultati nisu realni jer se tada pretpostavlja da je prigušnica konstantno priključena na mrežu, što u stvarnosti nije slučaj (isključuje se pri visokim opterećenjima EES-a kada su naponske prilike zadovoljavajuće). Optimalne lokacije i veličine kompenzacijskih uređaja s aspekta naponskih prilika su:

1. RHE Obrovac (400 kV sabirnice) – prigušnica 150 Mvar
2. TS 400/220/110 kV Konjsko (400 kV sabirnice) – prigušnica 50 Mvar.

Za određivanje optimalne lokacije i veličina izgradnje kompenzacijskih uređaja s aspekta gubitaka radne snage kao mjerodavne ocjenjujemo odvojeno grupe pogonskih stanja karakterističnih po maksimalnom i minimalnom opterećenju nazivne 2005. i 2010. godine (osjenčano u tablici). Iz rezultata je vidljivo da je optimalni kompenzacijski uređaj u maksimumu op-

**Tablica 3. Optimalne lokacije i veličine kompenzacijskih uređaja**

Pogonska stanja	Optimalne lokacije i veličine kompenzacijskih uređaja		
	Naponske prilike	Gubici radne snage	Blizina sloma napona
Max. 2005.	/	Međurić 220 kV C100 Ernestinovo 400 kV C50	/
Min. 2005.	Obrovac 400 kV L150 Mvar Konjsko 400 kV L50 Mvar	Žerjavinec 220 kV L150 Ernestinovo 400 kV L100 Tumbri 400 kV L150	Žerjavinec 220 kV L150 Pehlin 220 kV L150 Mraclin 220 kV L150
Max. 2010.	/	Međurić 220 kV C100 Mraclin 220 kV C50 Žerjavinec 220 kV C100	/
Min. 2010.	Obrovac 400 kV L150 Mvar Konjsko 400 kV L50 Mvar	Žerjavinec 220 kV L150 Međurić 220 kV L50 Tumbri 400 kV L100	Žerjavinec 220 kV L150 Pehlin 220 kV L150 Mraclin 220 kV L150
Max. 2005. i 2010.	/	Međurić 220 kV C100 Mraclin 220 kV C50 Žerjavinec 220 kV C100	/
Min. 2005. i 2010.	Obrovac 400 kV L150 Mvar Konjsko 400 kV L50 Mvar	Žerjavinec 220 kV L150 Tumbri 400 kV L150 Mraclin 220 kV L50	Žerjavinec 220 kV L150 Pehlin 220 kV L150 Mraclin 220 kV L150
Max. i min. 2005. i 2010.	Obrovac 400 kV L150 Mvar Melina 400 kV L50 Mvar	Žerjavinec 220 kV L100 Tumbri 400 kV L150 Ernestinovo 400 kV L100	Žerjavinec 220 kV L150 Pehlin 220 kV L150 Mraclin 220 kV L150

\* L – prigušnica (L50 – 50 Mvar, L100 – 100 Mvar, L150 – 150 Mvar)

C – kondenzatorska baterija (C50 – 50 Mvar, C100 – 100 Mvar, C150 – 150 Mvar)

terećenja EES-a s aspekta smanjenja gubitaka radne snage kapacitivnog djelovanja, a u minimumu opterećenja induktivnog djelovanja. To nadalje znači da bi s aspekta gubitaka radne snage trebalo ugraditi takav kompenzacijski uređaj koji ima mogućnost induktivnog i kapacitivnog rada (sinkroni kompenzator, statički Var kompenzator), kako bi imao utjecaja na smanjenje gubitaka radne snage tijekom čitave godine. Analize pokazuju da bi smanjenje gubitaka radne snage bilo toliko neznatno da takav kompenzacijski uređaj ne bi bio na prvi pogled ekonomski opravdan. Međutim, pravu verifikaciju njegove opravdanosti potrebno je vrednovati preko smanjenja gubitaka radne energije. Optimalne lokacije i veličine kompenzacijskih uređaja (prigušnica) s aspekta smanjenja gubitaka radne snage su:

(a) u maksimumu opterećenja

1a.TS 220/110 kV Međurić (220 kV sabirnice) – kondenzator 100 Mvar

2a.TS 220/110 kV Mraclin (220 kV sabirnice) – kondenzator 50 Mvar

3a.TS 400/220/110 kV Žerjavinec (220 kV sabirnice) – kondenzator 100 Mvar.

(b) u minimumu opterećenja

1b.TS 400/220/110 kV Žerjavinec (220 kV sabirnice) – prigušnica 150 Mvar

2b.TS 400/110 kV Tumbri (400 kV sabirnice) – prigušnica 150 Mvar

3b.TS 220/110 kV Mraclin (220 kV sabirnice) – prigušnica 50 Mvar.

Očito je da provedene analize ne upućuju na istu optimalnu lokaciju kompenzacijskog uređaja s dvosmjernim djelovanjem (induktivno, kapacitivno) za maksimalna i minimalna opterećenja EES-a. Radi pronalazanja obostranog optimuma trebalo bi provesti dodatna istraživanja i analize, no zbog očite neisplativosti takvog uređaja daljnje analize nisu izvršene.

Optimalne lokacije i veličine kompenzacijskih uređaja s aspekta blizine sloma napona su iste za sve analizirane grupe pogonskih stanja karakterističnih po minimalnom opterećenju EES-a. Za grupe pogonskih stanja karakterističnih po maksimalnom opterećenju EES-a optimalna veličina kompenzacijskog uređaja za razmatrani kriterij se ne može pronaći.

Optimalne lokacije i veličine kompenzacijskih uređaja s aspekta blizine sloma napona su:

1. TS 400/220/110 kV Žerjavinec (220 kV sabirnice) – prigušnica 150 Mvar

2. TS 220/110 kV Pehlin (220 kV sabirnice) – prigušnica 150 Mvar

3. TS 220/110 kV Mraclin (220 kV sabirnice) – prigušnica 150 Mvar.



Očito je da računski opitnum s aspekta blizine sloma napona nije praktično primjenljiv budući da se pri niskim opterećenjima u sustavu ne pojavljuje opasnost od sloma napona.

Na osnovi provedenih analiza ocjenjujemo da optimalnu lokaciju i veličinu kompenzacijskog uređaja treba odrediti s aspekta zadovoljenja naponskih prilika u EES-u. Minimiziranje radne snage i blizina sloma napona nisu kriterij prema kojemu bi trebalo određivati način i veličinu kompenzacije u EES-u Hrvatske (težinski faktori su im 0 – funkcija cilja u korištenom matematičkom modelu). Kao konačan prijedlog lokacije, veličine i tipa kompenzacijskog uređaja, provedene analize nesumljivo ukazuju na sljedeću lokaciju: RHE Obrovac (400 kV) – prigušnica 150 Mvar.

## 7. UTJECAJ KOMPENZACIJSKOG UREĐAJA NA NAPONSKE PRILIKE I GUBITKE RADNE SNAGE

U ovom poglavlju je detaljno opisan utjecaj ugradnje prigušnice 150 Mvar na 400 kV sabirnice RHE Obrovac (kao predloženu lokaciju i izvedbu kompenzacije u EES-u Hrvatske), na naponske prilike i gubitke radne snage u EES-u kod jednog karakterističnog pogonskog stanja.

Tablica 4. Naponske prilike i gubici radne snage u razmatranom pogonskom stanju "nazivne" 2010. godine

Varijanta	Naponi u kritičnim čvorovima mreže			
	RHE Obrovac	TS Konjsko	TS Melina	TS Đakovo
Osnovno stanje	434	437	425	246
Blokirane preklapke transf. 400/220 i 400/110 kV u položaju 0*	429	432	422	251
Kompenzacijski rad RHE Obrovac do 80 Mvar	425	430	421	245
Kompenzacijski rad RHE Obrovac do 160 Mvar	420	426	418	244
Kompenzacijski rad RHE Čapljina do 252 Mvar	430	431	422	244
Kompenzacijski rad RHE Čapljina do 252 Mvar + Kompenzacijski rad RHE Obrovac do 80 Mvar	422	426	419	243
Kompenzacijski rad RHE Čapljina do 252 Mvar + Kompenzacijski rad RHE Obrovac do 160 Mvar	418	423	417	242
Priključena prigušnica 50 Mvar u TS Tumbri	433	436	423	246
Priključena prigušnica 100 Mvar u TS Ernestinovo	432	433	423	239
Priključena prigušnica 150 Mvar u RHE Obrovac (400 kV)	416	423	417	243
Priključena prigušnica 100 Mvar u RHE Obrovac (400 kV)	422	428	419	244
Blokirane preklapke transf. 400/220 i 400/110 kV u položaju 0 + Priključena prigušnica 150 Mvar u RHE Obrovac (400 kV)**	413	421	415	250

\* previsoki naponi još na:

Bilice 220	251.3 kV	Melina 220	245.8kV
Brinje	249.5 kV	Mraclin 220	246.8kV
HE Senj 220	249.1 kV	Pehlin 220	245.4kV
HE Zakućac 220	250.3 kV	Plat 220	245.5kV
Imotski 220	245.4 kV	TE Plomin 220	245.7kV
Konjsko 220	250.3 kV	TE Sisak 220	245.5kV
Međurić 220	246.1 kV	Vodnjan 220	245.6kV

\*\* previsoki naponi još na:

Bilice 220	246.0kV
Brinje	246.2kV
HE Senj 220	245.7kV
HE Zakućac 220	246.0kV
Konjsko 220	245.0kV

Kao karakteristično pogonsko stanje odabrana je varijanta "nazivne" 2010. godine za koju je na modelu detektiran najviši napon od 437 kV u TS Konjsko. Promatrano pogonsko stanje karakteristično je po:

- minimalnom opterećenju EES-a,
- normalnoj hidrologiji,
- uvozu 500 MW iz Mađarske i 400 MW iz BiH i Srbije,
- tranzitu 600 MW iz Italije za BiH, Srbiju i Bugarsku.

Važni pogonski detalji za razmatrano stanje još su:

- RHE Obrovac van pogona,
- prigušnice u TS Tumbri i TS Ernestinovo izvan pogona,
- preklapke transf. 400/220, 400/110 kV u optimalnom položaju za razmatrano pogonsko stanje,
- RHE Čapljina u kompenzacijskom režimu rada (180 Mvar), naponi u 400 kV mreži BiH iznad dozvoljenih granica (TS Mostar – 427 Mvar),
- naponi u EES Slovenije, Srbije, Crne Gore i Mađarske unutar dozvoljenih granica.

Uticaj korištenja nekih postojećih resursa (kompenzacijski režim rada RHE Čapljina do 252 Mvar, kompenzacijski režim rada RHE Obrovac do 160 Mvar, priključenje prigušnice 50 Mvar u TS Tumbri, 100 Mvar u TS Ernestinovo, priključak prigušnice 150 Mvar na 400 kV sabirnice RHE Obrovac) prikazan je u tablici 4.

Iz tablice je vidljivo da se najbolje naponske prilike postižu ugradnjom prigušnice snage 150 Mvar na 400 kV sabirnice RHE Obrovac. Napon je tada neznatno iznad dopuštene gornje granice jedino u TS Konjsko (423 kV), dok se u ostalim čvorovima mreže on nalazi unutar dozvoljenih granica.

Ukoliko bi preklopke transformatora 400/220 kV i 400/110 kV bile postavljene u položaj 0, naponi u 400 kV mreži bi se u odnosu na osnovno stanje (optimalan položaj preklopki tih transformatora s obzirom na očuvanje napona sekundara) nešto popravili (najviši napon u TS Konjsko – 432 kV), ali bi se znatno pokvarili u 220 kV mreži, a 15 čvorova u mreži te naponske razine u EES-u Hrvatske bi imalo napon viši od dopuštenih 245 kV.

U slučaju da pri opisanom pogonskom stanju jedan generator RHE Obrovac radi u kompenzacijskom režimu rada (– 3MW/do – 80 Mvar) naponske prilike u svim kritičnim čvorovima mreže bi ostale nepovoljne, izuzev u TS Đakovo gdje bi napon bio na dozvoljenoj gornjoj granici. Radom dva generatora RHE Obrovac u kompenzacijskom režimu rada napon u TS Konjsko bi i dalje bio iznad dozvoljene gornje granice (426 kV).

Bez nove prigušnice u EES-u RH, kompenzacijski rad RHE Čapljina s maksimalnih 252 Mvar kapacitivno, snizio bi napone u EES-u Hrvatske, ali ne u dovoljnoj mjeri. Kombinacija RHE Čapljina (do 252 Mvar) i jednog generatora RHE Obrovac (do 80 Mvar) i dalje ne bi snizila napone u svim kritičnim čvorovima mreže ispod gornje granice (Obrovac 422 kV, Konjsko 426 kV), a tek bi kombinacija RHE Čapljina i dva generatora RHE Obrovac u maksimalnom kompenzacijskom režimu rada dovela donekle do zadovoljavajućih naponskih prilika (TS Konjsko i dalje iznad gornje granice – 423 kV).

Prigušnica 50 Mvar na tercijaru transformatora u TS Tumbri ne utječe značajno na naponske prilike u kritičnim čvorovima mreže. Utjecaj priključenja prigušnice 100 Mvar na 110 kV sabirnice TS Ernestinovo nešto je izraženiji, a tek priključak prigušnice 150 Mvar na 400 kV sabirnice RHE Obrovac dovodi do donekle zadovoljavajućih naponskih prilika u EES-u Hrvatske (napon je i dalje previsok u TS Konjsko – 423 kV).

Iz tablice 4 je vidljivo da se priključkom prigušnice 150 Mvar u RHE Obrovac postižu približno jednake naponske prilike u kritičnim čvorovima mreže, kao i u istodobnom kompenzacijskom radu RHE Čapljina do maksimalno 252 Mvar kapacitivno i dva generatora RHE Obrovac do 160 Mvar ukupno. Očito je da bi u slučaju trajnog kompenzacijskog rada RHE Čapljina i RHE Obrovac pri niskim opterećenjima EES-a kada se naponi podižu iznad dozvoljene gornje granice, snaga ugrađene prigušnice na 400 kV sabirnicama RHE Obrovac mogla biti i manja od predloženih 150 Mvar.

Ugradnjom prigušnice 150 Mvar na 400 kV sabirnice RHE Obrovac ukupni gubici radne snage na modelu za

analizirano pogonsko stanje bi se smanjili za 3.05 MW (35.13 MW – 32.08 MW). To smanjenje se odnosi na čitavu modeliranu mrežu (dakle i susjedne EES). U EES-u Hrvatske smanjenje gubitaka radne snage u analiziranom pogonskom stanju bi iznosilo 2.66 MW (16.79 MW – 14.13 MW).

Naponske prilike u 400 kV mreži Hrvatske značajno ovise o naponima u rubnim čvorovima susjednih sustava (Slo, Mađ, BiH i SRJ). U slučaju kada bi u prethodno analiziranom pogonskom stanju napon na sabirnicama Obrovac i NE Krško bio 420 kV (ovisno o angažmanu jalove snage generatora TE Nikola Tesla i NE Krško) previsoki naponi bi se pojavili i u TS Ernestinovo i TS Tumbri. Prigušnice 50 Mvar u Tumbri i 100 Mvar u Ernestinovu tada bi pridonijele smanjenju napona u tim TS, a za sniženje napona na južnom kraku bilo bi potrebno priključiti i prigušnicu 150 Mvar u RHE Obrovac.

## 8. ZAKLJUČAK

Na temelju matematičkog modela prema kojem se traži optimalna lokacija i veličina kompenzacijskih uređaja s aspekta naponskih prilika, minimiziranja gubitaka radne snage i blizine sloma napona, razvijen je programski paket *Optlok*, te su izvršeni proračuni potreba ugradnje kompenzacijskih uređaja u prijenosnoj mreži HEP-a za kratkoročan i srednjoročan razvoj mreže (do "nazivne" 2010. godine). Proračuni su obuhvatili analizu 224 moguća i očekivana pogonska stanja s obzirom na mogućnosti angažmana elektrana u EES-u Hrvatske (hidrologiju), opterećenje EES-a, razmjene i tranzite snage preko prijenosne mreže, te načinu rada RHE Obrovac i RHE Čapljina.

S obzirom na naponske prilike u EES-u Hrvatske (naponske razine 400, 220 i 110 kV), u kratkoročnom i srednjoročnom razdoblju možemo očekivati probleme povišenja napona u mreži iznad maksimalno dozvoljenih vrijednosti. Problem povišenja napona najizraženiji je u 400 kV mreži, a najugroženije transformatorske stanice su RHE Obrovac, Konjsko i Melina. Povišenje napona javlja se pri niskim opterećenjima EES-a bez obzira na razmjene snage sa susjednim EES-ima ili tranzite za potrebe trećih zemalja (u iznosima koji su analizirani). Rad jednog ili dva generatora RHE Obrovac u kompenzacijskom režimu (do 80 Mvar kapacitivno po generatoru) ne može u potpunosti riješiti spomeniti problem pri svim mogućim i očekivanim pogonskim stanjima. Problem bi se značajno ublažio ukoliko bi osim RHE Obrovac u kompenzacijskom režimu za potrebe EES-a Hrvatske radila još i RHE Čapljina.

Ispravnim podešenjem preklopki transformatora s mogućnošću promjene prijenosnog omjera u beznaponskom stanju (400/220 kV i 400/110 kV), te automatskom regulacijom napona transformatora 220/110 kV, problem povišenja napona u 400 kV mreži

moguće je ograničiti samo na tu naponsku razinu (usprkos intenziviranju problema na toj razini), te očuvati napone u 220 kV i 110 kV mrežama unutar dozvoljenih granica.

Radi efikasnog korištenja postojećih resursa u EES-u, a radi ublažavanja problema previsokih napona pri niskim opterećenjima u sustavu, predlaže se poduzimanje sljedećih koraka:

1. Ažuriranje pogonskih karata generatora u EES-u.
2. Provjera podešenja limitera poduzbude generatora, eventualno novo podešenje istih radi "dubljeg" rada generatora u kapacitivnom području, a ovisno o proračunima stabilnosti EES-a.
3. Podešenje preklopki transformatora s mogućnošću promjene prienosnog omjera u beznaponskom stanju (400/220 kV i po potrebi 400/110 kV) najmanje dvaput godišnje (za zimski i ljetni režim rada).

Nakon obavljanja svih prethodno navedenih aktivnosti, radi održavanja naponskih prilika unutar dozvoljenih granica, nužno bi bilo ugraditi kompenzacijski uređaj kapacitivnog djelovanja (npr. prigušnicu) na 400 kV naponsku razinu. Najpovoljnija lokacija za istu je RHE Obrovac, a najpovoljnija veličina iste je 150 Mvar.

Ukoliko se želi u potpunosti izbjeći problem previsokih napona u mreži, bilo bi potrebno ugraditi dodatnu prigušnicu snage 50 Mvar na 400 kV sabirnice TS 400/220/110 kV Konjsko. Taj zahvat ne ocjenjujemo nužnim imajući u vidu moguća pogonska stanja u kojima se i dalje mogu javljati prekoračenja napona u 400 kV mreži nakon ugradnje prigušnice 150 Mvar u RHE Obrovac na 400 kV sabirnice, te mogućnosti kompenzacijskog režima rada RHE Obrovac i RHE Čapljinja. Ugradnju kompenzacijskog uređaja (jednog ili više njih, snage veće od 50 Mvar) s aspekta smanjenja gubitaka radne snage u prienosnoj mreži, kao i s aspekta blizine sloma napona, ne smatramo opravdanom, budući da u EES-u realno ne postoji opasnost od sloma napona pri normalnom režimu rada (raspoložive sve grane mreže), te budući da smanjenje gubitaka radne snage nakon ugradnje kompenzacijskog uređaja nije značajno za sve analizirane varijante proračuna. Ovaj zaključak odnosi se na razmatranje potrebne kompenzacije na razini cjelokupnog EES-a, a zanemarujući moguće lokalne probleme (ispadi pojedinih vodova u 110 kV mreži, utjecaj automatske regulacije na transformatorima 110/x kV i sl.) koji eventualno mogu voditi ka razmatranju potreba (statičke i dinamičke analize) ugradnje lokalnih kompenzacijskih uređaja manje jedinične snage na 110 kV ili 35 kV naponskoj razini i s obzirom na ta dva kriterija.

Ekonomska opravdanost ove investicije nije ispitivana ovom prilikom, a što bi svakako trebalo imati veliku važnost pri eventualnom donošenju odluke o investiranju. Da bi se mogla što točnije procijeniti ekonomska dobit od ugradnje kompenzacijskog uređaja bilo bi nužno poznavati okvire tržišta električne energije unu-

tar kojih će funkcionirati hrvatski elektroenergetski sustav, te naknade za pomoćnu uslugu regulacije napona i jalove snage.

#### LITERATURA:

- [1] M. MAJSTROVIĆ, G. MAJSTROVIĆ, D. BAJŠ: "Metode za izbor najpovoljnije lokacije kompenzacijskih uređaja", Energetski institut "Hrvoje Požar", Zagreb, 2001.
- [2] D. BAJŠ, G. MAJSTROVIĆ, M. MAJSTROVIĆ: "Analiza potreba ugradnje kompenzacijskih uređaja u prienosnoj mreži HEP-a za planirani razvoj mreže u kratkoročnom i dugoročnom razdoblju", Energetski institut "Hrvoje Požar", Zagreb, 2002.
- [3] ENERGIJA br. 5/2001, HEP, Zagreb, listopad 2001.
- [4] SECI PROJECT GROUP ON DEVELOPMENT OF INTERCONNECTION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS OF SECI COUNTRIES – REGIONAL TRANSMISSION NETWORK PLANNING PROJECT: Regional model construction, ESP, CMS,EKC, 2002.
- [5] SUMMARY OF THE CURRENT OPERATING PRINCIPLES OF THE UCPTE, UCPTE, 1999.
- [6] GODIŠNJI IZVJEŠTAJ 2000, Elektroprivreda BiH, Sarajevo, 03. 2001.
- [7] LETNO POROČILO 2000, ELES Ljubljana, 2001.
- [8] OSNOVNI PODACI ELEKTROPRIVREDE SRBIJE ZA 2000. GODINU, Beograd, 2001.
- [9] GODIŠNJI IZVJEŠTAJ 2000., Elektroprivreda Crne Gore, Nikšić, 2001.
- [10] ANNUAL REPORT 2000., MVM, Budapest, 2001.
- [11] LOVRIĆ, GOIĆ: "Gubici električne energije u prienosnoj mreži HEP-a", Energija, broj 5, Zagreb, 2001.
- [12] RAZVITAK ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA HRVATSKE DO 2030. GODINE – MASTER PLAN (novelacija), EIHP, Zagreb, 2001.
- [13] DALJINSKO UPRAVLJANJE REGULACIJOM NAPONA I JALOVE SNAGE – SEKUNDARNA REGULACIJA NAPONA I JALOVE SNAGE, FER, Zagreb, 1991.
- [14] D. BAJŠ, B. RADMILOVIĆ, S. ALERIĆ: "Studija uklopavanja nove KTE snage 400 Mw na EES Republike Hrvatske (lokacija TE-TO Zagreb, TE Sisak, TETO i PTE Osijek)", Energetski institut "Hrvoje Požar", Zagreb, 2000.

#### OPTIMAL SIZE AND LOCATION OF COMPENSATION EQUIPMENT INSTALLATION IN THE TRANSMISSION NETWORK OF HEP

The paper offers the analysis of optimal size and location of compensation equipment installation in the transmission network of the Croatian Electric Company for planned short and mid-term period network development. The analysis has been conducted based on the mathematical model described in an earlier paper. Based on a huge number of possible and expected operation states the compensation proposal is given, the analysis of different measures as well as of the existing resource usage in order to maintain voltage within limits.

**OPTIMALE LEISTUNG UND STANDORT VON KOMPENSATIONSANLAGEN IM ÜBERTRAGUNGSNETZ KROATISCHER ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT**

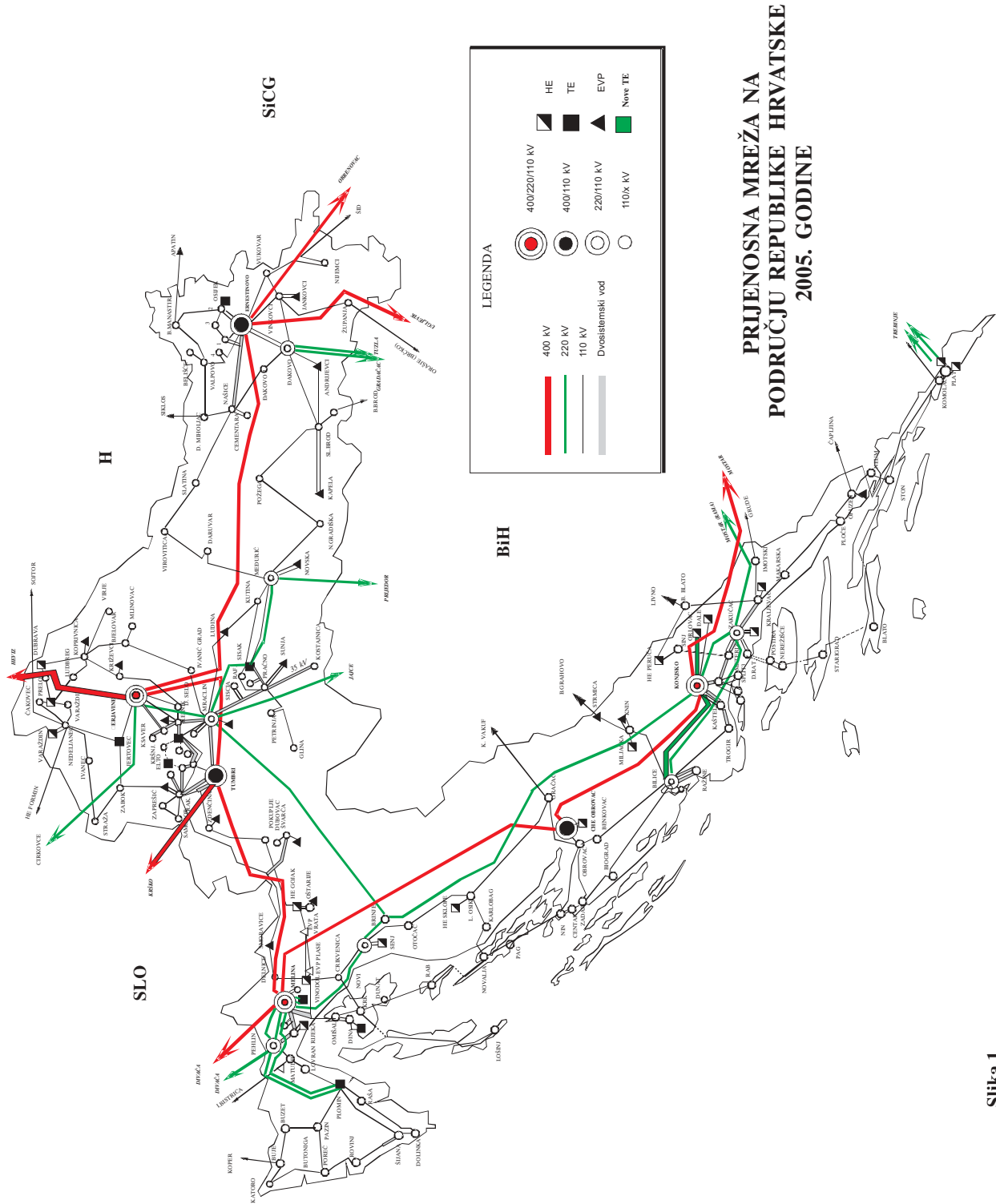
Vorgezeigt wird die Untersuchung optimaler Leistung und Standortauswahl für Kompensationsanlagen im Übertragungsnetz der Kroatischen Elektrizitätswirtschaft zwecks Planung der kurzfristigen und der mittelfristigen Netzentwicklung. Die Untersuchung ist auf Grund des im früheren Artikel beschriebenen mathematischen Modells durchgeführt worden. Von der grossen Anzahl möglicher und erwarteter Betriebszustände ausgehend, wird ein Vorschlag für die Kompensation gegeben und untersucht wird der Einfluss einiger Massnahmen und der Nutzung bestehender Mittel für die Einhaltung von Spannungsverhältnissen innerhalb zulässiger Grenzen.

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**

Uredništvo primilo rukopis:  
2002 – 12 – 10.

**PRILOG: ANALIZIRANE KONFIGURACIJE EES-a HRVATSKE**



Slika 1.

