

Ivica Toljan

Projekt Rekonekcija – zamjena redoslijeda faza i otočni rad hrvatskog i BiH elektroenergetskog sustava – neočekivani preduvjeti za povezivanje dvaju europskih elektroenergetskih sustava

Sažetak: Europska udruga državnih elektroprivreda do svibnja 2001. radila je pod imenom Unija za koordiniranje proizvodnje i prijenosa električne energije (*Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity* – UCPTE). Zbog procesa liberalizacije i priprema za otvaranje tržišta električne energije dolazi do promjene organizacija. Razdvajaju se djelatnosti proizvodnje i prijenosa električne energije. U Lisabonu, Portugal, u svibnju 2001. Hrvatska elektroprivreda postaje jedan od osnivača i punopravan član nove udruge za prijenos i vođenje elektroenergetskih sustava – UCTE (*Union for the Coordination of Transmission of Electricity*).

U to vrijeme nasljednim povijesnim događanjima europski elektroenergetski sustav (ees) sastojao se od dvaju dijelova, dviju razdvojenih zona; prva i druga europska elektroenergetska zona. Na sastanku pod predsjedanjem Jürgena Stotza, tad glavnog direktora Njemačke elektroprivrede (*Deutsche Verbundgesellschaft* – DVG), zaključeno je da je najveći prioritet povezivanje navedenih zona i stvaranje jedinstvenog europskog ees-a.

Potpisivanjem Pisma o razumijevanju u Lisabonu, na navedenom sastanku počele su aktivnosti oko projekta Rekonekcija. Već na tom sastanku mogao se primijetiti velik pritisak s ciljem da se projekt završi do svibnja 2004. godine. Razumljivo, najveći je interes pokazivala Grčka. Naime, 13. kolovoza 2004. bilo je planirano otvorenje XXVIII. Olimpijskih igara u Ateni.

Sigurnost opskrbe električnom energijom bio je prioritet. Već je tad bila gotova studija o mogućim scenarijima Rekonekcije. Bilo ih je sedam, ali niti jedan nije računao da će Hrvatska u tom roku obnoviti svoju visokonaponsku mrežu uništenu ratnim razaranjima i izgraditi dvije nove 400 kV trafostanice Ernestinovo i Žerjavinec. Rekonekcija bi se napravila preko Mađarske, a Hrvatska bi vjerojatno još godinama bila djelomično izolirana od ostatka europskog ees-a. Nakon dugih rasprava i sastanaka, Upravni odbor UCTE-a na sastanku u Zagrebu 2002. godine osnovao je Izvršni tim (*Executive Team* – ET), s osnovnim ciljem pripreme i realiziranja projekta električnog povezivanja tad postojećih dviju europskih sinkronih zona.

Upravni odbor UCTE-a, sastavljenog od svih europskih elektroprivreda, za voditelje je odredio predstavnika hrvatskog operatora prijenosnog sustava Ivicu Toljana (Član Uprave HEP-a i direktor prijenosa) i češkog Jiříja Feista (tad jedan od direktora češkog prijenosa ČEPS-a). Nakon pune tri godine intenzivnog i odgovornog rada, Hrvatska je obnovila svoju visokonaponsku mrežu, što je napravila i BiH, izgradila nove 400 kV transformatorske stanice i projekt je doveden pred završnu fazu provedbe – planirano uključanje 10. listopada 2004. godine. Na zadnjem sastanku Izvršnog tima za rekonekciju, mađarski predstavnik upozorava da se projekt ne može realizirati jer na sučelju Republike Slovenije, Mađarske i Hrvatske faze nemaju jednak redoslijed, odnosno zamijenjene su. Zbog toga treba ees RH i BiH odvojiti od europskog ees-a (staviti u otočni rad). Da bi se to realiziralo, treba dobiti dozvolu od UCTE-a i organizirati više od 500 ljudi različitih struka te svu pripadajuću tehniku, kao i pronaći način plaćanja izvanrednih troškova.

Ključne riječi: elektroenergetski sustav, redoslijed zamjene faza, projekt Rekonekcija, otočni rad

Uvod

Za sam projekt Rekonekcija [1] dobra je priprema bila studija [9] koju je 2001. godine izradio UCTE pod ravnanjem njemačke elektroprivrede, tzv. DVG studija (*Stability of the Synchronously Interconnected Operation of the Electricity Networks of UCTE / CENTREL, Bulgaria and Romania, DVG, Heidelberg, Germany, 2001.*). Na izradi studije radili su svi predstavnici iz jugoistočne Europe kao i stručnjaci iz Njemačke i Austrije. Iz Hrvatske je sudjelovao mr. sc. Zdenko Tonković iz Instituta za elektroprivredu, u to vrijeme naš vodeći stručnjak za prijenos električne energije. Studiju je vodio dr. sc. Eckhard Grebe

(RWE¹ Energy, Essen, Njemačka), tad vodeći znanstvenik i stručnjak po pitanjima dinamičke i statičke stabilnosti rada velikih ees-a.

Glavna manjkavost studije bila je da je izrađena bez 400/110 kV trafostanice TS Ernestinovo u RH, jer se nije vjerovalo da će Hrvatska uspjeti pripremiti svoju mrežnu infrastrukturu još dugo vremena. Studija nigdje nije spomenula problem usklađivanja faza. Taj problem je otkriven pred sam početak izvršenja projekta Rekonekcije. Engleska izreka 'Vrag je u detaljima' (engl. *The Devils are in details*), na tom je projektu došla do punog izražaja. Svjedoci smo da je i NASA prije nekoliko mjeseci morala otkazati let u svemir posadi koja se godinama za to pripremala zbog problema s veličinom svemirskog odijela.

Studija je uz mnoštvo karakterističnih podataka za velike ees-ove izračunala sigurnost i stabilnost europskog ees-a prilikom mogućih scenarija spajanja, modelirala matematički i konfiguracijski zajedničku mrežu, izračunala tranzijentnu stabilnost, tokove snaga, odstupanja frekvencije i naponske prilike. Bila je čvrst temelj da se napravi s našim programom, koji smo imali u Nacionalnom dispeterskom centru HEP-a, sve daljnje potrebne analize s uključenjem novih 400 kV stanica Ernestinovo i Žerjavinec. Projekt Rekonekcije, usklađivanje faza i otočni rad napisani su u referatima 2005. godine koji su objavljeni [8], [11], [12] i prezentirani na konferencijama HRO CIGRÉ-a. Stoga je ovaj referat kompilacija navedenih triju, ali detalji se mogu naći na *web*-stranicama HRO CIGRÉ-a.

1. Projekt Rekonekcija

Nakon niza razgovora i neizvjesnih stanja, Hrvatska je dobila povjerenje Upravnog odbora UCTE-a za vođenje projekta Rekonekcija [1], [2], [3] i relativno kratke rokove za obnovu vlastitog sustava, a to znači; izgradnja dviju novih 400 kV transformatorskih stanica, obnova svih dalekovoda, kao i izgradnja novih u sklopu nove topologije hrvatske mreže. Ciljni rok bio je lipanj 2004. godine.

Rokovi izgradnje i pripreme hrvatske mreže bili su pod velikim nadzorom, uz stalna izvještavanja Upravnom odboru UCTE-a. Uspješnost projekta ovisila je i o razvoju rekonstrukcije infrastrukture u BiH. Kroz program Power III elektroprivrednici u BiH uspjeli su na vrijeme rekonstruirati trafostanicu TS 400/110 kV Mostar, kao i odgovarajuće dalekovode. Poseban je problem bio je 400 kV vod Mostar – Sarajevo, no zahvaljujući nastojanju svih uspjelo je gotovo nemoguće te je doprinos stručnjaka iz BiH iznimno važan u predmetnom projektu.

Osnovan je Izvršni odbor (*Executive Team – ET*), na čijem su čelu bili Jiří Feist, dipl. ing. el., jedan od direktora u češkoj elektroprijenosnoj kompaniji

¹RWE, Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk



Sl. 1.: Voditelji projekta Rekonekcij (slijeva nadesno): mr. sc. Milan Jevšenak – ELES (15. 6. 2004. – 10. 10. 2004.), mr. sc. Ivica Toljan – HEP (15. 5. 2001. – 10. 10. 2004.), Jiří Feist – ČEPS (15. 6. 2001. – 15. 6. 2004.)



Sl. 2.: Sastanak izvršnog tima za projekt Rekonekcija i djelatnici NDC-a (Nacionalni dispečerski centar) HEP-a (Zagreb, rujan 2004.)



Sl. 3. Tajnik projekta Rekonekcija – Damjan Međimorec, dipl. ing. el. (15. 6. 2001. – 10. 10. 2004.)

– ČEPS. Inženjer Feist imao je iskustvo spajanja članica CENTREL-a (zemlje srednje i istočne Europe iz bivšeg istočnog ees-a) na UCTE kao i mr. sc. Ivica Toljan, član Uprave HEP grupe i direktor HEP – Prijenosa, slika 1. Oba su bila višegodišnji operativni državni dispečeri. U svibnju 2004., pred sam početak realizacije projekta, inženjer Feist prešao je na novo radno mjesto (direktor razvoja Češke elektroprivrede, ČEZ) i zamjenjuje ga direktor slovenskog operatera prijenosnog sustava (ELES), mr. sc. Milan Jevšenak, također bivši državni dispečer. Tajnik ET-a cijelo je vrijeme bio Damjan Međimorec, dipl. ing. el., slika 3., a uz njega je za vrijeme projekta bio prisutan i Silvio Brkić, dipl. ing. el. iz HEP – OPS-a. U uvodu je spomenuta studija obradila šest scenarija i dobiveni rezultati bili su vrlo korisni za naknadne analize po scenariju 7., koji se na koncu i realizirao, slika 4.

1.1. Pregled razvoja UCTE-a i stanje prije rekonekcije

Elektrifikacija kontinentalne (paneuropske) Europe “počela” je od manjih područja koja su se postupno povećavala uz istodoban porast i naponskih razina. Bitan element njihova spajanja interkonekcijama počeo je još dvadesetih godina prošlog stoljeća (zbog korištenja prednosti hidroenergije iz Alpa), a



Sl. 4.: Studija *Scenariji Rekonekcije – Stability of the Synchronously Interconnected Operation of the Electricity Networks of UCTE/Centrel, Bulgaria and Romania* (DVG – Deutsche Verbundgesellschaft.V., Heidelberg, Njemačka, 29. siječnja 2001.)

intenziviran je od 1949. godine, što traje još i danas. U Europi su se nakon Drugog svjetskog rata oblikovale četiri velike elektroenergetske interkonekcije:

1. Zapadnoeuropska interkonekcija UCPTE (Unija za koordinaciju proizvodnje i prijenosa električne energije), koja od 1951. obuhvaća elektroenergetske sustave osam zemalja: Austrije, Belgije, Francuske, Italije, Luksemburga, Nizozemske, Njemačke (tadašnje Savezne Republike) i Švicarske. Njima su 1961. pridružene zemlje interkonekcije UFIPT (uz Francusku, obuhvaća Portugal i Španjolsku) i 1974. zemlje interkonekcije SUDEL-a (uz Austriju i Italiju, obuhvaćala je Jugoslaviju i Grčku od 1977.).
2. Sjevernoeuropska interkonekcija NORDEL, koja od 1963. obuhvaća zapadnu Dansku, Finsku, Norvešku, Švedsku i Island (Island, u odvojenom radu).
3. Istočnoeuropski objedinjeni energetski sustav OES, od 1960., interkonekcija obuhvaća europske zemlje članice nekadašnjeg Savjeta za uzajamnu ekonomsku pomoć (SEV): Bugarsku, Čehoslovačku, Mađarsku, Njemačku Demokratsku Republiku, Poljsku, Rumunjsku i jugozapadni dio jedinstvenog elektroenergetskog sustava SSSR-a (Moldavija i Ukrajina)
4. Jedinstveni ees SSSR-a, nastao šezdesetih odnosno sedamdesetih godina, koji je obuhvaćao devet objedinjenih elektroenergetskih sustava u toj zemlji (od ukupno jedanaest, s gotovo 100 rajonskih sustava), u europskom i azijskom dijelu.

Postoji još i interkonekcija UKTSOA (*United Kingdom Transmission System Operators Association*), koja obuhvaća sustav Engleske i Walesa te koordinira dobavu iz Škotske i uvoz iz Francuske. ATSOI (*Association of Transmission System Operators of Ireland*), interkonekcija je koja obuhvaća sustave Republike Irske i Sjeverne Irske. To su dvije manje europske interkonekcije.

Uspostavljene europske elektroenergetske interkonekcije imale su određene prirodne i razvojne posebnosti, koje ih dijelom čine komplementarnim te 'potiču' na međusobno spajanje, a dijelom su takve da stvaraju teškoće pri mogućem spajanju:

- zemljopisni položaj duž razdjelnice istok-zapad: vrh potražnje pomiče se dnevno sa Suncem; usto, istok je suficitaran s primarnim izvorima energije, a zapad uglavnom deficitaran
- zemljopisni položaj duž razdjelnice sjever-jug: vrh potražnje pomiče se sezonski, ljeti prema jugu, a zimi prema sjeveru; usto, ekološki je preopterećen središnji prostor i u tom pogledu slabije opterećen sjever i jug
- udio energije vode u ukupnoj proizvodnji električne energije
- udio nuklearnih elektrana
- regulacijska svojstva elektrana i sustava
- zemljopisne zapreke (morski tjesnaci) i
- globalno-političke prepreke.

Nakon tzv. perestrojke i pada Berlinskog zida (1989.), društvenih i političkih promjena u SSSR-u (1991.) i istočnoj Europi te rata na prostoru Jugoslavije nastaju promjene i unutar zatečenih europskih interkonekcija i u umnožavanju njihove međusobne povezanosti.

Prije svega, 1992. u Pragu je utemeljena nova interkonekcija CENTREL, kojoj su pristupili ees-ovi Češke, Slovačke, Poljske i Mađarske s jednim od najvažnijih ciljeva: prilagodba mreže zbog integracije u UCPTE. Od 1993. isključene su veze prema interkonekciji ees-a SSSR-a. Jugozapadni dio Ukrajine, oko TE Burštin, također je odvojen od interkonekcije ees-a SSSR-a.

U Njemačkoj, ujedinenj 3. listopada 1990., žurno se grade četiri 400 kV dalekovoda kako bi se nove savezne države izdvojile iz interkonekcije OES-a i priključile sustavu ranijih saveznih država, odnosno interkonekciji UCPTE. To je realizirano 1995., a krajem te godine počeo je pokusni paralelni rad interkonekcije CENTREL, dakle Poljske, Mađarske, Češke i Slovačke s interkonekcijom UCPTE. Stalni sinkroni rad realiziran je 1998. godine.

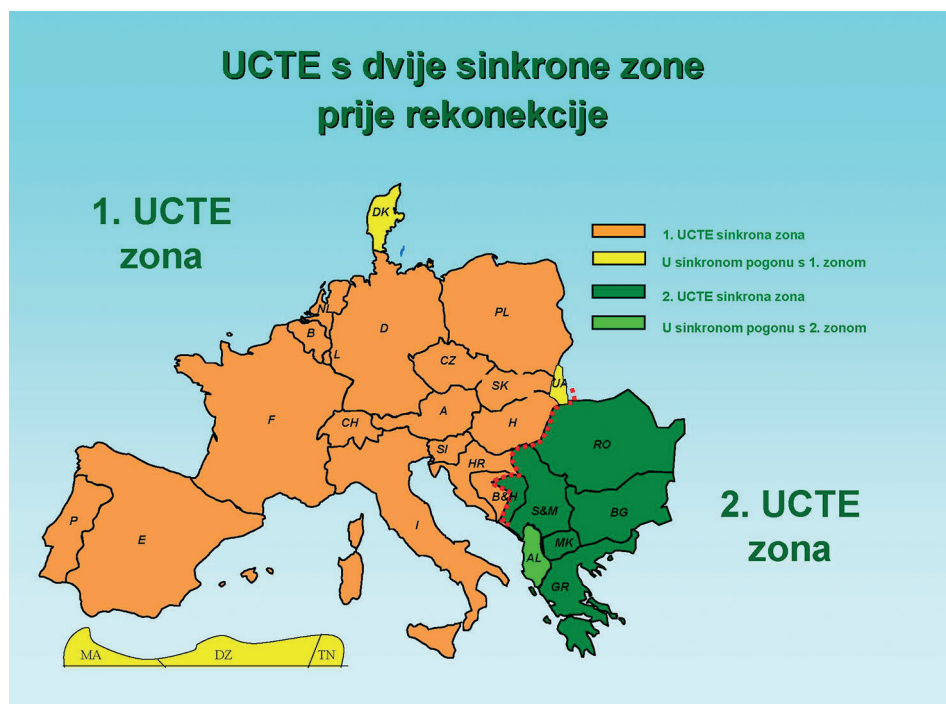
Interkonekcije NORDEL i UKTSOA odvajaju od UCPTE-a morske zapreke takve duljine da se ne mogu premostiti izmjeničnim prijenosom, bitno ekonomičnijim od istosmjernog. Prijenos izmjeničnom strujom podmorskim kabelom visokog napona ograničen je na nekoliko desetaka kilometara. Uz veću duljinu, kapacitivna struja koja nužno teče kabelom na njegovu početku "zauzela" bi sav presjek kabela te ne bi preostao presjek raspoloživ za aktivni prijenos energije. Pri istosmjernom naponu nema kapacitivne struje kabelom, ali takav sustav traži – osim polaganja kabela – i skupa usmjerivačka postrojenja na njegovu početku i završetku. Engleska pokrata za prijenos istosmjernom strujom visokog napona je HVDC (engl. *High voltage direct current*).

Nekoliko podmorskih kabela istosmjerne struje povezuje zemlje NORDEL-a međusobno, a prema zemljama UCPTE-a položena su tri takva kabela. Prvi je BALTIC-kabel (najdulji podmorski kabel na svijetu: 250 km), između Švedske i Njemačke, napona 450 kV i prijenosne moći 600 MW, u pogonu od 1994. godine. Drugi je KONTEK-kabel, između Danske i Njemačke, duljine 52 km u Baltičkom moru, napona 400 kV i prijenosne moći 600 MW, u pogonu od 1996. godine. Treći je SwePol-kabel, između Švedske i Poljske, napona 450 kV i prijenosne moći 600 MW, podmorske duljine 230 km, u pogonu od 2003. godine. U međuvremenu su izgrađene i dodatne HVDC veze.

Najsnažniji podmorski kabelski prijenos na svijetu, IFA 2000, prijenosne moći 2000 MW, položen je ispod La Manchea, duljine 72 km. Pri istosmjernom naponu od 270 kV omogućuje znatan izvoz iz Francuske u Veliku Britaniju, a u pogonu je od 1986. godine. Još od 1961. na tom je potezu kabelski prijenos s istosmjernom strujom prijenosne moći 160 MW.

Godine 1999., usklađujući se s odredbama Direktive 96/92 Europskog parlamenta i Vijeća od 19. prosinca 1996. o zajedničkim pravilima za unutarnje

tržište električne energije Europske unije o električnoj energiji, koja nalaže tržišni položaj proizvodnje električne energije i odvajanje proizvodnje od prijenosa i distribucije, interkonekcija UCPTE mijenja svoj naziv, izostavljajući riječ proizvodnja (engl. *production*) iz naslova i otad se naziva UCTE, Unija za koordinaciju prijenosa električne energije. Nema više među osnovnim zadaćama koordinaciju proizvodnje električne energije, nego pružanje tehničke mogućnosti da se takova koordinacija obavlja na tržišnoj/konkurentnoj osnovi. Udružuje operatore prijenosnih sustava u kontinentalnoj Europi, osiguravajući pouzdanu tržišnu osnovu putem učinkovite i sigurne elektroenergetske mreže najviših napona (engl. *power highway*).



Sl. 5.: Interkonekcija UCTE sredinom 2004. godine (izvor: HEP – OPS)

Ratna razaranja u Hrvatskoj još su 1991. razdvojila, potpunim razaranjem TS 400/110 kV Ernestinovo te djelomičnim razaranjem TS 400/220/110 kV Konjsko, kao i kasnijim razaranjima na području BiH – interkonekciju UCPTE (kasniji UCTE) na dvije zone, slika 5., svaku za sebe u sinkronom pogonu. U drugoj sinkronoj zoni našli su se ees-ovi jugoistočne Europe (istočni dio BiH,

Srbija i Crna Gora, Makedonija², Grčka, i – u sinkronom radu s drugom zonom od 1994. godine Rumunjska i od 1996. Bugarska, te nakon njih i Albanija), a u prvoj sinkronoj zoni sve preostale zemlje, uključujući Hrvatsku i Sloveniju. Za RH značajna je bila izgradnja 400 kV voda Žerjavinec – Héviz, okončana 1999., s obzirom na to da je riječ bila o alternativnom spojnom putu RH prema prvoj zoni UCTE preko Mađarske; obje dotadašnje 400 kV veze bile su preko Slovenije (Zagreb – Krško i Melina – Divača).

Godine 2004., nakon što je prijenosna mreža u Slavoniji i Baranji i TS 400/110 kV Ernestinovo te mreža u BiH obnovljena, došlo je do spajanja prve i druge sinkrone zone UCTE-a, tablica 1., i time je ponovno uspostavljena jedinstvena interkonekcija od Portugala do Poljske i od Francuske do Grčke, Makedonije, Bugarske i Rumunjske, te – u pridruženom članstvu – zapadne Danske. Sustavi jugozapadne Ukrajine i Albaniji bili su u sinkronom radu s UCTE-om, ali te zemlje tad nisu bile članice.

Godine 1991. osnovan je poseban odbor MEDELEC, čiji je cilj bio elektroenergetsko spajanje oko Sredozemlja. Izgrađena je veza koja proteže interkonekciju UCTE na sjevernoafrički prostor – zemlje Magreba: Maroko, Alžir i Tunis, koje čine međusobnu interkonekciju. Kabel izmjenične struje napona 400 kV ispod Gibraltara, prijenosne moći 730 MW, duljine 25 km, povezuje Španjolsku s Marokom od 1997. godine. U izgradnji je još jedan takav kabel. Zemlje Magreba: Libija, Egipat, Jordan, Libanon i Sirija čine jedan interkonekcijski blok. Realizirano je spajanje Tunis – Libija. Slijedi spajanje na tursko-sirijskoj granici. Bospor je, inače, premošten četirima vodovima 400 kV.

Međukontinentalno spajanje koje na taj način nastaje omogućilo bi europsko investiranje u korištenje primarnih energetske izvora sjeverne Afrike, u daljoj budućnosti i dublje u Africi – sve do eventualno mogućih ekonomski prihvatljivih budućih solarnih rješenja masovno instaliranih u ekvatorskom području.

Na sjeveru bilo je planirano polaganje, koje je poslije realizirano, čak triju novih podmorskih kabela istosmjernje struje: dvaju između Norveške i Njemačke te jednog između Norveške i Nizozemske. Očigledno, komplementarnost skandinavske hidroenergije i sjevernoeuropske kontinentalne termoenergije te ekološki motivi potiču na intenziviranje razmjene između tih prostora. Švedska se time priprema i za nadoknadu nuklearne energije nakon obustave proizvodnje u vlastitim nuklearnim elektranama. Razmatrano je sinkrono spajanje interkonekcije UCTE i interkonekcije IPS/UPS (*Interconnected Power Systems / Unified Power System*), koja bi se pružala od Lisabona do

²Ime zemlje promijenjeno je 2019. u Sjeverna Makedonija.

Vladivostoka. Konačni izvještaj o mogućnostima takva spajanja podnesen je 2008. i pozitivan je.

Interkonekcija IPS/UPS obuhvaća elektroenergetske sustave baltičkih zemalja (Latvije, Litve i Estonije) te Armenije, Azerbejdžana, Bjelorusije, Gruzije, Moldavije, Kazahstana, Kirgistana, Rusije, Tadžikistana, Ukrajine i Uzbekistana. Nastala je nakon raspada SSSRa, odnosno raspada svojedobnog istočnoeuropskog objedinjenog eneretskog sustava. Razmatra se i alternativa veleprijenosa istok-zapad, sustavom istosmjerne struje s više priključaka (multiterminalni prijenos): Rusija, Bjelorusija, Poljska i dva priključka u Njemačkoj, prijenosne moći 4000 MW i ukupne duljine 1800 kilometara.

Uz tehničko-tehnološka ograničenja širenju, i brojne druge zapreke ne dopuštaju “beskrajno” protezanje interkonekcijskog obuhvata: neujednačeni pogledi na kvalitetu, sigurnost, ekonomičnost. Različitost tradicija, kultura, jezika, odnosa prema disciplini i slične nehomogenosti unutar preširoko zahvaćenog prostora također vode velikom oprezu.

Tablica 1.: Dvije sinkrone zone UCTE pred spajanjem (zaokruženi podaci) 2004. godine (izvor: UCTE– ET)

Sinkrona zona	Instalirana snaga elektrana, GW	Proizvodnja električneenergije, TWh
Prva	545	2300
Druga	55	200
Ukupno UCTE	600	2500

1.2. Tijek pripreme, organizacija i preduvjeti rekonekcije

Potpisivanjem Memoranduma o razumijevanju u Lisabonu počele su aktivnosti oko projekta Rekonekcije. Spajanje se provjeravalo metodom “korak po korak”. Sljedeća je bila provjera sigurnosti provjerom kriterija sigurnosti ($n - 1$). Određivanje prvog voda za spajanje na sučelju bilo je zahtjevno jer je trebalo uzeti u obzir Ferrantijev učinak (zbog porasta kapacitivne komponente struje na kraju voda dolazi do porasta napona u praznom hodu te u trenutku uključenja može doći do znatne razlike napona na sučelju; zbog toga se petlja zatvara na nižoj strani napona sučelja).

Procjene i izračuni tzv. neželjenih tokova snaga kroz vodove koji bi mogli nastati u procesu spajanja prve i druge sinkrone zone, kao i tokovi unutar bližih mreža, postavili su zahtjev da razmjena bude 0 MW. U pripremi projekta cijela



Sl. 6.: Članovi izvršnog tima za provođenje projekta Rekonekcija u NDC-u HEP – OPS-a, slijeva na desno: Leo Prelec, Walter Satinger, Šime Radić, Ante Barić, Marinko Rogić, Milan Jevšenak, Ivica Toljan, Damjan Međimorec, Silvio Brkić, Davorin Kučić, Igor Ivanković

je visokonaponska mreža UCTE-a (uključujući mreže zapadne Ukrajine i Albanije), modelirana za očekivano opterećenje i proizvodnju. Prvi plan projekta spajanja bio je svibanj 2004., no zbog kašnjenja u pripremi i izgradnji infrastrukture (TS-a i DV-a), spajanje je odgođeno za jesen te godine. Stoga su se i svi proračuni trebali preračunati na navedeno vrijeme.

Temeljna činjenica spajanja, koja se odnosila na hrvatski ees, bila je da sustav koji je bio na granici prve sinkrone zone UCTE-a nakon 13 godina dolazi praktički u središnji položaj. Zbog toga dolazi do izmjene konfiguracije unutarnje, a posebice vanjske mreže. Daljnje procjene pokazivale su da će zbog intenziviranja tržišnih transakcija biti vrlo teško predvidjeti tokove snaga, a time i opterećenost mreže. Prilikom povezivanja treba već u tom trenutku voditi brigu o tome da će se javiti potreba za učinkovitim tehničkim i organizacijskim rješenjima za zaštitu hrvatskog ees-a od poremećaja iz susjednih i drugih ees-ova (ugradnja kvalitetne zaštite, WAMS (*Wide Area Monitoring System*) opreme, nova ICT oprema).

Temeljni preduvjet Rekonekcije bio je da se tog dana, tzv. dana D, razmjena energije 'svede' na nulu. Organizacija i hijerarhija regulacije bila je postavljena na način da regulacija ne utječe na izvršenje projekta.

Glavni koordinatori:		CROATIA Mr. Ivica Toljan
		SLOVENIA Mr. Milan Jevšenak
Direktno uključeni TSOI:		HUNGARY Mr. Zerenyi József
		ROMANIA Mr. Marian Cernat
		UKRAINE Mr. Ljubomyr Karach
		SERBIA Mr. Dragan Vignjević
		MONTENEGRO Mr. Zoran Đukanović
		BOSNIA AND HERZEGOVINA Mr. Zalm Karamehmedović
Predstavnik ETRANS-a:		SWITZERLAND Mr. Walter Sattinger
Indirektno uključeni (promjena moda sek.regulacije):		GREECE Mr. Aris Tassoulis
		BULGARIA Mr. Todor Milanov
		EKC Mr. Milovan Novičević

Sl. 7.: Popis službenih predstavnika u projektu Rekonekcija

1.3. Stabilnost ees-a

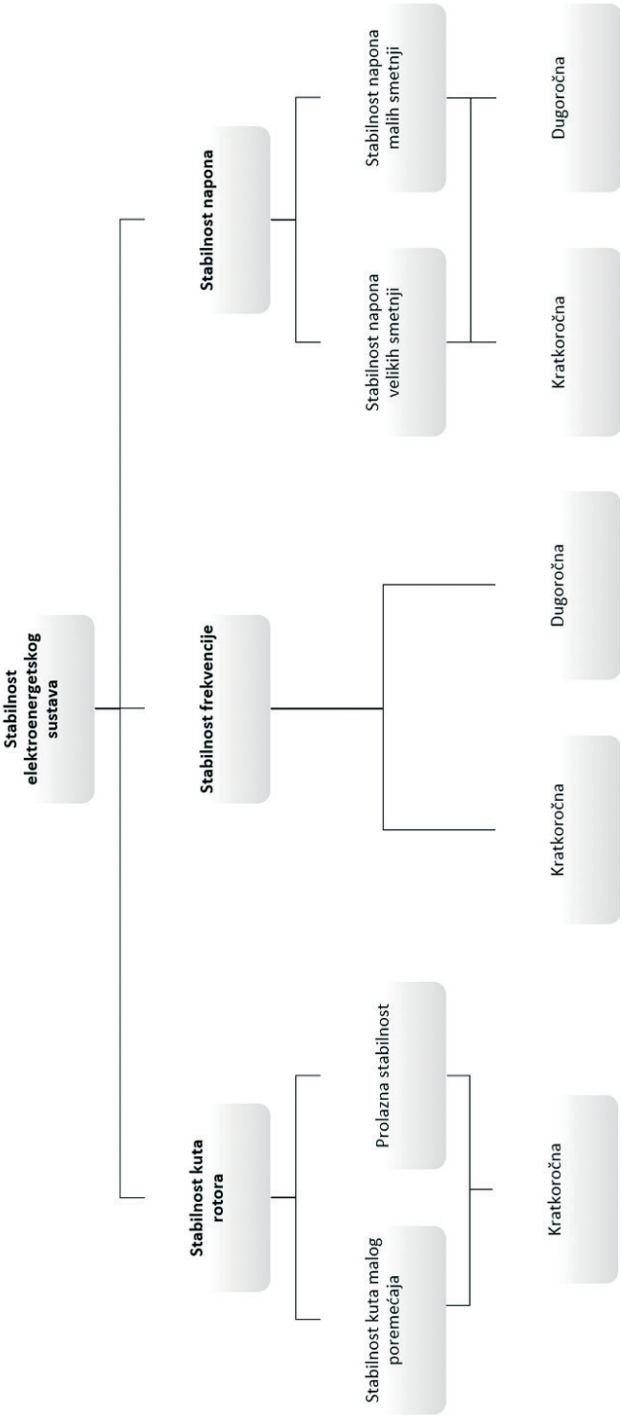
Definicija stabilnosti [4], [5], [6], [7] i [16] i rad ees-a različito se tretiraju u literaturi, posebice razlika između statičkih i dinamičkih pojava. Više se puta te granice isprepliću i u većini literature, kao i u UCTE *Priručniku za vođenje sustava* [3]. U tom priručniku stabilnost je definirana i razgraničena na sljedeći način:

- Statička stabilnost – označava stabilnost s obzirom na male i postupne promjene opterećenja, sustav zadržava stabilnost s klasičnom uzбудom i regulacijom, glede sinkronih generatora u elektranama.
- Dinamička stabilnost – označava stabilnost s obzirom na relativno male i iznenadne promjene opterećenja; sustav se s tog gledišta može opisati linearnim diferencijalnim jednadžbama i stabilizirati korištenjem tzv. linearnog i kontinuiranog dodatnog nadzora stabilnosti. Tipičan su primjer niskofrekvencijske oscilacije u slučaju većih ees-a, i torzijske oscilacije turboagregata u slučaju podsinkrone rezonancije prijenosnih vodova s kapacitivnom kompenzacijom.
- Tranzijentna (prijelazna) stabilnost – odnosi se na stabilnost ees-a za iznenadne i opasne poremećaje, koji prelaze mogućnosti linearnih i kontinuiranih dopunskih regulatora stabilnosti. Sustav može “izgubiti” stabilnost pri prvom njihanju, posebice ako nije primijenjena uspješna zaštita. Za analizu prijelazne stabilnosti i određivanje regulacije, sustav se treba opisati nelinearnim diferencijalnim jednadžbama.
- Nelinearna stabilnost – je matematički pojam koji se odnosi na, općenitu, vrstu problema stabilnosti koja se pojavljuje u tehnici, a nije usko vezan na ees. Tu se sustav treba opisati nelinearnim jednadžbama, ali ne nužno nelinearnim diferencijalnim jednadžbama. Često upotrebljavani primjeri za istraživanja nelinearne stabilnosti su analiza statičke stabilnosti upotrebom kriterija jednakih površina i analiza prijelazne stabilnosti pomoću Ljapunove direktne metode.

Stabilnost ees-a je sposobnost sustava da se uz dano stanje pri početku rada, vrati u normalno stanje uravnoteženosti, nakon što se dogodio poremećaj. Stabilnost je stanje uravnoteženosti između suprotstavljenih snaga; nestabilnost se javlja u slučaju kad poremećaj dovodi do stalne neravnoteže među suprotstavljenim stranama. Elektroenergetski sustav izrazito je nelinearan sustav, koji djeluje u stalno promjenjivoj okolini; opterećenja, isključenja generatora, topologija, a ključni se operativni parametri kontinuirano mijenjaju. Pri izloženosti prolaznom poremećaju, stabilnost sustava ovisi o prirodi poremećaja kao i stanju prije poremećaja.

1.3.1. Statička analiza

Analiza tranzita, tokova snaga, kratkih spojeva i N-1 provedena je u studiji DVG-a, no već je spomenuto da je projekt izrađen bez čvorne točke TS Ernestinovo te su rezultati bili samo djelomično primjenjivi. Radi toga provedene su analize s domaćim ekspertima [13], [15], [17], koji su uspjeli analitički predočiti ključne analize, koje su pokazale da je moguće provesti rekonekciju. Programi koji su se koristili bili su programi Instituta za elektroprivredu (IE), program DAM s FER-a, program PTI/PSS Energetskog instituta *Hrvoje Požar*



Sl. 8.: Temeljni elementi stabilnosti ees-a

(EIHP). Razvijeno je nekoliko modela ovisno o očekivanoj konfiguraciji mreže, hidrološkim uvjetima, mogućem danu realizacije projekta.

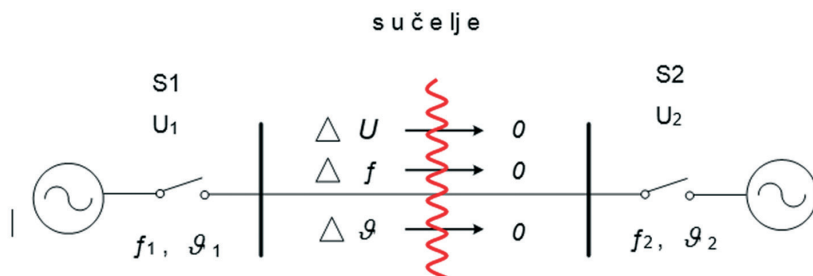
Bilo je iznimno teško odlučiti se koji je model prihvatljiv jer je rizik bio velik. Iskustveni podaci kao i mišljenja većine eksperata ukazivali su da se treba usredotočiti na realizaciju tokova snaga, pod velikim uvjetom da se tijekom dana “zaustavi” trgovina, odnosno razmjena električne energije između OPS-ova (operateri prijenosnog sustava) u rekonekciji.

1.3.2. Dinamička analiza

Dinamičko vladanje, slika 8., analiza kuta, naponske stabilnosti, oscilacija frekvencije i promjena tokova snaga u kratkom vremenu analitički su promatrani s pomoću nekoliko softverskih programa u samoj pripremi rekonekcije, ali najvećim dijelom kroz DVG studiju. Tijekom rekonekcije dinamičko vladanje praćeno je promatranjem odziva navedenih veličina najnovijom WAMS opremom u nekoliko čvornih točaka u Švicarskoj, Hrvatskoj i Grčkoj. Značajnu je pomoć pružio švicarski operater ETRANS. Uočena su međupodručna elektromehanička njihanja kao i oscilacije frekvencije. Sustav se ipak u roku od nekoliko minuta uspio održati i daljnjim spajanjem na nižim naponskim razinama 220 kV i 110 kV konačno postigao područje stabilnosti.

2. Usklađivanje redoslijeda faza

U tijeku spajanja dvaju ili više sustava, slika 9., osnovna dinamička svojstva: frekvencija, napon i kut rotora kalkiliraju se tako da na sučelju njihova razlika teži nuli. Kako je teško postići navedeno idealno stanje, veličine razlika izračunavaju ovisno o slučaju do slučaja, pa je tako učinjeno i za slučaj spajanja paneuropskog dijela prve i druge sinkrone zone.



Sl. 9.: Strukturalna predodžba na sučelju dvaju ees-a različitih dinamičkih svojstava

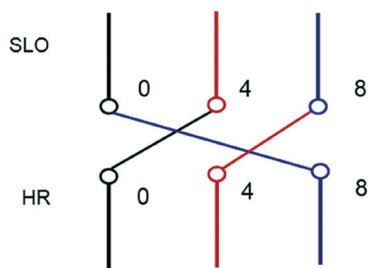
U proteklih dvadeset godina istraživanja su bila usmjerena na prikupljanje podloga i rješenja za projekt spajanja dviju paneuropskih sinkronih zona [8], [10], [14]. Prvo je spajanje članica CENTREL-a na UCTE, drugo je spajanje ees-a Bugarske i Rumunjske na blok CENTREL/UCTE, treće je spajanje prve i druge paneuropske sinkrone zone. Istraživanja koja su provedena s potporom programa Europske unije za velike europske prijenosne mreže (*Trans-European Networks* – TEN), osigurala su kvalitetne pretpostavke za provedbu.

Glavni naglasci u studijama bili su stavljeni na istraživanje stabilnosti zbog malih poremećaja (međupodručne oscilacije) kao bitnog stajališta razvoja ees-a. Temeljem istraživanja postignuta su saznanja o zaključcima i preporukama koji su se koristili za analize dinamičkih karakteristika tijekom spajanja velikih sustava. Ispitivanje održavanja sigurnosti uz minimalno potrebni broj vodova u sučelju je temeljna funkcija cilja. Uz dana ograničenja (naponi, frekvencija, tokovi snaga, sigurnost), traženje optimuma funkcije rješava se, prije svega, linearnim programiranjem.

Bitnu ulogu pri izvedbi projekata imale su električne zaštite i prekidači. U samoj pripremi projekta spajanja od bitne važnosti bila je infrastrukturna priprema; obnova TS 400/110 kV Ernestinovo, izgradnja nove 400/220/110 kV TS Žerjavinec, obnova DV 400 kV TS Ernestinovo – TS Tumbri, obnova svih ostalih 220 kV i 110 kV vodova, obnova 400/110 kV Mostar 4 i obnova 400 kV, 220 kV, 110 kV vodova BiH.

Prve su analize pokazivale da je provedivo idejno rješenje koje je za analizu uzelo podatke za tokove djelatne i jalove snage, u predvidivo, jesen 2004. godine. Nadalje, provjeravalo se kod svih OPS-a je li navedeni model dovoljno “dubok” i točan za daljnje proračune. Analize su izrađene posebno za zemlje koje su bile na sučelju spajanja, slika 11.

Tijekom istraživanja stanja mreže i priprema za spajanje prve i druge sinkrone zone došlo je do “otkrića” unutar postojeće topologije, slike 10. i 12., tj. problema u hrvatskoj prijenosnoj mreži koji nije bio razmatran i analiziran, a onemogućivao je izvedbu projekta spajanja. Problem je nastao 1943. godine prilikom izgradnje i puštanje u pogon DV 110 kV Samobor – Brestanica, gdje se u tijeku spajanja nije vodilo računa o točnom spajanju faze na fazu, nego je

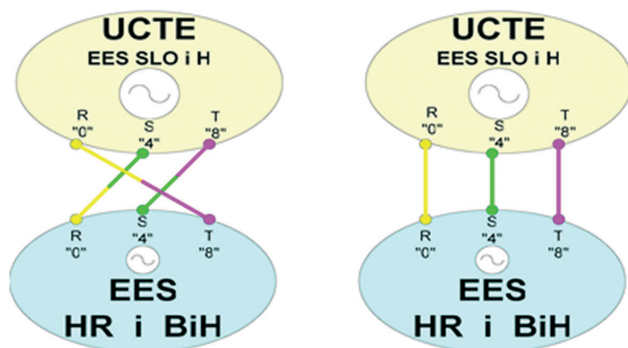


Sl. 10.: Principno predodžanje bivšeg stanja rasporeda faza na sučelju HR-SLO i HR-H ees-a



Sl. 11.: Predočenje spoja hrvatskog ees-a s okruženjem (raspored faza) (izvor: HEP – OPS)

došlo do zamjene položaja faza ili prepleta, slika 11. Zbog toga se daljnjim razvojem mreže i spajanjem problem povećavao, slika 12., a nije rješavao. Do negativnih posljedica nije došlo jer je ees Jugoslavije bio odvojen od istočnoeuropskih. Prilikom razdvajanja i oblikovanja druge zone fazno spajanje u drugoj sinkronoj zoni pravilno je izvedeno i nije bilo negativnih posljedica. No, u



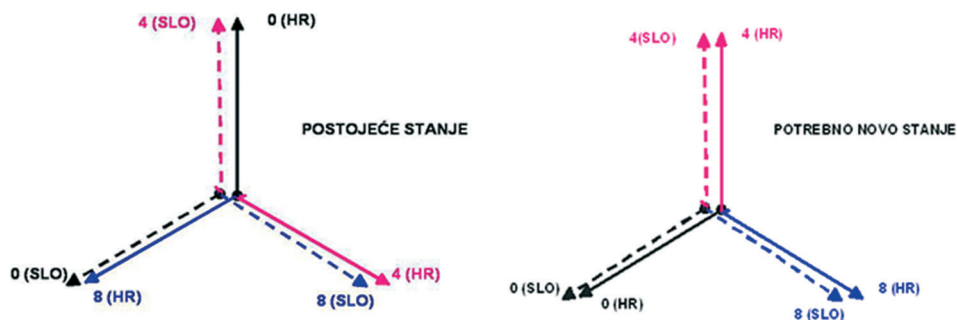
Sl. 12.: Sučelje ees-a Hrvatske i UCTE-a (ees-a SLO i H) prije (lijevo) i poslije (desno) usklađivanja redoslijeda faza

slučaju planiranog spajanja prve i druge sinkrone zone s postojećom topologijom došlo bi do nesagledivih posljedica za cijeli europski ees.

Stoga je ET (slika 2.) odlučio da se ees RH i BiH fizički odspoji od prve sinkrone zone i stavi u ‘otočni rad’ (samostalni rad ees-a, bez galvanskog spoja s ostalima), provede poravnanje faza, ponovno spoji pravilno (“fazu na fazu”) i na taj način pripremi za projekt spajanja. Projekt je izveden (25. 9. 2004.), a zbog složenosti i velikog rizika od raspada pripreman je uz veliki broj proračuna i analiza i potrebni oprez.

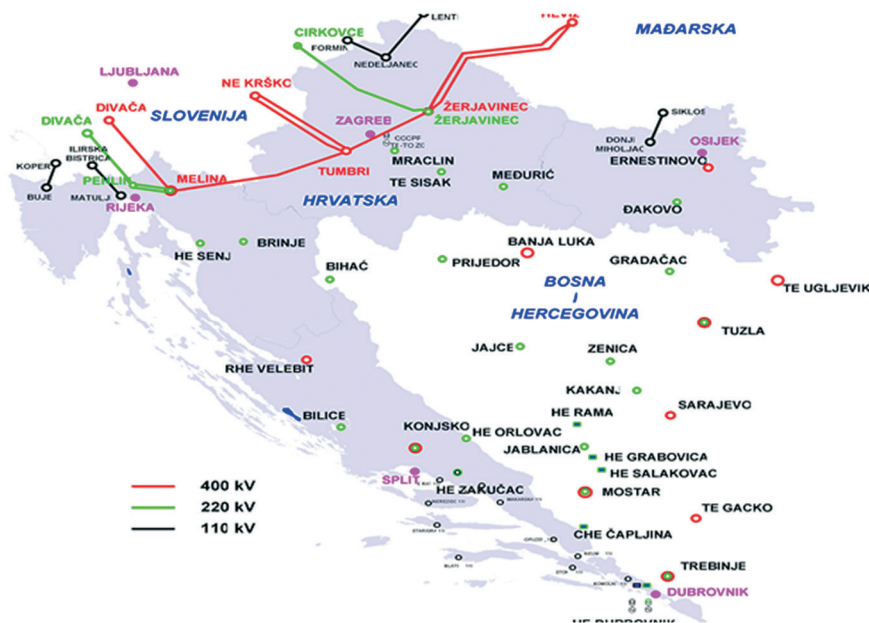
Riječ je bila o sučelju ees-a koji obuhvaćaju sve spojne vodove, slika 11., između hrvatskog te slovenskog i mađarskog ees-a. Na 400 kV strani to su bili DV 400 kV Melina – Divača, DV 400 kV Tumbri – Krško, Žerjavinec – Héviz. Na 220 kV strani DV 220 kV Pehlin – Divača i Žerjavinec – Cirkovce. Na 110 kV strani DV 110 kV Buje – Koper, Matulji – Ilirska Bistrica, Nedeljanec – Formin.

Planirani radovi odvijali su se na dalekovodima, mjernoj opremi, relejnoj zaštiti i sustavima telekomunikacija. Prema slikama 12. – 15. trebalo je uskladiti redoslijed faza na tom sučelju, a to znači provesti odgovarajuću zamjenu položaja faznih vodiča (preplet) na najpovoljnijim mjestima svakog spojnog voda između hrvatskog, slovenskog i mađarskog ees-a. Spojni su vodovi, slika 11., prema odgovarajućem scenariju isključivani da bi se na istima obavio ‘preplet’.

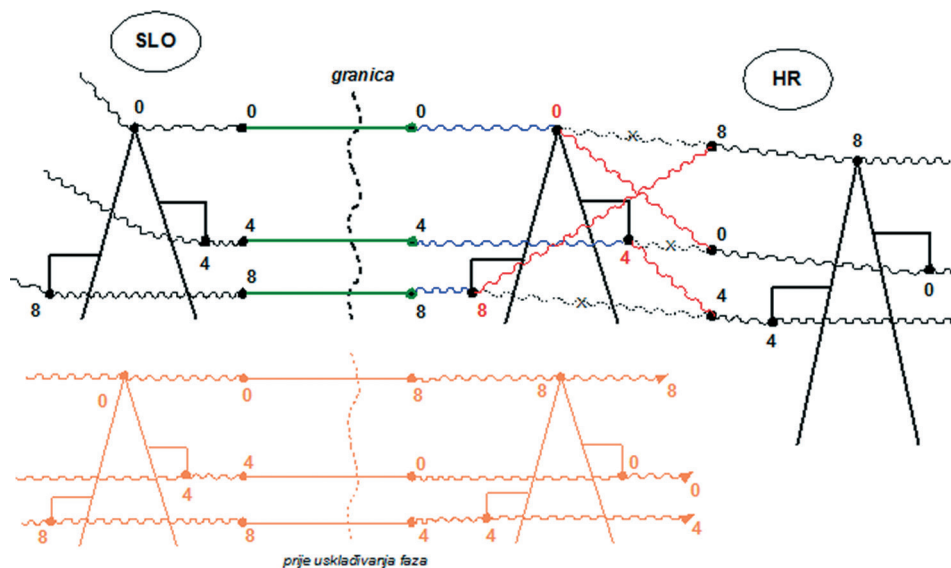


Sl. 13.: Fazorsko predočenje prethodnog stanja i potrebnog novog stanja

Sučelje (engl. *interface*) je fizičko mjesto spoja dvaju ees-a preko spojnih vodova koji se nazivaju interkonektori. Na slici 14. može se uočiti da je od svih susjednih zemalja problem egzistirao između Hrvatske i Slovenije i Mađarske s jedne strane, a u jednakom spoju usklađenosti faza bio je sustav Hrvatske i BiH. Zbog takvog tehničkog stanja ta dva su sustava bila razmatrana kao jedan blok, odnosno promjenu redoslijeda faza trebalo učiniti samo na sučelju Hrvatske i Slovenije i Mađarske, a ne između Hrvatske i BiH. Na tom principu učinjeni su i proračuni za izvedbu projekta specifičnog i jedinstvenog u poznatoj energetskej literaturi.



Sl. 14.: Spojni vodovi na sučelju ees-a Hrvatske i UCTE-a na kojima je proveden 'preplet' – usklađivanje redosljeda faza



Sl. 15.: Predodžba izvedbe usklađivanja faza između Hrvatske i Slovenije



Sl. 16.: Stup na DV 400 kV Žerjavinec (HR) – Héviz (HU) u blizini državne granice nakon harmoniziranja redoslijeda faza

U jednom trenutku usklađivanja redoslijeda faza bilo je nužno da se hrvatski ees, a s njim zajedno i sustav BiH u cijelosti odvoji od UCTE-a, te da isti prijeđu u otočni pogon.

Iz sigurnosnih razloga otočni rad trebao je biti u što kraćem vremenu. U tu je svrhu na trima spojnim vodovima koji su bili izvan pogona (DV 400 kV TS Tumbri – NE Krško 1 i 2 i DV 220 kV TS Žerjavinec – Cirkovce) unaprijed izvršen preplet i usklađen redoslijed faza. Prema temeljnom scenariju izvođenja aktivnosti, u TS Tumbri sve je bilo pripremljeno da se resinkronizacija sustava Hrvatske i BiH s UCTE-om realizira sinkroček-relejom³ na DV 400 kV TS Tumbri – Krško 1 u što kraćem vremenu, i da se potom uključe DV 400 kV TS Tumbri – Krško 2 i DV 220 kV TS Žerjavinec – Cirkovce.

Izvedba usklađivanja redoslijeda faza bila je zahtjevna, slike 15. i 16. Tražila je znatnu količinu izvorne i adekvatne opreme te obučenost izvođača na projektu koji se realizira samo jednom – nedostajala je rutina. Sve to ometalo je brzinu realizacije. Na dalekovodima izvedba je bila brže napravljena nego

³ **sinkroček-relej**, uređaj za provjeru razlike napona, frekvencija i kutova na mjestu spajanja proizvodne jedinice na elektroenergetski sustav, spajanja dvaju dijelova elektroenergetskog sustava koji nisu sinkroni, uspostave veze između dviju točaka jednog elektroenergetskog sustava i elektroenergetskih sustava u interkonekciji, obično se pridodaje uređaju za sinkronizaciju

sigurnosna provjera usklađenosti elektronske opreme (prijenos signala, releji, telekomunikacijska usklađenost). Značajan faktor bili su i vremenski uvjeti, koji su na taj dan bili ekstremno nepovoljni (kiša i vjetar).

3. Otočni rad hrvatskog i BiH ees-a

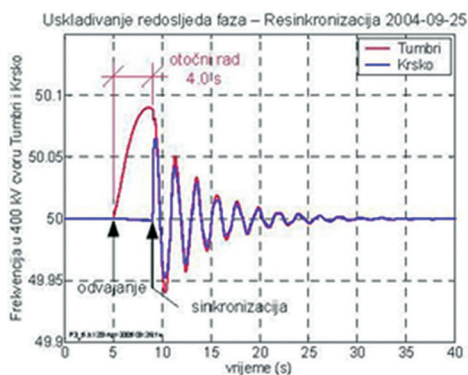
Parametriranje sinkroček-releja, $\Delta f = 100$ mHz, $\Delta \delta = 10^\circ$ el., $\Delta U = 40$ kV, načinjeno je na temelju pogonskih iskustava i rezultata predikcijskih proračuna dinamičkog vladanja hrvatskog ees-a za scenarij isključenja DV 400 kV Žerjavinec – Héviz 2 (potpuno odvajanje ees-a Hrvatske i BiH od UCTE-a i prelazak u otočni rad), otočnog rada i ponovne sinkronizacije na UCTE preko DV 400 kV Tumbri – Krško 1. Simulacijski proračuni rađeni su na prediktiranom polaznom stacionarnom stanju.

Navedeno polazno stacionarno stanje bilo je postavljeno temeljem osnovnog scenarija za pripremu i izvođenje aktivnosti usklađivanja redoslijeda faza. Polazno stacionarno stanje podešeno je tako da u trenutku odvajanja od UCTE-a sustav Hrvatske i BiH bude veći s malim iznosom djelatne snage od približno 50 MW, da budu u obama sustavima agregati sposobni za rad u modu primarne regulacije frekvencije, da budu u tom modu rada, i da rezerva primarne regulacijske snage bude oko 250 MW. Konačno, da funkciju sekundarne regulacije frekvencije i snage razmjene obavlja hrvatski ees, i to u modu regulacije sustava postavljenu na 400 MW/Hz.

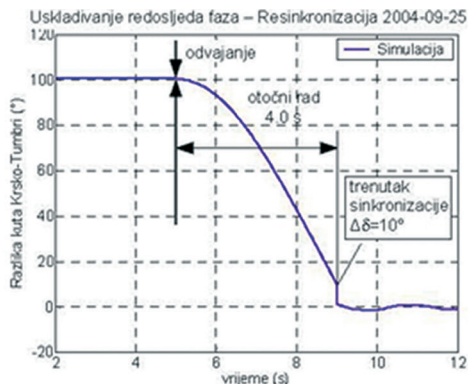
Scenarij odvajanja od UCTE-a, otočnog rada ees-a Hrvatske i BiH i ponovne sinkronizacije predviđao je da se početno fazno 'kašnjenje' fazora napona u 400 kV čvoru Tumbri za fazorom napona u 400 kV čvoru Krško iznosi približno 100° el. s povećavanjem frekvencije ees-a Hrvatske i BiH nakon odvajanja od UCTE-a. Zbog toga je planirano da višak proizvodnje u obama sustavima u trenutku odvajanja bude približno 50 MW te da se spajanje obavi čim budu zadovoljeni uvjeti za sinkronizaciju postavljeni na sinkroček-releju u TS Tumbri.

Rezultati predikcijskih simulacijskih proračuna [13], [15], [17], [19], [20] za scenarij cjelovitog odvajanja i ponovne sinkronizacije sustava Hrvatske i BiH na UCTE bili su detaljno analizirani. Rezultati su bili pozitivni glede uspješnosti realizacije navedenog scenarija i sigurnosti sustava prema kriteriju kutne stabilnosti.

Odziv frekvencije u 400 kV čvoru Tumbri – Krško prilikom odvajanja i ponovne sinkronizacije, slika 17., pokazuje da u razdoblju otočnog rada ($t = 4,0$ s) frekvencija od nazivne u trenutku odvajanja ($f = 50,00$ Hz) raste najviše do $f = 50,08$ Hz, te da u trenutku sinkronizacije bloka Hrvatske i BiH dolazi do propadanja u sljedećoj sekundi najmanje do $f = 49,96$ Hz. Stacionarno stanje nastaje nakon 10 s, što se može smatrati pozitivnim odzivom sustava, posebice utjecaja prouzročenih oscilacijama koherentne grupe područja u sučelju.



Sl. 17.: TS Tumbri – odziv frekvencije
(izvor: IE, Institut za elektroprivredu)

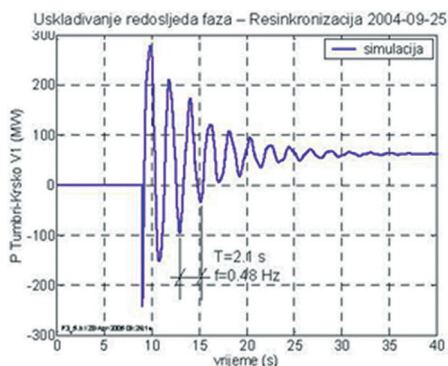


Sl. 18.: Čvor TS Tumbri, NEK⁴ odziv razlike kutova (izvor: IE)

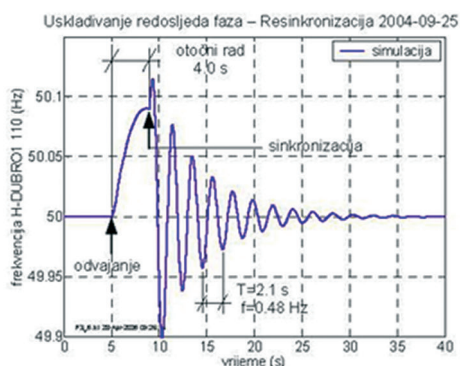
Odziv razlike kutova fazora napona u 400 kV čvoru Tumbri i NE Krško prilikom odvajanja i ponovne sinkronizacije ees-a Hrvatske i BiH na UCTE, slika 18., pokazuje da je od početnih 100° el. u trenutku odvajanja, koliko je iznosila razlika kroz 4 s otočnog rada, došlo do smanjenja razlike vrlo brzo i na taj je način bio ispunjen uvjet za sinkronizaciju $\Delta\delta = 10^\circ$ el.

Odziv djelatne snage na DV 400 kV Tumbri – Krško prilikom odvajanja i ponovne sinkronizacije ees-a Hrvatske i BiH na UCTE, slika 19., pokazuje da je snaga “zaplesala” od ekstremno +250 MW do -150 MW, da bi u relativno kratkom vremenu od 15 s “ostala” na +75 MW.

U konačnici, mjereno je i odziv frekvencije na 110 kV strani blok-transformatora agregata AG1 u HE Dubrovnik pri odvajanju i ponovne sinkronizacije



Sl. 19.: DV 400 kV Tumbri, NEK, odziv djelatne snage (izvor: IE)



Sl. 20.: HE Dubrovnik, odziv frekvencije na 110 kV strani (izvor: IE)

⁴NEK, Nuklearna elektrana Krško

ees-a Hrvatske i BiH na UCTE, slika 20., na jugu hrvatskog ees-a, gdje se može uočiti također brzi odziv ees-a, postizanje stabilnosti i relativno slabe inherentne titraje homogene grupe južnog dijela sustava.

Tijekom završnih aktivnosti usklađivanja redoslijeda faza na sučelju hrvatskog ees-a i UCTE-a obavljalo se mjerenje i zapis dinamičkog ponašanja karakterističnih veličina stanja (djelatne snage, napona, frekvencija) u odabranim točkama / postrojenjima hrvatskog sustava. Projekt je bio jedinstven i praktički neponovljiv i jedinstvena prilika da se snime dinamičke značajke odabranih veličina stanja u slučaju specifičnih tehničkih događanja i njima izazvanih prijelaznih pojava, te osiguraju zapisi za analize i uvid u stvarna dinamička svojstva sustava Hrvatske i BiH u posebnim, tzv. partikularnim pogonskim uvjetima. Zapisi su od velike vrijednosti za proučavanje dinamičkih modela koji se koriste pri simulacijskim istraživanjima i korisno su iskustvo za specijaliste koji se bave analizama pojava u elektroenergetskim postrojenjima i sustavima.

Promjene uklopnog stanja na sučelju ees-a Hrvatske i UCTE-a pratile su prijelazne pojave s elektromehaničkim oscilacijama sustava Hrvatske i BiH prema UCTE-u. "Slabljenje" veze između sustava Hrvatske i BiH i UCTE-a u procesu njihova odvajanja prouzročilo je smanjenje frekvencije međupodručnih elektromehaničkih oscilacija ees-a Hrvatske i BiH prema UCTE-u. Prilikom spajanja stanje je bilo obratno i frekvencija međupodručnih oscilacija je rasla. Frekvencija elektromehaničkih oscilacija kretala se u području od 0,5 Hz do 0,8 Hz.

Posebice zanimljiva i informativna bila su elektromehanička gibanja sustava Hrvatske i BiH pri odvajanju od UCTE-a, tijekom otočnog rada i ponovne sinkronizacije na UCTE te pri isključenju i uključenju spojnih vodova (DV 220 kV Pehlin – Divača, DV 400 kV Melina – Divača i DV 400 kV Žerjavinec – Héviz, slike 21. i 22., koji su sastavni dio koridora za tok snage iz sjeveroistočnog dijela UCTE-a u njegov jugozapadni dio, odnosno sjeverni dio ees-a Italije.

Dinamički model sustava na kojem su izvođena predikcijska simulacijska istraživanja dinamičkog vladanja ees-a Hrvatske i BiH kod potpunog odvajanja i ponovne sinkronizacije sustava Hrvatske i BiH na UCTE iskorišten je za simulaciju realnih pogonskih događaja tijekom spajanja i s njima izazvanih prijelaznih pojava.

Sigurnost ees-a Hrvatske i BiH prema kriteriju kutne stabilnosti nije ni jednog trenutka bila upitna tijekom realizacije projekta usklađivanja redoslijeda faza na sučelju ees-a Hrvatske i UCTE-a zahvaljujući ciljano postavljenom pogonskom stanju obaju sustava i gotovo punoj raspoloživosti unutarnje prijenosne mreže. Identificirana su dva moda međupodručnih elektromehaničkih oscilacija, i to dominantni mod oscilacija svojstven sustavu Hrvatske i BiH i mod međupodručnih oscilacija, koji najvjerojatnije pripada koherentnoj grupi sustava u sjeveroistočnom dijelu UCTE-a. U nekom manje povoljnom pogonskom stanju i u smanjenoj raspoloživosti unutarnje prijenosne mreže mogao bi biti izražen problem međupodručnih oscilacija svojstvenih ees-u Hrvatske i BiH.

Bitno je da svi stabilizatori ees-a u okviru sustava uzbude sinkronih generatora u ees-u Hrvatske i BiH trebaju biti sposobni i podešeni za učinkovito prigušenje elektromehaničkih oscilacija s frekvencijom u području od 0,1 Hz do 0,8 Hz.

Teorijska razmatranja, matematičke i računalne analize, kao i ukupno iskustvo realizacije projekta poslužili su kao temeljne podloge za izvedbu projekta spajanja dviju europskih zona UCTE-a različitih sinkronih svojstava.

S gledišta dinamičkog ponašanja hrvatskog sustava tijekom planiranih aktivnosti prilikom usklađivanja redoslijeda faza na sučelju ees-a Hrvatske i UCTE-a bilo je zanimljivo snimati veličine koje oslikavaju dinamičko ponašanje sustava u domeni elektromehaničkih prijelaznih pojava (njihanja), dakle u području frekvencija od 0,1 Hz do 2,0 Hz. Time su ujedno određeni i temeljni zahtjevi na svojstva mjerno-registracijske opreme. Nadalje, prijelazne pojave trebalo je snimati istodobno na više mjesta širom sustava, a zapisi s različitih lokacija morali su biti međusobno striktno vremenski usklađeni.

U hrvatskom sustavu tad nije postojao sustav sinkroniziranog i koordiniranog mjerenja putem trajno instalirane mjerno-registracijske opreme u ključnim objektima (*Wide Area Measurement System* – WAMS), niti je hrvatski ees bio uključen u UCTE – WAMS. Stoga je za potrebe mjerenja i registriranja prijelaznih pojava prouzročenih događajima tijekom usklađivanja redoslijeda faza angažirano više mjernih ekipa raspoređenih u postrojenja: TS Tumbri, TS Melina, TS Konjsko, HE Dubrovnik i TE-TO Zagreb.

Lokacije mjernih ekipa (TP-1 do TP-5) odabrane su tako da se raspoloživim brojem ekipa i mjerno-registracijskom opremom u što većoj mjeri pokrije i što bolje reprezentira dinamika cijelog sustava. Mjerni signali uzimani su iz postojećih mjernih pretvornika ugrađenih u objektima. U skladu s tim odabrane su i mjerne veličine koje u najvećoj mjeri oslikavaju pojave od interesa (djelatna snaga na vodovima, frekvencija). Iznimke su mjerenja u HE Dubrovnik (TP-5) i CCCPP TE-TO Zagreb (TP-2), gdje su iskorišteni postojeći višekanalni mjerno-registracijski sustavi CoDIS (VESKI, Zagreb) s pomoću kojih je realiziran zapis trenutačnih vrijednosti napona i struja s frekvencijom uzorkovanja od 2 kHz, a koji su bili posebno parametrirani za potrebe tih mjerenja tako da se osigura dovoljno trajanje zapisa. Snimanje na ostalim mjernim mjestima obavljeno je višekanalnim digitalnim mjerno-registracijskim uređajima odgovarajućih svojstava (trajanje zapisa 500 s, vrijeme uzorkovanja od 1 ms do 5 ms).

Mjerenja su koordinirana putem telefonskih veza sa središnjeg koordinacijskog mjesta CP u NDC⁵ Zagreb. U vremenu raspoloživom za pripremu nije bilo moguće realizirati sustav automatske sinkronizacije i startanja mjerno-registracijske opreme. Umjesto toga, kod svakog je zapisa dinamike sustava nalog

⁵NDC, Nacionalni dispečerski centar

za početak registracije izdavan iz središnjeg koordinacijskog mjesta, istodobno svim mjernim ekipama (TP-1 do TP-5). Interno vrijeme svakog mjernog uređaja prethodno je bilo podešeno prema signalu točnog vremena (prema preciznim daljinski i automatski kontroliranim satovima).

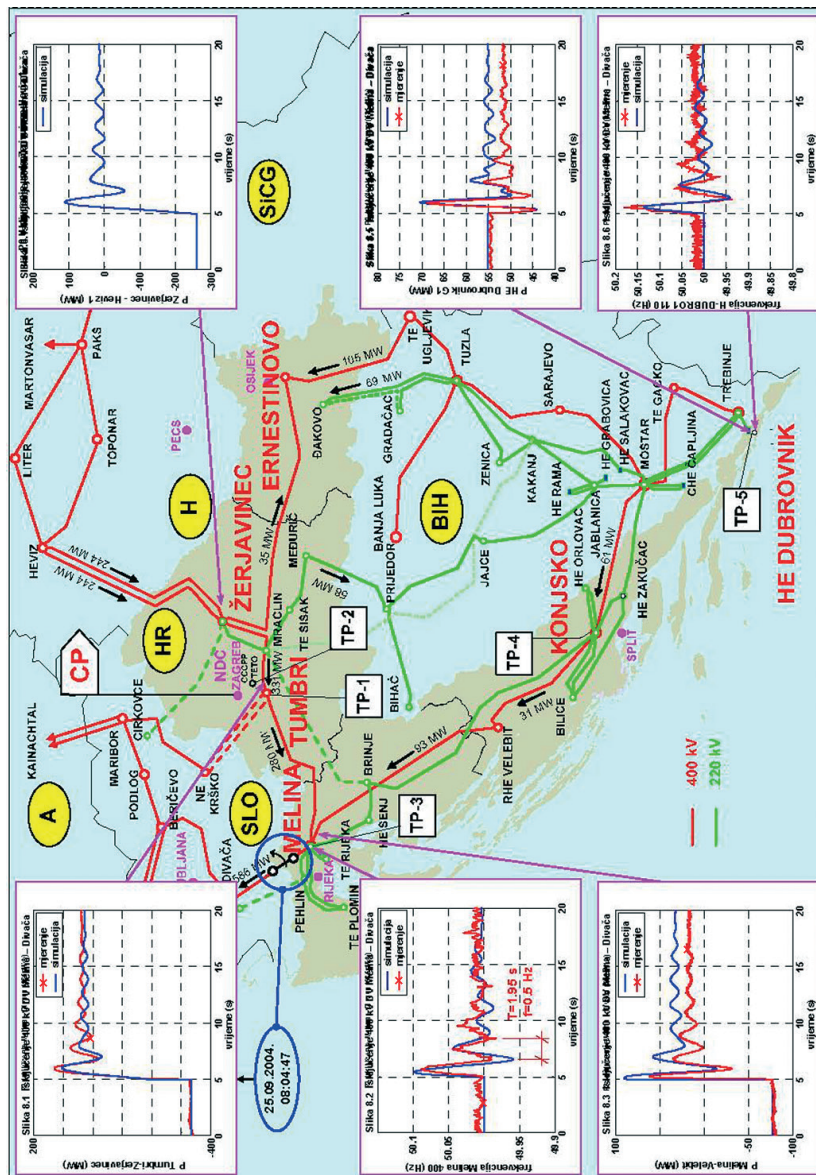
Za svaku promjenu uklopnog stanja 440 kV i 220 kV dalekovoda na sučelju hrvatskog ees-a i UCTE-a preuzet je iz DAM sustava u NDC Zagreb zapis kvazistacionarnog stanja hrvatskog sustava prije i poslije isključenja, odnosno uključenja dalekovoda. Ti su zapisi osim za arhivske svrhe i provjeru dinamičkih zapisa poslužili i za postavljanje polaznih stacionarnih stanja kod simulacijskih proračuna.

Točni podaci o trenucima isključenja i uključenja dalekovoda uzeti su iz KRD zapisa. Mjerenja i simulacijski proračuni odziva karakterističnih veličina stanja u strateškim točkama ees-a Hrvatske tijekom prijelaznih stanja prouzročenih stvarnim događajima kod usklađivanja redoslijeda faza na sučelju ees-a Hrvatske i UCTE-a 25. 9. 2004. izvršeni su za slučajeve isključenja 220 kV DV Pehlin – Divača i 400 kV DV Melina – Divača, za slučaj sekvencije: isključenja 400 kV DV Žerjavinec – Hévíz 2 (potpuno odvajanje ees-a Hrvatske i BiH od UCTE-a), otočnog rada i ponovne sinkronizacije na UCTE preko 400 kV DV Tumbri – Krško 1 te za slučajeve uključenja 400 kV DV Tumbri – Krško 2, 220 kV DV Žerjavinec – Cirkovce, 220 kV DV Pehlin – Divača, Žerjavinec – Hévíz 1 i 2.

Dinamičko ponašanje ees-a Hrvatske ilustrirano je na zemljovidno orijentiranim prikazima konfiguracije 400 kV i 220 kV prijenosne mreže hrvatskog ees-a s podacima tokova djelatnih snaga na značajnijim vodovima neposredno prije nastanka prijelazne pojave (podaci iz DAM sustava) i usporednim prikazima izmjerenih i simulacijskih odziva tijekom prijelaznih pojava u četirima karakterističnim slučajevima: (1) prilikom isključenja 400 kV DV Melina – Divača, (2) prilikom isključenja 400 kV DV Žerjavinec – Hévíz 2 s potpunim odvajanjem ees-a Hrvatske i BiH od UCTE-a, otočnog rada i ponovne sinkronizacije na UCTE preko 400 kV DV Tumbri – Krško 1 te za (3) uključenje 220 kV DV Pehlin – Divača i (4) uključenje 400 kV DV Žerjavinec – Hévíz 1.

3.1. Dinamičko ponašanje hrvatskog ees-a kod isključenja 400 kV DV Melina – Divača

Dinamičko ponašanje ees-a Hrvatske za slučaj isključenja 400 kV DV Melina – Divača 25. 9. 2004. u 08:04:47 ilustrirano je na slici 21. usporednim prikazom izmjerenih (crveno, označen križićem ×) i proračunatih (plavo) odziva karakterističnih veličina stanja u strateškim točkama ees-a Hrvatske te prikazom podataka tokova snage (iz DAM sustava) na značajnijim vodovima neposredno prije isključenja. Konfiguracijski je značajno da je nakon isključenja 400 kV DV



Sl. 21.: Zemljovidno orijentirani prikaz 400 kV i 220 kV prijenosne mreže cesa-a Hrvatske sa značajnijim tokovima djelatnih snaga (podaci iz DAM sustava) neposredno prije isključenja 400 kV DV Melina – Divača 25. 9. 2004. u 08:04:47 i s izmjenim (crveno, označen križićem ×) i simularnim (plavo) odzivima karakterističnih veličina stanja u strateškim točkama cesa-a Hrvatske tijekom prijelazne pojave prouzročene isključenjem tog dalekovoda (izvor: IE)

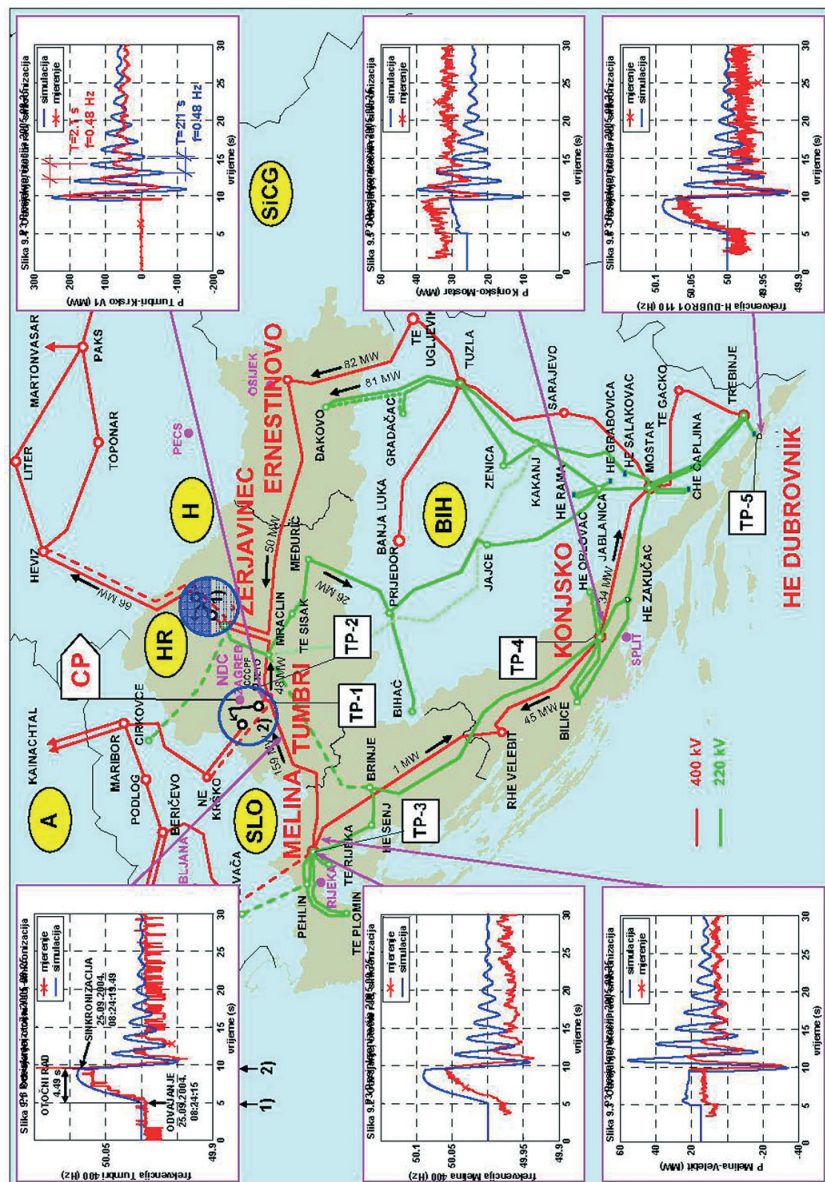
Melina – Divača s tokom djelatne snage od Meline prema Divači od 586 MW, slika 21., prekinut prijenosni koridor od sjeveroistoka ka jugoistoku UCTE-a, odnosno prema sjevernom dijelu ees-a Italije jer su već bili isključeni 400 kV DV Tumbri – Krško 1 i 2 i 220 kV DV Žerjavinec – Cirkovce i Pehlin – Divača. Po isključenju 400 kV DV Melina – Divača sustav Hrvatske i BiH ostao je spojen na UCTE preko 400 kV DV Žerjavinec – Hévíz i na njemu se ustalio tok od oko 40 MW prema Hévízu, što je bilo vrlo blizu planiranom iznosu (oko 50 MW) po osnovnom scenariju događanja.

Sustav Hrvatske i BiH u specifičnoj pogonskoj konfiguraciji prema odzivima karakterističnih varijabli tijekom prijelazne pojave prouzročene isključenjem 400 kV DV Melina – Divača, može se reći koherentno i dobro prigušeno oscilira prema UCTE-u s frekvencijom osnovnog moda osciliranja od 0,51 Hz. Treba istaknuti da je aktualno i ciljano postavljeno pogonsko stanje ees-a Hrvatske i BiH prilikom usklađivanja redoslijeda faza bilo vrlo sigurno s aspekta moguće pojave međupodručnih elektromehaničkih oscilacija i njihova prigušenja. Rezultati mjerenja i simulacijski rezultati zadovoljavajuće se podudaraju, tako da se može zaključiti da je vjerodostojnost dinamičkog modela dobra.

3.2. Dinamičko ponašanje hrvatskog ees-a za scenarij: isključenja 400 kV DV Žerjavinec – Hévíz 2

Odvajanje, otočni rad i ponovna sinkronizacija ees-a Hrvatske i BiH na UCTE bila je središnja i najsloženija faza realizacije projekta usklađivanja redoslijeda faza na sučelju ees-a Hrvatske i UCTE-a. Sve je bilo pripremljeno u skladu s rezultatima predikcijskih simulacijskih proračuna dinamičkog ponašanja hrvatskog ees-a za scenarij: isključenja 400 kV DV Žerjavinec – Hévíz 2 (potpuno odvajanje ees-a Hrvatske i BiH od UCTE-a i prelazak u otočni rad), otočnog rada i ponovne sinkronizacije na UCTE preko 400 kV DV Tumbri – Krško 1, kako je uvodno opisano. Stručni tim u TS Tumbri zadužen za resinkronizaciju preko 400 kV DSV Tumbri – Krško bio je u trajnoj neposrednoj vezi s ekipom i operaterom u komandi TS Žerjavinec tako da je odmah, po primitku informacije da je isključena 400 kV veza između Žerjavina i Hévíza, dao nalog za uključenje 400 kV DV Tumbri – Krško. Kao što je bilo i predviđeno, ponovna sinkronizacija obavljena je u stanju kad su prvi put bili ispunjeni uvjeti za sinkronizaciju postavljeni na sinkroček-releju ($\Delta f = 100$ mHz, $\Delta \delta = 10^\circ$ el. i $\Delta U = 40$ kV). Zahvaljujući tako dobroj pripremi, otočni rad ees-a Hrvatske i BiH trajao je svega 4,49 s.

Dinamičko ponašanje ees-a Hrvatske ilustrirano je izmjerenim (crveno, označeno križićem) i simuliranim (plavo) odzivima karakterističnih veličina stanja u strateškim točkama ees-a Hrvatske prikazanim na slici 22. Polazno stacionarno stanje za simulaciju bilo je podešeno tako da u što većoj mjeri



Sl.: 22. Zemljovidno orijentiran prikaz 400 kV i 220 kV prijenosne mreže ees-a Hrvatske sa značajnijim tokovima djelatnih snaga (podaci iz DAM sustava) neposredno pred odvajanje od UCTE-a, s izmjeranim (crveno, označeno križićem x) i simuliranim (plavo) odzivima karakterističnih veličina stanja u strateškim točkama ees-a Hrvatske tijekom prijelazne pojave izazvane odvajanjem (25. 9. 2005. u 08:24:15) i ponovnom sinkronizacijom (u 08:24:20) ees-a Hrvatske i BiH na UCTE

odgovara podacima stacionarnog stanja neposredno prije isključenja 400 kV DV Žerjavinec – Hévíz 2 uzetim iz DAM sustava. Tok snage na 400 kV DV Žerjavinec – Hévíz neposredno prije isključenja iznosio je 65 MW u smjeru Hévíza.

Frekvencija ees-a Hrvatske i BiH, mjerena u 400 kV čvoru Tumbri, porasla je zbog tog viška proizvodnje i u trenutku sinkronizacije bila veća od polazne za oko 75 mHz prema rezultatima mjerenja (oko 80 mHz prema simuliranim rezultatima).

Sinkronizacija u simulaciji kontrolirana je modelom sinkroček-releja, ali je forsirano obavljena 4,49 s nakon isključenja 400 kV DV Žerjavinec – Hévíz, kao što se i dogodilo u realnim uvjetima. Tijekom prijelazne pojave prouzročene ponovnom sinkronizacijom na UCTE, ees Hrvatske i BiH oscilira prema UCTE-u dobro prigušeno s frekvencijom oscilacije od 0,48 Hz (mjerenje i simulacija) određeno iz odziva djelatne snage na 400 kV DV Tumbri – Krško. Što se tiče samog prigušenja, simulirani odzivi nešto su konzervativniji od izmjerenih. Rezultati mjerenja i simulacije, kako je ilustrirano usporednim prikazima odziva na slikama, dobro se podudaraju. Sigurnost ees-a Hrvatske i BiH po kriteriju kutne stabilnosti bila je vrlo dobra zahvaljujući ciljano postavljenom pogonskom stanju obaju sustava i gotovo punoj raspoloživosti prijenosne mreže.

Zaključak

Nedugo poslije Drugog svjetskog rata, 23. svibnja 1951. godine pod pokroviteljstvom OECD-a (*Organization for European Economic Co-operation*) osnovan je UCPTE. Temeljna uloga bio je doprinos razvoju gospodarskih aktivnosti kroz ekonomično korištenje energetske izvora međusobno spojenih elektroenergetskih sustava. Električno, galvanski, bilo je spojeno osam zapadnoeuropskih zemalja s godišnjom ukupnom potrošnjom od 154 TWh.

Otad do danas navedena dobrovoljna udruga širila se i restrukturirala organizacijski; 2001. godine postaje UCTE, a od 2009. godine ENTSO, sa svim europskim zemljama i godišnjom potrošnjom od 3329 TWh u 2017. godini. Operativno je uspostavljeno zajedničko, otvoreno, konkurentno, jedinstveno tržište električne energije. Time je ENTSO, kao pravni sljednik, napravio najveći doprinos u razvoju zajedničkog europskog duha jedinstvenog gospodarstva na kojem vladaju tržišni zakoni konkurencije. Svaka je članica davala i daje velik doprinos zajedničkom, odgovornom i efikasnom radu.

U svojoj evoluciji do 2004. godine europski ees bio je podijeljen u dvije nepovezane zone. Odlukom Upravnog odbora UCTE-a u Lisabonu 2001. odlučuje se da se zone moraju povezati kroz projekt Rekonekcija i time stvoriti zajednički europski ees. Navedeni projekt bio je povjeren Republici Hrvatskoj

(HEP). Poseban, specifičan i neponovljiv. Takav se projekt u energetskej povi-
jesti realizira prvi put i samo jednom. Golema odgovornost i nepredviđeni rizi-
ci bili su pred europskim, hrvatskim i ostalim znanstvenicima i stručnjacima.

Zagrebačka energetska škola (profesori: Požar, Bosanac, Bego, Udovičić, Granić, Zeljko, Haznadar, Filipović, Hebel, Mikuličić, Krajcar, Tešnjak), teme-
lji se na njemačkoj i francuskoj inženjerskoj praksi. Tijekom više od pedeset
godina educirala je stotine elektroinženjera, koji vrlo uspješno rade širom svi-
jeta. Projektom Rekonekcije njihovi su bivši studenti dobili velik stručni izazov,
koji je 2004. godine proglašen najvećim energetskeim događajem u Europi. Da-
nas se preko interneta proučava i citira diljem svijeta (v. *Resarch Gate*). U
svega tri godine HEP je uspio obnoviti elektroenergetsku mrežu uništenu ratnim
razaranjima, izgraditi dvije nove 400 kV trafostanice, pripremiti obje zone za
spajanje, organizirati realizaciju projekta i uspješno formirati zajednički europ-
ski ees 10. listopada 2004. godine.

U samom procesu priprema za rekonekciju, neočekivano, kad je već bilo
sve pokrenuto, na zadnjem sastanku pred realizaciju (mjesec dana do dana D),
dolazi se do činjenice da se zbog zamijenjenog redoslijeda faza projekt mora ili
obustaviti ili u kratkom roku prilagoditi faze na dalekovodima koji se spajaju.
Odgadanje projekta vjerojatno bi unedogled produljilo njegovu realizaciju. Da
bi se uspješno realizirao, javlja se novi preduvjet, a taj je da se hrvatski i bo-
sansko-hercegovački sustavi zajedno moraju odspojiti galvanski od europskog
ees-a i staviti u ‘otočni rad’. Brzim *ad hoc* analizama 13. rujna 2004. godine u
NDC-u, s obzirom na struku i raspoloživu tehniku, odlučeno je da se to može
realizirati. Nakon stresnih i zahtjevnih konzultacija s ostalim europskeim partne-
rima i odgovornim kolegama za europske ees, odluka je donesena u jednom
danu. Dobivši dozvole iz Bruxellesa (sjedište UCTE-a), 25. rujna 2004. godine,
zahvaljujući djelatnicima HEP-a, IE-a, EIHP-a, FER-a, Dalekovoda, europskeih
operatera, sve je završeno brzo i efikasno (u roku od 12 dana). Ukupno je bilo
angažirano više od 500 ljudi. Time su europske ees-i bili pripremljeni za projekt
Rekonekcija, a Zagrebačka energetska škola ušla je u europsku i svjetsku ener-
getsku povijest.

Nakon projekta rekonekcije promjenom topologije mreže, hrvatske ees od
rubnog je postao središnjei sustav u europskom ees-u. Gubici su smanjeni za
jedan posto, što je godišnje 100 GWh, odnosno više od pet milijuna eura, a
pozitivni efekti optimalne trgovine i sigurnost opskrbe električnom energijom
(otad nije zabilježen raspad ees-a), ukazuju na nemjerljive doprinose tehničkoj,
gospodarskoj i političkoj stabilnosti Europske unije.

Literatura

- [1] Toljan I., Međimurec D., Brkić S.: Projekt: Rekonekcija, dokumentacija Izvršnog tima za rekonekciju, HEP–OPS, Zagreb, 2004.
- [2] Toljan I. *Dinamičke značajke povezivanja elektroenergetskih sustava različitih sinkronih svojstava*, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, FER, Zagreb, Hrvatska, 2010.
- [3] UCTE – *Priručnik za vođenje pogona*, UCTE, Bruxelles, 2004.
- [4] Toljan I.: Definiranje koncepcije i pripremne aktivnosti za izradu GRID CODE hrvatskog elektroenergetskog sustava, 4. simpozij o sustavu vođenja EES-a, 2000.
- [5] Toljan I.: Mrežna pravila elektroenergetskog sistema (GRID CODE), 5. Savjetovanje CIGRÉ, 2001.
- [6] – *Mrežna pravila elektroenergetskog sustava* (prvo izdanje), MINGRIP, NN, Zagreb, 2004.
- [7] – *Memento of power system reliability*, RTE-Francuska 2005. Edition
- [8] Toljan I.: Od razdvajanja do ponovnog povezivanja europskih mreža UCTE-a, Simpozij o sustavu vođenja ees-a, HRO CIGRÉ Cavtat, 7. studenoga 2004.
- [9] – *Stability of the synchronously interconnected operation of the electricity networks of UCTE/CENTREL*, UCTE DVG Study, Bulgaria and Romania, final report, Heidelberg, Deutschland, 2001.
- [10] Toljan I., Banovac E., Tešnjak S.: Development of UCTE and Reconnection of 1st and 2nd Pan-European Synchronous Zones, 4th IASME/WSEAS International Conference on Energy&Enviroment (EE09), Cambridge, UK, February 21–26, 2009.
- [11] Toljan I., Stojasavljević M., Nemec D., Roksandić Ž., Mesić M., Kučić D., Radić Š., Barić A., Rogić M., Grujić V., Plavšić T.: Povezivanje 1. i 2. sinkrone zone UCTE-a; Dinamičko ponašanje hrvatskog elektroenergetskog sustava, 7. savjetovanje CIGRÉ, Cavtat, Hrvatska, 2005.
- [12] Toljan I., Stojasavljević M., Nemec D., Roksandić Ž., Mesić M., Kučić D., Radić Š., Mihalic D., Ivanković I., Grujić V., Plavšić T.: Usklađivanje redoslijeda faza na sučelju hrvatskog EES-a i UCTE-a; Dinamičko ponašanje hrvatskog EES-a kod odvajanja, otočnog rada i rekonekcije sustava Hrvatske i BiH na UCTE, 7. savjetovanje CIGRÉ, Cavtat, Hrvatska, 2005.
- [13] Stojasavljević M., Nemec D., Toljan I.: Monitoring of power system dynamics during reconnection of 1st and 2nd UCTE synchronous zones, International Scientific Conference on Monitoring of Power System Dynamic Performance, Moscow, Russia, 25–27 April 2006.
- [14] Toljan I., Mesić M., Kalea M.: *European Electric Interconnection*, IEEE, Croatian Academy of Engineering, International Scientific and Professional Meeting: *The Life and Work of Nikola Tesla*, Zagreb, Croatia, June 28–29, 2006.
- [15] Stojasavljević M., Nemec D., Roksandić Ž.: *Dinamičko ponašanje EES HR tijekom usklađivanja redoslijeda faza na sučelju EES Hrvatske, Slovenije i Mađarske na dan 25. 09. 2004.*, Institut za elektroprivredu i energetiku, Zagreb, siječanj, 2005.
- [16] Mikuličić, V.: *Pouzdanost ees-a*, FER, Poslijediplomski doktorski studij, Zagreb, Hrvatska, 2006.

- [17] Stojšavljević M., Nemec D., Roksandić Ž., Toljan I., Ivanković I., Radić Š.: Power system dynamics during island in gand reconnection of power system of Croatia and BiH to the UCTE, IASTED International Conference, Power and Energy Systems, Palma de Mallorca, Spain, August 29–31, 2007.
- [18] Toljan I., Hebel Z.: Power flows and transmission losses in the Croatian network after the UCTE reconnection, EUROCON 2005, International Conference on *Computer as a Tool*, IEEE Region 8, 2005., Sava Center, Belgrade, Serbia& Montenegro.
- [19] Tešnjak, S.: *Dinamika elektroenergetskog sistema*, FER, Zagreb 1995.
- [20] Tešnjak, S., *Dinamička i statička stabilnost ees-a*, FER, Poslijediplomski doktorski studij, Zagreb, 2006.

Reconnection project – replacement of phase order and island work of the Croatian and BiH power system – unexpected prerequisites for joining two European power systems

Ivica Toljan

Abstract: Until May 2001 European Association of Public Power Companies worked under the name Union for the Coordination of Production and Transmission (UCPTE). Due to the process of liberalization and preparation for the opening of the electricity market transformation of the organization has occurred. Power generation and transmission activities were separated. In Portugal, Lisbon, May 2001, Croatian Electricity Company becomes one of the founders and a full member of transmission and power management association (UCTE).

At this time, due to inherited historical events, the European power system consisted of two parts, two separated zones; the first and the second European Electricity Zone. At that meeting under the chairmanship of Jürgen Stotz (Chief Executive Officer at Deutsche Verbundgesellschaft, Germany), it was concluded that the highest priority is the linking of these zones and the creation of a single European power system.

By signing the Memorandum of Understanding in Lisbon at this meeting, activities on the Reconnection Project started. There was great pressure at that meeting with the aim of ending the project by May 2004. Understandably, Greece showed the greatest interest. Namely, on August 13, 2004, the opening of the 28th Olympic Games in Athens was scheduled. The security of electricity supply was the first priority. At that time there was a study on possible reconnection scenarios. There were even seven of them, but no one counted that the Republic of Croatia would renew its high-voltage network destroyed during the war within that time and build two new 400 kV substations Ernestinovo and Žerjavinec. The reconnection would be made over Hungary, and Croatia would probably have been partially isolated from the rest of the European power system for years. After extensive discussions and meetings, the UCTE Steering Board established the executive team in its meeting in Zagreb in 2002 with the aim of preparing and implementing a project of a merger or electrical connection between the existing two European synchronous zones.

The Steering Board, which consisted of all European power companies, appointed a representative of the Croatian transmission system operator Ivica Toljan (Member of HEP Management and Transmission Director) and the Czech transmission system operator Jiří Feist (Director of ČEPS) for Executive Team Leader. After three years of intensive and responsible work, the Republic of Croatia has renewed its high-voltage network, as well as Bosnia and Herzegovina, and built the new 400 kV station and the project was brought to the final stage of implementation – planned inclusion on 10.10.2004. At the last meeting of the Reconnection Team, the Hungarian representative warned that the project was unsuccessful; on the territory of the Republic of Slovenia and the Republic of Croatia, the phases do not have the same order, in other words, they have been replaced. That is why the power system of the Republic of Croatia and Bosnia and Herzegovina had to be separated from European (*put into island operation*). In order to achieve this, it is necessary to obtain a license from UCTE and to organize over 300 people of various professions as well as all related techniques and find a way to pay extra costs.

Keywords: electric power system, island operation, reconnection, phase order