

# ASINKRONI START AGREGATA CHE "ČAPLJINA" U STVARNIM UVJETIMA ELEKTROENERGETSKIH SUSTAVA BOSNE I HERCEGOVINE I HRVATSKE

Mr. sc. Nikola R u s a n o v, Sarajevo – Srećko V u č i n a, Mostar – mr. sc. Milan S t o j s a v l j e v i ć,  
mr. sc. Darko N e m e c, Zagreb

UDK 621.311.21.05  
IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Analizirajući režime rada elektroenergetskog sustava i iskorištenje raspoloživih energetskih resursa u uvjetima stvarne topološke strukture i elektroenergetskih prilika u prijenosnoj mreži Bosne i Hercegovine, ali i Hrvatske, posebno u području srednje i južne Dalmacije (jadranska magistrala), (česti režimi rada u kojima je sigurnost sustava ugrožena po (n-1) kriteriju raspoloživosti i kriteriju stabilnosti napona, naponi iznad dopuštenih iznosa, rad termoelektrana u Bosni i Hercegovini ispod tehničkog minimuma i sl.) postavilo se i pitanje mogućnosti iskorištenja svojstava reverzibilne hidroelektrane CHE Čapljina snage 2x240 MW i pogodnosti koje pruža otvoreno tržište električkom energijom. S tehničkog aspekta dva su osnovna problema, odnosno usluge sustava: 1) asinkroni start (zalet) agregata (direktni asinkroni zalet i asinkroni zalet s faznim prigušnicama u zvjezdištu generatora uz odvodnjen prostor turbine/crpke) i 2) prijenos snage i energije za crpni rad u uvjetima smanjene raspoloživosti sustava. Istraživanja pokazuju da je s aspekta dinamike napona i jalovih snaga moguć asinkroni zalet s faznim prigušnicama u zvjezdištu generatora uz odvodnjenu turbinu/crpku (način P1). Tijekom zaleta, generatori u bližoj okolini točke priključka CHE Čapljina (TS Mostar 4) nazivno su opterećeni jalovom snagom. Angažman i potpora drugog agregata u CHE Čapljina u generatorskom režimu rada znatno poboljšava prilike u pogledu napona i jalovih snaga u tom dijelu sustava tijekom zaleta. Analizirane su dvije varijante osiguranja snage i energije za crpni rad (pumpanje): 1) iz termoelektrana u EES Bosne i Hercegovine i 2) iz UCTE interkonekcije. U UCTE varijanti moguće su poteškoće sigurnosti sustava po (n-1) kriteriju raspoloživosti i kriteriju zagušenja na dijelu jadranske magistrale u EES-a Hrvatske.

Na bazi rezultata proračuna, tijekom tri noći u ožujku 2002. godine načinjeni su uspješni pokusi asinkronog starta i pumpanja s oba agregata CHE Čapljina u stvarnim uvjetima.

**Ključne riječi:** elektroenergetski sustav, crpna elektrana, asinkroni start, usluge sustava, dinamičke simulacije.

## 1. UVOD

Posljedice ratnih razaranja nisu mimoišle ni prijenosnu mrežu na području Bosne i Hercegovine uzrokujući otežani rad, a u nerijetkim slučajevima i potpunu neraspoloživost projektiranih funkcija pojedinih elektroenergetskih objekata. Jedan od takvih objekata je i CHE Čapljina snage 2x240 MVA koja, mada nije pretrpjela oštećenja, od početka ratnih djelovanja radi s izrazito smanjenim kapacitetom, a crpni rad nije ni pokušavan zbog bojazni da ne postoje osnovni preduvjeti s aspekta prijenosne mreže. Rezultati studije u kojoj bi bila obrađena statička stanja, proračuni struja kratkog spoja i simulacija asinkronog zaleta trebali bi biti podloga za donošenje odluke o mogućnosti asinkronog starta i eksploataciji agregata CHE Čapljina u crpnom radu.

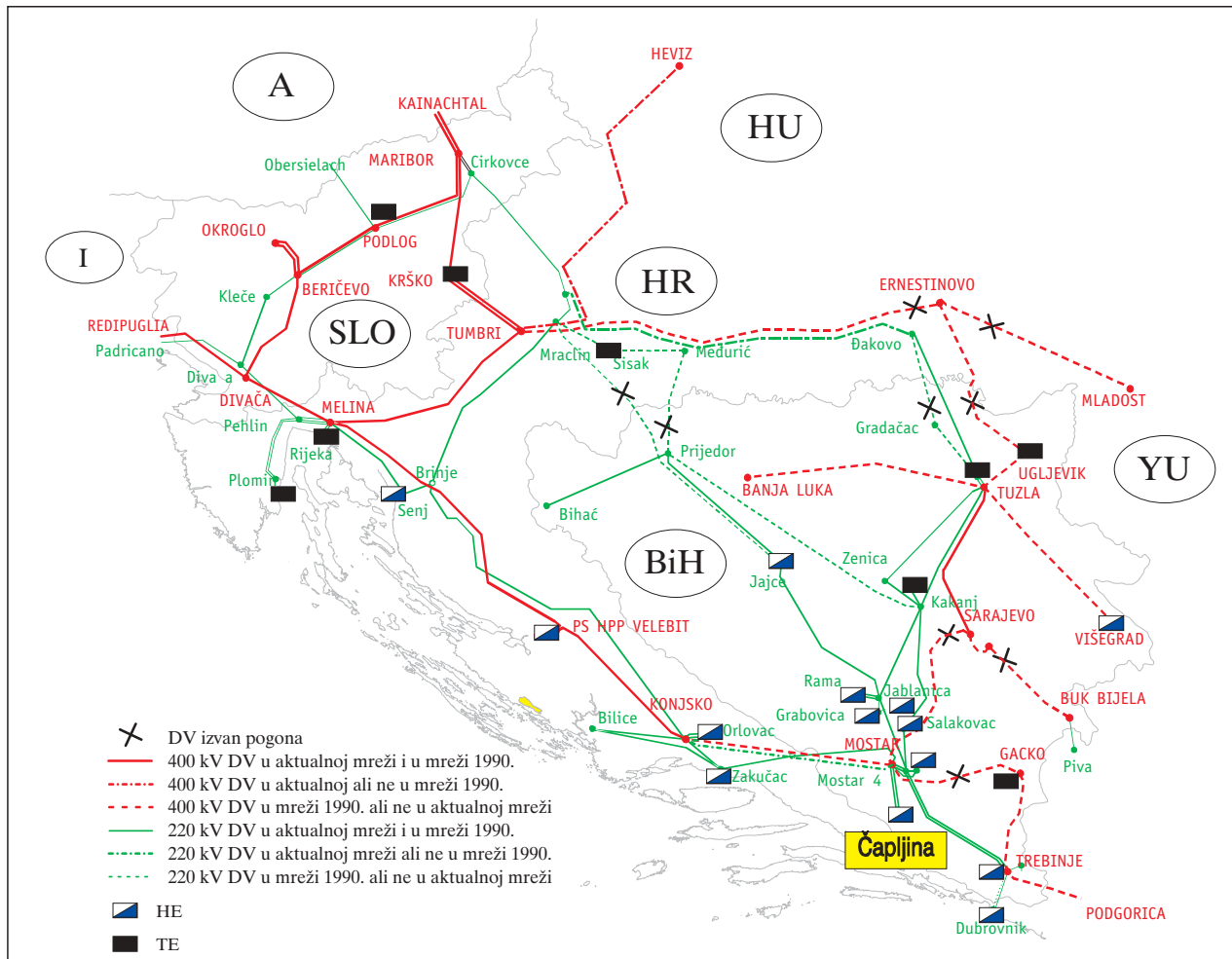
Ilustrativan je podatak da je tijekom 1991. godine CHE Čapljina proizvela ukupno 481.925 MVh, od toga 103.209 MWh iz crpnog rada uz 110 upuštanja u crpni rad. Prema raspoloživoj evidenciji, od početka rada CHE Čapljina bilo je 1621 upuštanje u crpni rad, a

najveći broj upuštanja zabilježen je 1990. godine, ukupno 258. U periodu 1982 – 1991. potrošnja energije za crpni rad iznosila je 1.774.206 MWh, a iz nje povratno dobivena energija u generatorskom radu 1.312.912 MWh, što daje izuzetno povoljan odnos povratno dobivene i utrošene energije od 0,74.

CHE Čapljina je projektirana i predviđena za sljedeće režime rada:

1. u suhom ljetnom i jesenjem razdoblju (cca 225 dana/god.) za rad u noćnim satima (23:00 – 05:00) u crpnom pogonu, a tijekom dana kao elektrana vršne snage i energije u trajanju od 5 – 6 sati;
2. u zimskom i proljetnom periodu (cca 140 dana/god.) uz dovoljne dotoke u gornji bazen u generatorskom radu u trajanju od 12 – 14 sati dnevno;
3. prema potrebama elektroenergetskog sustava u kompenzacijskom radu kao nad/poduzbuđeni generator/motor s kapacitetom 150160 Mvar po agregatu.

Položaj i povezanost CHE Čapljinje u prijenosnoj mreži prikazani su na slici 1.



Slika 1. Topološka struktura prijenosne mreže – stanje u ožujku 2002. godine

## 2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Za istraživanje sposobnosti i definiranje minimalnih uvjeta u EES Bosne i Hercegovine i Hrvatske za osiguranje sistemske usluge asinkronog starta agregata postavljena je i u konkretnom slučaju asinkronog pokretanja agregata u CHE Čapljina primijenjena metodologija koja predviđa odgovarajuća: 1) simulacijska istraživanja stacionarnih stanja, 2) simulacijska istraživanja dinamičkih stanja i 3) vrlo složena eksperimentalna istraživanja u realnim uvjetima uz uvažavanje svih sagledivih zahtjeva s aspekta pogonske sigurnosti sustava.

## 3. REZULTATI STATIČKIH ANALIZA

Analiza elektroenergetskih sustava nezaobilazan je faktor u njihovom proučavanju, kako u procesu planiranja izgradnje i proširenja, tako i u procesu planiranja i vođenja pogona i donošenja operativnih odluka za aktualna stanja u kojima se analizirani sustav nalazi. Rezultati takvih analiza trebaju biti konkretna rješenja s prijedlogom odgovarajućih mjera za njihovu realizaciju. Osnovni preduvjeti koji se trebaju osigurati radi

dobivanja pouzdanih rezultata na bazi kojih će se donositi odluke i realizirati predložene mjere i zahvati u realnom sustavu su vjerodostojnost ulaznih podataka i adekvatnost simulacijskih programa za analizu višestrojnih sustava.

Imajući u vidu i stvarne uvjete područnih elektroenergetskih sustava Hercegovine i Dalmacije, posebna pažnja je posvećena uvažavanju UCTE preporuka koje se odnose, između ostalog, i na sigurnost rada sustava. Navedene preporuke obvezuju članice UCTE interkonekcije na osiguranje uvjeta čiji je cilj smanjenje rizika ugrožavanja susjednih sustava zbog poremećaja u vlastitom sustavu. Položaj CHE Čapljina u sustavu je vrlo delikatan, posebno u aktualnom stanju topološke strukture prijenosne mreže kada s jedne strane nije u pogonu 400 kV mreža i kada se, s druge strane dva od tri 220 kV dalekovoda koji predstavljaju temeljnu vezu elektroenergetskog sustava BiH s UCTE interkonekcijom preko hrvatskog EES-a naslanjaju na sabirnice 220 kV TS Mostar 4 na koje su spojeni i agregati CHE Čapljina.

Model višestrojnih sustava 1 – relevantan za statičke analize uvjeta neposredno pred asinkroni zalet, u

tijeku zaleta, neposredno poslije sinkronizacije (uključenja uzbude sinkronog stroja) i u režimu crpnog rada - obuhvatio je područje Bosne i Hercegovine (dio koji je u paralelnom radu sa UCTE, odnosno dio koji je u I sinkronoj zoni), Hrvatske i Slovenije. EES Bosne i Hercegovine modeliran je do 110 kV naponske razine, a EES Hrvatske i Slovenije na razini prijenosne mreže 400 kV i 220 kV s referentnim čvorom (ekvivalentnim generatorom) iza čvora 400 kV Divača kojim je predstavljen utjecaj UCTE interkonekcije. Treba napomenuti da su svi generatori modelirani s pripadnim blok-transformatorima, a da regulatori napona održavaju nazivni napon na stezaljkama generatora za sve radne točke unutar područja definiranog pogonskim dijagramom svakog pojedinačnog generatora.

Za ocjenu mogućnosti asinkronog starta mjerodavan je režim rada sustava u noćnom periodu od 23:00 do 05:00, u kojem se predviđa mogućnost crpnog rada agregata u CHE Čapljina i koji je karakterističan po minimalnom angažiranju hidroelektrana. To je vrlo važna činjenica s obzirom da se radi o značajnim hidroenergetskim proizvodnim jedinicama koje su "električki" vrlo blizu CHE Čapljina i koje najviše utječu na uvjete asinkronog zaleta.

Rezultati statičkih analiza su ukazali na minimalne uvjete koje treba ostvariti u sustavu da bi se omogućila sistemsku uslugu asinkronog zaleta agregata CHE Čapljina. S obzirom na položaj CHE Čapljina, sistemsku uslugu asinkronog zaleta osiguravaju EES Bosne i Hercegovine i Hrvatske. Jedan je od najvažnijih uvjeta rezerva jalove snage generatora koji su u pogonu jer je asinkroni zalet uglavnom problem napona i jalove snage. To je za konkretni slučaj ilustrirano slikom 2 na kojoj su prikazani naponi u karakterističnim 220 kV čvorištima i jalove snage relevantnih proizvodnih jedinica neposredno pred asinkroni zalet i u tijeku zaleta za dvije varijante minimalnih uvjeta (slika 2 "gore": sa HE Dubrovnik ali bez HE Salakovac i HE Grabovica, i slika 2 "dolje" sa HE Salakovac i HE Grabovica ali bez HE Dubrovnik). Rezultati ovih analiza ukazuju da će

tijekom zaleta jalova snaga "električki" bliskih proizvodnih jedinica praktički dosegnuti maksimalno dopuštene (nazivne) iznose, definirane nazivnom radnom točkom u pogonskom dijagramu generatora, koji su radi usporedbe prikazani na slici 2 posebnim bar-grafom uz bar-grafove jalovih snaga prije i tijekom zaleta.

U tijeku asinkronog zaleta agregata uz odvodnjen prostor turbine/crpke s faznim prigušnicama u zvjezdištu statora sinkronog stroja potrebna jalova snaga iznosi oko 200 Mvar, pa je održavanje napona okolnih čvorišta u dozvoljenim granicama osnovni problem. Kao referentne sabirnice za ocjenu osjetljivosti sustava na povećanu potražnju jalove snage tijekom asinkronog zaleta odabrane su sabirnice 220 kV TS Mostar 4.

Poznato je da u analizi stacionarnih stanja elektroenergetskog sustava stanje svakog čvora definiraju četiri međusobno zavisne veličine: djelatna i jalova snaga te iznos i kut vektora napona. Ove veličine su međusobno povezane nelinearnim jednadžbama općeg oblika:

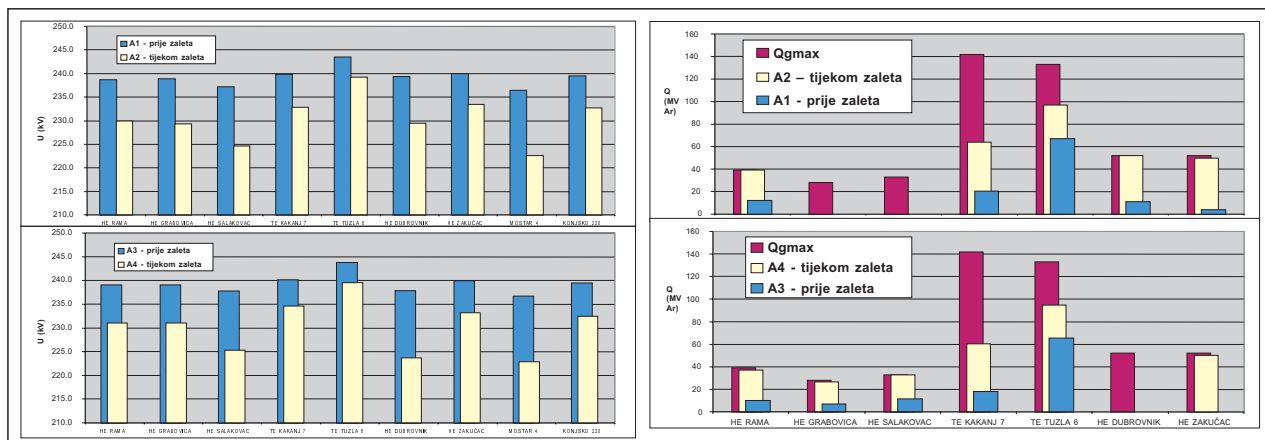
$$f(P, Q, V, \delta) = 0. \quad (1)$$

Promjena napona čvorišta može se prikazati kao funkcija promjene djelatne i jalove snage čvorišta:

$$\Delta V = C \cdot \Delta P + D \cdot \Delta Q. \quad (2)$$

Osjetljivosti napon – jalova snaga odnosno koeficijenti D (kV/Mvar) čvorišta definirani su podmatricom  $Q/V$  Jakobijeve matrice. Za izračun osjetljivosti napon – jalova snaga odnosno koeficijenta D za čvor 220 kV Mostar 4, kao pokazatelja sposobnosti sustava za održavanje napona u konkretnom slučaju asinkronog zaleta, simulirano je opterećenje od 20 MW / 200 Mvar na sabirnicama 15.75 kV u CHE Čapljina koje odgovara očekivanom udaru djelatne i jalove snage kod asinkronog starta agregata s faznim prigušnicama u zvjezdištu sinkronog stroja uz odvodnjenu turbinu/crpku.

Analize pokazuju da se minimalno potrebni uvjeti za asinkroni zalet uz uobičajenu pogonsku konfiguraciju



Slika 2. Naponi karakterističnih 220 kV čvorišta i jalove snage generatora "gore": sa HE Dubrovnik, bez HE Salakovac i HE Grabovica "dolje": bez HE Dubrovnik, sa HE Salakovac i HE Grabovica

prijenosnih sustava EES-a Bosne i Hercegovina i Hrvatske mogu ostvariti pod sljedećim pretpostavkama:

- u pogonu su HE Zakućac, HE Rama, HE Dubrovnik s po jednim agregatom, te TE Kakanj G-7 i TE Tuzla G-5 ili G-6 ( $U_{TS \text{ MOSTAR } 4} = 236.5 \text{ kV}$ ); ("**varijanta a**")
- u pogonu su HE Zakućac, HE Rama, HE Salakovac, HE Grabovica s po jednim agregatom, te TE Kakanj G-7 i TE Tuzla G-5 ili G-6 ( $U_{TS \text{ MOSTAR } 4} = 236.7 \text{ kV}$ ); ("**varijanta b**")

Proračuni pokazuju da bi za "**varijantu a**" pogonskog stanja (gornji grafički prikazi na slici 2), kod udarnog opterećenja od 20 MW/200 MVar na sabirnicama 15.75 kV u CHE Čapljina, propad napona na 220 kV sabirnicama u TS Mostar 4 iznosio 14.1 kV (sa 236.5 kV na 222.4 kV) uz praktički maksimalno dopušteno opterećenje jalovom snagom generatora u HE Zakućac (50 Mvar), HE Rama (39 Mvar) i HE Dubrovnik (52 Mvar), odnosno 14.4 kV (s 236.7 kV na 222.3 kV) također uz praktički maksimalno dopušteno opterećenje jalovom snagom generatora u HE Zakućac, HE Rama, HE Salakovac (33 Mvar) i HE Grabovica (27 Mvar) za "**varijantu b**" pogonskog stanja (donji grafički prikazi na slici 2). U prvom slučaju osjetljivost napon-jalova snaga za 220 kV čvor Mostar 4 iznosi  $D = 1/14.2 \text{ kV/Mvar}$ , a u drugom slučaju  $D = 1/13.9 \text{ kV/Mvar}$ .

Na slici 2 prikazani su iznosi napona u karakterističnim 220 kV čvorovima i iznosi jalovih snaga odabranih generatora u stanju prije zaleta te iznosi koji se očekuju tijekom zaleta, i to za slučaj "**varijante a**" ("gore") i za slučaj "**varijante b**" pogonskog stanja ("dolje"). Radi usporedbe na slici 2 prikazane su posebnim bar-grafovima i maksimalno dopuštene jalove snage generatora uz bar-grafove jalovih snaga prije i tijekom zaleta.

#### 4. PRORAČUN STRUJA I SNAGA KRATKOG SPOJA

Jedan od važnijih pokazatelja za ocjenu nužnih uvjeta za uspješan asinkroni zalet su iznosi struja i snaga kratkog spoja na relevantnim sabirnicama. Za aktualnu topološku strukturu prijenosne mreže i angažirane proizvodne jedinice načinjen je proračun struja i snaga tropskog kratkog spoja na sabirnicama 220 kV TS Mostar 4.

Referentni režim za proračun struja tropskog kratkog spoja u suptranzijentnom periodu na sabirnicama 220 kV Mostar 4 definiran je istim režimom kao za proračune tokova snaga i naponskih prilika neposredno pred asinkroni zalet. Na temelju izračunate vrijednosti struje kratkog spoja određena je i tropska snaga kratkog spoja u suptranzijentnom režimu prema formuli:

$$S''_{k3} = c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_k \quad (3)$$

Faktor  $c$  za napone 35 – 380 kV i frekvencije 50 i 60 Hz, iznosi 1.10 za maksimalne struje kratkog spoja i 1.00 za

minimalne struje kratkog spoja. S obzirom da se analizira asinkroni zalet CHE Čapljina u režimima minimalnih opterećenja, za proračun tropske snage kratkog spoja u suptranzijentnom periodu usvojen je naponski faktor  $c = 1.0$ .

Rezultati proračuna tropskog kratkog spoja za definirano uklopno stanje prijenosne mreže i angažirane proizvodne jedinice prikazani su u donjoj tabeli:

$U_{TS \text{ Mostar } 4}$ (prije kvara) (kV)	$I''_{k3}$ (kA)	$S''_{k3}$ (MVA)
236.5	8.184	3348

Ekvivalentna reaktancija sustava izračunata na bazi ovih rezultata i normirana na baznu snagu generatora CHE Čapljina (240 MVA) iznosi oko 8% na 220 kV sabirnicama u TS Mostar 4, odnosno 20% na 15.75 kV sabirnicama u CHE Čapljina, što se može smatrati zadovoljavajućim vrijednostima s aspekta uspješnosti asinkronog starta.

#### 5. SIMULACIJA ASINKRONOG ZALETA U VREMENSKOJ DOMENI

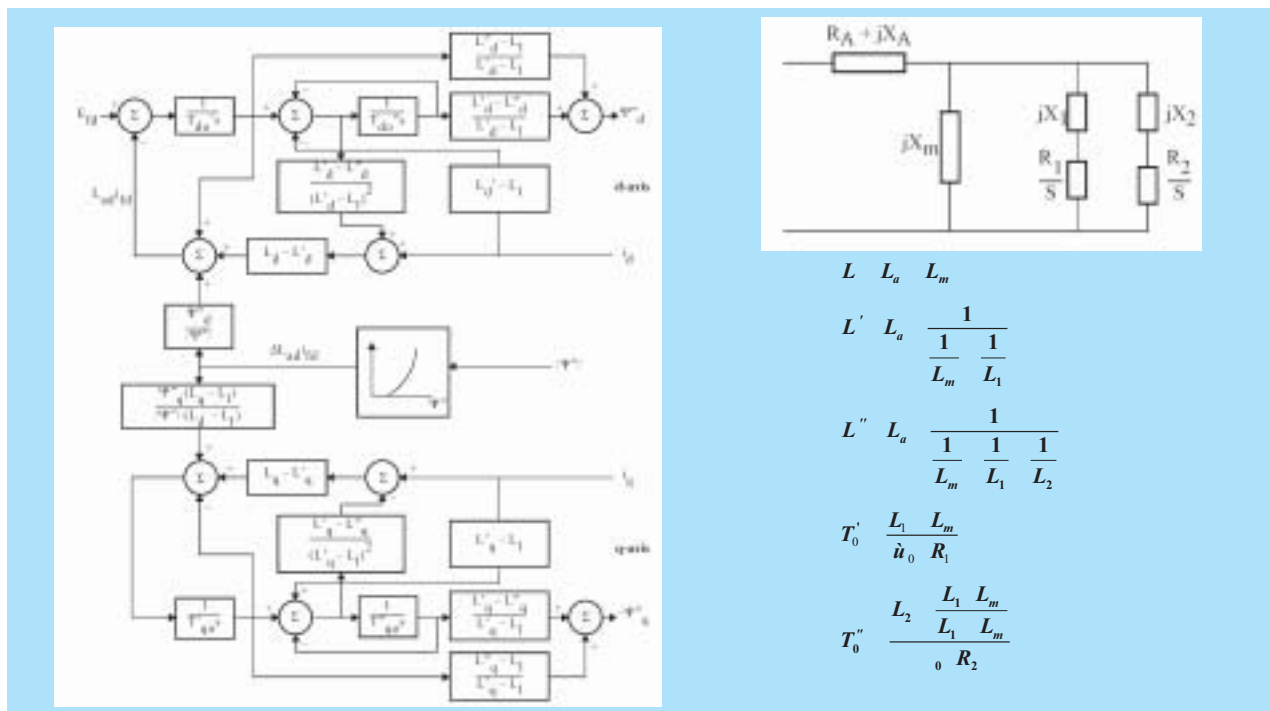
Simulacije asinkronog zaleta agregata CHE Čapljina uz odvodnjenu turbinu/crpku s faznim prigušnicama u zvjezdištu statora sinkronog stroja (način P1) načinjene su na višestrojnom modelu EES-a BiH kojim je obuhvaćena kompletna prijenosna mreža 400, 220 i 110 kV u prvoj sinkronoj zoni UCTE-a i relevantni dio 400 i 220 kV EES Hrvatske i Slovenije. Za sve generatore koji su modelirani na suptranzijentnom nivou, u skladu s raspoloživim podacima, modelirani su sustavi sustavi uzbude i sustavi turbinske regulacije. Osnovni cilj simulacija je odgovoriti na pitanje da li je i pod kakvim uvjetima moguće ostvariti asinkroni zalet i kako će prijelazna pojava tijekom zaleta utjecati na ponašanje EES-a.

Motor/generator (sinkroni stroj) agregata u CHE Čapljina je specifične izvedbe s dubokim utorima i masivnim polovima. Analiza asinkronog zaleta s takvim, detaljno modeliranim sinkronim strojem (s faznim prigušnicama u zvjezdištu statora, rotorskim namotajem zaključenim preko omskog otpora i sa odvodnjenom turbinom/crpkom) predstavlja specifičan problem koji, strogo uzevši, zahtijeva detaljnija teorijska istraživanja i implementaciju u postojeće programske pakete, ali i praktičnu verifikaciju modela, što u raspoloživom vremenu nije bilo moguće uraditi.

Iz navedenih razloga za dinamičku simulaciju motor/generatora CHE Čapljina korišten je model dvo-kaveznog asinkronog motora na suptranzijentnoj razini prilagođen analizama asinkronog starta sinkronog stroja. Izvršen je proračun relevantnih parametara nadomjesne sheme asinkronog motora na bazi poznatih parametara sinkronog stroja s dodatnim ko-

rekcijama zbog priključenja faznih prigušnica u zvjezdištu statora, omskog otpora kojim se zaključuje rotorski namot i otpornog momenta odvodnjene turbine/crpke. Blok-dijagram modela asinkronog motora kojim se simulira motor/generator CHE Čapljina prikazan je na slici 3.

krone brzine uz potporu drugog agregata u CHE Čapljina traje 118 sekundi (ukupno trajanje prijelaznog procesa je oko 125 s) s manjim propadima napona i proizvodnjama jalove snage generatora u HE Zakućac, HE Rama i HE Dubrovnik koje ne dostižu granične vrijednosti. Ni pri jednoj simulaciji nije indicirano dosti-



Slika 3. Blok dijagram modela i nadomjesna shema motora/generatora (sinkronog stroja) CHE Čapljina

Simulacije asinkronog zaleta izvedene su u dvije varijante:

- a) "samostalni" asinkroni zalet motor/generatora pri čemu je EES u potpunosti odgovoran za pružanje potrebne sistemske usluge asinkronog zaleta i osiguranje jalove snage od cca 200 Mvar;
- b) zalet s potporom drugog agregata u CHE Čapljina priključenim na mrežu u generatorskom radu čiji sustav regulacije napona održava nazivni napon na stazaljka generatora pri čemu se "sistemska usluga" osiguranja jalove snage za potrebe asinkronog zaleta reducira približno za 50% u odnosu na varijantu a).

Tijekom simulacija praćeno je 80 veličina: klizanje (brzina) motor/generatora CHE Čapljina, naponi relevantnih sabirnica, djelatne i jalove snage i kutovi generatora te tokovi snaga na vodovima.

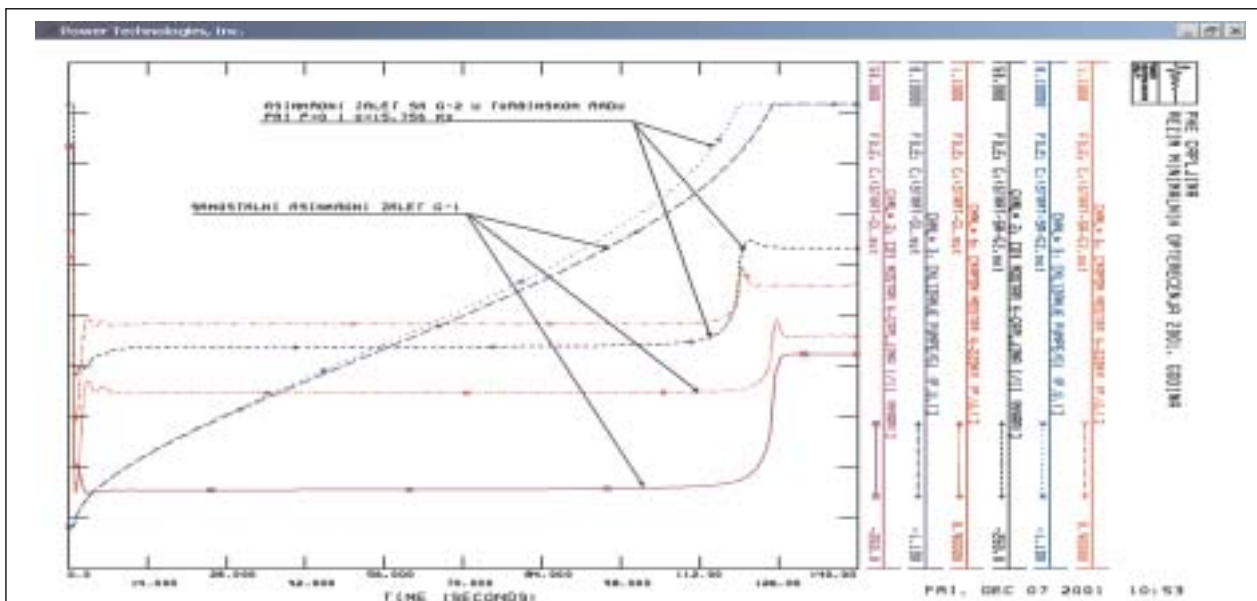
Rezultati simulacije "samostalnog" asinkronog zaleta pokazuju da vrijeme trajanja zaleta do sinkrone brzine iznosi 128 sekundi (ukupno trajanje prijelaznog procesa je oko 135 s) s iznosima napona koji ni u jednom 220 kV čvorištu mreže ni u jednom trenutku tijekom zaleta nisu niži od pogonski trajno dopuštenog iznosa od 198 kV (90%), ali s graničnim proizvodnjama jalove snage generatora u HE Zakućac, HE Rama i HE Dubrovnik. U odnosu na "samostalni" asinkroni zalet, zalet do sin-

zanje forsirnih iznosa struje uzbude generatora, a analiza oscilacija kutova rotora generatora potvrđuje da ni pojedinačna kutna stabilnost generatora kao i ukupna kutna stabilnost sustava neće biti upitna.

Na slici 4 prikazan je usporedni dijagram karakterističnih veličina kod asinhronog zaleta u varijantama a i b.

### 6. ASINKRONI ZALET CHE ČAPLJINA U REALNIM UVJETIMA

Mada su rezultati Studije 1 bili povoljni, zbog aktualnog stanja sustava ipak se nije mogla zanemariti činjenica da postoji značajna interakcija asinkronog zaleta ovako velikog agregata i EES-a što može dovesti do ozbiljnog sistemskog poremećaja koji može biti praćen neželjenim širenjem i, posebno u slučaju neuspješnog pokretanja, čak voditi ka raspadu sustava. Iz navedenih je razloga načinjen "Operativni program ispitivanja" 2 kojim je predviđeno da se prije pokusa asinkronog zaleta, u ciljanoj konfiguraciji sustava prema pretpostavkama iz Studije i realnim uvjetima, izvrši mjerenje naponske krutosti sustava (osjetljivost napon-jalova snaga), te da se samom izvođenju pokusa asinkronog zaleta pristupi samo ukoliko se dobiju povoljni rezultati. Ciljana konfiguracija je podrazumijeva-



Slika 4. Odziv karakterističnih veličina kod "samostalnog" zaleta i zaleta uz pomoć drugog agregata u CHE Čapljina

vala da u pogonu bude sva raspoloživa mreža 220 kV te po jedan hidro agregat u HE Rama, Grabovica, Salakovac, Zakućac, Dubrovnik i TE Tuzla (G5 ili G6).

U operativnom programu ispitivanja također je detaljno razrađena organizacijska shema s glavnim zapovjednim centrom u Sarajevu (ZEKC) i pomoćnim centrima u Sarajevu (EP BiH), Mostaru (EP HZHB), Trebinju (ERS) i Zagrebu (HEP) te mjestima mjerenja i registracije u svim zapovjednim centrima i odabranim objektima (CHE Čapljina, TS Mostar 4, HE Zakućac, TS Konjsko, RP Jablanica, HE Rama, HE Dubrovnik, HE Grabovica i EAL Mostar). U svim zapovjednim i mjernim centrima određene su odgovorne osobe te osigurana neposredna i stalna komunikacija, a razrađeni su postupci provođenja priprema i samog pokusa, uključujući i postupke operativnog osoblja u slučaju neuspjelog pokusa.

### 6.1. Mjerenje naponske krutosti sustava

Rezultati Studije 1 su pokazali da se u ciljanoj konfiguraciji sustava može na sabirnicama 220 kV TS Mostar 4 očekivati snaga kratkog spoja od oko 3350 MVA, što znači da ekvivalentna reaktancija sustava svedena na stezaljke motor/generatora (15.75 kV) u CHE Čapljina iznosi oko 20%. Prema uobičajenim kriterijima smatra se da ekvivalentna reaktancija sustava do 25% znači dobru povezanost objekta (sinkronog stroja u CHE Čapljina) sa sustavom, što bi značilo da aktualna i ciljana topološka struktura EES-a omogućava sistemsku uslugu asinkronog starta, što je i trebalo biti potvrđeno mjerenjima. Mjerenje naponske krutosti sustava izvršeno je u noći od 19. na 20. ožujka 2002. godine tako da je u različitim varijantama angažiranja agregata u HE Zakućac i HE Dubrovnik praćena promjena napona u sustavu u zavisnosti od promjene jalove snage generatora u CHE

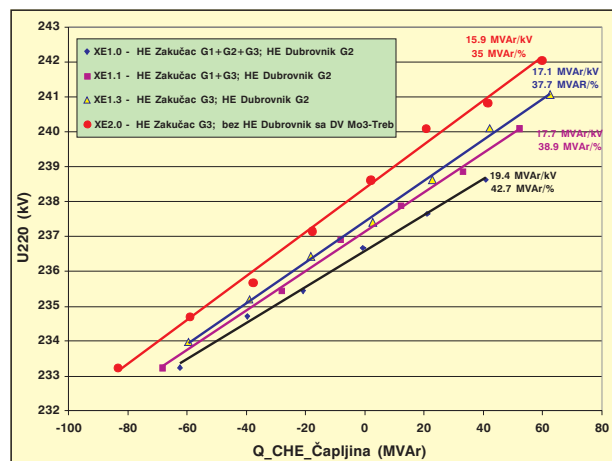
Čapljina, pri čemu je jedan agregat bio u turbinskom, a drugi u kompenzatorskom radu. Rezultati mjerenja za 220 kV čvor Čapljina prikazani su na slikama 5 i 6.

Na bazi provedenih mjerenja utvrđeno je:

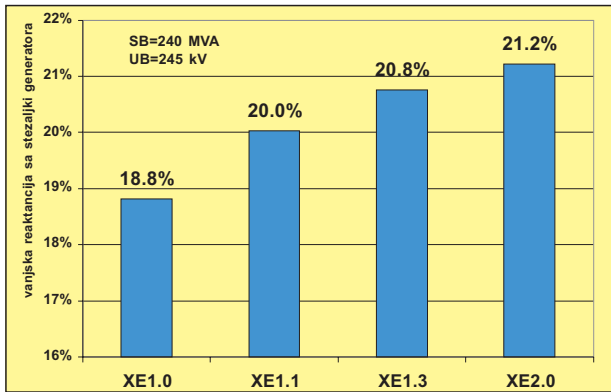
1. da su rezultati zadovoljavajući s obzirom na vanjsku reaktanciju sustava koja je u skladu s rezultatima proračuna dobivenim u Studiji na modelu EES-a;
2. da je zalet moguć i bez HE Dubrovnik; 3. da se asinkroni zalet jednog agregata treba načiniti uz potporu drugog agregata u CHE Čapljina u generatorskom pogonu.

### 6.2. Asinkroni zalet AG-1

Pokus asinkronog zaleta agregata AG-1 izvršen je 21. ožujka 2002. godine u 23:00 sati. Prethodno je, u skladu s Operativnim programom, od zapovjednih i ispitnih centara dobivena potvrda o spremnosti sustava i postrojenja u skladu sa zahtjevanom konfiguracijom i da

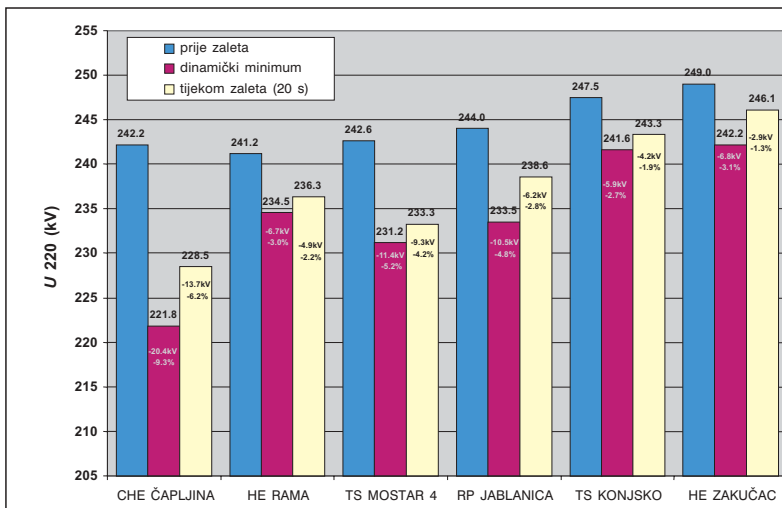


Slika 5. Naponska krutost 220 kV čvora CHE Čapljina

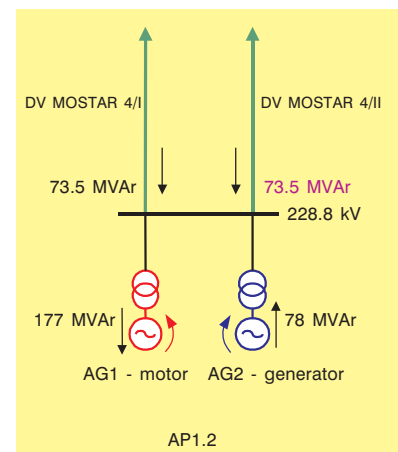


**Slika 6. Ekvivalentna reaktancija sustava gledano iz čvora CHE Čapljina**  
 XE1.0 -  $S_{k3}'' = 4016$  MVA  
 XE1.1 -  $S_{k3}'' = 3275$  MVA  
 XE1.3 -  $S_{k3}'' = 2916$  MVA  
 XE2.0 -  $S_{k3}'' = 2765$  MVA

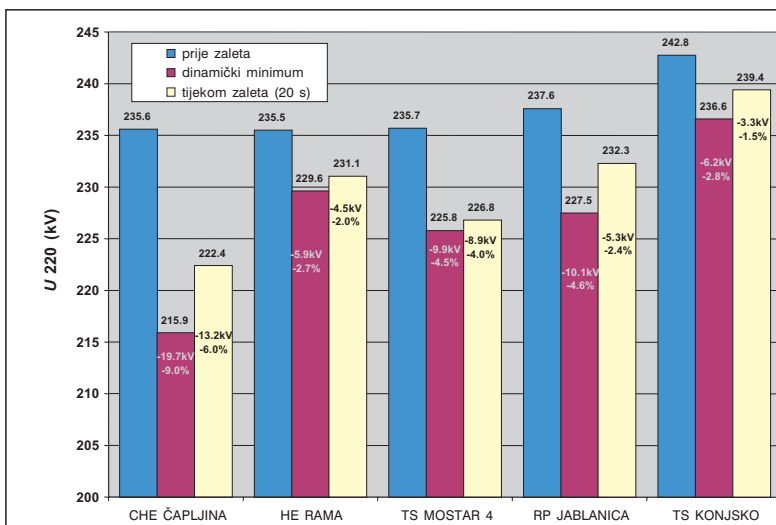
su načinjeni zapisi stacionarnog stanja (naponi, djelatne i jalove snage). Izvršena je sinkronizacija generatora AG-2 i odvodnjavanje turbinskog prostora AG-1. U prvom pokušaju, iako je postignuta sinkrona brzina, nije došlo do uključivanja uzbude, odnosno sinkronizacije motor/generatora na mrežu zbog greške na hidrauličkom ventilu. Unatoč tome može se smatrati da je prvi pokus asinkronog zaleta, s aspekta systemske usluge, bio uspješan. Ponovni zalet pokušao je pri istim uvjetima 22. ožujka u 00:11 sati i bio je uspješan u cijelosti. Asinkroni zalet motor/generatora s automatskom sinkronizacijom je trajao 96 sekundi i protekao je bez ikakvih problema u sustavu. Naponske prilike u karakterističnim 220 kV čvorištima mreže neposredno prije početka zaleta u samom početku zaleta i 20 sekundi nakon početka zaleta prikazani su na slici 7, a raspodjela jalovih snaga po agregatima CHE Čapljina i DV 220 kV Mostar 4 – CHE Čapljina 20 sekundi nakon početka zaleta na slici 8.



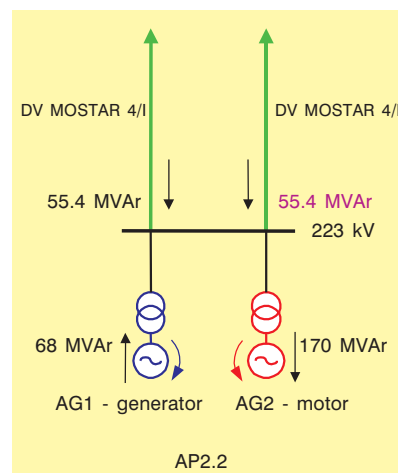
**Slika 7. Naponski profil u mreži 220 kV tijekom pokusa asinkronog zaleta AG-1**



**Slika 8. Tokovi jalovih snaga u CHE Čapljina 20 sekundi nakon početka asinkronog zaleta AG-1**



**Slika 9. Naponski profil u mreži 220 kV tijekom pokusa asinkronog zaleta AG-2**



**Slika 10. Tokovi jalovih snaga u CHE Čapljina 20 sekundi nakon početka asinkronog zaleta AG-2**

### 6.3. Asinkroni zalet AG-2

Pokus asinkronog zaleta AG-2 izvršen je 22. ožujka 2002. godine u 22:32 sati na isti način kao i zalet AG-1, ali s početno nešto nižim naponima u 220 kV mreži nego u slučaju zaleta AG-1 (vidi sliku 7 i sliku 9). Naponski profil u mreži 220 kV prikazan je na slici 9, dok je na slici 10 prikazana raspodjela jalovih snaga po agregatima CHE Čapljina i na 220 kV dalekovodu Mostar 4 – CHE Čapljina 20 sekundi nakon početka zaleta.

## 7. KOMPARATIVNA ANALIZA REZULTATA

Komparativna analiza rezultata pokazuje veoma dobro podudaranje vrijednosti napona i trajanja zaleta dobivenih simulacijom na modelu EES-a 1 i izmjerenih vrijednosti kod pokusa asinkronog zaleta u realnom sustavu, kako u trenutku uključivanja motor/generatora (dinamički minimum), tako i tijekom zaleta, što je ilustrirano u sljedećoj tablici za čvor 220 kV CHE Čapljina.

3. Agregati CHE Čapljina mogu se asinkrono pokretati bez AG2 (220 kV) u HE Dubrovnik.
4. ZEKC, Sarajevo u suradnji i uz suglasnost HEP-a, Zagreb i drugih elektroprivrednih kompanija u BiH, na temelju operativne analize po zahtjevu DC EP HZHB odobrava sistemsku uslugu asinkronog pokretanja i crpnog rada agregata CHE Čapljina.
4. Rezultati simulacijskih proračuna vrlo su se dobro podudarali s rezultatima mjerenja i odlično su poslužili za predikciju dinamike u stvarnim uvjetima.
5. Primijenjena metodologija simulacijskog istraživanja može se s velikom sigurnošću koristiti u ocjeni sposobnosti sustava i definiranju minimalno potrebnih uvjeta u sustavu za pružanje systemske usluge asinkronog starta agregata crpno akumulacijske elektrane.
6. Bilo bi korisno i potrebno pokrenuti aktivnosti na sređivanju baze tehničkih podataka izvedenog stanja postrojenja (pogonski dijagrami agregata/generatora, sustavi regulacije uzbude generatora, sustavi regulacije brzine vrtnje agregata, zaštita, mjerenje, ...).

KOMPARATIVNI PRIKAZ STUDIJSKIH REZULTATA I REZULTATA MJERENJA														
izvor podataka	napon na 220 kV sabirnicama CHE Čapljina kod pokusa asinkronog zaleta ( $U_n=220$ kV)													trajanje zaleta
	prije pokretanja		dinamički minimum				20 sekundi nakon pokretanja				nakon sinkronizacije			
	$U$		$U$		$\Delta U$		$U$		$U$		$U$			
	(kV)	(%)	(kV)	(%)	(kV)	(%)	(kV)	(%)	(kV)	(%)	(kV)	(%)	(s)	
Studija	239.0	108.5	218.0	99.1	-21.0	-9.4	227.0	103.2	-12.0	-5.3	223.0*	105.5	118	
pokus s AG - 1	242.2	110.1	221.8	100.8	-20.4	-9.3	228.5	103.9	-13.7	-6.2	245.0	111.4	96	
pokus s AG - 2	235.6	107.1	215.9	98.1	-19.7	-9.0	222.4	101.1	-13.2	-6.0	236.0	107.2	118	

\* pri dostizanju sinkrone brzine, bez sinkronizacije (uključenja uzbude).

## 8. ZAKLJUČAK

1. Uspješno provedeni pokusi asinkronog zaleta i crpnog rada su pokazali da su oba agregata CHE Čapljina pogonski spremna za crpni rad i asinkrono pokretanje s faznim prigušnicama u zvjezdistu statora sinkronog stroja uz odvodnjenu turbinu / crpku.
2. Hrvatski EES i dio EES BiH u prvoj sinkronoj zoni UCTE-a u aktualnom stanju, uz potporu drugog agregata CHE Čapljina, sposobni su za sistemsku uslugu asinkronog starta agregata CHE Čapljina pri čemu nije upitna naponska stabilnost susjednih čvorišta. Iznosi napona ni u jednom 220 kV čvorištu mreže ni jednog trenutka tijekom zaleta nisu bili niži od pogonski trajno dopuštenog iznosa od 198 kV (90%). Ovaj zaključak je u potpunosti potvrđen u periodu svibanj-listopad 2002. godine kada je bilo više upuštanja agregata CHE Čapljina u redovni crpni pogon.

## LITERATURA

- 1 N. RUSANOV, "Analiza asinkronog zaleta PHE Čapljina obzirom na mogućnosti i ograničenja elektroenergetskog sustava" – ZEKC, oktobar/ listopad 2001.
- 2 Operativno povjerenstvo za rad CHE Čapljina, "Asinkrono pokretanje agregata u CHE Čapljina – Operativni program ispitivanja" – ZEKC – ožujak/mart 2002.
- 3 M. STOJSAVLJEVIĆ, D. NEMEĆ, i drugi, "Asinkrono pokretanje i pumpanje agregata u CHE Čapljina, Ispitivanje u aktualnom energetsom sustavu", Institut za elektroprivredu i energetiku, Zagreb, srpanj 2002.

### ASYNCHRONOUS START OF HPP ČAPLJINA PUMP IN A REAL SITUATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS OF BOSNIA AND HERZEGOVINA AND CROATIA

Analysis of the electric power system operation and usage of available energy resources in real circumstances of topology structure and electric energy circumstances in the



transmission network of Bosnia and Herzegovina and Croatia, especially in the region of mid and south Dalmatia (so called Adriatic Road), has given rise to the question of reversible hydro power plant Čapljina's utilization of 2X240 MW and to considering occasions created by open electric energy market.

From the technical point of view there are two problems, i.e. system services: 1) asynchronous aggregate start and 2) transmission of power and energy for pump operation under circumstances of lower system reliability. The research has shown that from the point of voltage, dynamic and reactive power, asynchronous start is possible with phase reactances in generator neutral point with water-free turbine/pump (mode P1).

During start up, generators near connecting point of pump HPP Čapljina (TS Mostar 4) are nominally loaded by reactive power. The operation and support of the other aggregate in pump HPP Čapljina in generator mode significantly improves considering voltage and reactive power in that part of the system during start up.

Two possibilities of power and energy supply for pumping are analyzed: 1) from thermal power plants of Bosnia and Herzegovina and 2) from UCTE interconnection. In the UCTE variant problems could arise with (n-1) criteria of reliability and criteria of bottlenecks on the part of the Adriatic Road in the electric power system of Croatia.

Based on calculation results during three nights in March 2002 successful trials of asynchronous start ups and pumping with two aggregates of pump HPP Čapljina were realized under real conditions.

#### **ASYNCHRONER ANLAUF EINES TURBOSATZES IM PUMPENSPEICHERWERK (=CHE) "ČAPLJINA" BEI BESTEHENDEN UMSTÄNDEN IN DEN ENERGIEVERSORGUNGSSYSTEMEN BOSNIEN-HERZEGOVINA'S UND KROATIENS.**

Bei der Untersuchung der Betriebsweisen elektroenergetischer Systeme und der Ausnutzung elektroenergetischer Anlagen unter den Bedingungen Ihrer tatsächlichen Lage und Anordnung, sowie unter den energetischen Umständen im Übertragungsnetz sowohl Bosnien-Herzegovina's, als auch Kroatiens, besonders im Bereich von Süd- und Mitteldalmatien (Adriatische Übertragungshauptader) stellen sich die Fragen möglicher Nutzung der Eigenschaften des 2x240 MW Pumpenspeicherwerkes "Čapljina" und der günstigen, vom offenen Strommarkt angebotenen, Gelegenheiten.

Aus der technischen Sicht erweisen sich zwei Grundprobleme, bei beiden möglichen Dienstleistungen: 1) Asyn-

chroner Anlauf eines Turbosatzes (direkt, oder mit Drosselspulen im Sternpunkt des Generators, bei entwässertem Raum der Turbine/Pumpe) und 2) Leistungs- und Energieübertragung für die Speicherungsarbeit in den Bedingungen beschränkter Verfügbarkeit des Systems. Aus der Sicht der Spannungsdynamik und der Blindleistungen deuten die Untersuchungen auf die Möglichkeit des asynchronen Anlaufes des Turbosatzes mit Drosselspulen im Sternpunkt des Generators beim entwässerten Raum der Turbine/Pumpe. (Dienstleistung 1).

Während des Anlaufes werden dem Anschlusspunkt vom Pumpenspeicherwerk "Čapljina" (UW "Mostar 4") näher liegende Generatoren mit nomineller Blindleistung belastet. Die Unterstützung des zweiten Turbosatzes in "Čapljina" in Erzeugungsschaltung verbessert wesentlich -während des Anlaufs- die Spannungs und Blindleistungsverhältnisse in diesem Teil des Systems,.

Zwei Varianten der Sicherung von Leistung und Energie für die Pumparbeit sind erörtert worden: 1) aus den Dampfkraftwerken des Stromversorgungssystems von Bosnien Herzegovina und 2) aus der Interkonektion mit dem UCTE. In dieser 2. Variante sind, laut dem (n-1) Kriterium der Verfügbarkeit und dem Engpasskriterium in einem Teil des adriatischen Übertragungshauptaders im Versorgungssystem Kroatiens, schwierigketen möglich.

Auf Grund der Ergebnisse durchgeführter Berechnungen sind in drei Nächten im März des Jahres 2002 erfolgreiche Versuche des asynchronen Anlaufes und der Pumparbeit mit beiden Sätzen des (=CHE) "Čapljina" in realen Bedingungen durchgeführt worden.

Naslov pisaca:

**Mr. sc. Nikola Rusanov, dipl. ing.**  
**Elektroprivreda BiH, Sarajevo**  
**Bosna i Hercegovina**

**Srećko Vučina, dipl. ing.**  
**Elektroprivreda HZHB**  
**Mostar, Bosna i Hercegovina**

**mr. sc. Milan Stojsavljević, dipl. ing.**  
**mr. sc. Darko Nemeč, dipl. ing.**  
**Institut za elektroprivredu**  
**i energetiku d.d.**  
**Ulica grada Vukovara 37**  
**10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:  
2003 – 07 – 09.