



Elektroprivreda

ČASOPIS ZAJEDNICE JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE • THE JOURNAL OF THE UNION OF YUGOSLAV
ELECTRIC POWER INDUSTRY • REVUE DE L'UNION YUGOSLAVE DE L'ELECTRICITE • ЖУРНАЛ ОБЪЕДИНЕННЫХ
ЮГОСЛАВСКОГО ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА • ZEITSCHRIFT DES JUGOSLAVWISCHEN ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT

Godina Year	LVI	Jul-Oktobar July-October	Broj No.	3
----------------	-----	-----------------------------	-------------	---

Sadržaj	Strana Page	Content
	<i>Duško Tubić i Branko Stojković</i>	
PONOVNO POVEZIVANJE SA GLAVNIM DELOM UCETE MREŽE	3	RECONNECTION WITH THE MAIN PART OF UCTE NETWORK
	<i>Veselin Ilić, Milenko Đurić i Aleksandar Čukarić</i>	
LABORATORIJSKO TESTIRANJE DIGITALNOG ALGORITMA KUĆIŠNE ZAŠTITE MONOFAZNOG TRANSFORMATORA ZASNOVANOG NA RAVNOTEŽI MAGNETNOPOBUDNIH SILA	9	LABORATORY TESTING OF DIGITAL ALGORITHM OF MONOPHASE TRANSFORMER CASING PROTECTION BASED ON MAGNETIC EXCITATION FORCE BALANCE
	<i>Ljubiša Nikolić, Miodrag Korolija, Dragan Kovačević i Radoslav Brkić</i>	
ISPITIVANJA NESAVRŠENOSTI MAGNETNIH JEZGARA OBRTNIH MAŠINA METODOM MALE INDUKCIJE	16	MAGNETIC CORE IMPERFECTION TESTING IN ROTATING MACHINERY BY LOW MAGNETIC INDUCTION METHOD
	<i>Dragan P. Popović</i>	
JEDNA METODA UPRAVLJANJA TOKOVIMA SNAGA POMOĆU STATIČKIH TRANSFORMATORA ZA REGULACIJU UGLA	24	A POWER FLOW CONTROL METHOD BY USE OF STATIC PHASE SHIFTING TRANSFORMERS
	<i>Branko Stojanović</i>	
PRIMENA METODE „SIMULACIJE KALJENJA” NA PROBLEM KOMPENZACIJE REAKTIVNE SNAGE U SIMETRIČNIM RADIJALNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA	35	APPLYING „SIMULATED ANNEALING” IN GENERAL CAPACITOR PLACEMENT PROBLEM IN LARGE SCALE SYMMETRICAL RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS
	<i>Miloje Kostić</i>	
POSTUPAK ZA POVEĆANJE KORIŠĆENJA KONDENZATORA I POBOLJŠANJE KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE	50	PROCEDURE FOR USAGE CAPACITORS INCREASING AND REACTIVE ENERGY COMPENSATION IMPROVEMENT
	<i>Mirjana Stojanović, Dragoljub Popović, Vladanka Aćimović-Raspopović i Jovanka Gajica</i>	
PRIMENA SIMULACIJE U PROJEKTOVANJU ELEKTROPRIVREDNIH TELEKOMUNIKACIONIH MREŽA SA TEHNOLOGIJOM INTERNET PROTOKOLA	65	SIMULATION IN THE DESIGN PROCESS OF INTERNET PROTOCOL BASED POWER UTILITY TELECOMMUNICATION NETWORKS
	<i>Igor R. Vujičić</i>	
MODELI ULASKA ELEKTROPRIVREDNIH KOMPANIJA NA TELEKOMUNIKACIONO TRŽIŠTE	78	ELECTRICITY COMPANY MODELS FOR ENTERING TELECOMMUNICATIONS MARKET
	<i>Ivica Paunović i Jovan Nahman</i>	
PRIMENA METODE KONAČNIH ELEMENATA U ANALIZI SLOŽENIH UZEMLJIVAČKIH SISTEMA	92	COMPLEX GROUNDING SYSTEMS ANALYSIS USING FINITE ELEMENT METHOD
	<i>Nikola Miladinović</i>	
STANDARDI MEĐUNARODNE ELEKTROTEHNIČKE KOMISIJE ZA JEDINSTVENU ARHITEKTURU PODATAKA, KOMUNIKACIJA I APLIKACIJA U RESTRUKTURIRANIM ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA	101	INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION STANDARDS FOR COMMON ARCHITECTURE OF DATA, COMMUNICATIONS AND APPLICATIONS IN RESTRUCTURED ELECTRIC POWER SYSTEMS
	<i>Dragan Trtica</i>	
EKSPLOATACIONA ISKUSTVA PRI RADU KONTURA REGULACIJE U TE-TO ZRENJANIN	110	EXPERIENCE OF EXPLOITATION CONTOUR REGULATION AT THE ZRENJANIN POWER PLANT
	<i>Jovan Nahman</i>	
Prikaz monografije		Review of monograph
STATIČKA SIGURNOST ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA	116	STATIC SECURITY OF ELECTRIC POWER INTERCONNECTIONS
	<i>autor: Dragan P. Popović</i>	
	<i>Miroslav Lutovac</i>	
Prikaz knjige		Review of book
ŠTA JE TO IP TELEFONJA?	118	WHAT IS IP TELEPHONY?
	<i>autor: Žarko Markov</i>	

IZDAVAČ:
PUBLISHER:

ZAJEDNICA JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE
UNION OF YUGOSLAV ELECTRIC POWER INDUSTRY

11 000 Beograd, Balkanska 13

Telefon: 686-633, 643-823, 688-092, 2687-199 (centrala)

Telefaks: 686-398

Internet strana: www.eps.co.yu; www.epcg.cg.yu; Elektronska pošta: jugel@sezampro.yu

DIREKTOR I GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK
DIRECTOR AND CHIEF EDITOR

Branislav A. Bošković, dipl. ing.

IZDAVAČKI SAVET
PUBLISHING COUNCIL

Branislav A. Bošković, dipl. ing., predsednik, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd;

Vladimir Vujović, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić;

Dr Slobodan Ružić, dipl. ing., član, Beograd;

Radomir Naumov, dipl. ing., član, Ministar za rudarstvo i energetiku u Vladi Republike Srbije, Beograd;

Dr Duško Tubić, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

Branko Kotri, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić.

REDAKCIONI ODBOR
EDITORIAL BOARD

Vladimir Vujović, dipl. ing., predsednik, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić;

Dr Duško Tubić, dipl. ing., zamenik predsednika, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

Prof. dr Miroslav Benišek, dipl. ing., član, Mašinski fakultet, Beograd;

Prof. dr Branislav Đorđević, dipl. ing., član, Građevinski fakultet, Beograd;

Prof. dr Jovan Nahman, dipl. ing., član, Elektrotehnički fakultet, Beograd;

Prof. dr Dragan Popović, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd;

Prof. dr Nikola Rajaković, dipl. ing., član, Elektrotehnički fakultet, Beograd;

Prof. dr Sreten Škuletić, dipl. ing., član, Elektrotehnički fakultet, Podgorica;

Dr Petar Vukelja, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd;

Dr Milivoje Cvetinović, dipl. mat., član, SAP, Beograd;

Mr Dragan Vlasisavljević, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

Mr Milan Gavrilović, dipl. ing., član, Beograd;

Mr Gojko Dotlić, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

Mr Radmilo Ivanković, dipl. ing., član, Beograd;

Mr Miroslav Marković, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić;

Dr Branko Stojković, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić;

Gojko Vlasisavljević, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

Aleksandar Vlajčić, dipl. ing., član, pomoćnik ministra za rudarstvo i energetiku u Vladi Republike Srbije, Beograd;

Milan Jakovljević, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

Mladen Serventi, dipl. ek., član, „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

Vojislav Škundrić, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

Momčilo Gojgić, dipl. prav., član, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd;

Lela Lončar, dipl. filolog, član, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd.

TEHNIČKI UREDNIK
TECHNICAL EDITOR
Jovo Todorović dipl. teh.

LEKTOR
LINGUISTIC REVIEW
& TRANSLATION
Lela Lončar, dipl. filolog

TEHNIČKI CRTAČ
MAPS AND GRAPHICS
Milanka Pejović,
teh. crtač

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Časopis „Elektroprivreda” se izdaje u 2004. godini uz finansijsku pomoć Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije

The „Elektroprivreda” journal is published in 2004 with financial support of Ministry for Science, Technology and Development of the Republic of Serbia

Štampa: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

Printed by: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

Tiraž: 1 000 primeraka

Circulation: 1,000 copies

Ponovno povezivanje sa glavnim delom UCTE mreže

Stručni rad
UDK: 621.1.18; 621.1.182.2; 621.1.182.1

Rezime:

U radu je dat pregled aktivnosti koje su realizovane u II UCTE sinhronoj zoni, kako bi se ispunili svi zahtevani uslovi za ponovno povezivanje sa glavnim delom UCTE mreže. Ovi poslovi su početi utvrđivanjem stepena oštećenja prenosne mreže, nastavljeni studijskim radom u cilju određivanja neophodnih objekata prenosne mreže za povezivanje i, nakon obnova ratom oštećene prenosne mreže, izvršena je priprema i na kraju je operativno realizovano povezivanje. Takođe su navedeni i najznačajniji poslovi urađeni u EPS i EPCG, u cilju unapređenja rada elektroenergetskih sistema Srbije i Crne i dovođenja performansi rada ovih sistema na nivo potreban za rad u UCTE interkonekciji.

Abstract:

RECONNECTION WITH THE MAIN PART OF UCTE NETWORK

The paper gives a review of activities realized in the Second UCTE Synchronized zone in order to fulfill all the requirements for reconnection to the main part of the UCTE network. These activities were initiated by establishing the amount of damage brought to the transmission network, and followed by study work for the purpose of determining required transmission plants for interconnection and, after reconstruction of the transmission network damaged in war, preparations were carried out, and finally interconnection became effective. The paper also gives a list of major tasks performed in EPS and EPCG, for the purpose of promotion of operation of the electric power systems of Serbia and Montenegro and bringing the operation performances of these systems to the level required for joining the UCTE interconnection.

1. UVOD

Od 1991. godine elektroenergetski sistemi Grčke, Makedonije, dela BiH-Republike Srpske i Srbije i Crne Gore radili su odvojeno od glavnog dela UCTE mreže, iako su elektroprivrede ovih zemalja punopravne članice UCTE-a. Oštećenja 400 kV veza RP Mladost - Ernestinovo i Ernestinovo - Ugljevik na severu, kao i veze Gacko - Mostar - Konjsko na jugu, su glavni razlozi prekida sinhronog rada sa glavnim delom UCTE mreže. Ponovno povezivanje

navedenih kao i svih ostalih elektroenergetskih sistema (EES) iz II UCTE sinhronone zone sa glavnim delom UCTE mreže bio je dugotrajan proces za čiju realizaciju i završetak je bilo neophodno da se ispunimo puno uslova. U ovom pregledu će biti prezentirani neophodni preduslovi za povezivanje, kao i način njihove realizacije.

Ponovno povezivanje sa glavnim delom UCTE mreže nije bilo moguće ostvariti samo popravkom oštećenih 400 kV veza na jugu i severu prethodne Jugoslavije. Naime, desili su se sledeći događaji ko-

ji su uticali na određivanje neophodnih preduslova za povezivanje:

- elektroenergetski sistemi CENTREL-a (Poljske, Češke, Slovačke i Mađarske) su od 1995. godine sinhrono povezani sa glavnim delom UCTE mreže a od 2001. godine su i punopravni članovi UCTE-a;
- elektroprivrede Rumunije i Bugarske su od 1995. odnosno 1996. godine u sinhronom radu sa ostalim balkanskim EES-ima, nakon ispunjenja propisanih mera, primljene su 2003. godine u UCTE;
- zapadni deo ukrajinskog EES-a, za koji se često koristi i naziv „Burštinsko ostrvo”, takođe je priključen na UCTE mrežu, a kao što je poznato, od ukrajinske trafostanice Mukačevo postoje 400 kV veze prema Slovačkoj, Mađarskoj i Rumuniji.

Sve prethodno navedeno uticalo je na određivanje UCTE-a da se istovremeno razmatraju uslovi za rekonekciju elektroenergetskih sistema Grčke, dela BiH-Republike Srpske, Makedonije, Srbije i Crne Gore i povezivanje elektroenergetskih sistema Rumunije i Bugarske sa glavnim delom UCTE mreže.

Grubo, sve aktivnosti oko povezivanja mogu se grupisati na sledeći način:

- utvrđivanje stepena oštećenja prenosne mreže;
- tehničke analize (studije) u cilju određivanja neophodnih objekata prenosne mreže za povezivanje;
- obnova ratom oštećene prenosne mreže;
- priprema i operativna realizacija povezivanja.

2. UTVRĐIVANJA NEOPHODNIH OBJEKATA PRENOSNE MREŽE ZA POVEZIVANJE

Aktivnosti vezane za ispitivanje mogućnosti ponovnog povezivanja dva razdvojena dela UCTE interkonekcije započete su SUDEL-ovom studijom 1996. godine [1]. Posle završetka ove Studije, formirane su dve SUDEL-ove ad hoc grupe sa zadatkom da sagledaju neophodne mere, dinamiku i troškove obnove 400 kV „Južne magistrale”, kao i TS 400/110 kV/kV Ernestinovo i 400 kV dalekovoda RP Mladost-Ernestinovo i Ernestinovo-Ugljevik.

Nemačke elektroprivredne kompanije su početkom 2001. godine završile Studiju stabilnosti sinhronog rada mreže UCTE-a, CENTREL-a, Bugarske i Rumunije [2]. Na osnovu rezultata ove Studije za ponovno povezivanje II UCTE sinhronone zone sa



Slika 1. Neophodni vodovi 400 i 220 kV za povezivanje prema Studiji stabilnosti sinhronog rada mreže UCTE-a, CENTREL-a, Bugarske i Rumunije

glavnim delom UCTE mreže, neophodno je da budu raspoložive sledeće tri 400 kV veze:

- Subotica - Šandorfalva (Mađarska) - Arad (Rumunija)
- Rošiori (Rumunija) - Mukačevo (Ukrajina)
- Gacko - Mostar - Konjsko

kao i tokom rata oštećeni 220 kV vodovi između BiH i Hrvatske (Zakučac-Mostar, Đakovo-Tuzla, Mraclin-Prijedor, Međurić-Prijedor i Đakovo-Građačac). Na slici 1 ovi dalekovodi su osenčeni.

3. POPRAVKA OŠTEĆENIH OBJEKATA

Popravka 400 kV veze Gacko - Mostar - Konjsko, trafostanice 400/220 kV/kV Mostar 4 i ostalih neophodnih objekata na tzv. „Južnoj magistrali” urađena je u okviru programa POWER III za rekonstrukciju elektroenergetskog sektora u BiH. Ovaj kredit je počeo da se koristi 2002. godine, a popravka objekata na „Južnoj magistrali” bitnih za rekonstrukciju je završena do sredine 2004. godine.

Za finansiranje popravke TS 400/110 kV/kV Ernestinovo i poveznih 400 kV dalekovoda prema BiH i Srbiji, kao i izgradnju nove TS 400/220/110 kV/kV/kV Žerjavinec, Hrvatska elektroprivreda je uzela zajam konzorcijuma komercijalnih banaka. Radovi na ovom projektu su počeli 2002. godine, a završeni do sredine 2004. godine.

Bez obnove prenosne mreže u Srbiji koja je bombardovanjem 1999. godine bila oštećena i delom uništena, iako je rađena pre svega za obezbeđenje napajanja potrošača u Srbiji, takođe ne bi bilo tehničkih uslova za ponovno povezivanje sa glavnim delom UCTE mreže .

4. PRIPREMA POVEZIVANJA

U maju 2001. godine predstavnici elektroprivreda Hrvatske, BiH i Srbije i predstavnik UCTE-a, potpisali su Memorandum o razumevanju u Lisabonu. Ovim dokumentom sve potpisnice se obavezale da će poslove koji su vezani za povezivanje dve sinhronne UCTE zone imati prioritet i da će međusobno saradivati u realizaciji povezivanja.

Sredinom 2001. godine i početkom 2002. godine održano je nekoliko sastanaka predstavnika elektroprivrednih kompanija iz BiH, Hrvatske i Srbije i Crne Gore, čiji je osnovni cilj bio koordinacija neophodnih aktivnosti vezanih za ponovno povezivanje elektroenergetskih sistema iz ovih država. Jedan od zadataka ovih sastanaka je bio i priprema Izjave, koju je trebalo da potpišu generalni direktori svih elektroprivrednih kompanija, i koja je trebalo da sadrži i akcioni plan aktivnosti vezanih za povezivanje. Me-

đutim, to nije realizovano jer nije bio usaglašen zajednički tekst Izjave.

Sredinom 2002. godine Upravljački komitet UCTE-a formirao je Izvršni tim (Executive team - ET) za povezivanje prve i druge UCTE sinhronne zone. Osnovni zadatak ET je bio da pripremi i realizuje povezivanje I i II UCTE sinhronne zone.

ET je najpre napravio spisak objekata prenosne mreže koji su bili bitni za povezivanje I i II UCTE sinhronne zone, sa opisom tada aktuelnog stanja i preduzetim poslovima da navedeni objekti budu u funkciji i sa očekivanim datumom završetka opisanih poslova. Ove informacije su tokom dvogodišnjeg rada ET periodično ažurirane.

Struktura i broj kontrolnih i obračunskih blokova nakon rekonekcije je takođe bilo jedno od pitanja koja su se dogovarala na ET. Za nove članove UCTE-a (Rumunija i Bugarska) postao je nadležan UCTE koordinacionog centra Sever (RWE-Brauweiler), dok su stari članovi UCTE-a ostali u okviru koordinacionog centra Jug (ETRANS-Laufenburg). EES Albanije, koja nije član UCTE-a, je za sada poseban kontrolni i obračunski blok, iako je bilo pokušaja da se priključi ili JIEL (EPS, EPCG i ESM pod koordinacijom EKC-a) ili grčkom kontrolnom i obračunskom bloku.

Kako je od završetka Studije stabilnosti sinhronog rada mreže UCTE-a, CENTREL-a, Bugarske i Rumunije proteklo određeno vreme i bilo je i izvesno da će topologija mreže u trenutku povezivanja biti dosta različiti u odnosu na pretpostavke iz navedene Studije, ET je odlučio da EKC i MVM urade novu analizu tokova snaga kao i da RWE ažurira proračune stabilnosti.

U odnosu na zaključke Studije stabilnosti sinhronog rada mreže UCTE-a, CENTREL-a, Bugarske i Rumunije, koji su glasili da je za povezivanje neophodno i dovoljno da budu raspoložive tri 400 kV i pet 220 kV veza (što je prikazano i na slici 1), pojavio se zahtev, pre svega od predstavnika HEP-a, da se obnovi kompletna 400 kV mreža u BiH, odnosno da u pogonu bude i 400 kV „poprečna” veza Ernestinovo-Ugljevik-Tuzla-Sarajevo-Mostar. Kako je završetak poslova na deonicama ove „poprečne” veze koje nisu bile u pogonu (Ernestinovo-Ugljevik i Sarajevo-Mostar) usledio svega par meseci kasnije od završetka objekata na „Južnoj” i „Severnoj” 400 kV magistrali, to je posle ne baš kratkog ubeđivanja, usvojen ovaj dodatni uslov za povezivanje.

Par meseci pre povezivanja, pored uslova vezanih za infrastrukturu, specificirani su zahtevi u pogledu prenosa informacija između interkonektivnih tačaka, TSO-a kao i kontrolnih oblasti i blokova. Zahtevi za prenos signala relejne zaštite, realnog vremena i obračunskih merenja praktično su defini-

sali minimalni nivo telekomunikacionog povezivanja susednih sistema.

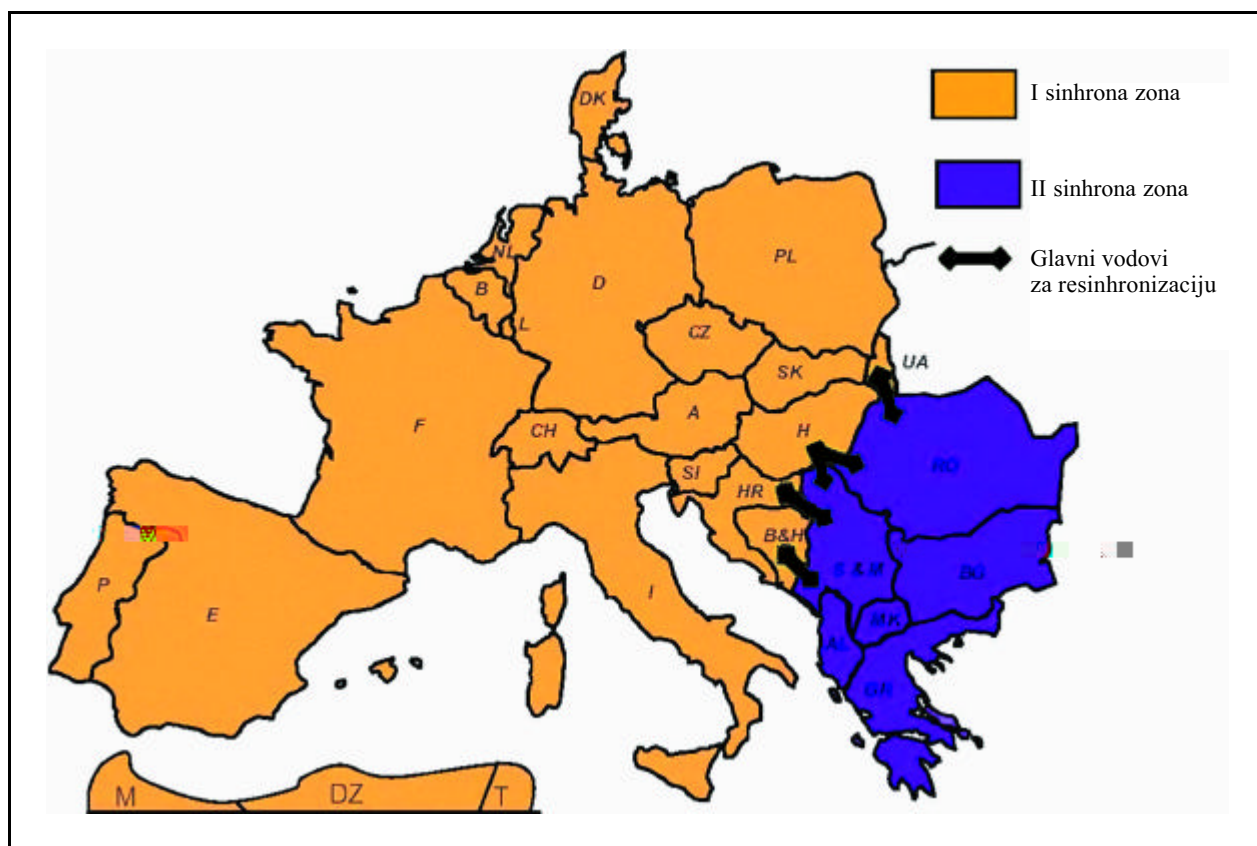
Samo mesec dana pre povezivanja, merenjem je utvrđeno da postoji fazni pomeraj od 120° između hrvatskog EES-a i svih njemu susednih EES-a, koji je nastao „ukrštanjem” faznih provodnika na vodovima između Hrvatske i Slovenije i Hrvatske i Mađarske. Preplitanjem faza na vodovima između navedenih sistema, ovaj fazni pomeraj je otklonjen.

Radna grupa eksperata je u okviru ET pripremila operativni Program povezivanja. Ovaj Program je napravljen na osnovu rezultata analize točkova snaga i ažuriranih proračuna stabilnosti, kao i na osnovu iskustava i prakse operativnog osoblja iz svih sistema koji su bili uključeni u rad ET. Određen je redosled povezivanja, kao i uslovi za zatvaranje petlje. Zahtevano je da pre povezivanja učestanost II UCTE sinhronne zone bude viša od učestanosti I zone između $0,03\text{ Hz}$ i $0,05\text{ Hz}$, kao i da maksimalna fazna razlika pri uključanju prvog voda bude što manja, a svakako ispod 10° . Za zatvaranje 400 kV petlji preporučeno je da maksimalna fazna razlika na krajevima dalekovoda ne bude veća od 30° a razlika napona viša od 20 kV . Na slici 2 prikazani su 400 kV vodovi preko kojih je izvrše-

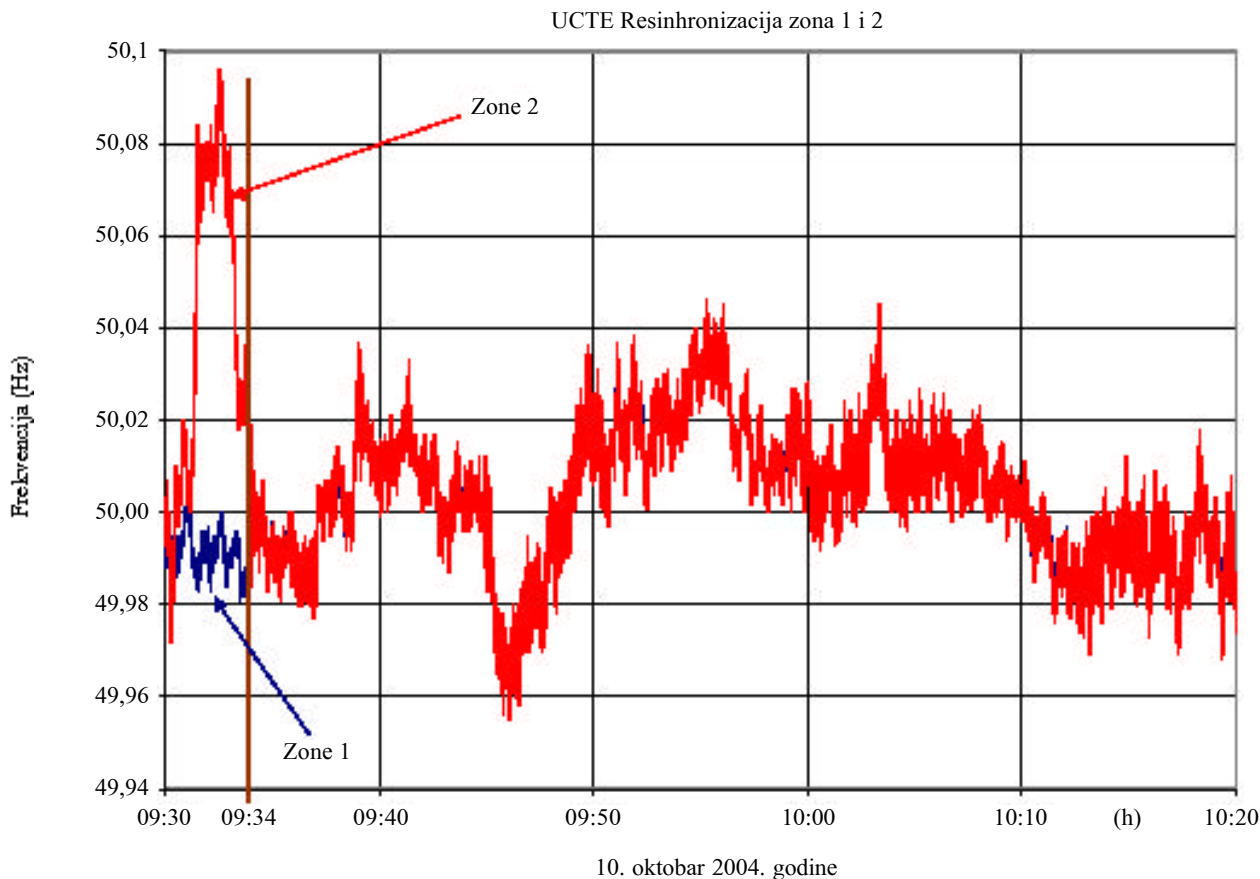
no povezivanje I i II UCTE sinhronne zone, kao i redosled njihovog uključanja.

5. OPERATIVNA REALIZACIJA POVEZIVANJA

Operativnu realizaciju povezivanja vodili su kopredsednici ET iz DC u Zagrebu, a učestvovali su DC u Budimpešti, Bukureštu, Lvovu, Sarajevu, Beogradu i Podgorici. Svi dalekovodi 400 kV sa slike 2 su najpre na obe strane pripremljeni za uključanje prekidača, a potom su stavljeni u prazan hod sa jedne strane. Namera je bila da vreme između uključanja prvog i petog voda bude što kraće, kako bi i trajanje rada dve velike interkonekcije (I i II UCTE sinhronne zone) preko jednog ili dva povezna dalekovoda takođe bilo što je moguće kraće. Uključenjem prekidača u Aradu, 10. 10. 2004. godine u 09:34 povezane su I i II UCTE sinhronna zona. Na slici 3, snimljenoj u ETRANS-u vide se učestanosti pre i nakon uključanja prekidača u Aradu. Potom su prema utvrđenom redosledu uključeni i ostali 400 kV vodovi između I i II UCTE sinhronne zone, uključujući i poslednji RP Maladost - Ernestinovo u 10:19. Potom su uključeni i vodovi 220 kV vodovi između I i II UCTE sinhronne zone.



Slika 2. Vodovi 400 kV preko kojih je izvršeno povezivanje I i II UCTE



Slika 3. Učestanost pre i nakon povezivanja I i II UCTE sinhronne zone

6. ŠTA JE URAĐENO U EPS-u I EPCG-u

Elektroenergetski sistem EPS-a se za rekonekciju pripremao nekoliko godina. EPS je najpre obnovio oštećenu i instalirao novu opremu u prenosnu mrežu, koja je bombardovanjem 1999. godine bila oštećena i uništena. EPS je morao da poboljša regulacione sposobnosti svojih elektrana, i to kako odzive elektrana u primarnoj regulaciji, tako i da modernizuje opremu i softver u nacionalnom DC i elektranama koje učestvuju u sekundarnoj regulaciji učestanosti i snaga razmene. Instalirana je nova merna oprema, pre svega na interkonektivnim dalekovodima. Počela je izgradnja novog telekomunikacionog sistema koji će podržati razmenu informacija između EPS-a i ostalih operatora sistema. Takođe je morala da se obezbedi neophodna oprema i informatička podrška za upravljanje elektroenergetskim sistemom Srbije, kao i da se omogući razmena svih podataka sa susednim sistemima. Dispečerski centar EPS-a postao je „čvor” na „elektronskoj magistrali” (Electronic Highway) kojom u realnom vremenu putuju i razmenjuju se podaci između elektroprivreda članica UCTE. Stručni tim EPS-a, koji je početkom avgusta 2004.godine formirao Generalni direk-

tor EPS-a, imao je zadatak da realizuje završne poslove i ispuni sve neophodne preduslove, kako bi se sam čin resinhronizacije nesmetano obavio i taj posao je uspešno obavio. Novac za realizaciju svih poslova EPS je obezbedio iz donacija, kredita, kao i iz sopstvenih izvora.

EPCG je takođe, u izvesnoj meri poboljšala regulacione sposobnosti svojih elektrana, konkretno HE „Perućice”, i to kako odziv elektrane u primarnoj regulaciji, tako i uključenje ove elektrane u sopstveni sistem sekundarne regulacije učestanosti i snage razmene. To je pretpostavljalo prethodnu realizaciju SCADA&AGC sistema u nacionalnom DC, koji su pušteni u pogon 2000. i 2002. godine, respektivno. Obnovljena je merna oprema na nekim interkonektivnim dalekovodima. Počela je, a ovih dana se i privodi kraju, izgradnja novog telekomunikacionog sistema, koji je gotovo 100 % baziran na optici. Isto tako, do kraja godine se očekuje puštanje u pogon novog SCADA sistema, koji će obezbediti potpun nadzor i kontrolu rada EES Crne Gore, kao i daljinsku komandu svim prekidačima 400, 220 i 110 kV naponskog nivoa. U završnoj je fazi montaža AMR sistema (automatsko daljinsko očitavanje brojila). Ovo bi, u najkraćim crtama, bile najvažnije

aktivnosti koje su vođene ili se još vode u EPCG sa ciljem stvaranja potrebnih uslova za kvalitetno vođenje EES-a Crne Gore, u jedinstvenoj UCTE sinhronoj zoni. Realizacija navedenih poslova finansirana je iz donacija, kredita kao i iz sopstvenih izvora EPCG.

7. ZAKLJUČAK

Pred EPS-om i EPCG je još puno posla, kako bi prenosni i proizvodni sistemi ovih kompanija bili na nivou elektroprivreda razvijenih evropskih zemalja i kako bi kvalitet napajanja potrošača takođe bio na nivou evropskih standarda. Ponovno povezivanje sa UCTE mrežom je veliki korak u tom pravcu. Najveću korist od ovog povezivanja svakako će imati po-

trošači, pre svega zbog sigurnijeg i kvalitetnijeg snabdevanja. Ponovni rad u okviru najveće evropske interkonekcije zahteva od EPS-a i EPCG veću i stalnu pogonsku spremnost i disciplinu rada u skladu sa standardima UCTE asocijacije.

8. LITERATURA

- [1] Sudel Ad hoc group, Reconnection of the UCPTE Network and Parallel operation of the Bulgarian and Romanian networks with UCPTE; PPC, EKC, ENEL, 1996
- [2] DVG, Stability of the Synchronous Interconnected Operation of the Electricity Networks of UCTE/CENTREL, Bulgaria and Romania, Heidelberg, 2001.

Rad je primljen u uredništvo 08. 11. 2004. godine



Duško Tubić je rođen 1959. godine u Kikindi. Diplomirao je 1982. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Energetskom odseku, smer Elektroenergetski sistemi. Magistrirao je i doktorirao na istom fakultetu 1987. odnosno 1992. godine. Od 1983. do 1987. godine radio je u Elektroprenosu (danas Elektroistok) Novi Sad, a od 1987. godine radi u Elektroprivredi Srbije u Beogradu, najpre u Direkciji za razvoj i investicije, a potom u Direkciji za upravljanje EES, gde je od 1999. godine pomoćnik direktora direkcije. Radio je na poslovima vezanim za eksploataciju, planiranje i upravljanje prenosnom mrežom i elektroenergetskim sistemom. Član je Upravljačkog komiteta UCTE-a. Autor je ili koautor tridesetak radova objavljenih u domaćim i međunarodnim časopisima i konferencijama.



Branko Stojković je rođen 1955. godine u Podgorici. Diplomirao je 1980. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, na Energetskom odseku. Postdiplomske studije je završio na ETF u Beogradu, gdje je i magistrirao 1989. godine. Doktorirao je na ETF u Podgorici 2003. godine. Od 1980. do 1986. godine radio je kao operativni dispečer u DC EPCG u Podgorici, a od 1986. do 1998. bio je zaposlen u sektoru za investicije EPCG. Od 1998. godine radi na radnom mestu direktora NDC EPCG u Podgorici. Do sada je objavio više od trideset radova u domaćim i međunarodnim časopisima i konferencijama, kao i jednu knjigu iz oblasti deregulacije elektroprivrednog sektora.

Veselin Ilić,
Milenko Đurić i Aleksandar Čukarić

Laboratorijsko testiranje digitalnog algoritma kućišne zaštite monofaznog transformatora zasnovanog na ravnoteži magnetopobudnih sila

Stručni rad
UDK: 621.314.1; 621.3.08; 621.317

Rezime:

Prokazani su rezultati testiranja digitalnog algoritma kućišne zaštite monofaznog transformatora od unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva, prezentiranog u referenci [1], pomoću laboratorijskih snimaka kvarova. Eksperimentalna mjerenja obavljena su na fizičkim modelima trofaznog i monofaznog transformatora sa snimljenim strujnim signalima na: primaru, sekundaru i kućištu za vrijeme prelaznog procesa tokom električnih kvarova. Optimizaciona metoda nerekurzivnog algoritma, baziranog na sumi magnetopobudnih sila, dala je konvergentan rezultat zadovoljavajuće tačnosti.

Ključne reči: laboratorijsko testiranje, magnetopobudne sile, kućišna zaštita

Abstract:

LABORATORY TESTING OF DIGITAL ALGORITHM OF MONOPHASE TRANSFORMER CASING PROTECTION BASED ON MAGNETIC EXCITATION FORCE BALANCE

The paper shows the results of digital algorithm of monophaser transformer casing protection against internal single-phase short circuits, presented in reference [1], by means of laboratory outage records. Experimental measurements were carried out in physical models of three-phase and monophaser transformers recorder by current signals in: primary, secondary and casing in the course of transient process during power outage. The optimization method of non-recursive algorithm, based on the sum of magnetic excitation forces, gave a convergent result of satisfactory accuracy.

Key words: laboratory testing, magnetic excitation forces, casing protection

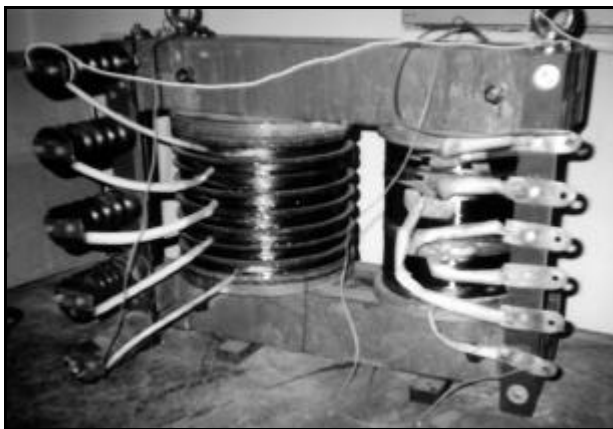
1. UVOD

Za zaštitu malih transformatora od unutrašnjih kratkih spojeva, ekonomski se ne isplati primjena diferencijalne zaštite, jer je broj ovih transformatorskih jedinica u distributivnim sistemima veliki. To je bio razlog da se za zaštitu transformatora od unutrašnjih kvarova koristi kućišna zaštita. Ona je razvijena ka-

ko za transformatore male, tako i velike nominalne snage. U radu je prikazano detektovanje: unutrašnjih jednofaznih metalnih (bez električnog luka) električnih kvarova u primaru trofaznog fizičkog modela, koji je radio kao jednofazna mašina, i sekundaru monofaznog fizičkog modela. Digitalizovani signali struja primara i sekundara i struje kvara, kao memorisani fajlovi, uvedeni su u PC, koji je vršio proraču-

Dr Veselin Ilić, dipl. ing. el. – Elektroprivreda Crne Gore A. D. „Elektroprenos“ TS 220/110/35 kV/kV/kV, 84 205 Mojkovac
Prof. dr Milenko Đurić – Elektrotehnički fakultet 11 020 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73
Docent dr Aleksandar Čukarić – fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica, 38 220 Kosovska Mitrovica, Kneza Miloša 7

ne po programiranom algoritmu opisanog u [1]. Memorisani fajlovi čine niz brojeva koji odgovaraju trenutnim vrijednostima struja i_1 , i_2 i i_k , koji predstavljaju ulazne signale. Za procjenu nepoznatog parametra (relativnog položaja mjesta kvara) ulaznih signala korišćena je optimizaciona metoda nerekurzivnog algoritma [2]. Optimizaciona metoda koristi metodu minimizacije srednjeg kvadratnog odstupanja, koja je obezbijedila optimalnu procjenu nepoznatog parametra (mjesta kvara) u uslovima postojanja šuma i greške pri mjerenju i digitalizaciji. Nerekurzivni algoritam, opisan u [1], radio je tako što su se prvo prikupljali svi odbirci izabrane sekvence signala („pro-



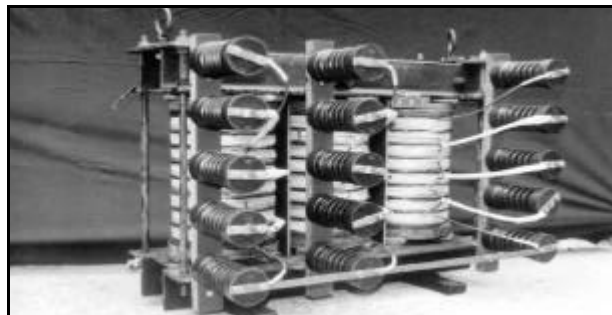
Slika 1. Model monofaznog transformatora

zor” podataka), a zatim se sa svim podacima „prozora” izračunalo mjesto kvara. Osnovna ideja od koje se pošlo počiva na činjenici da je struja kvara mjerljiva veličina pod uslovom da je kućište transformatora uzemljeno samo u jednoj tački.

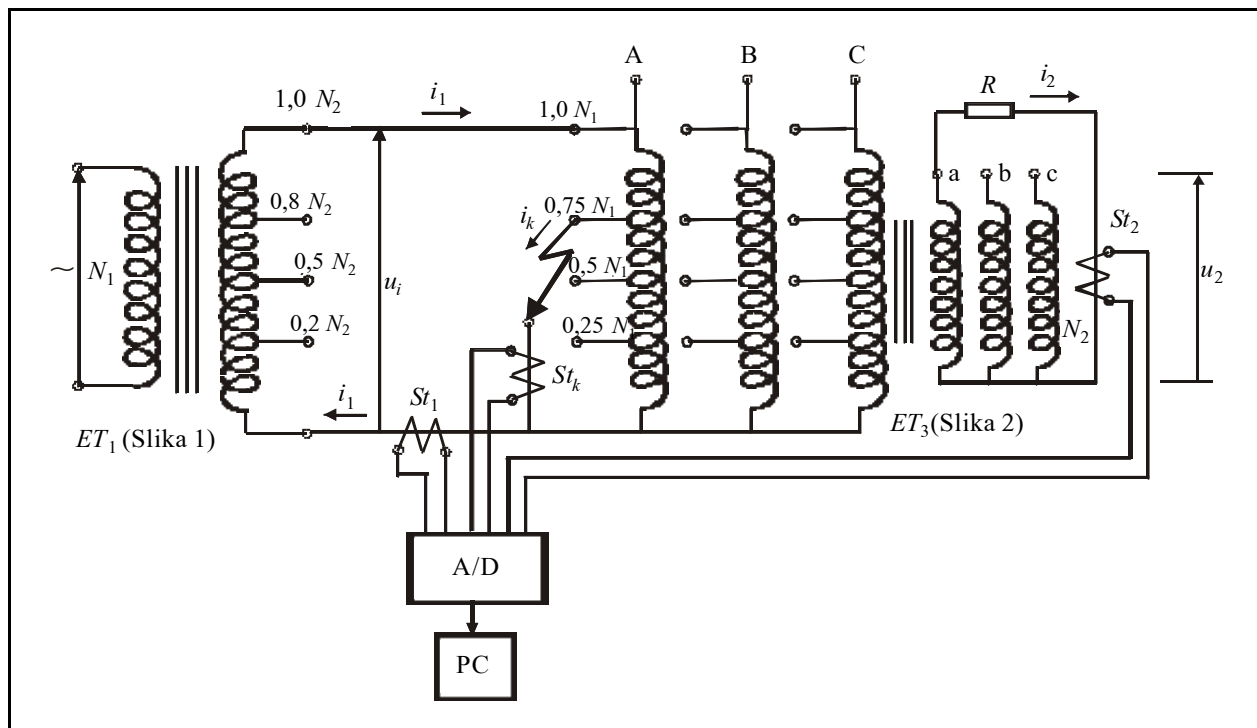
2. PRIKAZ IZVEDENIH LABORATORIJSKIH MJERENJA

Da bi se provjerila tačnost digitalnog algoritma [1] u realnim uslovima, korišćeni su podaci dobijeni iz eksperimenata u visokonaponskoj laboratoriji, sa metalnim kratkim spojevima na fizičkim modelima-slika 1 i 2.

Digitalizovani signali struja i_1 , i_2 i i_k dobijeni su pomoću kola-šema prikazanih na slici 3 i 4. Podaci (signali) su snimljeni korišćenjem uređaja za sni-

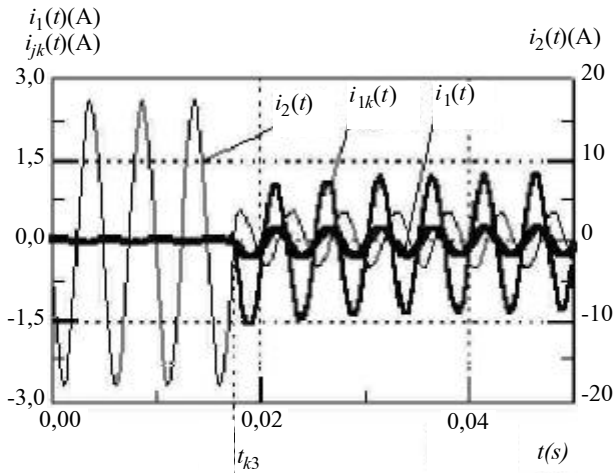


Slika 2. Model trofaznog transformatora



Slika 3. Laboratorijska šema veza za slučaj kvara na primaru trofaznog transformatora, koji je radio kao jednofazna mašina

manje prelaznih pojava sa frekvencijom odabiranja 2,5 kHz.



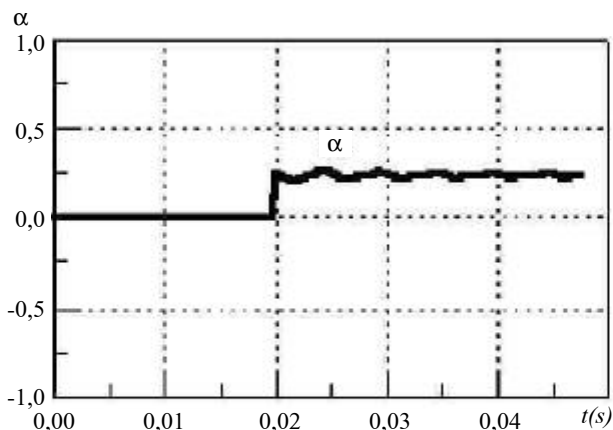
Slika 4. Struje primara i sekundara i struja kvara pri metalnom kvaru na primarnom namotaju $\alpha=0,25$

2.1. Kvar na primaru trofaznog transformatora

Šema veza i mjerna oprema, pri ovim eksperimentima, prikazani su na slici 3. Strujni signali: primara $i_1(t)$, sekundara $i_2(t)$ i kućišta $i_k(t)$, trofaznog transformatora, koji je radio kao jednofazna mašina, tokom prelaznog procesa za

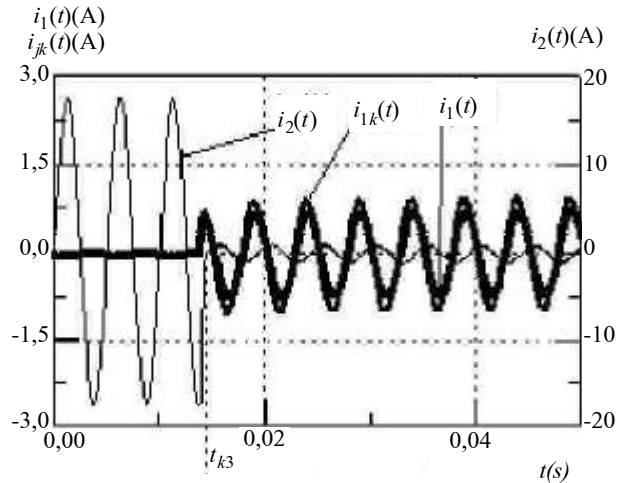
- metalni kvar na mjestu $0,25 N_l$ i
- metalni kvar na mjestu $0,75 N_l$ dati su na slici 4 i 6.

Estimirane vrijednosti relativnog položaja mjesta kvara na primaru a prikazani su na slici 5 i 7.

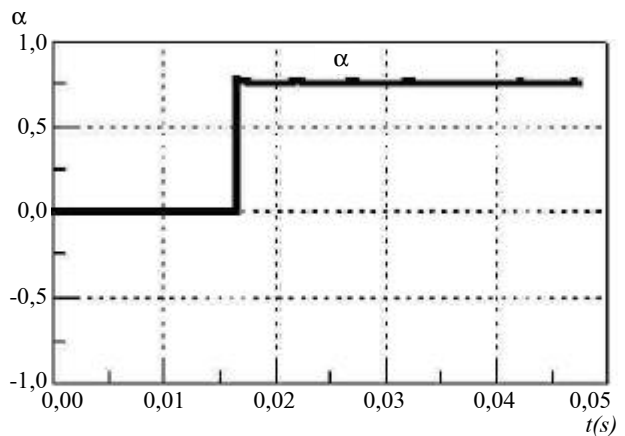


Slika 5. Estimirani parametar a za metalni kvar na primarnom namotaju $\alpha=0,25$

Sa stanovišta estimacije relativnog položaja mjesta kvara a , a to je prvenstveni zadatak algoritma opisanog u [1], postignut je izvanredan rezultat. Na-



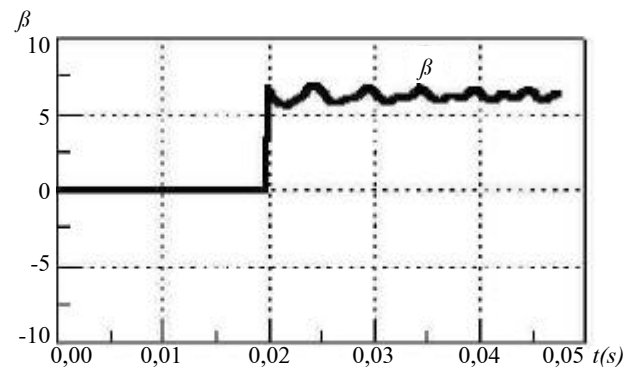
Slika 6. Struje primara i sekundara i struja kvara pri metalnom kvaru na primarnom namotaju $\alpha=0,75$



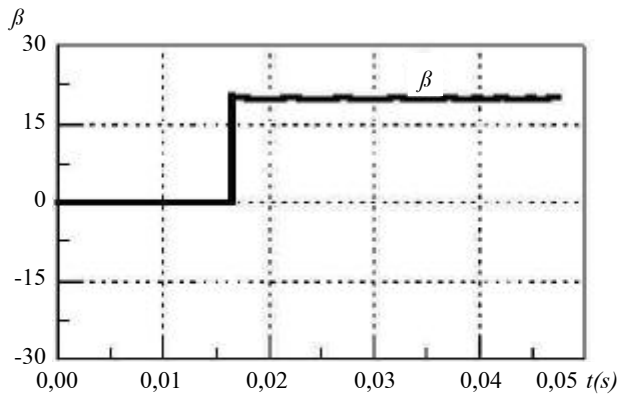
Slika 7. Estimirani parametar a za metalni kvar na primarnom namotaju $\alpha=0,25$

ime, postignuta je visoka tačnost i stabilna konvergencija.

Ono što „vidi” algoritam za detekciju kvarova na sekundaru, za kvar na primaru, prikazano je na slici 8 i 9.



Slika 8. Estimirani parametar β koji „vidi” algoritam za sekundarni namotaj, za metalni kvar na primarnom namotaju $\alpha=0,25$



Slika 9. Estimirani parametar β koji „vidi” algoritam za sekundarni namotaj, za metalni kvar na primarnom namotaju $\alpha=0,75$

2.2. Kvar na sekundaru monofaznog transformatora

Laboratorijsko test kolo za kvarove na sekundaru prikazano je na slici 10. U ovom slučaju trofazni transformator, u jednofaznom režimu rada, zajedno sa otpornikom R predstavljali su „električni potrošač” za monofazni transformator.

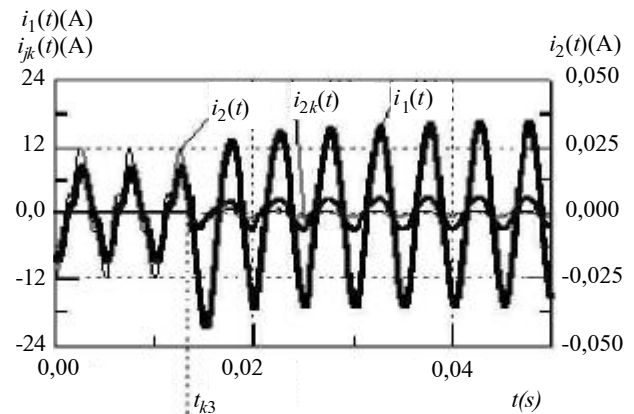
Kao u odeljku 2.1. odgovarajući strujni signali tokom prelaznog procesa za

- metalni kvar na mjestu $0,2 N_2$ i
- metalni kvar na mjestu $0,8 N_2$ prikazani su na slikama 11 i 13.

Izračunate vrijednosti relativnog položaja mjesta kvara na sekundaru β prikazani su na slikama 12 i 14.

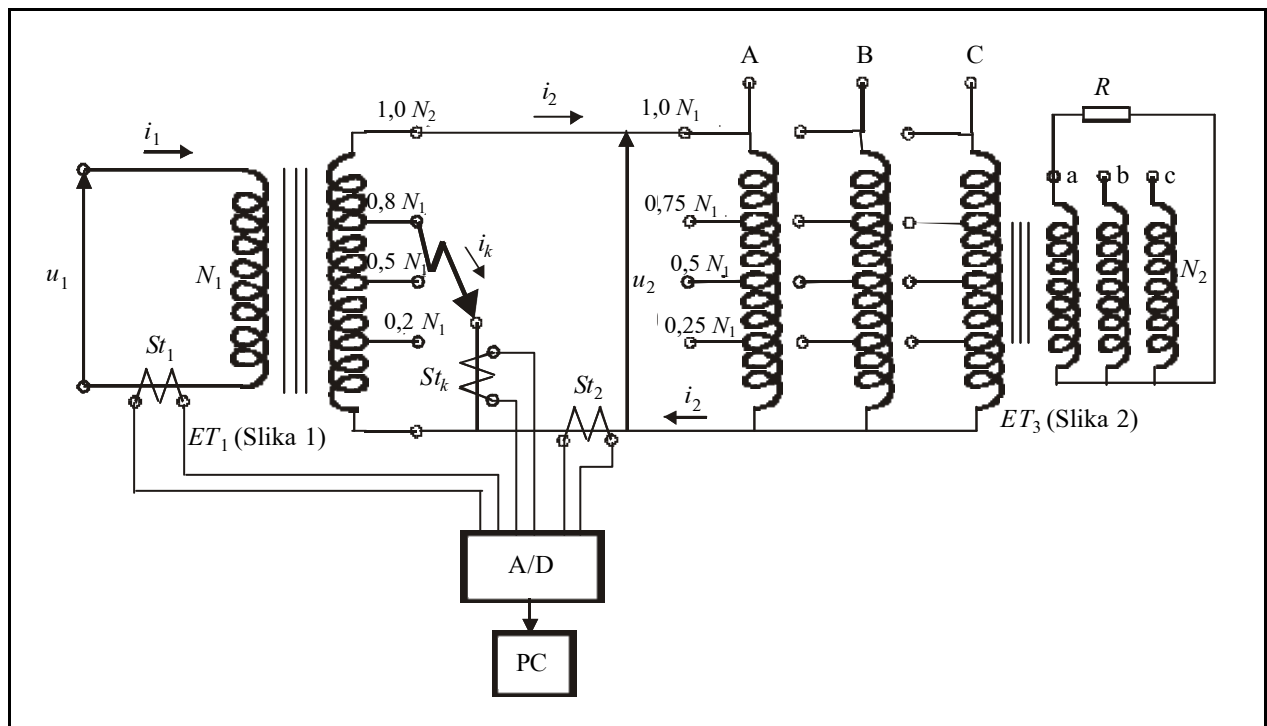
Može se konstatovati da estimirane vrijednosti relativnog položaja mjesta kvara na sekundaru konvergiraju sa zadovoljavajućom tačnošću i brzinom.

Ono što „vidi” algoritam za detekciju kvarova na primaru, za kvar na sekundaru, prikazano je na slikama 15 i 16.



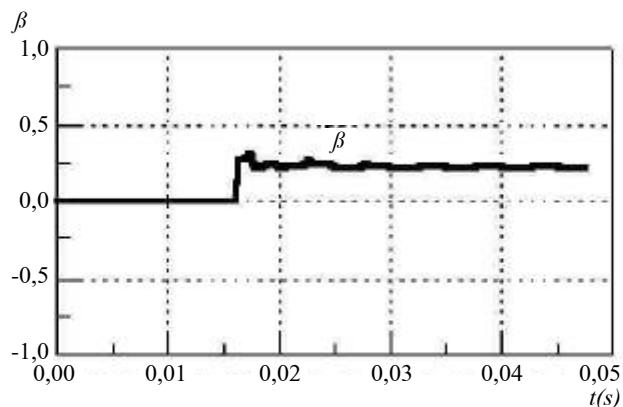
Slika 11. Struje primara i sekundara i struja kvara pri metalnom kvaru na sekundarnom namotaju $\beta=0,2$

Treba istaći osobinu algoritma [1] da po učitavanju uzoraka iz perioda kvara brzo konvergira ka vrijednostima prihvatljive tačnosti, uprkos izraženoj

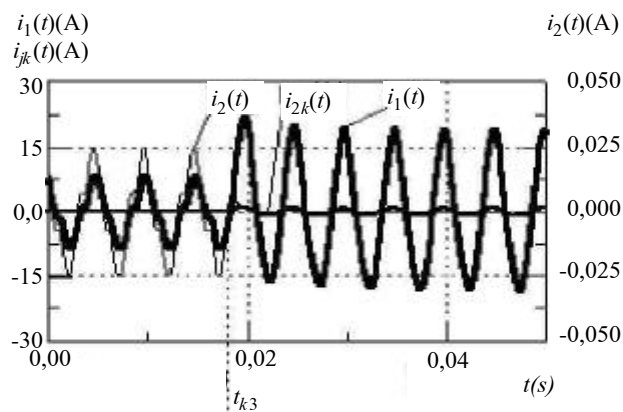


Slika 10. Laboratorijska šema veza za slučaj kvara na sekundaru monofaznog transformatora

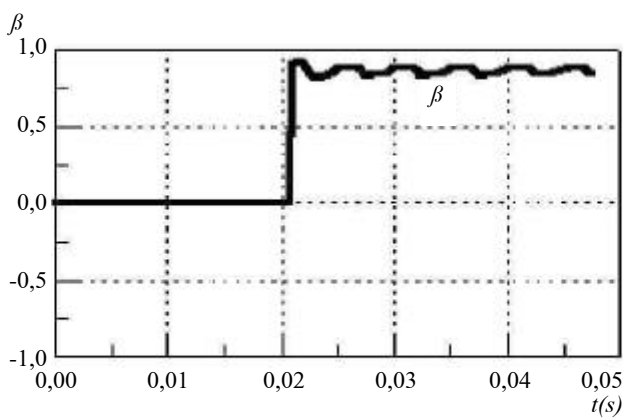
vrijednosti jednosmjerne komponente u strujama kvara (slika 4, 6, 11 i 13).



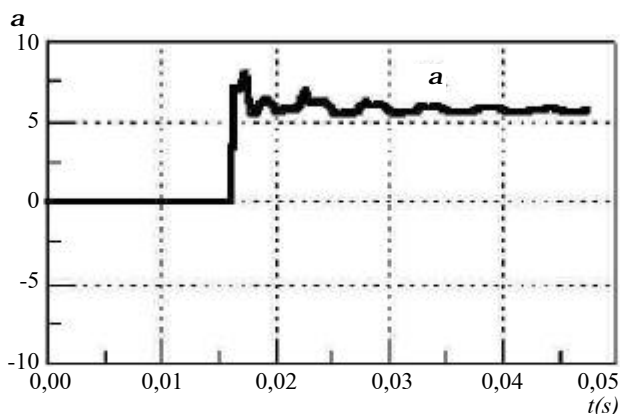
Slika 12. Estimirani parametar β za metalni kvar na sekundarnom namotaju $\beta=0,2$



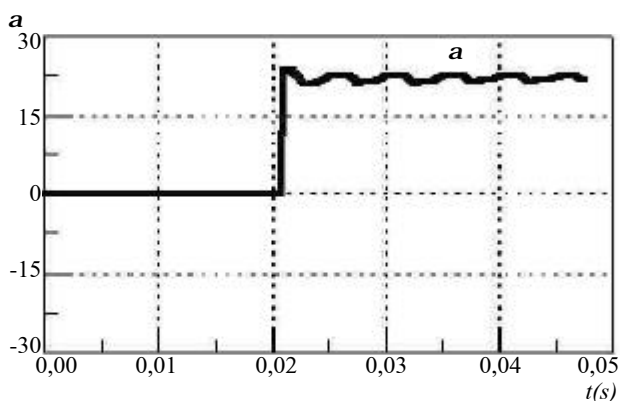
Slika 13. Struje primara i sekundara i struja kvara pri metalnom kvaru na sekundarnom namotaju $\beta=0,8$



Slika 14. Estimirani parametar β za metalni kvar na sekundarnom namotaju $\beta=0,8$



Slika 15. Estimirani parametar a koji „vidi” algoritam za primarni namotaj, za metalni kvar na sekundarnom namotaju $\beta=0,2$



Slika 16. Estimirani parametar a koji „vidi” algoritam za primarni namotaj, za metalni kvar na sekundarnom namotaju $\beta=0,8$

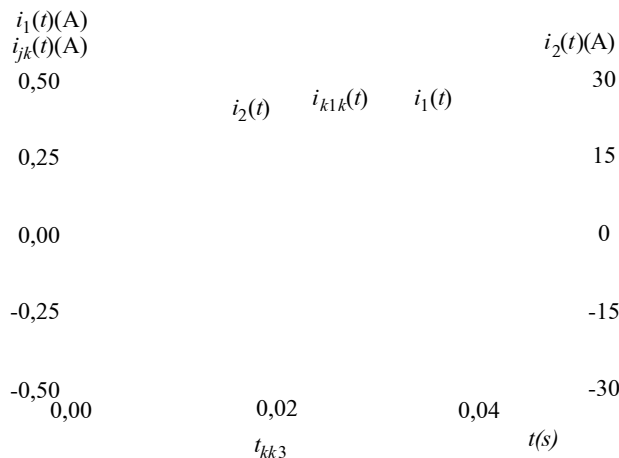
2.3. Testiranje algoritma [1] na „lažne struje”

Digitalni algoritam [1] provjeren je na tzv. „lažne struje” koje se mogu pojaviti u kućištu transformatora (kvar na niskonaponskoj opremi montirane na kućištu). Ovdje se misli na kvarove elektromotora koji pokreću ventilatore, za prinudno vazdušno hlađenje, i pumpe prinudne cirkulacije ulja. „Lažne struje” su inicirane iz posebnog izvora, koji je bio priključen u kolo sekundara strujnog transformatora St_k -slike 3 i 10. Vremenski tok „lažnih struja” kroz kućište trofaznog i monofaznog transformatora prikazan je na slikama 17 i 18.

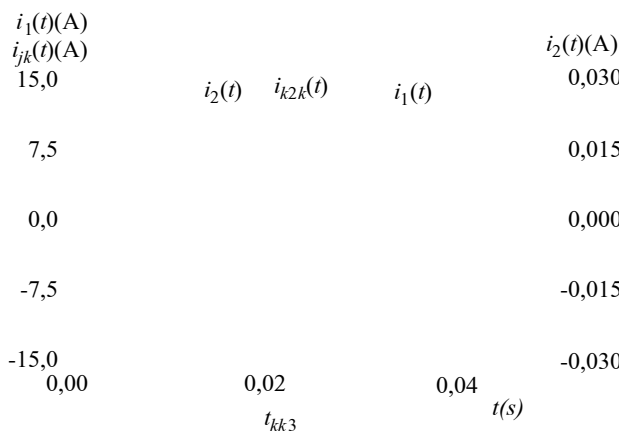
Izlazi digitalnog algoritma [1] dati su na slikama 19, 20, 21 i 22.

Ovi rezultati „govore” da je digitalni algoritam [1] selektivan.

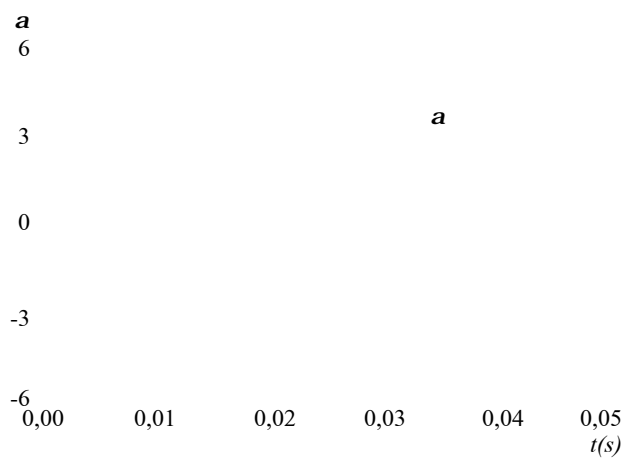
Formirani digitalni algoritam ima veliki praktični značaj, jer on može imati funkciju zaštitnog kućišnog releja monofaznog transformatora. Algoritam



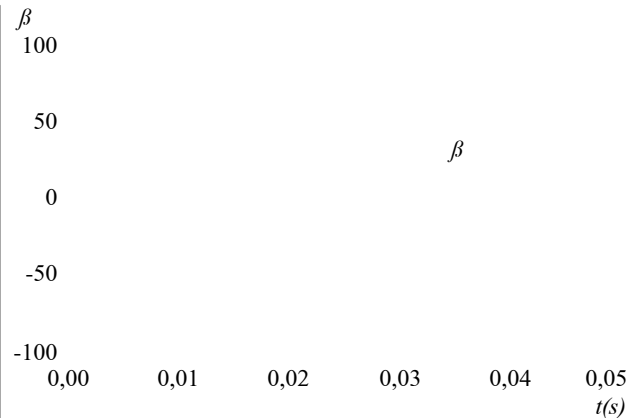
Slika 17. „Lažna struja” kvara kroz kućište trofaznog transformatora



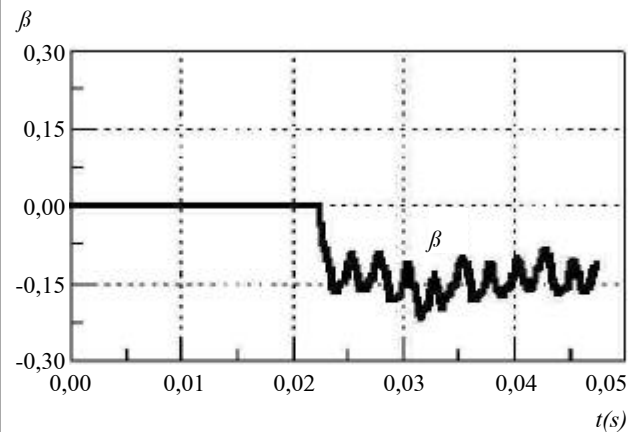
Slika 18. „Lažna struja” kvara kroz kućište monofaznog transformatora



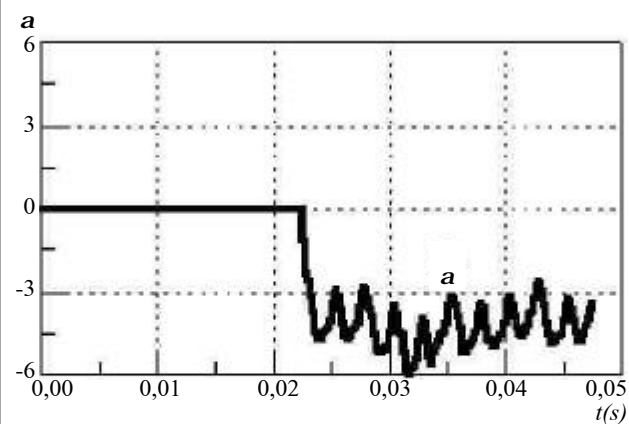
Slika 19. Estimirana vrijednost **a** za slučaj „lažne struje” kvara u kućištu trofaznog transformatora



Slika 20. Estimirana vrijednost β za slučaj „lažne struje” kvara u kućištu monofaznog transformatora



Slika 21. Estimirani parametar β koji „vidi” algoritam za sekundarni namotaj, pri „lažnoj struji” kvara u kućištu trofaznog transformatora



Slika 22. Estimirani parametar **a** koji „vidi” algoritam za primarni namotaj, pri „lažnoj struji” kvara u kućištu monofaznog transformatora

precizno određuje relativan položaj mjesta kvara kako na primarnom tako i na sekundarnom namotaju monofaznog energetskog transformatora.

3. ZAKLJUČAK

U ovom radu prezentirani su rezultati laboratorijskog testiranja digitalnog algoritma, opisanog u referenci [1], za detekciju unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva u monofaznim energetskim transformatorima. Eksperimentalni rezultati testiranja na primaru i sekundaru fizičkih modela, pri generisanju jednofaznih metalnih kratkih spojeva, pokazali su visoku tačnost algoritma i stabilnu konvergenciju.

Izloženi digitalni algoritam testiran je u vremenskom domenu. Selektivnost pri detekciji unutrašnjih jednofaznih kvarova potvrđuje njegovu originalnost i praktičnu primenljivost.

4. LITERATURA

- [1] V. Ilić, M. Đurić, A. Čukarić, ZEMLJOSPOJNA ZAŠTITA MONOFAZNIH TRANSFORMATORA BAZIRANA NA JEDNAČINAMA MAGNETOPOBUDNIH SILA, JUKO CIGRÉ, Banja Vrućica, 2003.
- [2] M. Đurić, TEHNIKA ZAŠTITE U ELEKTROENERGETICI, ETF, Beograd, 1997.

Rad je primljen u uredništvo 21. 07. 2004. godine



Veselin N. Ilić je rođen 25. 09. 1956. godine u Mojkovcu, Crna Gora. Srednju tehničku školu i Elektrotehnički fakultet završio je u Podgorici 1980. godine. Magistrirao je 1995. i doktorirao 2004. godine na Energetskom odsjeku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Od 1980. do 1985. godine radio je u Rudniku olova i cinka „Brskovo” u Mojkovcu, a potom sve do 1989. godine u Fabrici alu-čeličnih užadi u Kolašinu. Od 1989. godine pa do sada, zaposlen je u EPCG, „Elektroprenosu”, TS 220/110/35 kV/kV u Mojkovcu. Autor je više od 20 originalnih naučnih i stručnih radova objavljenih u domaćim i međunarodnim elektrotehničkim časopisima, savjetovanjima i konferencijama.



Milenko B. Đurić rođen je u Sarajevu 1948. godine. Elektrotehnički fakultet u Beogradu završio je 1973, gde je magistrirao 1977. i doktorirao 1985. godine. Redovni je profesor na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Bavi se relejnom zaštitom, elektroenergetskim postrojenjima, stabilnošću i regulacijom EES-a.



Aleksandar Čukarić rođen je 1958. godine u Prištini. Na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini diplomirao je 1983. godine. Magistrirao je 1994. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu i doktorirao na Fakultetu tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici 2002. godine. Radi na Fakultetu tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici u zvanju docenta. Autor i koautor je većeg broja naučnih i stručnih radova objavljenih u domaćim i međunarodnim časopisima i na konferencijama.

Ljubiša Nikolić,
Miodrag Korolija, Dragan Kovačević i Radoslav Brkić

Ispitivanja nesavršenosti magnetnih jezgara obrtnih mašina metodom male indukcije

Stručni rad
UDK: 621.313

Rezime:

U referatu se analiziraju metode za ispitivanje magnetnih jezgara obrtnih električnih mašina. Pored do sada često korišćene metode nazivne indukcije i praćenja porasta temperatura i pronalaženja lokalnih toplih mesta, opisana je metoda male indukcije koja se u svetu primenjuje poslednjih dvadesetak godina, a kod nas su je do sada primenjivale samo strane velike firme i to samo na nekoliko generatora u Elektropriredi Srbije. Posle razvoja mernog pretvarača i merne instrumentacije, kao i eksperimentalnih istraživanja u laboratoriji na modelu magnetnog jezgra generatora, izvršena su prva ispitivanja na realnom velikom magnetnom jezgru generatora. Rezultati i analize eksperimentalnih ispitivanja su dati u ovom radu. Stvoreni su uslovi da se metoda male indukcije uvede kao redovna dijagnostička procedura u sistem profilaktičkog ispitivanja električnih obrtnih mašina.

Ključne reči: obrtne mašine, magnetno kolo, mala indukcija, detekcija nesavršenosti

Abstract:

MAGNETIC CORE IMPERFECTION TESTING IN ROTATING MACHINERY BY LOW MAGNETIC INDUCTION METHOD

The magnetic core imperfection testing methods in rotating machinery are analyzed. The low magnetic induction method is described and electromagnetic transducer together with hardware and software instrumentation are developed. Both laboratory and on-site measurements are performed, and the results and analyses are outlined. The conditions and procedures for periodic diagnostic measurements of a magnetic core imperfection in rotating machinery by the low magnetic induction method are created.

Key words: rotating machinery, magnetic core, low induction, imperfection detection

1. UVOD

Pravovremena detekcija kratkih spojeva između susednih limova magnetnog jezgra statora, koji su već tople tačke u električnoj mašini ili su još uvek samo kratki spojevi sa velikom verovatnoćom da to tokom daljeg pogona mašine postanu, može da spre-

ći razvitak ozbiljnog kvara praćenog velikim direktnim i indirektnim troškovima [1], [2]. U teoriji i pri praktičnom izvođenju ispitivanja stanja kvaliteta magnetnih kola velikih obrtnih mašina (turbo generatora) primenjuju se dve osnovne metode koje se međusobno razlikuju, pre svega, po intenzitetu magnećenja i načinu detekcije nesavršenosti mag-

Ljubiša Nikolić, dipl. ing., Miodrag Korolija, dipl. ing., dr Dragan Kovačević, dipl. ing. i Radoslav Brkić, dipl. ing.
– Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” 11 000 Beograd, Koste Glavinica 8a

netnih kola za vreme ispitivanja: metoda nazivne indukcije i metoda male indukcije.

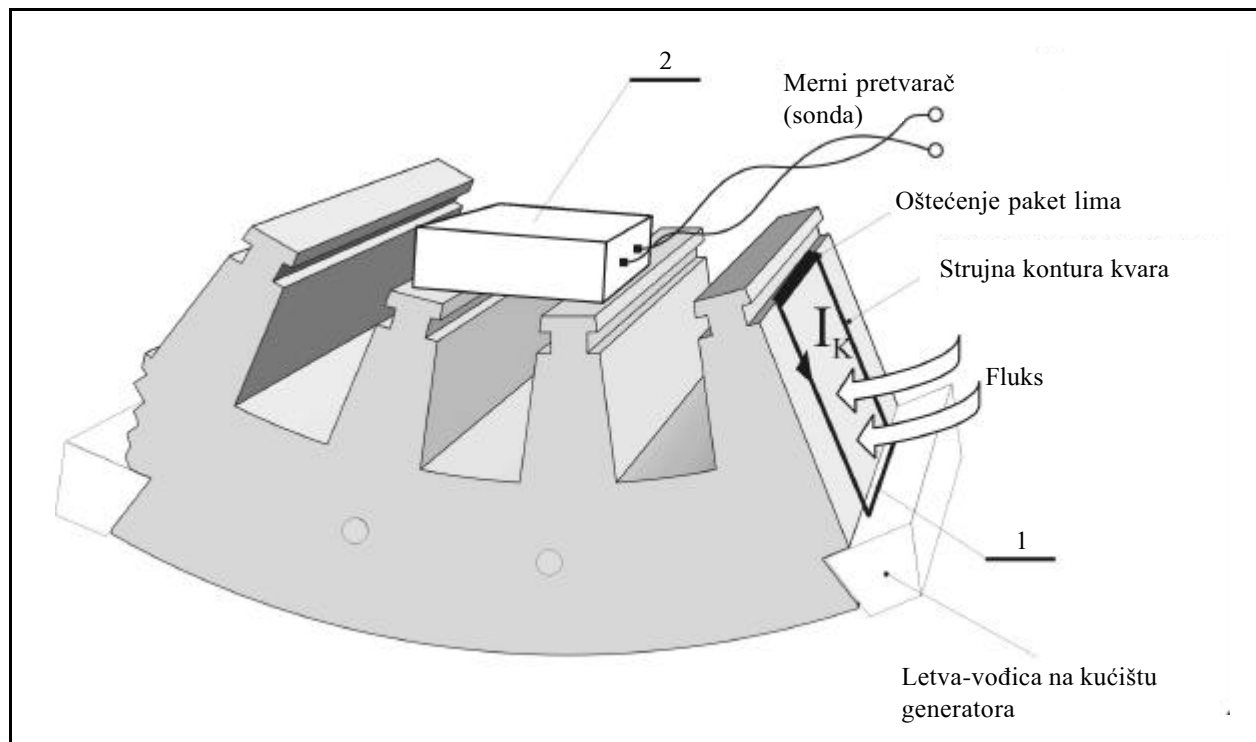
Magnetna jezgra statora obrtnih mašina se grade od silicijumom legiranih limova debljine 0,5 i vrlo retko 0,35 mm. Slojevi limova su najčešće po obimu jezgra segmentirani. Kod velikih turbogeneratora broj segmenata u jednom sloju ide i do dvanaest komada. Ti limovi su izolovani vrlo tankim slojem izolacije, uglavnom oko 25 μm , kako bi sprečili vrtložne struje koje se indukuju u njima. Tokom gradnje magnetnog kola se vrše presovanja pojedinih slojeva magnetnog kola, a po izgrađenom kompletnom magnetnom kolu se vrši završno presovanje i pritezanje magnetnog kola završnim potisnim pločama. Tokom tog postupka ne sme se oštetiti izolacija između limova, što treba potvrditi adekvatnim ispitivanjem. Nakon ubacivanja namotaja i njegovog učvršćenja-zaklinovanja ovo ispitivanje se ponavlja da bi se otklonila sumnja u eventualno povređivanje magnetnog jezgra za vreme procesa zaklinovanja. Tokom rada mašine u zavisnosti od konstrukcije, veličine i naponskog nivoa, između limova se indukuju određeni naponi, koji su u principu veći pri krajevima magnetnog kola zbog ivičnog efekta jezgra, segmentiranosti limova, kao i rasutih aksijalnih i radialnih flukseva, i koji su bezopasani za magnetno kolo sve dok se ne naruši dielektrik između limova. Po narušavanju ovog vrlo tankog dielektrika dolazi

do električnog spajanja susednih limova i formiranja strujne konture: mesto kvara, limovi i letva-vođica na kućištu mašine prema kojoj limovi imaju najčešće vrlo mali električni otpor od 20 do 2 000 $\text{m}\Omega$. U konturi se indukuje struja kvara I_k čija je veličina ograničena indukovanim naponom između limova, otporima limova, prelaznim otporima prema letvođici i otporom kvara. Struja I_k stvara fluks koji teži da poništi fluks koji ju je uzrokovao, i na taj način na mestu kvara deformiše normalnu raspodelu rasutog fluksa u zoni između zubaca odnosno u zoni žljebova statora. Šematski prikaz te pojave je dat na slici 1.

Struja kvara I_k u omskim otporima generiše toplotu i ukoliko sistem hlađenja nije u stanju da odvede tu toplotu, dolazi do širenja kvara, lokalnog pregrevanja, a u najgorem slučaju i do lokalnog topljenja limova na mestu kvara, odnosno do teške havarije mašine, takozvanog požara na gvožđu. Ovakve pojave, mada retke, ipak su se dešavale u realnim pogonima obrtnih mašina, a praćene su velikim direktnim i indirektnim troškovima.

2. METODE ISPITIVANJA MAGNETNOG KOLA

Kao što je već u uvodu rečeno danas se za kontrolu stanja kvaliteta magnetnih kola obrtnih mašina



Slika 1. Detekcija oštećenja magnetnog jezgra:
1-formiranje strujne konture kroz interlaminarni kratak spoj,
2-merna sonda za detekciju rasutog fluksa

koriste dve osnovne metode: metoda nazivne indukcije i metoda male indukcije. Obe metode će, u nastavku rada, biti opisane, pre svega, sa stanovišta praktičnih zahteva u pogledu angažovanja resursa (oprema, ispitivači, vreme) u toku ispitivanja.

2.1. Metoda nazivne indukcije

Metoda nazivne indukcije kod ispitivanja stanja magnetskog kola statora obrtne mašine zasniva se na magnećenju statorskog jezgra takvom indukcijom, koja što približnije odgovara radnim uslovima, a to je indukcija od 1 do 1,4 T. Vreme ispitivanja t je 90 minuta ukoliko je postignuta indukcija $B = 1$ T, a ukoliko se ispitivanje izvodi sa većim B onda se vreme ispitivanja skraćuje srazmerno kvadratu postignute indukcije po formuli $t = 90 * (1/B)^2$. Indukciju ispod 1 T ne bi trebalo primenjivati, jer se pri nižoj indukciji neće manifestovati sva mesta kvarova. U toku ispitivanja se prati temperatura magnetnog jezgra pomoću adekvatnih mernih uređaja, obično infracrvenom kamerom-termovizijom. U našoj praksi se dominantno koriste ruski kriterijumi: ukoliko se u toku ispitivanja ne pojave lokalna topla mesta čija je temperatura veća za 10 ° do 15 °C od ostalih delova magnetnog jezgra, pri čemu je maksimalna nadtemperatura zuba jezgra na kraju ispitivanja manja od 25 °C, magnetno jezgro se smatra ispravnim. Kod generatora savremenijih konstrukcija sami proizvođači često imaju i strožiji kriterijum od ovoga. Kod njih je obično maksimalno dozvoljena razlika temperatura pojedinih delova magnetnog jezgra oko 5 °C.

Magnećenje paket lima statora visokom indukcijom je povezano sa velikom snagom izvora. Idealno bi bilo da je to izvor sa regulisanim izlaznim naponom, ali kako se u praksi takav izvor može vrlo teško naći, onda se uobičajeno koriste izvori standardnih vrednosti niskog, a češće visokog napona bez regulacije. Primarni namotaj za pobuđivanje magnetnog kola se obrazuje namotavanjem jednožilnog kabla potrebnog poprečnog preseka i odgovarajućeg naponskog nivoa. *Kontrolni namotaj, najčešće izveden kao jedan zavojak proizvoljnog poprečnog preseka i odgovarajuće izolovanosti, obično postavljen pod pravim uglom u odnosu na primarni, služi da bi se iz tog indukovano napona preračunala tačna indukcija.* Ovakva šema iziskuje znatne materijalne troškove (visokonaponski jednožilni kabl dovoljne dužine za formiranje potrebnog broja navojaka i napajanje iz visokonaponskog izvora: u termoelektranama obično sa nekog od izvoda sa sabirnica sopstvene potrošnje, a u hidroelektranama obično sa susednog generatora, zatim izolacioni komadi koji se moraju postaviti po generatoru kako bi se bezbedno formirao pobudni namotaj, termovizijska kamera,...), kao i vreme za for-

miranje same šeme i po završenom ispitivanju, za njeno uklanjanje. Ujedno rad sa visokim naponom u realnim pogonskim uslovima zahteva ekipu vrlo dobro obučених ispitivača, kako bi se eventualni rizik koji nosi ovakvo ispitivanje, sveo na prihvatljivo nivo.

Opisana metoda ima i određena tehnička ograničenja. Topla mesta mogu biti detektovana samo tamo gde su vidljiva. To znači da je deo statora preko koga je postavljen pobudni namotaj nevidljiv za ovu metodu. Kod statorskih jezgara kod kojih je uložen statorski namotaj, stranice i dno žljebova se ne mogu kvalitetno kontrolisati, a to su najopasnija i najčešća mesta kvarova. Ujedno i kratki spojevi između limova uzrokovani narušavanjem izolacije između susednih limova ne mogu se detektovati ovom metodom ako stepen oštećenja nije takvog obima da se na njemu već razvija tolika temperatura koju metoda može registrovati. Interlaminarni spojevi u dubini magnetskog jezgra statora kao i početni interlaminarni spojevi na površini koji još uvek ne stvaraju tople tačke, ostaju kao neotkrivena potencijalna mesta za razvoj novih kvarova.

2.2. Metoda male indukcije

Metoda male indukcije se zasniva na detekciji rasutog fluksa prouzrokovanog strujama kroz kratke spojeve između limova, i ona je, ako ne potpuna zamena metodi nazivnog fluksa, ono bar metoda koja otklanja nedostatke prethodne metode [4],[5]. Ispitivanje se obavlja pri namagnećenom statorskom jezgru indukcijom reda 0,1 T. Za tako malu indukciju koristi se standardno izvor sa regulisanim naponom do 250 V, 50 Hz, 20 A koji je dovoljan i za najveće generatore. Pobudni namotaj se formira od nekoliko zavojaka izolovanim provodnikom do 10 mm², što omogućava vrlo brzo i ekonomično magnetno pobuđivanje paket lima statora. Detekcioni kalem se aksijalno prevlači duž jezgra, tako da uvek premošćuje dva zuba statora. Šematski prikaz je dat na slici 2. Brzina prevlačenja detekcionog kalema je, pored mehaničkih uslova, ograničena i mogućnostima merne opreme da izvrši kvalitetnu akviziciju mernih podataka.

Merenjem rasutog fluksa duž svih žljebova statora, preko amplitude i faznog stava signala na detekcionom namotaju, dobija se detaljna mapa rasutog fluksa u zoni statorskih žljebova, koja se pogodnim sistemom za akviziciju trajno memoriše. Na taj način se lokalizuju mesta sa interlaminarnim spojevima. Ova metoda obezbeđuje visoku ponovljivost pri merenju amplituda pri sličnim indukcijama i potpunu nezavisnost od intenziteta ostvarene indukcije pri merenju faznog ugla detekcionog signala. Dobijeni merni rezultati za određenu mašinu su jedin-

stveni i predstavljaju njen „*otisak prsta*” što za dalje preventivne kontrole predstavlja sigurnu referencu na koju se može osloniti i utvrditi svaka sledeća promena na statorskom jezgru mašine.

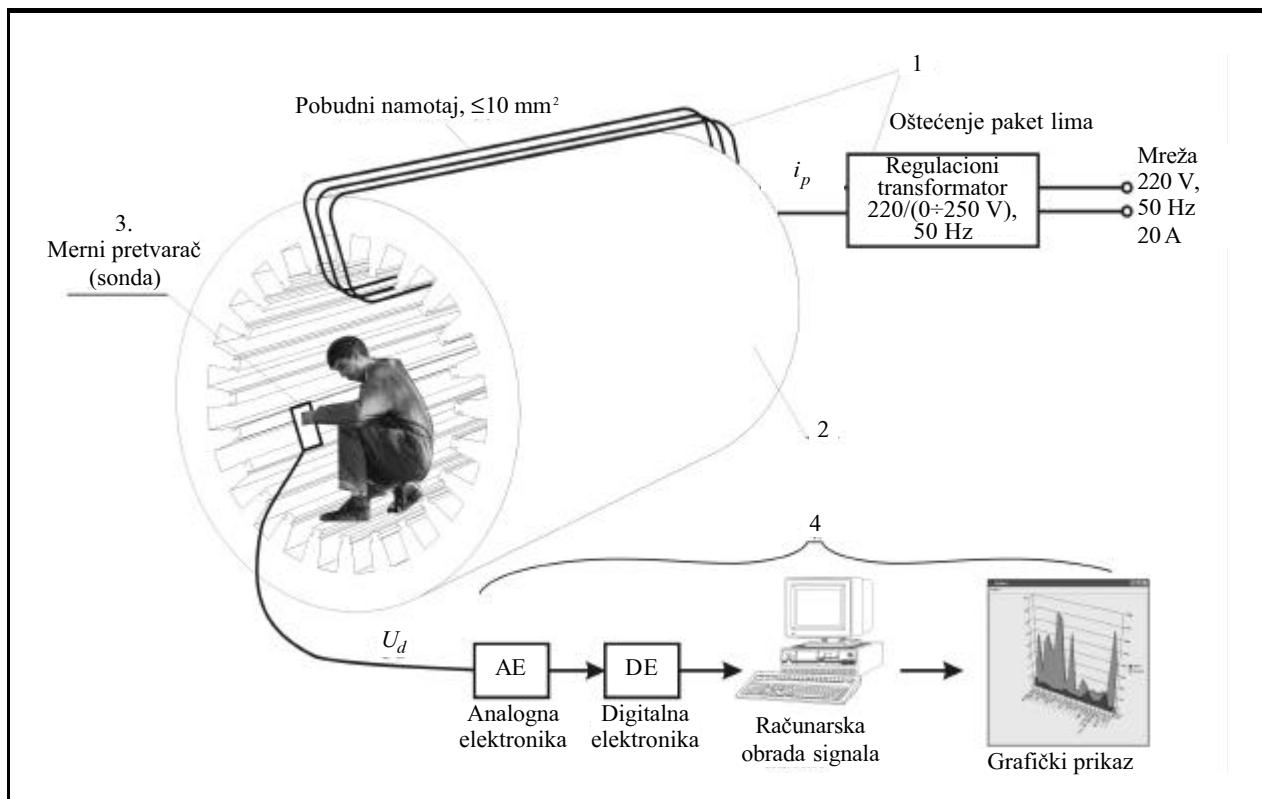
Popravke na oštećenim mestima, u zavisnosti od rizika koji nose, mogu biti izvedene odmah ili u vreme nekog od sledećih zastoja, odnosno remonata u vreme stabilnog energetskog stanja. Mesta interlaminarnih kratkih spojeva se prilikom popravke tretiraju mehaničkim struganjem, brušenjem ili ljuštenjem već prema vrsti oštećenja. Metalna prašina i delići se odmah odstranjuju iz unutrašnjosti generatora. Zatim se mesto reparacije tretira hemijskim putem da bi se izolovanost limova ostvarila kroz proces oksidacije, pa onda opet hemijski da se prethodni proces oksidacije zaustavi. Na kraju se vrši lokalna provera kvaliteta izvedenih radova vrlo lako i brzo metodom male indukcije. Ukoliko reparacija nije uspela postupak se ponavlja do dostizanja zadovoljavajućeg stanja.

3. RAZVOJ MERNE METODE I INSTRUMENTACIJE

Metoda male indukcije zasniva se na pobuđivanju magnetnog kola obrtne mašine indukcijom reda 10 % nazivne indukcije i merenju odgovarajućih

odziva pomoću elektromagnetnog pretvarača (sonde). Na slici 2 dat je prikaz merne metode sa koje se vidi da su osnovni elementi merne šeme: 1 - pobuda jezgra; 2 - ispitivano magnetno kolo; 3 - senzorski sistem; 4 - deo za obradu signala. Sa slike se uočava da merna metoda podrazumeva integraciju znanja i tehnologija iz više oblasti elektrotehnike: energetika (ispitivani objekat, deo za pobuđivanje magnetnog kola); elektronika (analogna i digitalna); metrologija (senzorski sistem i kalibracija); računarske tehnologije (hardver i softver).

Detektovani napon sa elektromagnetnog senzora, $u_d = U_d \mathbf{j}$, gde su U_d i \mathbf{j} intenzitet i fazni stav, respektivno, nosi u sebi informaciju o stanju magnetnog jezgra. Intenzitet detektovanog napona je mera nesavršenosti magnetnog jezgra, ali je veoma osetljiv na položaj merne sonde (rastojanje od magnetnog kola), dok je fazni stav detektovanog napona znatno manje osetljiv na promenu položaja merne sonde. Za potrebe ispitivanja velikih obrtnih mašina senzorski sistem se realizuje kao višesenzorski mobilni sklop [6]. Deo za obradu detektovanog signala sastoji se od analognog (AE) i digitalnog elektronskog sklopa (DE). Digitalizovani signali se uvode u računar, gde se obrađuju pomoću namenski razvijenog aplikativnog softvera. Nivo softverske obrade signala se realizuje u tri nivoa:



Slika 2. Razvoj merne metode: Dispozicija merne instrumentacije na ispitivanom magnetnom kolu i osnovni elementi merne šeme - 1) pobuda jezgra; 2) ispitivani objekat; 3) senzorski sistem; 4) elektronska obrada signala

BN - bazni nivo, za brzu detekciju prisustva interlaminarnih spojeva i snimanje „otiska prsta” mašine;

NN - napredni nivo, za detaljan uvid na mestima gde su detektovane potencijalne nesavršenosti;

EN - ekspertski nivo, koji obuhvata BN, NN, bazu podataka i ekspertski sistem.

Izloženi koncept je realizovan u laboratorijama Instituta „Nikola Tesla”, a proveren je kako u laboratorijskim uslovima, tako i u realnom pogonu na oštećenom turbogeneratoru koji je van upotrebe (EPS-TENT, turbogenerator 410 MVA). Dobijeni rezultati prikazani su u poglavlju koje sledi.

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U eksperimentalne svrhe je u Institutu „Nikola Tesla” projektovana sonda za detekciju i realizovan meri sistem u skladu sa blok šemom datoj na slici 2. Na improvizovanom modelu magnetnog jezgra, u laboratorijskim uslovima, obavljena su merenja na simuliranim kvarovima različitih intenziteta i lokacija (po površini i dubini). Laboratorijska istraživanja potvrdila su opravdanost usvojenog koncepta pa je i na realnom objektu magnetnog kola statora turbogeneratora, snage 410 MVA, već ranije oštećenom, izvršeno kontrolno merenje indukovano napona u detekcionom kalemu

uzrokovano rasutim fluksom između zubaca paketa lima, odnosno u zoni iznad žljebova statorskog namotaja. Ispitivano magnetno kolo je već pretrpelo teško oštećenje topljenjem limova u dnu jednog žljeba, a u dužini oko 1,5 m. Izvršeno je magnećenje magnetnog jezgra pobudnim namotajem formiranim od 16 zavoja-ka izolovanog provodnika preseka 4 mm², napajanim iz regulacionog transformatora sa 250 V i strujom od 3,5 A. Merenje i akvizicija indukovanih napona u detekcionom namotaju uzrokovano rasutim fluksom između susednih zuba duž žljebova u pojedinačnim mernim tačkama raspoređenim na oko pola metra po dužini magnetnog kola obavljeno je mernim sistemom opisanim u prethodnom poglavlju. Dobijene merene vrednosti prikazane su u tabeli 1 i grafički na slici 3.

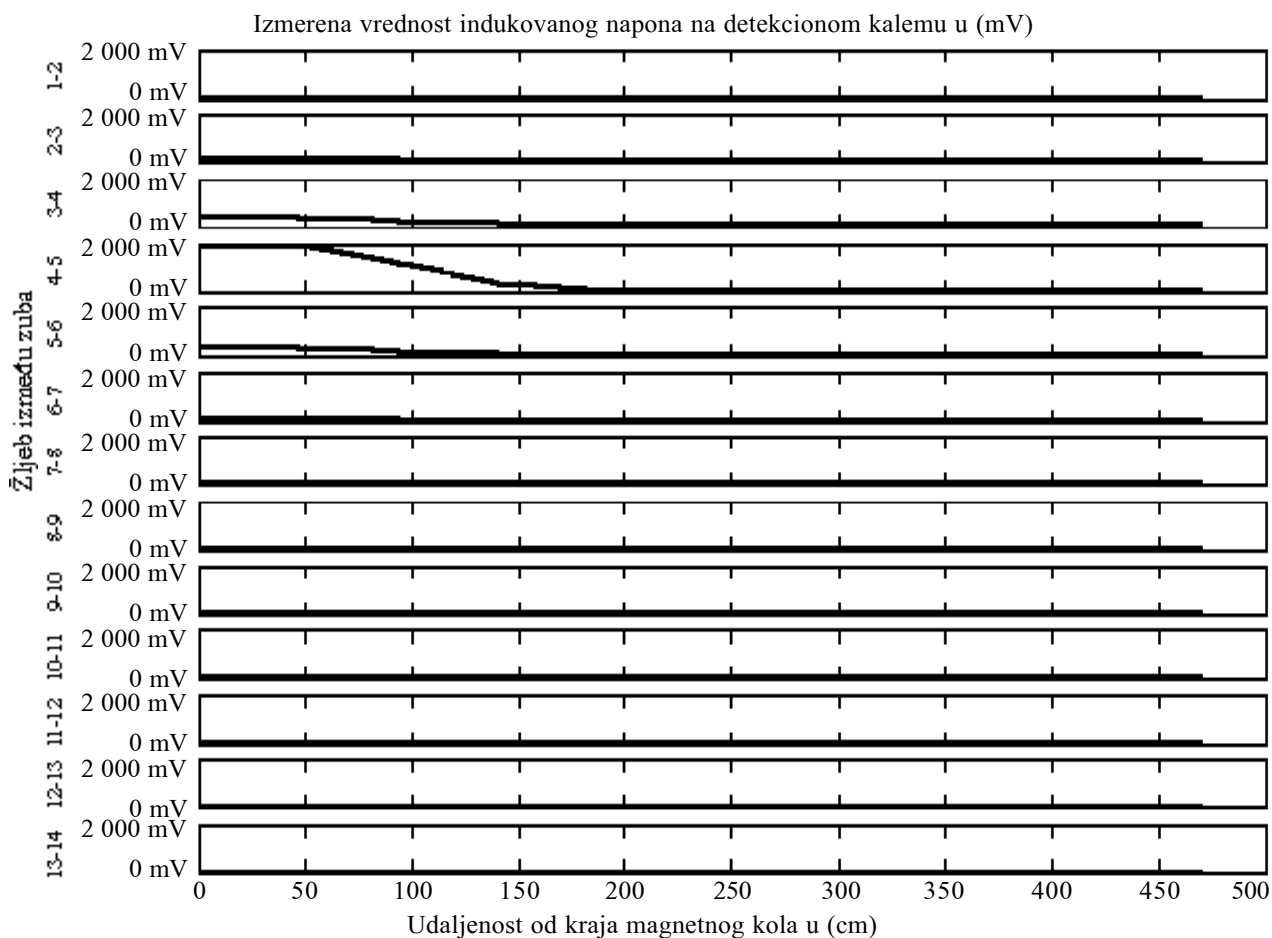
Iz table 1 i slike 3 se jasno vidi da su merene vrednosti u žljebu između zuba 4 i 5 (a to je žljeb sa oštećenjem u čijem se dnu vidi da se paket lim topio) u zoni kvara za oko 40 puta veće od merenih vrednosti u ostalom, odnosno zdravom delu magnetnog kola. Rezultati potvrđuju veliku osetljivost i dobru selektivnost primenjene metode i realizovane instrumentacije.

Zatim je, na istom magnetnom kolu, simuliran jedan kvar malog intenziteta spajanjem limova na zubu broj 5 u zoni klina, a sa strane prema zubu broj 4, u dužini od 5 cm. Dobijeni rezultati dati su u tabeli 2 i grafički prikazani slikom 4.

Tabela 1.

Rezultati ispitivanja na havarisanom turbogeneratoru, 410 MVA
- postojeći kvar-

Žljeb između zuba	Izmerena vrednost indukovano napona na detekcionom kalemu u mV, a u mernim tačkama na određenoj udaljenosti od kraja magnetnog kola										
	0 cm	47 cm	94 cm	141 cm	188 cm	235 cm	282 cm	329 cm	376 cm	423 cm	470 cm
1-2	32	34	37	48	50	50	49	49	50	51	46
2-3	65	75	66	51	50	50	50	51	50	51	48
3-4	365	360	240	85	52	51	50	50	51	50	50
4-5	1 820	1 900	1 130	324	50	50	50	50	50	50	47
5-6	340	363	235	97	52	50	52	53	51	51	49
6-7	76	92	72	54	52	50	51	50	52	51	50
7-8	40	43	45	51	52	50	51	52	51	52	48
8-9	28	30	41	51	51	49	50	52	53	51	48
9-10	22	24	40	50	51	50	50	52	50	50	49
10-11	21	21	28	49	51	49	51	52	50	51	47
11-12	19	21	30	49	51	50	52	52	51	52	49
12-13	18	20	36	54	53	52	52	53	52	51	49
13-14	18	21	35	50	52	51	52	53	52	51	49



Slika 3. Rezultati ispitivanja na havarisanom turbogeneratoru, 410 MVA - postojeći kvar-

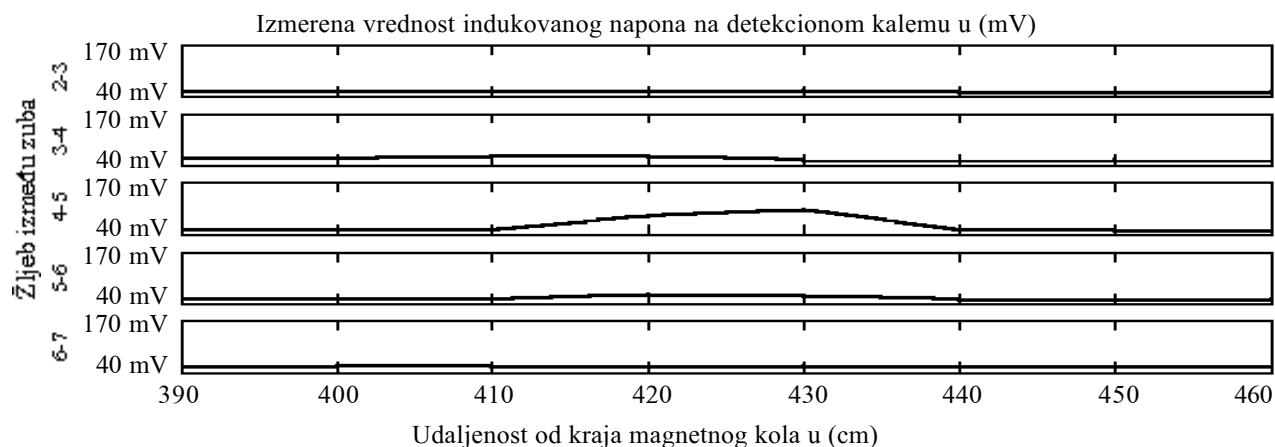
Sa slike 3 se vrlo jasno uočava zona kvara tj. mesta kratko spojenih limova, a sve to se još bolje vidi sa povećanim brojem merenja (povećanje rezolucije) u oštećenju zoni. Te merene vrednosti su date u tabeli 3. Očigledno je da su merene vrednosti u zoni simuliranog kvara 3,3 puta veće od vrednosti na zdravom, neoštećenom, delu magnetnog kola.

Eksperimentalna istraživanja pokazuju da primenjena metoda i realizovana instrumentacija imaju veliku osetljivost (odnos signala oštećenog i neoštećenog magnetnog jezgra je reda sto puta, videti sliku 3), izuzetno dobru selektivnost i dobru rezoluciju u lociranju mesta i veličine interlaminarnih spojeva magnetnih limova (uporediti slike 3, 4 i 5).

Tabela 2.

Rezultati ispitivanja na havarisanom turbogeneratoru, 410 MVA - simulirani kvar-

Žljeb između zuba	Izmerena vrednost indukovanog napona na detekcionom kalem u mV, a u mernim tačkama na određenoj udaljenosti od kraja magnetnog kola							
	390 cm	400 cm	410 cm	420 cm	430 cm	440 cm	450 cm	460 cm
2-3	50	50	50	50	53	51	49	50
3-4	53	53	59	59	52	49	52	49
4-5	50	51	50	84	100	52	51	49
5-6	51	51	51	62	60	52	49	50
6-7	52	54	54	51	53	52	51	52

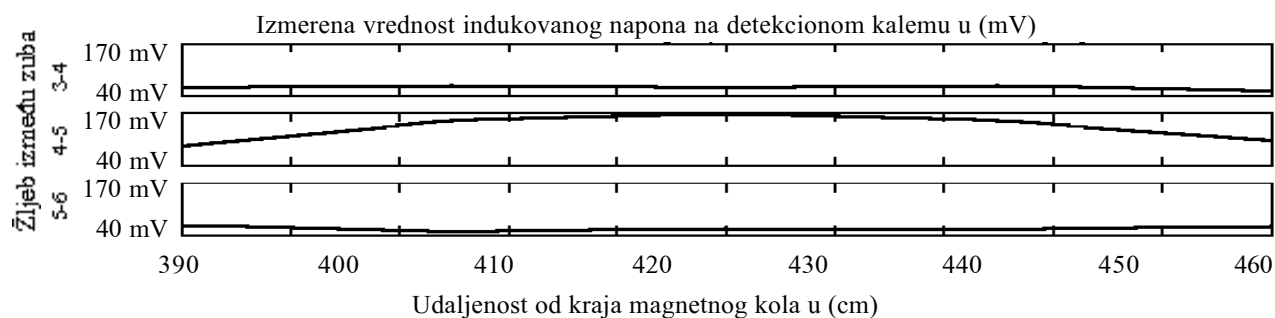


Slika 4. Rezultati ispitivanja na havarisanom turbogeneratoru, 410 MVA - simulirani kvar-

Tabela 3.

Rezultati ispitivanja na havarisanom turbogeneratoru, 410 MVA - simulirani kvar, povećanje rezolucije-

Žljeb između zuba	Izmerena vrednost indukovano napona na detekcionom kalem u mV, a u mernim tačkama na određenoj udaljenosti od kraja magnetnog kola				
	420,0 cm	422,5 cm	425,0 cm	427,5 cm	430,0 cm
3-4	59	64	61	64	52
4-5	84	150	167	150	100
5-6	62	47	56	51	60



Slika 5. Rezultati ispitivanja na havarisanom turbogeneratoru, 410 MVA - simulirani kvar, povećanje rezolucije-

5. ZAKLJUČAK

Pravovremena detekcija kratkih spojeva između susednih limova magnetnog jezgra statora, koji su već, ili se tek spremaju da postanu tople tačke u električnoj mašini, može da spreči razvitak ozbiljnog kvara praćenog velikim direktnim i indirektnim troškovima. Metoda male indukcije je bazirana na merenju rasutog fluksa, najčešće kao alternativa metodi nazivnog fluksa, koja nije samo mnogo jeftinija i brža, već obezbeđuje i mnogo bolji uvid u stanje paket lima. Ona detektuje sve interlaminarne kratke spojeve, uključujući i one koji još uvek ne predstavljaju topla mesta, ali koji se u njih mogu vrlo brzo razviti. Ovdje su uključena i sva za termovizijsku kameru nevidljiva mesta unutar paket lima. Dijagno-

za, po metodi male indukcije, da nema interlaminarnih kratkih spojeva između susednih limova, garantuje da nema ni toplih mesta u jezgru statora. Dijagnoza po metodi nazivne indukcije, da nema toplih mesta, garantuje da njih nema po površini zubaca koji su vidni oku kamere i u blizini tih površina, dok eventualna topla mesta u unutrašnjosti paket lima mogu da ostanu skrivena kao i sva ostala mesta kratkih spojeva između limova kao potencijalna mesta budućih novih toplih tačaka.

Eksperimentalna istraživanja pokazuju da primenjena metoda i realizovana instrumentacija imaju veliku osetljivost (odnos signala oštećenog i neoštećenog magnetnog jezgra je reda sto puta, videti sliku 3), izuzetno dobru selektivnost i dobru rezolu-

ciju u lociranju mesta i veličine interlaminarnih spojeva magnetnih limova (uporediti slike 3, 4 i 5).

Opisane dve metode ne isključuju jedna drugu, već ih treba posmatrati kao komplementarne. Prirodan redosled ispitivanja paketa lima statora, koji se nameće na osnovu izloženih eksperimentalnih istraživanja, je da se prvo obavi ispitivanje metodom male indukcije. Ako ta metoda da zadovoljavajuće rezultate, ispitivanje je završeno na brz, jednostavan i jeftin način. Ako je ispitivanje dalo nezadovoljavajuće rezultate, onda treba analizirati ima li potrebe primeniti i metodu nazivne indukcije da bi se utvrdilo jesu li interlaminarni spojevi, ako su vidljivi termovizijskom kamerom, stvarno i topla mesta i realna opasnost za mašinu. Ako se zaključi da treba vršiti reparaciju interlaminarnih spojeva, koji su realna opasnost za mašinu, nakon reparacije mesta kvara se vrlo lako i brzo, metodom niske indukcije, može utvrditi kvalitet popravke.

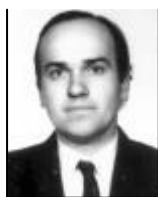
U svrhu praćenja promena stanja magnetnih jezgara generatora EPS-a, potrebno je za sve mašine EPS-a izvršiti ispitivanja metodom male indukcije i na taj način dobiti „otisak prsta” magnetnog jezgra svake mašine odnosno referencu za kasnije praćenje promena u magnetnim jezgrima generatora EPS-a.

Metodu male indukcije, koja je u svetu već odavno standardizovana, valjalo bi i kod nas ozvaničiti, možda novom preporukom EPS-a za obrtne mašine.

6. LITERATURA

- [1] IEC Technical Specification TS 60034-23, first edition, 2003-02.
- [2] Hazan S.I. „Turbogeneratori-Povređenija i remont”, Energoatomizdat, Moskva, 1983.
- [3] Senčanić M., Mihajlović M., Spasojević S., Božović Z. „Primena termovizije u ispitivanju statorskih paketa limova generatora” JU CIGRE, rad 11.21, Struga, 1985.
- [4] Zlatimir Posedel, E.Nodwell, I. Kirchoff, P.Bruhlmeir „Inspection and Repair of Interlamination Short-Circuits: The DIRIS Lamination Inspection System”, ABB Power Generation, 1998.
- [5] D.B. Paley, „Current low power core testing using ELCID”, IEE Colloquium, April, 1999.
- [6] Bernhard Mark, „Practical experiences with robotic inspection and measurement tools and their impact on maintenance strategies”, POWER GEN EUROPE 2003, Dueseldorf, Germany, 2003.

Rad je primljen u uredništvo 02. 09. 2004. godine



Ljubiša P. Nikolić (1956) je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1981. godine. Od 1983. do 1995. godine radio je u Termoelektrani „Nikola Tesla” – A u Obrenovcu na poslovima održavanja elektroenergetskih postrojenja. Od 1995. godine radi u Elektrotehničkom Institutu „Nikola Tesla” u Beogradu u Centru za Elektromerenja na poslovima ispitivanja karakteristika elektroizolacionih sistema generatora, visokonaponskih motora, energetskih i mernih transformatora. Oblast interesovanja je dijagnostika kvarova na elektroenergetskim objektima.



Miodrag Korolija rođen je 15. 09. 1943. godine u Beogradu, gde je završio Elektrotehnički fakultet, Energetski osek. Vojni rok je služio 1967. godine posle čega se zaposlio u Elektrotehničkom Institutu „Nikola Tesla”. Bavio se električnim merenjima i energetskom elektronikom. Konstruisao veći broj uređaja iz tih oblasti.



Dragan S. Kovačević je rođen u Užicu 1957. godine. Elektrotehnički fakultet u Beogradu završio je 1982. godine, gde je magistrirao 1989. godine, a doktorirao je 1999. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu. Sa naučnim zvanjem viši naučni saradnik radi u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” na poslovima direktora Centra Elektromerenja. Bavi se preciznim merenjima električnih, neelektričnih i magnetskih veličina.



Radoslav Brkić, visoka stručna sprema – završen Elektrotehnički fakultet u Beogradu, smer elektroenergetika. Zaposlen u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”, Beograd već oko 40 godina, na poslovima merenja električnih veličina i ispitivanja proizvoda za elektrotehničke svrhe. Najviše vremena proveo je na poslovima ispitivanja generatora i transformatora, a zatim sredstvima za zaštitu od statičkog elektriciteta. Saradivao je u JEK-u, CIGRE-u, JZS-u, a u CIGRE-u bio i predsednik SK-15 „Izolacioni materijali”. Na ETF-u, katedri za električna merenja proveo 4 godine kao honorarni asistent. U toku radnog veka samostalno ili kao koautor radio na izradi studija, elaborata, analiza i stručnih mišljenja, uvođenja i unapređenja sistema kvaliteta.

Jedna metoda upravljanja tokovima snaga pomoću statičkih transformatora za regulaciju ugla

Prethodno saopštenje
UDK: 621.05

Rezime:

U radu se izlaže jedna efikasna brza dekuplovana metoda za upravljanje tokovima snaga, odnosno metoda za automatsko podešenje statičkih transformatora za regulaciju ugla za zadate iznose tokova snaga na izabranim dalekovodima. Efekti ovih transformatora su predstavljeni preko injekcionog modela, uz odgovarajuće proširenje konvencionalnog modela tokova snaga. Osim toga, upravljanje tokovima snaga pomoću ovih transformatora modelovano je odgovarajućim dodatnim jednačinama. Za rešavanje tako formiranog modela upravljanja snagama, razvijena je specijalna brza dekuplovana procedura. Visoka numerička efikasnost i jednostavnost razvijene procedure utvrđena je na primeru realne interkonekcije koju sačinjavaju elektroenergetski sistemi Srbije i Crne Gore, Rumunije, Bugarske, Makedonije, Grčke i Albanije (Druga UCTE sinhrona zona).

Ključne reči: statički transformator, regulacija ugla, FACTS, upravljanje snagama, metoda, Druga UCTE sinhrona zona

Abstract:

A POWER FLOW CONTROL METHOD BY USE OF STATIC PHASE SHIFTING TRANSFORMERS

This paper presents an efficient fast decoupled power flow control method, e.g. method for automatic adjustment of static phase shifting transformers (SPST) for specified line flows. The effects of a SPST are represented by injection model and the corresponding extension of conventional load flow equations is made. Furthermore, the load flow control by means of PST is modeled by corresponding additional equations. For solution of the power flow control problem defined, the special fast decoupled procedure is developed. The high numerical efficiency and simplicity of this procedure has been established on the example of real interconnection formed by the power system of Serbia and Montenegro, Romania, Bulgaria, Macedonia, Greece and Albania (Second UCTE synchronous zone)

Key words: phase shifting transformer, FACTS, power flow control, method, Second UCTE synchronous zone

1. UVOD

Kao što je poznato širokoj stručnoj javnosti, elektronski, tiristorski upravljani statički transfor-

matori za regulaciju ugla (SPST - Static Phase Shifting Transformer) pripadaju širokoj familiji savremenih dostignuća energetske elektronike, za koju postoji već ustaljeni termin - FACTS (Flexible Al-

Prof. dr Dragan P. Popović, naučni savetnik instituta – „Nikola Tesla” 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a,
e-mail: dpopovic@ieent.org

ternating Current Transmission Systems) kontroleri [1,2]. Dakle, akronim FACTS podrazumeva široki krug posebno koncipiranih kontrolera, koji su u osnovi namenjeni povećanju fleksibilnosti funkcionisanja i upravljanja elektroenergetskih sistema (EES-a), kroz upravljanje osnovnim veličinama koje karakterišu prenos električne snage i energije nazimničnom strujom: uglovima, modulima napona i impedansama.

Nesumnjiva atraktivnost, široke mogućnosti i izazovi koje pružaju FACTS kontroleri, a koji se i dalje intenzivno razvijaju i usavršavaju, uticali su na veliko interesovanje i stručnjaka iz elektroprivreda. U prvom redu, u pogledu utvrđivanja realnih mogućnosti dometa i efekata njihove neposredne praktične primene, u kontekstu skoro svih segmenata planiranja, pogona i upravljanja EES-a (tokovi snaga i naponske prilike, statička sigurnost, ekonomski dispečing, odnosno optimizacija pogona, statička i tranzijentna stabilnost, odnosno prigušenje oscilacija i dr.).

Poslednjih godina, procesi liberalizacije tržišta električne energije i konsekvantno tome, restrukturiranje elektroprivrednih kompanija (kao jednom od najznačajnijih, a reklo bi se i najsloženijih i najdelikatnijih segmenata procesa reformi energetskog sektora) uneli su veoma širok spektar novih metodoloških i praktičnih aspekata, a naročito u pogledu novih zahteva i izazova u planiranju, eksploataciji i upravljanju, sada ne samo pojedinih elektroenergetskih sistema, već i elektroenergetskih interkonekcija u kojima se oni nalaze. U pomenutim procesima liberalizacije tržišta električne energije, problematika sigurnosti, odnosno pitanje utvrđivanja graničnih prenosnih kapaciteta u okviru realnih interkonekcija [3,4], kao i pitanja upravljanja zagušenjima (congestion management) [5,6], dobijaju prvorazredni praktični značaj. Tako, na primer, u dokumentu [7], koji se odnosi na evropsku praksu, u cilju povećanja prenosnih kapaciteta na kritičnim deonicama, odnosno u cilju eliminacije „zagušenja”, preporučuje se upotreba ovih serijskih FACTS kontrolera, kao tzv. „soft measures”, koja ne zahteva značajnije investicije.

Ovaj rad bavi se statičkim transformatorima za regulaciju ugla. Oni pripadaju kategoriji tzv. serijskih FACTS kontrolera tokova snaga, jer imaju mogućnost da upravljaju tokovima snaga (i to, neposredno, tokovima aktivnih snaga). Pri tome, praktično se ne menjaju uspostavljeni „vozni redovi” izvora (sem minimalnih promena, koje su uslovljene razlikama u gubicima aktivnih snaga, nastalih usled promena tokova snaga), kao i postojeća topologija električne mreže.

U prošlosti razvijen je niz procedura za podešenje ugla regulacije SPST, odnosno procedura za

utvrđivanje njihovih efekata. Priložene u ovom radu reference [8–13] su samo manji deo stvarno velikog skupa objavljenih radova iz ove oblasti.

Naravno, moglo bi da se postavi pitanje, koje je već bilo postavljeno u radu [14], zašto se ovi *FACTS kontroleri tretiraju u radovima domaćih autora, kad njih nema u EES Srbije i njegovom neposrednom okruženju?* To je tačno, za sada ih nema. Ali pitanje je šta će biti u budućnosti, kada bude formirano Regionalno tržište električne energije (REM) u jugoistočnoj Evropi, a pogotovu kada ono intenzivno „proradi” (proces koji je započet potpisivanjem Deklaracije o namerama [15] i Memoranduma o razumevanju [16]).

Takođe, nije isključeno da će se, u uslovima povezivanja Druge UCTE sinhronne zone sa glavnim delom interkonekcije UCTE i njenim širenjem na Istok i pojavi većih tranzita snaga u dužem vremenskom trajanju, pokazati tehnoeconomski opravdanost ugradnje ovih kontrolera na najpogodnijim lokacijama. Pri tome će se svakako respektovati do sada stečena pozitivna iskustva Evrope u primeni ovih kontrolera, apostrofirana u referenci [7].

U ovom radu daje se razvoj i praktična primena jedne metode za upravljanje tokovima snaga, odnosno metode za automatsko podešenje ugla regulacije SPST, za unapred zadate tokove aktivnih snaga na izabranim dalekovodima. Pri tome, efekti SPST se predstavljaju preko odgovarajućeg injekcionog modela, uz respektovanje i konduktansi elementa (dalekovoda) na kojima je on priključen [14,17].

Za rešavanje formiranog modela upravljanja tokovima snaga razvijena je jedna jednostavna, brza i pouzdana metoda, sa razdvajanjem varijabli tokom pojedine iteracije. Ta jednostavnost direktno je proizšla iz sačuvane simetričnosti matrice admitansi, što je omogućilo i simetričnost odgovarajućih submatrica koeficijenata. Takođe, jednostavnost i brzina rešavanja proizilaze iz činjenice da elementi submatrica koeficijenata imaju konstantne vrednosti, za nepromenjenu topologiju, a što nije ugrozilo željenu efikasnost. Pomenute karakteristike razvijene metode utvrđivane su na primeru postojeće elektroenergetske interkonekcije na prostorima Balkana, odnosno na primeru Druge UCTE sinhronne zone.

2. LISTA UPOTREBLJENIH OZNAKA

N – ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih čvorova EES-a

NG – ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatorskih čvorova

NL – ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih „neproizvodnih” čvorova ($NL = N - NG$)

NC – oznaka skupa čvorova EES-a na kojima su priključeni statički transformatori za regulaciju ugla (tzv. serijski FACTS kontroleri tokova snaga), modelovanih preko odgovarajućih injektiranih snaga

NCU – ukupan broj kontrolera, odnosno statičkih transformatora za regulaciju ugla ($NCU = NC/2$)

NCL – ukupan broj, odnosno oznaka skupa dalekovoda na kojima se upravljaju tokovi aktivnih snaga

t – $te^{j\mathbf{f}}$ kompleksni prenosni odnos statičkog transformatora za regulaciju ugla (SPST)

t – moduo kompleksnog prenosnog odnosa ($t=1/\cos \mathbf{f}$)

\mathbf{f} – ugao regulacije transformatora za regulaciju ugla

g_{km}, b_{km} – konduktansa i susceptansa elemenata „ $k-m$ ”

g_{ij}, b_{ij} – konduktansa i susceptansa elemenata „ $i-j$ ”

X_{km} – reaktansa elementa „ $k-m$ ”

\mathbf{q}_{km} – razlika uglova fazora napona na početku i kraju elemenata „ $k-m$ ”

\mathbf{q}_j – razlika uglova fazora napona na početku i kraju elemenata „ $i-j$ ”

P_{ci}^{SP} – zadati iznos toka aktivne snage ($i \in NCL$)

P_{ckm} – aktuelna vrednost toka snage na elementu (dalekovodu) „ $k-m$ ” ($k, m \in NC$)

P_{Gi}, Q_{Gi} – aktivna i reaktivna snaga generatora

$P_L(V_i), Q_L(V_i)$ – aktivna i reaktivna snaga potrošača kao složena nelinearna funkcija od napona

P_i, Q_i – aktivna i reaktivna snaga injeckiranja

k, l – subiteracioni indeksi.

3. FORMULACIJA METODE ZA UPRAVLJANJE TOKOVIMA SNAGA

3.1. Generalno

Generalna matematička formulacija razmatranog problema upravljanja tokova snaga je da se odredi vector upravljačkih varijabli \mathbf{u} , koji će zadovoljiti sledeća dva sistema jednačina:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{F}^{SP} \quad (1)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

uz zadovoljenje uslova :

$$\mathbf{u} \hat{\mathbf{I}} \mathbf{U} \quad (3)$$

U sistemima jednačina (1) i (2), veličina \mathbf{x} je vektor stanja, a veličina \mathbf{u} je vektor upravljačkih varijabli (u konkretnom slučaju to je \mathbf{f} - ugao regulacije statičkih transformatora za regulaciju ugla) u op-

segu dozvoljenih, odnosno mogućih vrednosti \mathbf{U} ($-30^\circ \text{el} < \mathbf{f} < 30^\circ \text{el}$). Veličina \mathbf{d} je vektor tzv. zadatah („demand”) varijabli.

Upravljanje tokovima aktivnih snaga po elementima (dalekovodima), na kojima su ugrađeni statički transformatori za regulaciju ugla, modeluje se posredstvom sistema jednačina oblika (1). U njima, veličina \mathbf{F}^{SP} je vektor unapred zadatih tokova aktivnih snaga po odabranim dalekovodima.

Sistem jednačina oblika (2) je merodavan za ravnotežno stanje, odnosno to su jednačine balansa snaga u čvorištima razmatrane interkonekcije. Pri tome, potrebno je napomenuti da je u ovom radu stacionarno stanje modelovano posredstvom jednačina tzv. konvencionalnih tokova snaga.

Međutim, moguće je umesto primenjenog konvencionalnog modela tokova snaga operisati i sa tzv. nestandardnim modelima tokova snaga (na primer sa modelima tokova snaga u karakterističnim post-dinamičkim kvazistacionarnim stanjima, prisutnim u metodologiji, odnosno računarskom programu STATIC [18]), što će biti predmet posebnog rada, koji je u pripremi.

3.2. Injeckioni model stati-kog transformatora za regulaciju ugla

Do sada, kada je u pitanju sam način modelovanja transformatora sa kompleksnim prenosnim odnosom, odnosno SPST, prisutna su dva različita prilaza. Jedan, konvencionalni, koji je baziran na odgovarajućoj modifikaciji matrice admitansi čvorova EES-a, nastaloj inkorporiranjem zamenske šeme SPST u takvu šemu elementa (dalekovoda) na čijem početku je instaliran.

Kao neposredna posledica takvog načina modelovanja, matrica admitansi čvorova postaje nesimetrična i funkcija ugla regulacije \mathbf{f} , sa poznatim posledicama. Uz znatno povećanje memorijskih zahteva, povećava se i vreme simulacija u odnosu na proračune tokova snaga EES-a bez ovih kontrolera. Takva iskustva stečena su i u okviru radova [19,20], u kojima se efekat SPST određivao na bazi primene poznatog računarskog programa CLF-OPF [21], u kome je prisutan ovaj konvencionalni prilaz modelovanju SPST.

Drugi prilaz modelovanju efekata SPST baziran je na odgovarajućem modelu injeckiranih snaga u relevantnim čvorovima, a koji ne ugrožava prirodnu simetričnost matrice admitansi EES-a.

U radu [8] formiran je jedan uprošćen inkrementalni model SPST koji se odnosi samo na injeckirane aktivne snage, uz zanemarenje konduktansi elementa na kome se on nalazi. Nešto složeniji prilaz dat je u [9], ali i dalje je bila samo aktivna snaga

u pitanju, uz takođe, uvažavanje samo susceptansi elemenata na kome su oni priključeni.

U radovima [10,11,12], razvijeni model statičkog transformatora za regulaciju ugla obuhvata i injektiranu reaktivnu snagu, ali i dalje uvažavaju se samo susceptanse elemenata na kojima su instalirani ovi kontroleri.

Međutim, kako je to bilo pokazano u radu [17], ako se želi dostizanje visoke preciznosti određivanja svih efekata serijskih kontrolera tokova snaga, uključujući i onaj osnovni - upravljanje tokovima aktivnih snaga, neophodno je bilo da se uvaži i uticaj konduktansi kod formiranja izraza za injektirane snage (to je posebno značajno u slučajevima srazmerno malih dužina dalekovoda).

U tom cilju, proširen je model injektiranih snaga, izložen u [11], obuhvatajući uticaj konduktansi elemenata na kojima su ugrađeni ovi kontroleri. U uslovima uvažavanja i konduktansi, efekti SPST, priključenog na početku elementa „ $k-m$ ”, kvantifikuju se preko sledećih relacija [17]:

$$P_{ck} = -g_{km} V_k^2 \tan^2 \mathbf{f} - g_{km} V_k V_m \tan \mathbf{f} \sin \mathbf{q}_{km} + b_{km} V_k V_m \tan \mathbf{f} \cos \mathbf{q}_{km} \quad (4)$$

$$Q_{ck} = g_{km} V_k \tan \mathbf{f} \cos \mathbf{q}_{km} + b_{km} V_k^2 \tan^2 \mathbf{f} + b_{km} V_k V_m \tan \mathbf{f} \sin \mathbf{q}_{km} \quad (5)$$

$$P_{cm} = -g_{km} V_k V_m \tan \mathbf{f} \sin \mathbf{q}_{km} - b_{km} V_k V_m \tan \mathbf{f} \cos \mathbf{q}_{km} \quad (6)$$

$$Q_{cm} = -g_{km} V_k V_m \tan \mathbf{f} \cos \mathbf{q}_{km} + b_{km} V_k V_m \tan \mathbf{f} \sin \mathbf{q}_{km} \quad (7)$$

$$k, m \in \hat{\mathbf{I}} \text{ NC}$$

Dakle, prisustvo SPST na početku elementa „ $k-m$ ” valorizuje se uvođenjem injektiranja u njegovim krajnjim čvorovima „ k ” i „ m ”. Pri tome, evidentno je da ovaj izvedeni injekcioni model SPST ne ugrožava simetričnost matrice admitansi čvorova, što je svakako veoma značajno u praktičnom smislu sa aspekta algoritmovanja, potrebnog vremena obavljanja simulacija i zahteva za memorijom računara.

Dalje, u kontekstu modelovanja SPST preko injektiranih snaga, aktuelna vrednost toka aktivne snage na elementu „ $k-m$ ”, na čijem je početku instaliran SPST, određuje se preko sledeće relacije:

$$P_{ckm} = g_{km} t^2 V_k^2 - t V_k V_m [g_{km} \cos(\mathbf{q}_{km} + \mathbf{f}) + b_{km} \sin(\mathbf{q}_{km} + \mathbf{f})] \quad (8)$$

$$k, m \in \hat{\mathbf{I}} \text{ NC}$$

3.3. Formulacija metode za upravljanje tokovima aktivnih snaga

Saglasno generalnoj formi modela upravljanja tokovima aktivnih snaga, datog preko sistema jednačina oblika (1) i (2), i saglasno prethodno datom injekcionom modelu SPST, aktuelne su sledeće jednačine balansa:

$$DP_{ci} = P_{ci}^{SP} - P_{ckm} = 0, \quad i \in \hat{\mathbf{I}} \text{ NCL}, \quad k, m \in \hat{\mathbf{I}} \text{ NC} \quad (9)$$

$$DP_{i-} = P_{Gi} - P_{Li}(V_i) - P_i = 0 \quad (10)$$

$$DQ_{i-} = Q_{Gi} - Q_{Li}(V_i) - Q_i = 0, \quad i \in \hat{\mathbf{I}} \text{ N/NC} \quad (11)$$

$$DP_{i-}^C = P_{Gi} - P_{Li}(V_i) - P_i - P_{ci} = 0 \quad (12)$$

$$DQ_{i-}^C = Q_{Gi} - Q_{Li}(V_i) - Q_i - Q_{ci} = 0 \quad i \in \hat{\mathbf{I}} \text{ NC} \quad (13)$$

Veličine P_i i Q_i su injektirane aktivne i reaktivne snage u čvoru „ i ”, koje, koristeći se polarnim koordinatama, imaju sledeći poznati oblik:

$$P_i = g_{ii} V_i^2 - V_i \sum_{j=1}^N \mathbf{a}_{ij} V_j (g_{ij} \cos \mathbf{q}_{ij} + b_{ij} \sin \mathbf{q}_{ij}) \quad (14)$$

$$Q_i = -b_{ii} V_i^2 - V_i \sum_{j=1}^N \mathbf{a}_{ij} V_j (g_{ij} \sin \mathbf{q}_{ij} - b_{ij} \cos \mathbf{q}_{ij}) \quad (15)$$

Jednačine oblika (9), kojih ima NCL , odnosno onoliko koliko ima vodova sa kontrolerima, na kojima se unapred specificiraju željeni tokovi aktivnih snaga, odgovaraju generalnoj formi upravljanja koja je data preko sistema jednačina (1).

Jednačine (10) i (11) (važe za krajnja čvorišta elemenata bez SPST), odnosno jednačine (12) i (13) (važe za krajnja čvorišta elemenata sa SPST) su tzv. jednačine balansa snaga, koje odgovaraju generalnoj formi sistema jednačina (2).

Na taj način, opšta formulacija metode za upravljanje tokovima aktivnih snaga pomoću SPST svodi se na *jedinstveni sistem nelinearnih algebarskih jednačina* (sačinjavaju ga jednačine oblika (9) - (13)), u kojima figurišu sledeće *dve grupe nepoznatih varijabli*:

- vektor upravljačkih varijabli - \mathbf{f} dimenzije NCL
- vektor stanja koji sadrži subvektore - \mathbf{q} i \mathbf{V} dimenzija $(N-1)$ i NL , respektivno,

Drugim rečima, potrebno je da se odrede elementi *vektora upravljanja* \mathbf{f} (uglovi regulacije SPST, odnosno kontrolera tokova snaga, u okviru prethodno pomenutih dozvoljenih granica $\underline{\mathbf{L}}$) tako da jednačine specificiranih (upravljanih) tokova aktivnih snaga (9) i jednačine balansa snaga (jednačine (10)-

(11), odnosno (12)-(13)) budu *simultano* zadovoljene. Pri tome treba napomenuti da svih prisutnih *NCU* kontrolera ne moraju da budu „aktivno uključeni” u upravljanje tokovima aktivnih snaga, odnosno važi sledeći generalni odnos:

$$NCL \neq NCU \quad (16)$$

Posebni slučaj prethodno date opšte formulacije upravljanja tokovima snaga je slučaj kada je $NCL = 0$. To je slučaj kada prisutnih *NCU* kontrolera nisu u tzv. „aktivnoj funkciji”, odnosno kada oni tokom proračuna tokova snaga ne menjaju unapred podešenu vrednost ugla regulacije f . Praktično, tu se više ne radi o direktnom upravljanju tokovima aktivnih snaga (dostizanje unapred zadatih vrednosti). Tada se preko datog modela samo određuju neposredni efekti kontrolera na tokove snaga, koji imaju fiksnu vrednost podešenih uglova regulacije f .

Ekstremni slučaj je kada je $NCU = 0$ (slučaj kada u razmatranoj interkonekciji nema instaliranih SPST, odnosno kontrolera tokova snaga). Naravno, u tom slučaju, prethodno dati model bio bi u funkciji samo proračuna konvencionalnih tokova snaga.

3. 4. Formulacija metode rešavanja formiranog modela upravljanja tokovima snaga

Sasvim je sigurno da se problem proračuna tokova snaga u elektroenergetskim interkonekcijama, u kojima su transformatori sa kompleksnim prenosnim odnosima predstavljeni preko odgovarajućih modela injektiranih snaga, može uspešno da rešava primenom poznate metode Newton-Raphsona [22], imajući u vidu njene pouzdane karakteristike kvadratne konvergencije. O tome najbolje govore rezultati izloženi u radu [12].

Međutim, sam način modelovanja SPST pružao je posebni izazov u pogledu traganja za jednostavnijim, ali i dalje efikasnim tehnikama rešavanja, uz respektovanje činjenice da elementi matrice admitansi čvorova EES-a ostaju nepromenjeni, uz očuvanje njene početne simetrije.

U radovima [17, 23], koji su se bavili injekcionim modelima tzv. serijskih FACTS kontrolera, izloženi su razvoji brzih postupaka sa razdvajanjem varijabli tokom iterativne procedure. Ti postupci su se odnosili na određivanje tokova snaga u uslovima statičkih stanja [17] i uslovima kratkotrajnih i dugotrajnih dinamičkih procesa u EES [23].

Razvoj ovih tehnika rešavanja modela tokova snaga u pomenutim stanjima, pošao je od oblika rešenja koji daje primena metode Newton-Raphsona [22] na odgovarajuće jednačine balansa snaga. Dalje, polazeći od dobijenog oblika rešenja, uveden je

niz opravdanih uprošćenja i pretpostavki kod formiranja odgovarajućih submatrica koeficijenata. Uvedena uprošćenja i pretpostavke su bile samo u kontekstu pojednostavljenja same tehnike rešavanja (jer je reč samo o odgovarajućim modifikacijama matrice Jakobijana), a ne samog modela tokova snaga koji je sačuvao svoju autentičnost. Ona su pokazala svoju opravdanost u analizama statičkih stanja [17], u analizama karakterističnih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja [14] i u analizama kratkotrajnih i dugotrajnih dinamičkih procesa [23].

U slučaju problema upravljanja tokovima snaga sa kojim se bavi ovaj rad, novi momenat je prisustvo jednačina oblika (9), a koje moraju da budu simultano zadovoljene zajedno sa jednačinama oblika (10) i (11), odnosno (12) i (13).

Analogno prethodno rečenom, i u ovom slučaju se startuje sa oblikom rešenja koji daje primena metode Newton-Raphsona na jednačine balansa (9)-(13). Zatim, isto kao kod razvoja prethodno pomenutih procedura, polazeći od dobijenog oblika rešenja, uvodi se niz opravdanih uprošćenja i pretpostavki kod daljeg formiranja odgovarajućih submatrica koeficijenata. Kao što će se to videti u narednom izlaganju, to je urađeno isključivo u cilju pojednostavljenja same tehnike rešavanja, pri čemu formirani model upravljanja tokovima aktivnih snaga pomoću SPST zadržava svoju autentičnost.

U tom cilju, najpre se zanemaruje, tokom pojedine iteracije, uticaj promene napona na aktivne snage, kao i uticaj promene ugla na reaktivne snage. Time odgovarajuće submatrice u matrici Jakobijana postaju nula matrice, odnosno izvršeno je rasprezanje varijabli tokom pojedine iteracije. Takođe, zanemaruje se uticaj karakteristika potrošača na odgovarajuće elemente Jakobijana, odnosno submatrica koeficijenata.

Sledeće uvedeno uprošćenje (ali samo kod formiranja matrice koeficijenata, a ne kod određivanja injektiranih snaga) proizilazi iz uobičajenog odnosa konduktansi i susceptansi u realnim visokonaponskim mrežama. Taj odnos opravdava uvođenje sledećeg uprošćenja:

$$g_{ij} \approx 0; g_{ii} \approx 0 \quad (17)$$

Dalje, zanemaruju se otočni elementi u susceptansi b_{ii} , odnosno:

$$b_{ii} \approx \sum_{j=1}^N b_{ij} \quad (18)$$

Zatim, u submatricama koeficijenata za aktivnu snagu za module napona se usvaja nominalna vrednost, odnosno $V_n = 1$ r. j.

Kao rezultat uvedenih uprošćenja i pretpostavki, formirajući vektore debalansa DP^c/V , DP_c/V i DQ^c/V po analogiji sa [24], dobijaju se sledeća dva sistema raspregnutih jednačina:

$$\begin{matrix} & k & & k-1 \\ P^c/V & B_c & B_p & \\ & & & \end{matrix} \quad (19)$$

$$\begin{matrix} P_c/V & B_p & B \\ & & \\ Q^c/V & B_c & V^{l-1} \end{matrix} \quad (20)$$

Shodno sprovedenom postupku formiranja ovih sistema jednačina, elementi submatrice koeficijenata B'_c i B''_c , za čvorove u kojima se ne nalaze SPST imali bi oblik:

$$b'_{cii} = -b_{ii}; b'_{cij} = b_{ij} \quad (21)$$

$$b''_{cii} = -b_{ii}; b''_{cij} = b_{ij} \quad (22)$$

$$i, j \in \hat{I} \text{ N/NC}$$

Respektujući prisustvo SPST čiji efekti su obuhvaćeni preko modela injektiranih snaga (4)-(7), odgovarajući elementi submatrice koeficijenata B'_c i B''_c razlikovali bi se u odnosu na prethodno date elemente, samo u onim dijagonalnim i van dijagonalnim elementima, koji odgovaraju čvorovima na kojima su priključeni ovako modelovani kontroleri.

U slučaju SPST, ugrađenog u grani „k” i „m”, odgovarajući dijagonalni i van dijagonalni elementi matrica B'_c i B''_c imali bi oblik :

$$b'_{ckk} = b_{kk} - b_{km} \tan \sin \alpha_{km} \quad (23)$$

$$b'_{cmm} = b_{mm} + b_{km} \tan \sin \alpha_{km}$$

$$b''_{ckk} = b_{kk} - 2b_{km} \tan^2 \alpha_{km} - b_{km} \tan \sin \alpha_{km}; \quad (24)$$

$$b''_{cmm} = b_{mm} - b_{km} \tan \sin \alpha_{km}$$

$$b'_{ckm} = b_{km} - b_{km} \tan \sin \alpha_{km}; \quad (25)$$

$$b'_{cmk} = b_{mk} - b_{mk} \tan \sin \alpha_{km}$$

$$b''_{ckm} = b_{km} - 2b_{km} \tan^2 \alpha_{km} - b_{km} \tan \sin \alpha_{km}; \quad (26)$$

$$b''_{cmk} = b_{mk} - b_{mk} \tan \sin \alpha_{km}$$

$$k, m \in \hat{I} \text{ NC}$$

Takođe, u slučaju SPST, ugrađenog na početku grane „k” i „m”, ali u kojoj se vrši i upravljanje tokom aktivne snage, odgovarajući elementi submatrice $B'_p \mathbf{q}$ i $B'_p \mathbf{f}$ imali bi oblik :

$$b'_p \mathbf{q}_{ki} = -b_{km} \cos(\mathbf{q}_{km} + \mathbf{f}) \quad (27)$$

$$b'_p \mathbf{q}_{mi} = b_{km} \cos(\mathbf{q}_{km} + \mathbf{f}) \quad (28)$$

$$b'_p \mathbf{f}_{ki} = -b_{km} \cos(\mathbf{q}_{km} + \mathbf{f}) \quad (29)$$

$$b'_p \mathbf{f}_{mi} = b_{km} \cos(\mathbf{q}_{km} + \mathbf{f}) \quad (30)$$

$$i \in \hat{I} \text{ NCL}, k, m \in \hat{I} \text{ NC}$$

Submatrica $B' \mathbf{f}$ ima samo dijagonalne elemente sledećeg oblika:

$$b'_{f_{ki}} = -b_{km} \cos(\mathbf{q}_{km} + \mathbf{f}) \quad (31)$$

$$i \in \hat{I} \text{ NCL}, k, m \in \hat{I} \text{ NC}$$

Na taj način, za rešavanje formulisanog problema upravljanja tokovima aktivnih snaga operisalo bi se sa sistemima raspregnutih jednačina (19) i (20), ali kod kojih, striktno gledano, saglasno datim izrazima (23) - (31), svi elementi odgovarajućih submatrica koeficijenata ne bi imali konstantne vrednosti.

Razlog za to leži u činjenici da su odgovarajući dijagonalni i van dijagonalni elementi funkcija ugla regulacije SPST. Takođe, oni su i funkcija razlike uglova fazora napona u čvorištima njihovog priključka, odnosno razlike uglova na krajevima elemenata (dalekovoda), na kojima su ugrađeni ovi serijski FACTS kontroleri tokova snaga.

Međutim, analizirajući navedene izraze (23) - (31), uočavaju se mogućnosti za *uvođenje daljih uprošćenja*.

Tu su se u prvom redu imali u vidu realni opsezi ugla regulacije kontrolera koji se susreću u praksi ($-15^\circ \leq \mathbf{f} < 15^\circ$). Takođe, dalja uprošćenja kod formiranja submatrice koeficijenata našla su uporište u uobičajenim vrednostima razlike uglova fazora napona ($|\mathbf{q}_{km}| < 15^\circ$) u realnim pogonskim uslovima.

Dakle, prethodno rečeno govori o dominantnoj ulozi elemenata b_{kk} , b_{mm} , b_{km} i b_{mk} , što su i analize u nizu konkretnih primera potvrdile. To je omogućilo opravdano zanemarenje ostalih članova u relacijama (23) - (26).

Dalje, u slučaju elemenata submatrice koeficijenata, koji su dati preko relacija (27)-(31), uvođenjem sledeće opravdane pretpostavke :

$$\cos(\mathbf{q}_{km} + \mathbf{f}) \approx 1 \quad (32)$$

dolazi se do njihovih konstantnih vrednosti.

Na kraju, koristeći ideju izloženu u [24] (u submatrici koeficijentata koja se odnosi na aktivne snage zanemaruju se rezistanse, a u submatrici koja se odnosi na reaktivnu snagu, dupliraju se šantovi), sistemi jednačina (19) i (29) svode se na sledeća dva sistema raspregnutih jednačina:

$$\begin{matrix} / \\ / \end{matrix} \quad (33)$$

$$\begin{matrix} / \\ / \end{matrix} \quad Q^C / V \quad B \quad V^{l-1} \quad (34)$$

Na taj način, do traženih vrednosti uglova regulacije SPST, koji obezbeđuju zadate tokove aktivnih snaga na odabranim elementima (dalekovodima), dolazi se sukcesivnim iterativnim rešavanjem (smisao uvedenih subiteracionih indeksa k i l) dva raspregnuta (naravno, samo tokom pojedine iteracije) sistema jednačina, u kojima elementi svih prisutnih submatrica koeficijentata $B\mathcal{C}$, $B\mathcal{C}_f$, $B\mathcal{C}_q$, $B\mathcal{C}^T$ i $B\mathcal{C}^T$ imaju konstantne vrednosti, za nepromenjenu topologiju.

Pri tome, potrebno je posebno da se naglasi da kvadratne submatrice $B\mathcal{C}$ i $B\mathcal{C}^T$ dimenzija $(N-1)$ i NL , respektivno, su identične odgovarajućim submatricama u poznatoj brznoj dekuplovanju metodi [24].

Dalje, submatrica $B\mathcal{C}_q = B\mathcal{C}_q^T$ (T - oznaka za transpoziciju), a submatrica $B\mathcal{C}_f$ ima samo dijagonalne elemente. Dakle, matrica koeficijentata raspregnutog sistema jednačina (33) je simetrična. Submatrice $B\mathcal{C}_q$, $B\mathcal{C}_f$ i $B\mathcal{C}_f$ dimenzija $(NCL) \times (N-1)$, $(N-1) \times (NCL)$ i $(NCL) \times (NCL)$, respektivno, imaće sledeće elemente:

$$\begin{matrix} b'_{p \quad ki} & \frac{1}{X_{km}}; & b'_{p \quad mi} & \frac{1}{X_{km}}; \\ b'_{p \quad ki} & \frac{1}{X_{km}}; & b'_{p \quad mi} & \frac{1}{X_{km}}; \end{matrix} \quad (35)$$

$$i \in \hat{I} \quad NCL, \quad k, m \in \hat{I} \quad NC$$

Očigledno, razvijena metoda upravljanja tokovima aktivnih snaga je znatno jednostavnija od prilaza baziranog na metodi Newtona, koji je izložen u radu [12]. Ta jednostavnost, saglasno raspregnutim jednačinama (33) i (34), neposredno proizilazi iz činjenice da se za datu topologiju EES-a i niz mogućih lokacija ovih kontrolera i niz njihovih mogućih podešenja, simetrične submatrice koeficijentata B , $B\mathcal{C}_f$, $B\mathcal{C}_q$, $B\mathcal{C}_f$ i $B\mathcal{C}^T$ formiraju samo jedanput (kao što se i njihova dvojnog trouglasta faktorizacija takođe vrši samo jedanput). Dakle, tokom dalje iterativne procedure vrši se samo određivanje novih vrednosti

vektora debalansa („mismatche”), saglasno datim relacijama (9)-(13).

Uz ovu jednostavnost i evidentno male memorijske zahteve, razvijena metoda ima opšti karakter i poseduje veliku numeričku efikasnost, o čemu će, uz ostale relevantne praktične aspekte, biti reči u narednim poglavljima.

3.5. Posebni slučajevi razvijene metode upravljanja tokovima snaga

Posebni slučaj prethodno date opšte formulacije upravljanja tokovima snaga, je slučaj kada je $NCL = 0$ i $NCU \neq 0$, odnosno, slučaj kada prisutnih NCU kontrolera nisu u tzv. „aktivnoj funkciji”. Tokom proračuna tokova snaga ovi kontroleri ne menjaju unapred podešenu vrednost ugla regulacije f , odnosno samo se određuju njihovi neposredni efekti na tokove snaga.

U ovom slučaju, kada je $NCL = 0$ i $NCU \neq 0$, nema više submatrica $B\mathcal{C}_q$, $B\mathcal{C}_f$ i $B\mathcal{C}_f$, jer uglovi regulacije nisu više varijable, tako da se tokovi snaga određuju iterativnim rešavanjem sledećih sistema raspregnutih jednačina:

$$P^C / V^k = B' \quad k-1 \quad (36)$$

$$Q^C / V^k = B'' \quad V^{k-1} \quad (37)$$

Kako je to već rečeno, kvadratne submatrice $B\mathcal{C}$ i $B\mathcal{C}^T$ sa konstantnim elementima, dimenzija $(N-1)$ i NL , respektivno, su identične odgovarajućim submatricama u poznatoj brznoj dekuplovanju metodi [24]. Dakle, tokom dalje iterativne procedure vrši se samo određivanje novih vrednosti vektora debalansa DP^C i DQ^C , saglasno datim relacijama (10) - (13) (relacije (9) tada nisu u funkciji).

Na kraju, u slučaju da u razmatranoj interkonekciji ne postoje kontroleri ($NCU = 0$), sistemi jednačina se transformišu u poznati brzi raspregnuti postupak [24].

$$P / V^k = B' \quad k-1 \quad (38)$$

$$Q / V^k = B'' \quad V^{k-1} \quad (39)$$

jer su tada u pitanju samo tzv. konvencionalni tokovi snaga.

4. RA^UNARSKI PROGRAM UTOKOVI

Na bazi izloženog matematičkog modela i tehnike njegovog rešavanja, u Institutu „Nikola Tesla” od strane autora ovoga rada, razvijen je računarski

program **UTOKOVI** (*Upravljanje TOKOVIMA*), koji pored glavnog programa ima 16 potprograma tipa subroutine.

U realizaciji ovog računarskog programa primenjen je Compaq Fortran Compiler- verzija 6. x. , a omogućeno je tretiranje interkonekcija sa 10 000 čvorova, 30 000 grana, 2 000 generatora, 4 000 transformatora, 200 regulacionih basena i 100 statičkih transformatora za regulaciju ugla, odnosno kontrolera tokova snaga.

Osnovne mogućnosti, odnosno funkcije ovoga računarskog programa su sledeće:

- A.** Određivanje tokova snaga u slučaju kada je $NCL = NCU \neq 0$, odnosno kada u razmatranoj interkonekciji nema instaliranih kontrolera;
- B.** Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoje kontroleri ($NCU \neq 0$), ali među njima nema tzv. „aktivnih kontrolera” ($NCL = 0$). Tada se samo utvrđuju efekti tzv. „pasivnih kontrolera”, koji imaju unapred zadatu fiksnu vrednost ugla regulacije;
- C.** Određivanje tokova snaga u slučaju kada je $NCL < NCU$, odnosno kada od prisutnih NCU kontrolera, njih NC automatski podešavaju svoj ugao regulacije, za zadati tok snage na elementu na kome je instaliran.
- D.** Određivanje tokova snaga u slučaju kada je $NCL = NCU$, odnosno kada svih prisutnih NCU kontrolera automatski podešavaju svoje ugalove regulacije, za zadate tokove aktivnih snaga na elementima na kojima su instalirani.

Opcija A odgovara proračunu tzv. konvencionalnih tokova snaga, koji se, kako je to prethodno objašnjeno, obavlja preko poznate metode Stott-Alsaca [24]. Ostale opcije u primeni ovoga računarskog programa B, C i D obuhvataju postojanje kontrolera.

Za opciju B, to su samo tzv. „pasivni” kontroleri, a za opciju C, u pitanju je kombinacija tzv. „pasivnih” i „aktivnih” kontrolera. Na kraju, u okviru opcije D operiše se samo sa tzv. „aktivnim” kontrolerima, odnosno na svim dalekovodima na kojima su instalirani vrši se upravljanje tokovima aktivnih snaga, automatskim određivanjem podešenja odgovarajućih uglova regulacije. Za

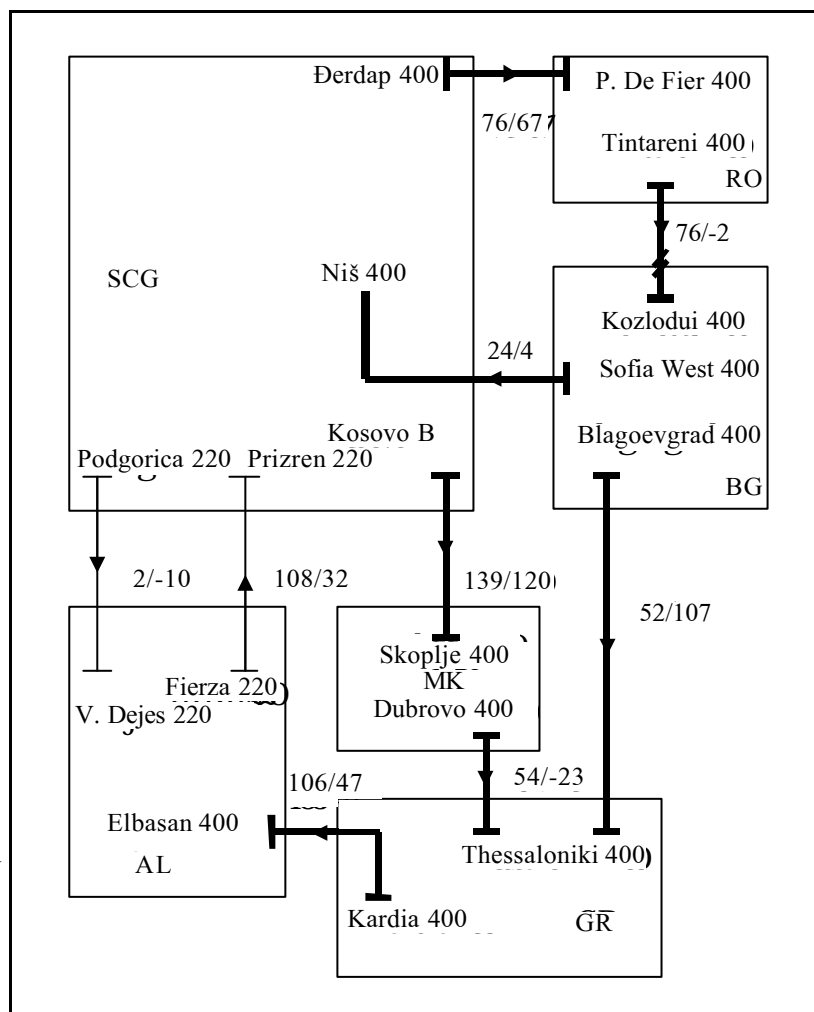
ELEKTROPRIVREDA, br. 3, 2004.

opcije C i D, ukoliko tokom proračuna uglovi regulacije kontrolera prevazilaze raspoloživi opseg, program se zaustavlja i upozorava korisnika da problem upravljanja nije adekvatno formulisano.

5. PRIMERI PRAKTI^NE PRIMENE RAZVIJENOG PROGRAMA UTOKOVI

Prva praktična iskustva u primeni razvijene metode (odnosno pomenutog računarskog programa **UTOKOVI**) za upravljanje tokovima aktivnih snaga stečena su na primeru realne elektroenergetske interkonekcije, koju sačinjavaju EES Srbije i Crne Gore (SCG), Rumunije (RO), Bugarske (BG), Makedonije (MK), Grčke (GR) i Albanije (AL) (odnosno reč je o Drugoj UCTE sinhronoj zoni).

Na slici 1 daje se blok dijagram razmatrane interkonekcije. Modelovane su kompletne mreže 400 i 220 kV u svim prikazanim EES, osim u EES Grčke, gde su kompletno modelovane mreže 400 i 150 kV



Slika 1. Tokovi aktivnih i reaktivnih snaga po interkonektivnim dalekovodovima za tzv. „multi” program razmene

samo u njegovom severnom delu (a ostatak je predstavljen preko ekvivalenata Wardovog tipa, dobije nog od grčke elektroprivrede).

Na istoj slici daju se tokovi aktivnih i reaktivnih snaga po interkonektivnim dalekovodima (MW/Mvar), za slučaj kada nema programiranih totala razmena između posmatranih EES-a (tzv. „nulti” programi razmene). Dakle, tokovi snaga prikazani na pomenutoj slici su zapravo tzv. „slobodni tokovi” snaga („ring” ili „parallel” flows).

Pre navođenja konkretnih praktičnih primera, trebalo bi posebno napomenuti da su oni tako izabrani da u prvom redu dovedu do velikih iskušenja razvijenu metodu u pogledu karakteristika konvergencije.

Prvi primer praktične primene razvijene metode odnosio se na scenario utvrđivanja mogućnosti eliminacije (*naravno, u pitanju je bio hipotetički scenario, ali veoma indikativan u pogledu testiranja mogućnosti razvijene metode*) registrovanih slobodnih tokova snaga na relaciji AL SCG GR. Praktično je bilo reči o utvrđivanju mogućnosti za eliminaciju fizičkih tokova snaga po interkonektivnim vodovima na pomenutoj relaciji.

Za tako postavljeni cilj, SPST su bili instalirani na početku interkonektivnih dalekovoda 220 kV Fierza (AL) - Prizren (SCG) i 400 kV Elbasan (AL) - Kardia (GR), sa unapred zadatim, *multim tokovima aktivnih snaga*. Za pomenuti scenario, tabela 1 daje kretanje maksimalnog odstupanja snaga („the maximum power mismatches”) tokom iterativne procedure rešavanja sistema jednačina (33) i (34), kao i korekcija ugla regulacije SPST, instaliranih na početku prethodno pomenutih interkonektivnih dalekovoda.

Potrebno je napomenuti da je u ovom i u svim narednim slučajevima, početak iterativne procedure imao tzv. „flat” („miran”) start (nominalne vrednosti napona u svim „PQ” čvorovima i nulta vrednost za sve uglove, uključujući i ugao regulacije SPST).

Tabela 1.

Maksimalne vrednosti debalansa snaga i vrednosti korekcija ugla regulacije SPST tokom iterativne procedure eliminacije „slobodnih tokova” snaga na relaciji AL SCG GR

Broj iteracije	Max $ DP $ (MW)	Max $ DQ $ (Mvar)	Max $ DP_c $ (MW)	Δf_1 (°el)	Δf_2 (°el)
0	1 727,400	4 901,700	0,000 0	-4,453	13,586
1	198,800	262,600	8,891 0	-4,124	-4,643
2	22,100	14,100	1,904 0	-0,199	0,042
3	1,700	0,609	0,126 0	-0,013	-0,007
4	0,116	0,047	0,010 0	-0,001	0,000
5	0,010	0,031	0,001 0	-	-

Kao rezultat, nakon samo pet iteracija došlo se do automatskih podešenja SPST (-8,792 i 8,981 °el), koja (podešenja) bi obezbedila da *specifikovani fizički tokovi aktivnih snaga na pomenutim interkonektivnim dalekovodima imaju nultu vrednost*.

Ostali primeri praktične primene razvijene metode koji se navode u daljem tekstu ovoga rada, nisu više u domenu čiste hipotetike, kao prethodni slučaj, već se bave scenarijima koji nisu sasvim van realnosti, a uvršćeni su prvenstveno u cilju da se razvijena metoda dovede u maksimalna, pre svega, numerička iskušenja.

Tako, na primer, u pomenutom kontekstu maksimalnih iskušenja, tabela 2 odgovara slučaju kada EES Grčke izvozi 800 MW EES Srbije i Crne Gore a SPST su instalirani na početku interkonektivnih dalekovoda 400 kV Dubrovo (MK) - Thessaloniki (GR) (**Df1**) i Thessaloniki GR) - Blagoevgrad (BG) (**Df2**), sa unapred specificiranim aktivnim snagama u iznosu -300 i 300 MW, respektivno. Iz ove tabele se uočava da je bilo potrebno opet samo pet iteracija da se dođe do traženih vrednosti uglova regulacije SPST (-8,921 i 4,691 °el), koji omogućuju da tokovi aktivnih snaga imaju zadate iznose -300 MW, odnosno 300 MW.

Tabela 2.

Maksimalne vrednosti debalansa snaga i korekcije ugla regulacije SPST tokom iterativne procedure (scenario - GR izvozi 800 MW SCG a SPST su instalirani na početku interkonektivnih dalekovoda 400 kV Dubrovo (MK) - Thessaloniki (GR) i Thessaloniki (GR) - Blagoevgrad (BG))

Broj iteracije	Max $ DP $ (MW)	Max $ DQ $ (Mvar)	Max $ DP_c $ (MW)	Δf_1 (°el)	Δf_2 (°el)
0	1 727,400	4 901,700	300,000	-9,324 0	7,062 0
1	199,600	263,200	11,000	0,055 0	-2,171 0
2	22,300	14,200	2,900	0,354 0	-0,209 0
3	1,800	0,531	0,122	-0,005 0	0,009 0
4	0,114	0,031	0,013	0,000 9	0,001 3
5	0,006	0,016	0,002	-	-

Tabela 3 odgovara istom programu razmene (GR SCG 800 MW), ali je došlo do ispada interkonektivnog dalekovoda 400 kV Thessaloniki (GR) - Blagoevgrad (BG).

Pretpostavljeno je da je na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Elbasan (AL) - Kardia (GR) instaliran SPST, sa specificiranim tokom aktivne snage u iznosu -250 MW. Ovaj slučaj je u praktičnom smislu veoma interesantan, jer bi se bez ovoga SPST interkonektivni dalekovod 400 kV Elbasan (AL) - Kardia (GR) opteretio sa 482 MW, odnosno jedan jedini autotransformator u Elbasanu (300 MVA, 400/220

kV/kV) bi se znatno preopteretio. Dakle, sa relativno malom vrednošću ugla regulacije SPST (11,255 °el), u poređenju sa mogućnostima postojećih SPST, došlo bi do zadovoljavajućeg postdinamičkog stanja, nakon ispada interkonektivnog dalekovoda 400 kV Thessaloniki (GR) - Blagoevgrad (BG).

Tabela 3.

Maksimalne vrednosti debalansa snaga i vrednosti korekcije ugla regulacije SPST tokom iterativne procedure (GR izvozi 800 MW SCG; dalekovod Thessaloniki (GR) - Blagoevgrad (BG) je van pogona)

Broj iteracije	Max $ DP $ (MW)	Max $ DQ $ (Mvar)	Max $ DP_c $ (MW)	Δf_1 (°el)	Δf_2 (°el)
0	1 727,400	4 901,700	250,000	13,261	13,586
1	199,500	263,900	11,900	-2,251	-4,643
2	22,500	14,300	0,508	0,242	0,042
3	1,800	0,547	0,004	-0,001	-0,007
4	0,119	0,016	0,000	0,001	0,000
5	0,006	0,031	0,000	-	-

Na kraju, tabela 4 daje ukupan broj iteracija potrebnih za dostizanje zahtevane tačnosti od 0,1 MW i 0,1 Mvar, kao i konačno podešenje ugla regulacije SPST, instaliranog na početku interkonektivnih dalekovoda 400 kV Dubrovo (MK) - Thessaloniki (GR) i Thessaloniki (GR) - Blagoevgrad (BG), za realizaciju različitih zadatih tokova snaga.

Tabela 4.

Ukupan broj iteracija za postizanje zadate tačnosti od 0,1 MW i 0,1 Mvar i dobijene vrednosti ugla regulacije f za zadate tokove snaga P_C^{sp}

Dubrovo(MK)- Thessaloniki (GR)		Thessaloniki(GR)- Blagoevgrad (BG)		Ukupan broj iteracija
P_C^{sp} (MW)	f (°el)	P_C^{sp} (MW)	f (°el)	
-100	9,662	400	-1,736	5
-200	5,790	300	-6,121	5
-200	-4,863	400	8,841	5
-300	-8,921	300	4,691	5
- 300	-20,178	400	19,113	6
- 400	-13,166	200	0,538	5

Na taj način, početna iskustva u praktičnoj primeni razvijene metode, sticana na primeru realne interkonekcije, govore o njenoj jednostavnosti i veoma dobrim karakteristikama konvergencije. U daljem radu na ovoj značajnoj problematici, zajedno sa primenjenim konvencionalnim modelom tokova snaga operisaće se i sa tzv. nestandardnim modelima tokova snaga. Tu se u prvom redu misli na modele

tokova snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima, koji su osnova metodologije (odnosno računarskom programu STATIC [18]) za analize statičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija.

6. ZAKLJUČCI

U radu su prikazani razvoj i praktična primena jedne metode upravljanja tokovima aktivnih snaga pomoću statičkih transformatora za regulaciju ugla. Za zadate tokove aktivnih snaga na odabranim elementima (dalekovodima), razvijena metoda na veoma jednostavan i efikasan način utvrđuje potrebne vrednosti ugla regulacije ovih serijskih FACTS kontrolera tokova snaga, respektujući postojeća ograničenja.

Karakteristike i mogućnosti razvijenog računarskog programa UTOKOVI, baziranog na izloženoj metodi, utvrđivane su na primeru realne elektroenergetske interkonekcije. Rezultati praktične primene, čiji je samo manji obim izložen u radu, ukazuju na moguće značajne tehničke efekte ovih kontrolera tokova snaga.

Proučavanje njihovih efekata moglo bi biti veoma interesantno i izazovno u budućnosti, kada bude formirano Regionalno tržište električne energije u jugoistočnoj Evropi, a pogotovu kada ono intenzivno „proradi“.

Takođe, nije sasvim isključeno da će se, u uslovima povezivanja Druge UCTE sinhronne zone sa glavnim delom interkonekcije UCTE i njenim širenjem na Istok i pojavi većih tranzita snaga u dužem vremenskom trajanju, pokazati tehno-ekonomska opravdanost ugradnje ovih kontrolera na najpogodnijim lokacijama. Pri tome će se svakako respektovati već prisutna pozitivna inostrana iskustva u praktičnoj primeni ovih kontrolera.

7. LITERATURA

- [1] Erche M. et al., IMPROVEMENT OF POWER PERFORMANCES USING POWER ELECTRONIC EQUIPMENT, CIGRE 1992, Session, PARIS, 30 Aug - 5 Sept, paper 14/37/38-02, 1992
- [2] Povh D. et al., CIGRE TECHNICAL BROCHURE: LOAD FLOW CONTROL IN HIGH VOLTAGE SYSTEMS USING FACTS CONTROLLERS, Electra, No 164, February 1996, pp. 162-165
- [3] DEFINITIONS OF TRANSFER CAPACITIES IN LIBERALISED ELECTRICITY MARKETS, Final Report, ETSO, April, 2001
- [4] PROCEDURES FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENTS, ETSO, October, 2001

- [5] EVALUATION OF CONGESTION MANAGEMENT METHODS FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION, ETSO, Florence Regulators Meeting, November, 1999
- [6] Mijailović S, V. Vujašinović Z., Apostolović M., PREGLED AKTUELNIH METODA ZA UPRAVLJANJE ZAGUŠENJIMA U PRENOSNOJ MREŽI U EVROPI, časopis „Elektroprivreda”, br. 1, 2004, str. 40-55.
- [7] ANALYSIS OF ELECTRICITY NETWORK CAPACITIES AND IDENTIFICATION OF CONGESTION, IAEW and CONSENTEC, Final Report, Aachen, December 2001
- [8] Stott B. and Hobson E, POWER SYSTEM SECURITY CONTROL CALCULATIONS USING LINEAR PROGRAMMING, PART I, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-97, No. 5, September/October 1978, pp. 1713-1720
- [9] Han. Z. X., PHASE SHIFTER AND POWER FLOW CONTROL, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, October 1982, pp. 3790-3795.
- [10] Mescua J., A DECOUPLED METHOD FOR SYSTEMATIC ADJUSTMENT OF PHASE - SHIFTING AND TAP - CHANGING TRANSFORMERS, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-104, September 1985, pp. 2315-2321.
- [11] Sprinivasan N. et al., ON-LINE COMPUTATION OF PHASE SHIFTER DISTRIBUTION FACTOR AND LINELOAD ALLEVIATION, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-104, No 7, July 1985, pp. 1656-1662.
- [12] Noroozian M. and Andersson G., POWER FLOW CONTROL BY USE OF CONTROLLABLE SERIES COMPONENTS, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993, pp. 1420-1429.
- [13] Cr. Fuerte - Esquivel and Acha E, A NEWTON - TYPE ALGORITHM FOR THE CONTROL OF POWER FLOW IN ELECTRICAL POWER NETWORKS, IEEE Trans. on PS, Vol. 12, No. 4, November 1997, pp. 1474-1480.
- [14] Popović D. P, GENERALIZOVANI MODEL TRANSFORMATORA I TOKOVI SNAGA, časopis „Elektroprivreda”, br. 1, 2003, str. 3-14.
- [15] MEMORANDUM OF UNDERSTANDING FOR THE ESTABLISHMENT OF A COMPETITIVE REGIONAL ELECTRICITY MARKET (REM) IN SOUTH EASTERN EUROPE, Athens, 2000
- [16] STUDY ON THE DEVELOPMENT OF A COMPETITIVE BALKAN ELECTRICITY MARKET, 1999
- [17] Popović D. P., JEDNA METODA PRORAČUNA TOKOVA SNAGA U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA SA SERIJSKIM FACTS KONTROLERIMA, časopis „Elektroprivreda”, br. 1, 1998, str. 11-22.
- [18] Popović D. P., AN EFFICIENT METHODOLOGY FOR STEADY-STATE SECURITY ASSESSMENT OF POWER SYSTEMS, Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 10, No. 2, April 1988, pp. 110-116.
- [19] Popović D. P., Mijailović S., Papazoglou T., MOGUĆA POBOLJŠANJA PERFORMANSI RADA ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA PRIMENOM NEKIH OD ELEMENATA FACTS TEHNOLOGIJE, časopis „Elektroprivreda”, br. 1, 1995, str. 16-22.
- [20] Papazoglou T. Popović D. P., Mijailović S., ANALYSIS OF THE EFFECTS OF APPLICATION OF PST AND CSC ON THE PERFORMANCE OF THE UCPT SYSTEM IN THE BALKANS, Stockholm Power Tech Conference, Stockholm, June 18-22, 1995, paper SPT PS 16-02-0520, pp. 490-493.
- [21] Dechamps C., Nuytten R., Vankelecom J., CONSTRAINED LOW FLOW - OPTIMUM POWER FLOW, CLF-OPF: USER GUIDE, Systems-Europe S. A. Publication Bruxelles, 1997.
- [22] Tinney W. F. and Hart C. E., POWER FLOW SOLUTION BY NEWTON'S METHOD, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-86, No. 11, November 1967, pp. 1449-1467.
- [23] Popović D. P., METODE ODREĐIVANJA TOKOVA SNAGA U EES SA SERIJSKIM FACTS KONTROLERIMA, U USLOVIMA KARAKTERISTIČNIH DINAMIČKIH PROCESA, časopis „Elektroprivreda”, br. 3, 1998, str. 7-13
- [24] Stott B. and Alsac O., *Fast Decoupled Load Flow*, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-93, no. 3, May/June 1974, pp. 856-869.

Rad je primljen u uredništvo 27. 07. 2004. godine



Dragan P. Popović rođen je 1943. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 1965. godine na Energetskom odseku, magistrirao 1981. godine na smeru Elektroenergetski sistemi, a doktorsku tezu odbranio maja 1984. godine, sve na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Po diplomiranju, zaposlio se u Elektrotehničkom Institutu „Nikola Tesla”, gde se i sada nalazi na radnom mestu višeg savetnika u centru „Elektroenergetski sistemi”. Godine 1997. izabran je u najviše naučno-istraživačko zvanje naučni savetnik. Kao autor (pretežno) ili koautor do sada je objavio preko 140 naučnih i stručnih radova i razvio je veći broj računarskih programa za analizu relevantnih statičkih i dinamičkih stanja elektroenergetskih interkonekcija.

Branko Stojanović

Primena metode „simulacije kaljenja” na problem kompenzacije reaktivne snage u simetričnim radijalnim distributivnim mrežama

Pregledni rad

UDK: 621.3.016.5; 621.3.016.4; 621.3.112.14; 621.316

Rezime:

„**Simulacija kaljenja**” je prvi put primenjena za rešavanje problema kompenzacije reaktivne snage u distributivnim mrežama od strane grupe inženjera na Kornel Univerzitetu u SAD, 1990. godine. Od tada se ova metoda nije konceptijski mnogo promenila. Kompenzacija reaktivne snage razmatrana u ovom članku posmatrana je kao optimizacioni problem minimizacije gubitaka električne energije, gubitaka vršne aktivne snage i cene planiranih kondenzatorskih baterija. U problem su uključena i ograničenja sumarne maksimalne i minimalne reaktivne snage planiranih kondenzatorskih baterija, kao i naponska ograničenja za napone u čvorovima mreže. Kao rešenje dobijaju se izlazni rezultati kojima se tačno definiše mesto (čvor) gde treba ugraditi bateriju, snaga baterije i podešenost baterije s obzirom na posmatrani nivo opterećenja. Metoda je testirana na tri test primera primenom računarskih programa razvijenih u ovom radu. Prvi test primer ima 70 čvorova i jedan naponski nivo, drugi ima 31 čvor, takođe je jednog naponskog nivoa, a treći je sa tri naponska nivoa i 53 čvora. Dobijeni rezultati pokazuju da metoda ima punu primenu za mreže u procesu njihovog planiranja kada vreme kalkulacije nije od primarnog značaja.

Ključne reči: fiksne i regulacione kondenzatorske baterije, globalni optimum, „simulacija kaljenja”, nivo opterećenja, radijalne distributivne mreže

Abstract:

APPLYING „SIMULATED ANNEALING” IN GENERAL CAPACITOR PLACEMENT PROBLEM IN LARGE SCALE SYMMETRICAL RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS

„**Simulated annealing**” was used for solving general capacitor placement problem by engineers at Cornell University, U.S.A. in the 1990's for the first time. Since then, this method hasn't changed much. The general capacitor placement problem is analyzed as optimization problem with energy losses, peak power losses and cost of installed capacitors as objective function in this paper. Load constraints as well as voltage constraints are included in the problem formulation. The solution defines precisely place where to install capacitor, capacitor's rated power and it's adjustment in accordance with defined load level. This method is tested through three test examples by program packages developed in this paper. The first test example has 70 nodes and one voltage level, the second one has 31 nodes and also one voltage level, while the third one has three voltage levels and 53 nodes. Obtained results show that the method is fully applicable in the planning process of distribution networks when calculation time is not of primary importance.

Key words: fixed and switched capacitors, global optimum, „simulated annealing”, load level, radial distribution networks.

Mr Branko Stojanović dipl. el. ing. - Tehnički opitni centar, 11 000 Beograd, Vojvode Stepe 445

1. UVOD

Problem planiranja izvora reaktivnih snaga (VAR problem) u stvari ima vrlo komplikovanu, delimično diskretnu, delimično kontinualnu prirodu sa nediferencijabilnom nelinearnom funkcijom cilja. Ovaj problem pripada klasi NP (non-polynomial) problema. Ne postoje poznati načini da se ovi problemi tačno reše a za neko prihvatljivo vreme. Njih treba rešavati heuristikom ili približnim tehnikama. Najpopularnija je tehnika grubog pretraživanja koja prihvata isključivo trenutna poboljšanja. Glavni nedostatak ove metode je da se ona često zaustavi u lokalnom optimumu, pre nego u globalnom.

Jedan način da se prevaziđe ovaj problem je metoda zasnovana na „simulaciji kaljenja”. „Simulacija kaljenja” je moćna metoda za rešavanje problema kombinatorne optimizacije. Ona se karakteriše sposobnošću da izbegne lokalne minimume ugradnjom funkcije verovatnoće u postupak prihvatanja ili odbacivanja rešenja. Ovo je moćna, opšta tehnika slična sa procesom kristalizacije u fizičkim sistemima. Teoretski metod konvergira asimptotski ka globalnom optimumu sa verovatnoćom 1 pod uslovom da funkcija cilja, pomeraji i postupak kaljenja zadovoljavaju određene uslove (za svaku vrednost kontrolnog parametra treba da se ostvari stacionarna distribucija, kao što i vrednost kontrolnog parametra mora da se polako snižava do nule).

U [4] prezentiran je kompjuterski paket SAMVAR zasnovan na „simulaciji kaljenja” za VAR planiranje u složenim radijalnim, simetričnim mrežama. Optimalno VAR planiranje je formulisano kao problem koji ima ograničenja i višestruku funkciju cilja. Ograničenja i funkcije cilja mogu biti nediferencijabilne, tako da je formulacija problema bliža realnosti. Paket predstavlja algoritam za rešavanje u dva nivoa, prvi koji se sastoji od proširene metode „simulacije kaljenja” i drugi zasnovan na metodi e -ograničenja. Izlaz iz prvog nivoa su globalna, neinferiorna rešenja. Ona služe u procesu planiranja inženjeru kao osnova za davanje prioriteta jednoj od funkcija cilja uz povećanje broja ograničenja, pri čemu su kroz e -ograničenja definisana pogoršanja ostalih funkcija cilja, dok se primarna dodatno popravljaju. Glavni razlog mada nedovoljno opravdan u našem slučaju za posmatranje višestruke funkcije cilja autori navode u činjenici da su pojedinačne funkcije cilja međusobno u konfliktu i da se ne mogu kombinovati u jednostruku funkciju cilja. Četiri funkcije cilja koje se razmatraju u [4] su, prva - gubici, druga - investicije za planirane kondenzatorske baterije (cena kupovine, ugradnje i održavanja baterija), treća - devijacija napona u čvorovima i četvrta - devijacija protoka opterećenja kroz vodove. Poslednje dve funkcije cilja se najčešće zanemaruju, a prve dve se mogu kombinovati u jednu.

U [5] se razmatraju 3-fazne nesimetrične (neuravnotežene) radijalne distributivne mreže. Postoji jedna funkcija cilja, koja se sastoji od gubitaka električne energije i troška vezanog za kondenzatorske baterije u vidu cene kupovine baterija, montaže baterija, zamene baterija i uklanjanja postojećih baterija. Metoda rešavanja je zasnovana na kombinaciji metode „simulacije kaljenja” i tehnike grubog pretraživanja da bi se povećala brzina proračuna i nadalje sačuvao visoki kvalitet rešenja. Samo grubo pretraživanje u osnovi ima dodavanje kondenzatorskih baterija u čvorove mreže sve dok se funkcija cilja poboljšava (gubici snage u ovom slučaju), čim se gubici počnu povećavati od svih čvorova mreže koji su interesantni ovaj čvor se izuzima i nadalje posmatra mreža samo sa novim (smanjenim) brojem čvorova. Ovaj postupak se ponavlja na dalje dok se ne pređu svi interesantni čvorovi.

U [3–5] kao primeri navode se mreže: IEEE sa 30 čvorova (simetrična), Tajvanska sa 358 čvorova (takođe simetrična) i nesimetrična sa 291 sabirničkih čvorova, 305 distributivnih vodova i 6 transformatora (deo NYSEG distributivnog sistema). Podaci za ove mreže nisu bili dostupni, pa smo zato u poglavlju numerički rezultati analizirali mrežu iz [2] (Test sistem 1), mrežu iz [10] (Test sistem 2) i mrežu iz [15] (Test sistem 3). Sva tri test primera predstavljaju trofazne simetrične radijalne distributivne mreže od kojih je metoda „simulacije kaljenja” bila primenjena samo na prvom test primeru [16,17] od strane Chianga i saradnika.

U poslednje vreme prisutna je tendencija kombinovanja optimizacionih metoda. Ova tendencija je nastavljena i u ovom radu. Naime, u kompleksnijem programu napravljenom za slučaj planiranja regulacionih baterija kada postoji onoliko programskih petlji koliko i nivoa opterećenja samo u petlji maksimalnog nivoa opterećenja primenjena je metoda „simulacije kaljenja” a u svim ostalim detaljno pretraživanje svih mogućih konfiguracija mreže za koje se sračunava funkcija cilja. Ovaj hibridni algoritam „simulacije kaljenja” i detaljnog pretraživanja nalazi optimalno rešenje za veoma kratko vreme, jer se algoritam posle generacije konfiguracije vršnog nivoa opterećenja ograničava samo na izgenerisane čvorove mreže (posmatra se mreža sa novim mnogo manjim brojem čvorova).

Velika pažnja se danas pridaje metodi „simulacije kaljenja” s obzirom na razvoj računarske tehnike i pojavu vrlo brzih personalnih računara. Proračuni za test primer iz ovog rada vršeni su na personalnom računaru Pentium II sa procesorom brzine 533 MHz koji je daleko premašen sa onim što se sada nudi na tržištu. Činjenica da su primeri iz ovog rada takođe analizirani na mnogo sporijoj mašini

[18] IBM PC/80 MHz, a za dosta kraće vreme, govori u prilog činjenici da granice primenljivosti metode „simulacije kaljenja” treba tražiti u smislu ograničenja CPU (computing) vremena egzekucije programa i kvaliteta rešenja.

2. FORMULACIJA PROBLEMA

Problem postavljanja kondenzatorskih baterija u razgranatoj distributivnoj mreži da bi se minimizirala funkcija cilja, postoji od 1961. godine [23]. Realnije razmatranje ovog problema nastaje sa člankom Greingera i saradnika iz 1985. godine [19]. Funkcija cilja u ovom problemu može se definisati na sledeći način:

$$K_e \sum_{i=1}^{N_t} T_i P_{loss,i} + k_p \sum_{k=1}^{N_c} C_k(Q_k^0) \quad (1)$$

gde su korišćene sledeće oznake,

K_e – cena gubitaka aktivne energije (\$/kWh),

T_i – trajanje i -tog nivoa opterećenja (h),

N_t – broj nivoa opterećenja,

$P_{loss,i}$ – gubitak aktivne snage za vreme i -tog nivoa opterećenja (kW),

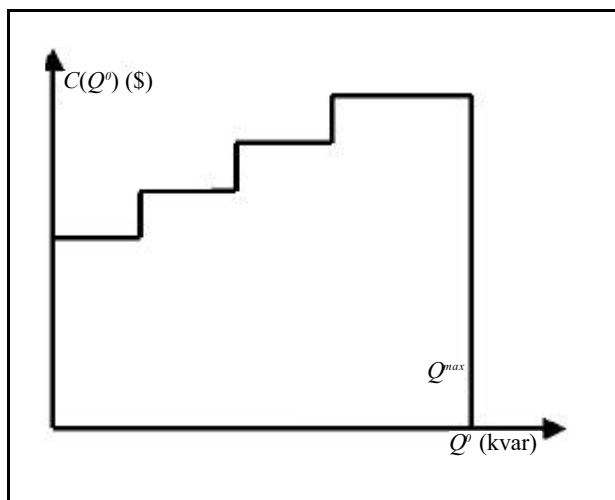
k_p – cena gubitaka aktivne snage za vršni nivo opterećenja (\$/kW),

$P_{loss,l}$ – gubitak aktivne snage za vršni nivo opterećenja (kW),

N_c – broj sabirnica gde se ugrađuju kondenzatorske baterije,

$C_k(Q_k^0)$ – cena kondenzatorske baterije postavljene kod sabirnice k instalisane snage Q_k^0 (kVar) u \$.

U primeru iz ovoga rada ovo je stepenasta nediferencijabilna funkcija koja izgleda kao na slici 1 [12].



Slika 1. Tipična funkcija cene postavljenih kondenzatorskih baterija

Napominjemo da je moguća i tabelarna predstava funkcije cene kondenzatorskih baterija. U tabeli [5] je uneta veličina baterije u kVar-ima za različite njihove kombinacije jer se radi o nesimetričnim mrežama, tip baterije (fiksna, regulaciona), cena montaže, snage baterije, zamene i uklanjanja baterije (ukupno četiri vrednosti), tip sabirnice gde se ugrađuje baterija.

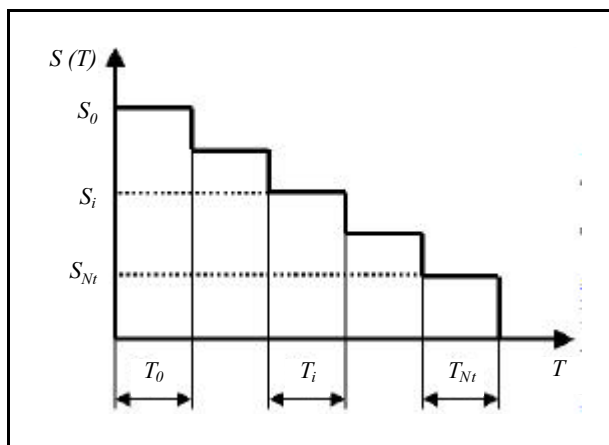
Nekad se cena kondenzatora množi sa godišnjom stopom [18] s obzirom da trošak baterije treba razvući na ceo period eksploatacije koji se najčešće kreće od 1 do 10 godina [5,12].

2.1. Promena opterećenja

Problem koji se posmatra je mešovito celobrojni, nelinearni sa nediferencijabilnom funkcijom cilja gde N_t predstavlja broj nivoa opterećenja kao što je dato na slici 2. Takođe se pretpostavlja uniformna promena opterećenja kao:

$$Q_i(T) = Q_i^0 S(T) \quad (2)$$

gde je Q_i^0 vršno opterećenje a $S(T)$ kriva trajanja opterećenja.



Slika 2. Diskretna kriva trajanja opterećenja

Potrošači u čvorovima su modelovani kao potrošači konstantne snage tokom određenog nivoa opterećenja. Potrošači se mogu modelovati i modelima konstantne impedanse i konstantne struje [20].

2.2. Veličina kondenzatora i kontrolno podešavanje

Posmatraju se dva tipa kondenzatorskih baterija, fiksne i regulacione. Fiksne imaju istu reaktivnu snagu za sve nivoe opterećenja, a kod regulacionih reaktivna snaga opada kako opadaju nivoo opterećenja.

Za fiksne je $Q_k^0 \quad Q_k^1 \quad \dots \quad Q_k^{Nt}$ (3)

a za regulacione $0 \quad Q_k^i \quad Q_k^0$ (4)

2.3. Ograničenja uslovljena opterećenjem

Usvojimo sledeće oznake:

$Q_{bmax,ll}$ – maksimalna ukupna reaktivna snaga instaliranih baterija za određeni nivo opterećenja,

$Q_{loss,ll}$ – gubici reaktivne snage za „suvu” mrežu (mrežu bez kondenzatorskih baterija) za određeni nivo opterećenja,

$Q_{dem,ll}$ – potrošnja reaktivne snage za određeni nivo opterećenja,

onda se ima,

$$Q_{bmax,ll} = Q_{loss,ll} + Q_{dem,ll} \quad (5)$$

Ako je nadalje:

$Q_{bmin,ll}$ – minimalna ukupna reaktivna snaga instaliranih baterija za određeni nivo opterećenja,

$P_{00,ll}$ – aktivna snaga na napojnom čvoru za određeni nivo opterećenja, onda važi sledeća relacija:

$$Q_{bmin,ll} \quad Q_{loss,ll} \quad Q_{dem,ll} \quad P_{00,ll} \frac{\sqrt{1 - 0,85^2}}{0,85} \quad (6)$$

u smislu održavanja faktora snage napojnog čvora iznad 0,85. Za detalje izvođenja relacija (5) i (6) pogledati referencu [14].

Ograničenja uslovljena opterećenjem definisana relacijama (5) i (6) smanjuju prostor konfiguracija (posmatranu populaciju) mogućih rešenja u ogromnoj meri a da se ne izgubi globalni optimum. Ona čine metodu rešenja izvodljivom, bez njihov postupak nije ograničen i problem se praktično ne može rešiti.

2.4. Efikasni algoritam analize tokova snaga

U programskom paketu iz ovog rada korišćena su tri podprograma za efikasni algoritam analize toka snaga (tri sabrutine).

Za test sisteme 1 i 2 korišćen je algoritam za simetrične radijalne distributivne mreže samo sa bočnim granama i jednom trafo stanicom kod napojnog čvora. Rešavanje je izvršeno Njutn–Rafsonovom metodom nazvanom, Dist–flow metoda i ona je u potpunosti objašnjena u referenci [21,22].

Za test sistem 3 korišćena su dva efikasna algoritma analize tokova snaga, prvi iz reference [20] u kojoj je obeležavanje čvorova mreže po nivoima i

drugi gde su čvorovi obeleženi polazeći od napojnog, nultog čvora, a zatim duž grana radijalne mreže, „nizvodna” numeracija čvorova.

2.5. Radna ograničenja

Ovo su ograničenja vezana za veličinu napona u čvorovima mreže. Ova vrednost poznata je unapred, uglavnom definisana standardima čega se inženjer projektant mora pridržavati. Postavljanjem kondenzatorskih baterija podiže se i naponski profil mreže odnosno poboljšava se naponska slika sistema.

3. „SIMULACIJA KALJENJA”

Neka je C_i tekuće rešenje a C_j rešenje iz komšiluka koje je generisano neposredno pre rešenja C_i . $DC_{ij} = C_i - C_j$ je razlika ova dva rešenja. c je kontrolni parametar nazvan „temperatura” i on ima visoku vrednost na početku algoritma i postepeno se smanjuje tokom procesa „kaljenja”. Niz sukcesivnih rešenja se zove Markovljev lanac. Postoje dva tipa algoritma „simulacije kaljenja”, homogeni i nehomogeni. Kod homogenog svaki Markovljev lanac ima konstantnu temperaturu za sva svoja rešenja a postoje različiti Markovljevi lanci za koje temperatura postepeno opada. Kod nehomogenog postoji jedan Markovljev lanac sa različitim kontrolnim parametrom za svaki sukcesivni par rešenja. „Simulacije kaljenja” se može prikazati sledećom šemom u pseudo-Paskalu [1]:

Startuj sa bilo kojim početnim rešenjem, poremeti sa tekuće (j) konfiguracije (stanja) na sledeću (i),
nađi DC_{ij} ,
ako je $DC_{ij} < 0$ zameni konfiguraciju j konfiguracijom i ,
ako nije sračunaj $\exp(-DC_{ij}/c)$,
ako je $\exp(-DC_{ij}/c)$ veće od slučajnog broja uniformno raspodeljenog u intervalu $[0,1]$, zameni konfiguraciju j konfiguracijom i (Metropolis kriterijum [24]),
ako nije zadrži tekuću konfiguraciju j .
Stani kada se sistem zaledi, to jest nema primetnog poboljšanja u rešenju.

4. „SIMULACIJA KALJENJA” ZA PROBLEME SA OGRANIČENJIMA

Postoji još jedan korak više kod „simulacije kaljenja” kada postoje ograničenja. Ovaj korak je provera podobnosti rešenja, pre generisanja nove konfiguracije putem generatora slučajnih brojeva. Ako je novo rešenje podobno ono se poredi sa pret-

hodnim, a ako nije, ono se odbacuje i traži se novo sve dok se ne pronađe ono koje je podobno.

Za algoritam sa fiksnim baterijama kao i sa regulacionim baterijama opšte ograničenje je minimalna i maksimalna ukupna snaga svih ugrađenih kondenzatorskih baterija. Ova vrednost poznata je unapred, kao ulazni podatak u algoritam i pri perturbacijama generisanim generatorom slučajnih brojeva uzima se u obzir ova vrednost tako da su sva rešenja podobna sa ove tačke gledišta.

U slučaju regulacionih baterija, njihova veličina opada kako opada i nivo opterećenja. Ovo ograničenje je nametnuto snagom ugrađenih baterija, ono se uzima u obzir mehanizmom generisanja konfiguracija tako da su generisane konfiguracije podobne.

5. OSNOVNI ELEMENTI U „SIMULACIJI KALJENJA”

5.1. Prostor konfiguracija (nekad nazvan i populacija)

Veličina prostora konfiguracija zavisi od broja mogućih mesta za postavljanje kondenzatora to jest od broja sabirnica i mogućih veličina kondenzatora na svakoj lokaciji. Ovo je najčešće beskonačno izbrojiv skup. Ograničiti ovaj prostor je od vrhunskog značaja. Ograničenja kojima se ovaj prostor limitira imaju gorući smisao pod uslovom da se ne eliminiše globalni optimum.

5.2. Pomeraji (mehanizam perturbacije, mehanizam poremećaja)

Kod algoritma u ovom radu korišćen je jedinstveni mehanizam perturbacije u sledeća tri koraka:

1. korak: generatorom slučajnih brojeva odredi ukupnu snagu planiranih baterija,
2. korak: generatorom slučajnih brojeva odredi snagu svake planirane baterije pojedinačno,
3. korak: generatorom slučajnih brojeva odredi lokaciju svake planirane baterije.

5.3. Mehanizam hlađenja

Korišćen je prosti mehanizam hlađenja a postoje i vrlo složeni [24]. Kako je primenjeni algoritam homogeni, ima se konstantna temperatura za svaki generisani Markovljev lanac. Pravilo snižavanja temperature je prosto $T_{k+1}=0,95*T_k$. T_{k+1} je temperaturna vrednost $(k+1)$ og Markovljevog lanca. Povećanjem broja Markovljevih lanaca, postepeno i lagano opada vrednost temperature i sistem se lagano hladi.

Početna vrednost temperature treba da je vrlo visoka da omogući da se svako pomeranje prihvati u slučaju optimizacionog problema bez ograničenja. Za problem kompenzacije reaktivne snage koji je problem sa ograničenjima pomeraji se nekad odbacuju zbog narušavanja ograničenja [3]. U našem slučaju početna vrednost temperature je vrlo visoka, i kod jednostavnijeg problema fiksnih baterija iznosi 5 000 „°C” [6,7] a za komplikovaniji problem regulacionih baterija iznosi 10 000 „°C”. Ne postoji generalno pravilo sa kojom početnom temperaturom startovati, i nekoliko hiljada „stepeni” u potpunosti zadovoljava problem.

5.4. Stop kriterijum

Kod problema ovde tretiranog postoji stop kriterijum za terminiranje svakog Markovljevog lanca i stop kriterijum za terminiranje algoritma.

Kod fiksnih baterija Markovljev lanac terminira kada $D C_{k,k-1}/C_k$ postane manje od jedne konstante koja se usvaja na početku algoritma [24]. Što je ova konstanta niža, duže je CPU vreme egzekucije algoritma. C_k i C_{k-1} su dva susedna podobna rešenja.

Za regulacione baterije, Markovljev lanac terminira kada njegova dužina dostigne jednu prethodno određenu vrednost datu izrazom $1,1^{k*n_0}$, gde je k redni broj Markovljevog lanca, a n_0 njegova početna vrednost.

Algoritam u oba slučaja terminira kada odnos prihvatanja postane dovoljno mali. Koliko mali zavisi od nas, što je manja ova vrednost duže je CPU vreme a rešenje bolje. Odnos prihvatanja se definiše kao količnik broja prihvaćenih rešenja i broja svih rešenja generisanih jednim Markovljevim lancem. Program takođe terminira ako se premaši maksimalna dužina Markovljevog lanca (promenljiva označena sa LANAC u programu za generalni slučaj postavljanja baterija).

6. ALGORITAM ZA REŠAVANJE U SLUČAJU FIKSNIH KONDENZATORSKIH BATERIJA

Korak 1 – Ulazni podaci:

1. podaci o mreži i stepenasta funkcija cene baterija,
2. početna temperatura $T_0=5\ 000$ „°C”,
3. kriterijum terminiranja Markovljevog lanca,
4. kriterijum okončanja algoritma.

Korak 2 – Startovanje sa početnom podobnom konfiguracijom („suva” mreža):

kreće se sa „suvom” mrežom to jest mrežom bez kondenzatorskih baterija za koju se sračunava funkcija cilja, prva funkcija cilja sa kojom se inicijalizuje

algoritam i koja se prihvata kao „stara” iznosi 1.E30. Ova vrednost se odbacuje i „suva” mreža je prva prihvaćena konfiguracija.

Korak 3 – Mehanizam hlađenja.

Korak 4 – Generiši novu podobnu konfiguraciju:

1. upotrebi generator slučajnih brojeva,
2. pozovi sabrutinu kojom je modelovan efikasan algoritam toka snaga, kojom se sračunavaju snage grana i naponi čvorova.

Korak 5 – Metropolis kriterijum

Ovim već pomenutim pravilom odbacuje se nova konfiguracija ili pak prihvata i proglašava za staru i tako se ažurira stanje. Želimo da naglasimo da je ovim algoritmom takođe moguće prihvatiti i skuplje konfiguracije što čini osnovnu razliku između „simulacije kaljenja” i tehnike grubog pretraživanja kojom se prihvataju samo jeftinije konfiguracije. U poslednjem slučaju može se zaustaviti u lokalnom minimumu što se prevazilazi kod „simulacije kaljenja” ovim pomeranjem „uzbrdo”.

Korak 6 – Provera stop kriterijuma:

Algoritam se zaustavlja u dva slučaja koji god da prvi nastupi:

1. dužina Markovljevog lanca na određenoj temperaturi postaje veća od određenog unapred izabranog broja konfiguracija,
2. odnos prihvatanja postaje manji od neke unapred izabrane vrednosti.

Napomena: Kada se desi 1. ili 2. sistem se smatra „zamrznutim” i algoritam terminira.

Korak 7 – izlazna datoteka

U ovoj datoteci daju se sledeći podaci:

1. optimalna konfiguracija,
2. rešenje algoritma za tok snaga za svaki nivo opterećenja,
3. naponska „slika” za svaki nivo opterećenja,
4. funkcija cilja,
5. elementi funkcije cilja.

7. ALGORITAM ZA REŠAVANJE U GENERALNOM SLUČAJU POSTAVLJANJA KONDENZATORSKIH BATERIJA (KOMBINACIJA FIKSNIH I REGULACIONIH KONDENZATORSKIH BATERIJA)

Postavljanjem regulacionih kondenzatorskih baterija postižu se veće uštede nego kad se postavljaju samo fiksne pa je u skladu sa ovim razvijen poseban algoritam.

Program razvijen u Fortranu 77 bitno se razlikuje od programa datog u referencama [3–5, 16,17] i daje bolje rezultate.

Postoji N_t kontrolnih petlji u programu (N_t – broj nivoa opterećenja).

1. Glavna kontrolna petlja u kojoj je algoritam „simulacije kaljenja” upotrebljen sa cenom konfiguracije kao funkcijom cilja.
2. U glavnoj petlji, koja se može nazvati petljom vršnog opterećenja, postoji $N_t - 1$ odvojenih (one idu jedna iza druge kako opadaju) kontrolnih petlji za preostalih $N_t - 1$ uređenih nivoa opterećenja.

Funkcija cilja za ove kontrolne petlje je gubitak aktivne snage. U ovih $N_t - 1$ kontrolnih petlji, kao optimizacioni kriterijum upotrebljava se detaljno pretraživanje umesto metode „simulacije kaljenja”. Na ovaj način smanjeno je CPU vreme proračuna u odnosu na slučaj da se koristi metoda „simulacije kaljenja” i u ovim pod-kontrolnim petljama što je i glavni nedostatak metode opisane u [16,17].

Korak 1 – Ulazni podaci:

1. podaci o mreži i stepenasta funkcija cene baterija,
2. početna temperatura $T_0=10\ 000$ „°C”,
3. početna dužina Markovljevog lanca (200 generisanih konfiguracija),
4. koeficijent povećanja dužine Markovljevog lanca (1.1),
5. kriterijum okončanja algoritma.

Korak 2 – Startovanje sa početnom podobnom konfiguracijom:

1. pomoću generatora slučajnih brojeva, u skladu sa ograničenjima uslovljenim opterećenjem, generiši konfiguraciju vršnog nivoa opterećenja i pozovi sabrutinu radi izračunavanja napona čvorova radi proračuna gubitka snage;
2. pomoću generatora slučajnih brojeva, u skladu sa ograničenjima uslovljenim opterećenjem, generiši konfiguraciju $N_t - 1$ nivoa opterećenja i pozovi sabrutinu da bi sračunao gubitke;
3. isti postupak kao 2 ali za svaki od preostalih $N_t - 2$ nivoa opterećenja;
4. sračunaj početnu funkciju cilja.

Korak 3 – Načini globalni mehanizam hlađenja za spoljašnju petlju:

1. na bazi ranije izvršenog algoritma (za fiksne kondenzatorske baterije) i činjenice da su odbacivanja sada češća, zaključeno je da početna temperatura u potpunosti zadovoljava;
2. pravilo sniženja temperature, ili prosti mehanizam hlađenja kao u algoritmu samo za fiksne kondenzatorske baterije je usvojen:

$$T_{k+1}=0,95*T_k.$$

Korak 4 – Generatorom slučajnih brojeva generiši novu konfiguraciju vršnog nivoa opterećenja. Pozovi sabrutinu da bi odredio tok snaga. Na ovaj način dobija se druga konfiguracija vršnog nivoa opterećenja. Ona je ograničavajuća za niže nivoe opterećenja.

Korak 5 – Prva unutrašnja petlja je petlja $N_t - 1$ nivoa opterećenja. Sada se primenjuje mehanizam detaljnog pretraživanja, u cilju nalaženja najjeftinije konfiguracije ovog nivoa opterećenja s obzirom na kriterijum minimalne aktivne potrošnje.

Napomena: da bi se sračunao tok snaga za određenu konfiguraciju uvek se poziva sabrutina.

Korak 6 – Unutrašnja petlja koja sledi, druga za redom je unutrašnja petlja $N_t - 2$ nivoa opterećenja. Ovde se koristi kao i za sve $N_t - 1$ unutrašnje petlje detaljno pretraživanje, u cilju nalaženja najjeftinije (s obzirom na aktivne gubitke) konfiguracije za tekući stari $N_t - 1$ nivo opterećenja. Poslednja je optimalna konfiguracija za tekuću konfiguraciju vršnog nivoa opterećenja. Gornji postupak se ponavlja za sve preostale $N_t - 3$ nepretražene petlje.

Korak 7 – Na ovakav način se dobija kompletna tekuća nova konfiguracija.

Korak 8 – Sada je sve spremno za primenu Metropolis kriterijuma, ali isključivo za spoljašnju petlju u okviru koje je generisana nova konfiguracija maksimalnog nivoa opterećenja.

Korak 9 – Odavde je procedura ista kao za fiksne kondenzatorske baterije.

8. NUMERIČKI REZULTATI

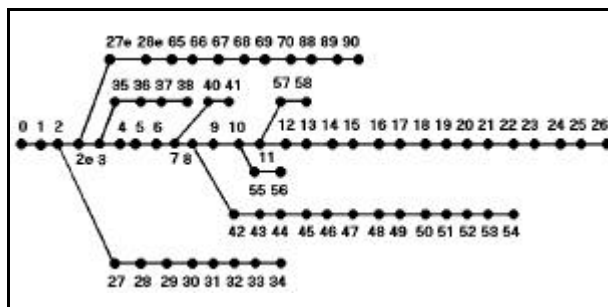
Razvijena su dva programa, jedan prostiji za problem postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija i drugi komplikovaniji za generalni slučaj postavljanja fiksnih i regulacionih kondenzatorskih baterija i oba su pisana u programskom jeziku Fortran 77.

Kao test sistemi korišćena su tri karakteristična distributivna sistema.

8.1. Test sistem 1

Korišćen je 12,66 kV distributivni sistem sa 70 čvorova i 9 bočnih grana izveden iz dela PG&E distributivnog sistema, prikazan na slici 3. Detaljni podaci, o njemu su dati u [21,22] i u prilogu 2. Pretpostavljeno je da se koriste kondenzatorske baterije sa korakom od 300 kVar-a sa fiksnom cenom montaže od 1 000 \$/mestu montaže i promenljivom cenom od 900 \$ po jedinici od 300 kVar-a.

Dozvoljene tolerancije napona u čvorovima iznose $\pm 10\%$ od nazivnog napona (12,66 kV). Cena



Slika 3. Ispitni sistem 1 [21,22]

gubitaka aktivne snage za vršni nivo opterećenja i period od godinu dana koji se posmatra je zanemarena ($k_p=0$ \$/kW/godini), dok je cena gubitaka aktivne energije 0,06 \$/kWh. Napon napojnog čvora iznosi 12,66 kV tokom minimalnog i nominalnog nivoa opterećenja. Za vreme vršnog nivoa opterećenja on iznosi 1,05*12,66 kV. Potrošači su modelovani kao potrošači konstantne snage. Optimalni rezultati primene metode „simulacije kaljenja” na kompenzaciju u ovom sistemu dati su u tabeli 1.

Tabela 1.

Rezultati primene metode „simulacije kaljenja” na ispitni sistem 1

„Suva” mreža (podaci o nekompenzovanom sistemu)						
Gubici aktivne snage za maksimalni nivo opterećenja (P_L u kW) 755 kW, Gubici električne energije za period od godinu dana (E_L u MWh) 2 327,4 MWh, Vrednost funkcije cilja (F_{max} u \$) 139 642 \$. Faktor snage napojnog čvora je manji od 0,85. Napon na čvoru 50 pada ispod 0,9*12,66 kV.						
Podaci o kompenzovanom sistemu						
Kondenzatorske baterije	Fiksne			Regulacione		
Čvor gde je postavljena baterija	17 50			16 50		
Nivo opterećenja	1	2	3	1	2	3
Nazivne snage baterija u kvar	300	300	300	300	300	300
P_{Lmin} u kW	1 200 1 200 1 200			2 400 1 200 600		
E_{Lmin} u MWh	538,0			477,0		
F_{min} u \$	1 578,4			1 505,2		
DF_{max} u \$	101 201,0			98 613,0		
	38 441,0			41 028,0		

8.1.1. Detaljnije razmotrena programska optimalna konfiguracija za slučaj postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija primenom metode „simulacije kaljenja”

a) Funkcija cilja iznosi 101 201 \$ i ima sledeće komponente:

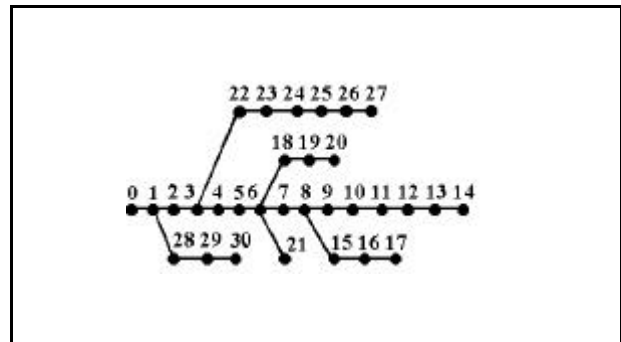
- cena fiksnih kondenzatorskih baterija: 6 500 \$,
- cena gubitaka aktivne energije: 94 701 \$.
- b) Faktor snage napojnog čvora je veći od 0,85. Mreža je blago prekompenzovana za minimalni nivo opterećenja.
- c) Naponski profil zadovoljava naponska ograničenja.
- d) $DC_{k,k-1}/C_k=0,001\%$, $n_k, \max=5\ 000$ (maksimalna dužina Markovljevog lanca).
- e) Upotrebljen je prosti mehanizam hlađenja $\alpha(T_k)=0,95$.
- f) Stopa prihvatanja je 0,001.
- g) CPU vreme egzekucije programa na PC Pentium II, 533 MHz je 1 minut.

8.1.2. *Detaljnije razmotrena programska optimalna konfiguracija za generalni slučaj postavljanja fiksnih i regulacionih kondenzatorskih baterija primenom metode „simulacije kaljenja”*

- a) Funkcija cilja iznosi 98 613 \$ i ima sledeće komponente:
 - cena fiksnih i regulacionih kondenzatorskih baterija: 8 300 \$,
 - cena gubitaka aktivne energije: 90 313 \$.
- b) Faktor snage napojnog čvora je veći od 0,85. Mreža nije prekompenzovana.
- c) Naponski profil zadovoljava naponska ograničenja.
- d) Krajnja dužina k -tog Markovljevog lanca je data formulom $n_k=1,1^k*200$ a maksimalna dozvoljena dužina Markovljevog lanca (LANAC) je 3 000.
- e) Upotrebljen je prosti mehanizam hlađenja $\alpha(T_k)=0,95$.
- f) Stopa prihvatanja je 0,000 1.
- g) CPU vreme egzekucije programa na PC Pentium II, 533 MHz je 12 minuta.

8.2. Test sistem 2

Drugi test sistem je 23 kV sa 31-im čvorom i 6 bočnih grana i njega su prvi upotrebili Grainger i Civanlar u [19] i on je predstavljen na slici 4. Ulazni podaci za ovaj primer su $k_p=120$ \$/kW/godini, $k_e=0,03$ \$/kWh i cena kondenzatora od $k_c=5$ \$/kvar-u. Godišnja stopa cene kondenzatorskih baterija iznosi 15 %. Ovaj primer obrađen je korišćenjem genetičkog algoritma u referenci [10]. Podaci o nivoima opterećenja kojih u ovom primeru ima četiri i njihovom trajanju su takođe dati u [10] i u prilogu 2. Optimalni rezultati primene metode „simulacije kaljenja” na kompenzaciju u ovom sistemu dati su u tabeli 2. Potrošači su modelovani kao potrošači konstantne snage.



Slika 4. Ispitni sistem 2 [10,19]

Tabela 2. Rezultati primene metode „simulacije kaljenja” na ispitni sistem 2

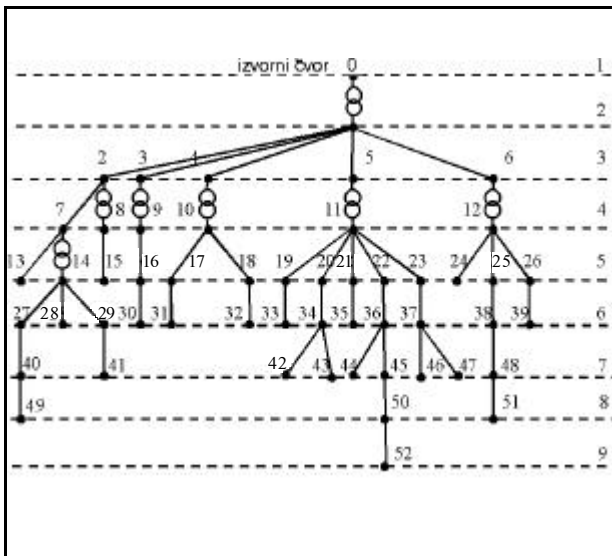
„Suva” mreža (podaci o nekompenzovanom sistemu)				
Gubici aktivne snage za maksimalni nivo opterećenja (P_L u kW) 1 390,7 kW, Gubici električne enegije za obračunski period od 6 900 h (E_L u MWh) 2 882,5 MWh, Vrednost funkcije cilja (F_{max} u \$) 253 361 \$.				
Podaci o kompenzovanom sistemu				
Regulacione kondenzatorske baterije				
Nivo opterećenja	1	2	3	4
Čvor gde je postavljena baterija	Nazivne snage baterija u kVar			
2	300	300	300	300
3	900	900	600	300
7	1 200	1 200	600	300
8	1 500	600	300	300
13	600	600	600	300
28	900	900	900	600
24	300	300	300	300
25	1 200	900	600	300
F_{min} u \$	212 539			
DF_{max} u \$	40 822			

8.2.1. *Detaljnije razmatrana optimalna konfiguracija primenom metode „simulacije kaljenja”*

- a) Krajnja dužina k -tog Markovljevog lanca je data formulom $n_k=1,1^k*200$ a maksimalna dozvoljena dužina Markovljevog lanca (LANAC) je 50 000.
- b) Upotrebljen je prosti mehanizam hlađenja $\alpha(T_k)=0,95$.
- c) Stopa prihvatanja je 0,000 1.
- d) CPU vreme egzekucije programa na PC Pentium II, 533 MHz je 5 sati.

8.3. Test sistem 3

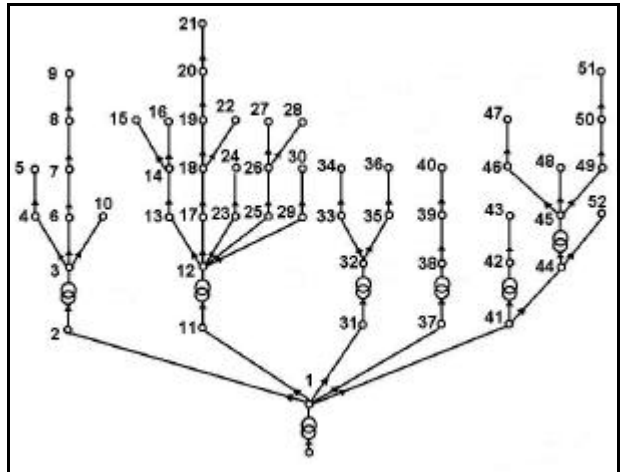
Ovo je primer mešovite distributivne mreže sa 53 čvora i tri naponska nivoa 110 kV/35 kV/10 kV i dat je na slici 5 [18]. Na ovoj slici prikazan je tipičan radijalni distributivni sistem, primenjena je numeracija čvorova po nivoima. Upotrebljeni su sledeći ulazni podaci: $k_p=120$ \$/kW/godini, $k_e=0,030$ \$/kWh, cena kondenzatorskih baterija data je u [18] i u prilogu 2, godišnja stopa cene kondenzatorskih baterija iznosi 15 %. Postoje dva tipa potrošača, industrijski u čvorovima 12, 24, 25, 26, 38, 39, 48 i 51 i stambeni/komercijalni koji su priključeni u ostalim čvorovima. Kriva trajanja aktivnog i reaktivnog opterećenja podeljena je u 12 segmenata različitog trajanja tako da se ima 12 različitih nivoa opterećenja tokom perioda od godinu dana. Aktivna i reaktivna potrošnja pojedinih čvorova takođe je data u [18] i u prilogu 2. Dozvoljena tolerancija za napone čvorova iznosi $\pm 10\%$ od nazivne vrednosti. Potrošači i kondenzatorske baterije modelovani su konstantnom snagom.



Slika 5. Ispitni sistem 3 [18]

Podaci za „suvu” mrežu, mrežu bez kondenzatorskih baterija (nekompenzovani sistem) su sledeći $P_L=988,6$ kW, gubici aktivne energije $E_L=4\,766,7$ MWh sa maksimalnom vrednosti funkcije cilja $F_{max}=261\,629$ \$.

Rezultati optimizacije primenom metode „simulacije kaljenja” za dva upotrebljena efikasna algoritma toka snaga dati su u tabeli 4.



Slika 6. Ispitni sistem 3 [18]
(„nizvodno” označavanje čvorova mreže)

Tabela 4. Rezultati primene metode „simulacije kaljenja” za slučaj postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija

a) označavanje čvorova test mreže po nivoima (slika 5 [18])						
j	Q_{c8j} (kvar)	Q_{c10j} (kvar)	Q_{c20j} (kvar)	Q_{c30j} (kvar)	Q_{c36j} (kvar)	Q_{c38j} (kvar)
1 do 12	1 500	900	300	300	300	300
Minimalna vrednost funkcije cilja $F_{min}=241\,069$ \$ Maksimalna ušteda $DF_{max}=20\,560$ \$						
Parametri za primenjenu metodu „simulacije kaljenja” i) $DC_{k,k-1}/C_k=0,001\%$, ii) Maksimalna dužina Markovljevog lanca 10 000 000, iii) Stopa prihvatanja 0,001 %, iv) CPU vreme = 312 sati (program normalno terminira).						
b) označavanje čvorova test mreže „nizvodno” duž grana mreže (slika 6)						
j	Q_{c3j} (kvar)	Q_{c12j} (kvar)	Q_{c39j} (kvar)	Q_{c43j} (kvar)	Q_{c45j} (kvar)	
1 do 12	1 200	1 500	300	600	1 200	
Minimalna vrednost funkcije cilja $F_{min}=245\,394$ \$ Maksimalna ušteda $DF_{max}=16\,235$ \$						
Parametri za primenjenu metodu „simulacije kaljenja” i) $DC_{k,k-1}/C_k=0,001\%$, ii) Maksimalna dužina Markovljevog lanca 10 000 000, iii) Stopa prihvatanja 0,001 %, iv) CPU vreme (egzekucija programa veštački prekinuta), 18 sati.						

9. ZAKLJUČCI

U ovom radu izloženo je rešavanje problema minimizacije funkcije cilja radijalne, simetrične, distributivne mreže za slučaj najekonomičnijih tokova reaktivnih snaga primenom metode „simulacije kaljenja”.

Dobijeni rezultati ukazuju na prednosti ove metode i daju čvrste osnove za njenu primenu u realnim distributivnim mrežama u procesu njihovog planiranja kada vreme proračuna nije od primarnog značaja.

9.1. Način postavljanja kondenzatorskih baterija u radijalnim distributivnim mrežama

Ne postoji generalni odgovor na ovo pitanje. Njega je moguće dobiti nakon primene programa u konkretnom slučaju (konkretnoj radijalnoj distributivnoj mreži).

9.2. Bliskost globalnom optimumu

Primena metode „simulacije kaljenja” na sva tri test primera pokazuje da što su ulazni parametri rigorozniji, blizina globalnom optimumu je veća, ali vreme računanja je drastično duže. Algoritam prihvata gora rešenja (povećanje vrednosti funkcije cilja) i može terminirati sa ovakvim gorim rešenjem. Ovo se prevazilazi monitorisanjem programa tokom njegove stvarne egzekucije. Pod monitorisanjem programa podrazumeva se beleženje minimalne vrednosti funkcije cilja sve do trenutka stvarnog terminiranja programa. U sva tri primera rešenje koje je dobijeno, dobijeno je upravo ovim monitorisanjem.

9.3. Poređenje razvijenog algoritma sa drugim algoritmima za rešavanje

Poređenjem metode „simulacije kaljenja” iz ovog članka sa istom metodom primenjenom kod drugih autora [16,17] vidimo da metodu „simulacije kaljenja” ima smisla primenjivati samo u petlji vršnog nivoa opterećenja to jest da je jedino hibridni algoritam sa metodom potpunog pretraživanja, u nižim petljama, za niže nivoe opterećenja, realan u konkretnim primenama za kompenzaciju sa gledišta proteklog CPU vremena. Ova tendencija primene hibridnog algoritma sa metodom „simulacije kaljenja” prisutna je relativno od skora, videti referencu [26] u kojoj se metoda „simulacije kaljenja” primenjuje dok se ne približimo globalnom optimumu, a onda se prelazi na iterativno pretraživanje komši-

luka globalnog optimuma, čime se ne samo dobija bolje rešenje već i za kraće vreme.

9.4. Naponska ograničenja

Naponska ograničenja analizirana su u Test sistemu 1 iz čega se videlo da kondenzatori sami po sebi, mada poboljšavaju svojom ugradnjom naponski profil, ne mogu da ga toliko poprave da bi bila ispoštovana naponska ograničenja. Pri nedovoljnom naponu u mreži (što je uglavnom slučaj pri maksimalnom nivou opterećenja) potrebno je ugraditi još i regulacione transformatore.

10. ZAHVALNICA

Autor želi da iskaže svoju zahvalnost gospodinu dipl. el. ing. Ebel Ivi iz Beograda za njegovu neprocenjivu pomoć u kreiranju programskog paketa na Fortranu 77 u primeni metode „simulacije kaljenja” za generalni slučaj primene kondenzatorskih baterija kao i prof. Milošu S. Nedeljkoviću dipl. maš. ing, mašinski fakultet Beograd, na pomoći pri kreaciji programskog paketa na Fortranu 77 za slučaj fiksnih kondenzatorskih baterija i njegovim izuzetno korisnim sugestijama u sprovođenju ovog istraživanja.

11. DODATAK 1 MATEMATIČKI FUNDAMENTI METODE „SIMULACIJE KALJENJA”

U statističkoj mehanici fizički proces poznat kao kaljenje se često vrši da bi sistem postigao stanje sa minimalnom slobodnom energijom. U procesu kaljenja, čvrsto telo se u vrućoj kadi zagreva porastom temperature kade sve dok se ne rastopi do tečnog stanja, tada se temperatura polagano spušta. U tečnoj fazi, svi delići čvrstog tela se raspoređuju proizvoljno. U zemaljskom stanju, delići se raspoređuju u vidu visoko strukturirane rešetke i energija sistema je minimalna. Zemaljsko stanje kod čvrstog tela se postiže samo ako je maksimalna temperatura dovoljno visoka a hlađenje se sprovodi dovoljno polako. U protivnom, čvrsto telo se može zamrznuti pre u metastabilnoj strukturi nego u zemaljskom stanju. Ako je stanje definisano skupom položaja delića, tada u termičkoj ravnoteži, verovatnoća da je sistem u stanju i je predstavljena Bolcmanovom raspodelom,

$$Pr\{s_i\} = \frac{\exp(-E(i)/k_b T)}{Z} \quad (1)$$

gde je $Z = \sum_i \exp(-E(i)/k_b T)$ poznato kao funkcija razdvajanja, k_b je Bolcmanova konstanta, T je

temperatura, $E(i)$ je energija stanja i , $i \in S$ je prostor stanja. Pri vrlo visokim temperaturama, može se videti da važi

$$\lim_{T \rightarrow 0} \lim_{i \in S} \frac{\exp(-E(i)/k_b T)}{\sum_{j \in S} \exp(-E(j)/k_b T)} = \frac{1}{|S|} \quad (2)$$

gde je $|S|$ ukupan broj stanja u S . Ovo nameće zaključak da su sva stanja podjednako verovatna pri vrlo visokoj temperaturi. U ovom slučaju, energija stanja ne utiče na verovatnoću stanja. Na drugoj strani, pri nižim temperaturama, vrednost eksponencijalne funkcije je izuzetno zavisna od energije stanja. Tako da se ima

$$\lim_{T \rightarrow 0} \lim_{i \in S} \frac{\exp(-(E(i) - E_{min})/k_b T)}{\sum_{j \in S} \exp(-(E(j) - E_{min})/k_b T)} = \frac{1}{|S_{min}|}, \quad i \in S_{min} \quad (3)$$

gde je

$$S_{min} = \{i : E(i) = E_{min}\} \quad i \quad E_{min} = \min_{j \in S} E(j).$$

Iz ove jednačine, se vidi da kada se temperatura približava nuli, sistem konvergira ka stanju sa minimalnom energijom, E_{min} , s obzirom na to da je verovatnoća jedino stanja sa minimalnom energijom različita od nule, a za druga stanja je nula.

Ime „simulacija kaljenja” potiče od analogije sa fizičkim procesima kod čvrstih tela.

Funkcija cene i rešenje (konfiguracija) u procesu optimizacije odgovaraju funkciji energije i stanju u statističkoj fizici, respektivno.

Kod „simulacije kaljenja” za tekuće stanje $s(k)$ naredno stanje $s'(k)$ se nasumice bira iz komšiluka gde je k , k -ti pokušaj. Verovatnoća prelaska iz jednog stanja u drugo je data Metropolis kriterijumom

$$P(s(k), s'(k)) = \exp\left(-\frac{f(s'(k)) - f(s(k))}{T}\right) \quad (4)$$

Markovljev lanac se završava raspodelom stacionarnog stanja sa verovatnoćom konfiguracije i , p_i posle beskonačnog broja poremećaja.

$$p_i(T) = \frac{\exp(-f(i)/T)}{\sum_{j \in S} \exp(-f(j)/T)} \quad (5)$$

Iz (3) se zna da je

$$p_i^* = \lim_{T \rightarrow 0} p_i(T) = \frac{1}{|S_{min}|}, \quad i \in S_{min} \quad (6)$$

u protivnom.

Zato je,

$$\lim_{T \rightarrow 0} \lim_k P(s(k) \in S_{min}) = \lim_{T \rightarrow 0} \lim_{i \in S_{min}} p_i(T) = \sum_{i \in S_{min}} p_i^* = 1. \quad (7)$$

Jednačina (7) iskazuje činjenicu da „simulacija kaljenja” asimptotski konvergira ka konfiguraciji sa minimalnom cenom. To jest, ako se temperatura polako spušta a na svakoj temperaturi sistem ispuni zadovoljavajući broj pomeraja, konfiguracije sa globalnom minimalnom cenom se dostižu sa verovatnoćom jedan.

12. DODATAK 2

ULAZNI RAČUNSKI PODACI ZA TEST PRIMERE

12.1. Test sistem 1

Napon napojnog čvora $U_0=12,66$ kV

Tabela T1.

Cena kondenzatorskih baterija

Snaga baterije (kvar)	Cena baterije (\$)
300	1 900
600	2 800
900	3 700
1 200	4 600
1 500	5 500

Tabela T2.

Vrednosti i trajanje nivoa opterećenja

Nivoi opterećenja	S_0 1,8	S_1 1,0	S_2 0,5
Trajanje nivoa opterećenja (h)	T_0 1 000	T_1 6 760	T_2 1 000

Tabela T3.

Podaci o mreži

Deonica	R (Ω)	X (Ω)	P (k Ω)	Q (kVat)
0-1	0,000 5	0,001 2	0	0
1-2	0,000 5	0,001 2	0	0
2-2e	0	0	0	0
2e-3	0,001 5	0,003 6	0	0
3-4	0,025 1	0,029 4	0	0
4-5	0,366 0	0,186 4	2,60	2,20
5-6	0,381 1	0,194 1	40,40	30,00

nastavak 1. tabele T3.

Deonica	R (Ω)	X (Ω)	P (k Ω)	Q (kVat)
6-7	0,092 2	0,047 0	75,00	54,00
7-8	0,049 3	0,025 1	30,00	22,00
8-9	0,819 0	0,270 7	28,00	19,00
9-10	0,187 2	0,061 9	145,00	104,00
10-11	0,711 4	0,235 1	145,00	104,00
11-12	1,030 0	0,340 0	8,00	5,50
12-13	1,044 0	0,345 0	8,00	5,50
13-14	1,058 0	0,349 6	0	0
14-15	0,196 6	0,065 0	45,50	30,00
15-16	0,374 4	0,123 8	60,00	35,00
16-17	0,004 7	0,001 6	60,00	35,00
17-18	0,327 6	0,108 3	0	0
18-19	0,210 6	0,069 6	1,00	0,60
19-20	0,341 6	0,112 9	114,00	81,00
20-21	0,014 0	0,004 6	5,30	3,50
21-22	0,159 1	0,052 6	0	0
22-23	0,346 3	0,114 5	28,00	20,0
23-24	0,748 8	0,247 5	0	0
24-25	0,308 9	0,102 1	14,00	10,00
25-26	0,173 2	0,057 2	14,00	10,00
2-27	0,004 4	0,010 8	26,00	18,60
27-28	0,064 0	0,156 5	26,00	18,60
28-29	0,397 8	0,131 5	0	0
29-30	0,070 2	0,023 2	0	0
30-31	0,351 0	0,116 0	0	0
31-32	0,839 0	0,281 6	14,00	10,00
32-33	1,708 0	0,564 6	19,50	14,00
33-34	1,474 0	0,487 3	6,00	4,00
2e-27e	0,004 4	0,010 8	26,00	18,55
27e-28e	0,064 0	0,156 5	26,00	18,55
28e-65	0,105 3	0,123 0	0	0
65-66	0,030 4	0,035 5	24,00	17,00
66-67	0,001 8	0,002 1	24,00	17,00
67-68	0,728 3	0,850 9	1,20	1,00
68-69	0,310 0	0,362 3	0	0
69-70	0,041 0	0,047 8	6,00	4,30
70-88	0,009 2	0,011 6	0	0
88-89	0,108 9	0,137 3	39,22	26,30
3-35	0,003 4	0,008 4	0	0
35-36	0,085 1	0,208 3	79,00	56,40
36-37	0,289 8	0,709 1	384,70	274,50
37-38	0,082 2	0,201 1	384,70	274,50
7-40	0,092 8	0,047 3	40,50	28,30
40-41	0,331 9	0,111 4	3,60	2,70

nastavak 2. tabele T3.

Deonica	R (Ω)	X (Ω)	P (k Ω)	Q (kVat)
8-42	0,174 0	0,088 6	4,35	3,50
42-43	0,203 0	0,103 4	26,40	19,00
43-44	0,284 2	0,144 7	24,00	17,20
44-45	0,281 3	0,143 2	0	0
45-46	1,590 0	0,533 7	0	0
46-47	0,783 7	0,263 0	0	0
47-48	0,304 2	0,100 6	100,00	72,00
48-49	0,386 1	0,117 2	0	0
49-50	0,507 5	0,255 8	1 244,00	888,00
50-51	0,097 4	0,049 6	32,00	23,00
51-52	0,145 0	0,073 8	0	0
52-53	0,715 0	0,361 9	227,00	162,00
53-54	1,041 0	0,530 2	59,00	42,00
10-55	0,201 2	0,061 1	18,00	13,00
55-56	0,004 7	0,001 4	18,00	13,00
11-57	0,739 4	0,244 4	28,00	20,00
57-58	0,004 7	0,001 6	28,00	20,00

12.2. Test sistem 2Napon napojnog čvora $U_0=23$ kV

Tabela T4.

Cena kondenzatorskih baterija

Snaga baterije (kvar)	Cena baterije ($\$$)
300	1 900
600	3 200
900	4 500
1 200	5 400
1 500	6 000
1 800	6 400

Tabela T5.

Vrednosti i trajanje nivoa opterećenja

Nivoi opterećenja	S_0 1	S_1 0,8	S_2 0,6	S_3 0,4
Trajanje nivoa opterećenja (h)	T_0 750	T_1 725	T_2 1 050	T_3 4 375

Tabela T6.

Podaci o mreži

Deonica	R (Ω)	X (Ω)	P (k Ω)	Q (kVat)
0-1	0,509 6	1,703 0	0	0
1-2	0,219 1	0,011 8	522	174
2-3	0,348 5	0,344 6	0	0
3-4	1,175 0	1,021 4	936	312
4-5	0,553 0	0,480 6	0	0
5-6	1,662 5	0,936 5	0	0
6-7	1,350 6	0,760 8	0	0
7-8	1,350 6	0,760 8	0	0
8-9	1,325 9	0,746 9	189	63
9-10	1,325 9	0,746 9	0	0
10-11	3,970 9	2,236 9	336	112
11-12	1,854 9	1,044 9	657	219
12-13	0,755 7	0,425 7	783	261
13-14	1,538 9	0,866 9	729	243
8-15	0,475 2	0,413 1	477	159
15-16	0,728 2	0,410 2	549	183
16-17	1,305 3	0,735 3	477	159
6-18	0,483 8	0,420 6	432	144
18-19	1,589 8	1,381 8	672	224
19-20	1,538 9	0,866 9	495	165
6-21	0,604 8	0,525 7	207	69
3-22	0,563 9	0,557 5	522	174
22-23	0,343 2	0,339 3	1 917	639
23-24	0,572 8	0,497 9	0	0
24-25	1,460 2	1,269 2	1 116	372
25-26	1,062 7	0,923 7	549	183
26-27	1,511 4	0,851 4	792	264
1-28	0,465 9	0,025 1	882	294
28-29	1,635 1	0,921 1	882	294
29-30	1,114 3	0,627 7	882	294

12.3. Test sistem 3 (numeracija čvorova po nivoima)

Napon napojnog čvora $U_0=110$ kV

Tabela T7.

Cena kondenzatorskih baterija

Snaga baterije (kvar)	Cena baterije (\$)
300	1 900
600	3 200
900	4 500
1 200	5 400
1 500	6 000

Tabela T8.

Vrednosti i trajanje nivoa opterećenja

Nivoi opterećenja	Trajanje	Stambena i komercijalna potrošnja	Industrijska potrošnja
j	T_j (h)	p,q (r.j.)	p,q (r.j.)
1	782,14	1,00	1,00
2	1 564,28	0,89	0,92
3	782,14	0,85	0,92
4	782,14	0,72	0,80
5	1 564,28	0,69	0,80
6	782,14	0,67	0,80
7	312,57	0,67	0,65
8	625,71	0,63	0,65
9	312,57	0,63	0,65
10	312,57	0,63	0,60
11	625,71	0,54	0,60
12	312,57	0,50	0,60

Tabela T9.

Podaci o transformatorima

Grana	m (kV/kV)	Snaga (kVA)	R (Ω)	X (Ω)	$P+jQ$ (kW+jkvar)
1	110/36,75	1x31 500	1,510	44,610	0+j0
8	35/10,5	1x8 000	1,033	10,670	2 000+j560
9	35/10,5	1x8 000	1,033	10,670	1 000+j320
10	35/10,5	2x4 000	1,263	9,100	1 000+j320
11	35/10,5	2x4 000	1,263	9,100	300+j100
12	35/10,5	2x8 000	0,516	5,335	1 200+j400
14	35/10,5	1x4 000	2,527	18,200	0+j0

Tabela T10.

Podaci o vodovima

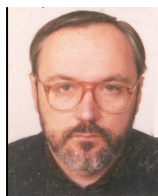
Grana	Dužina (km)	Parametri voda			$P+jQ$ (kW+jkvar)
		r_v (Ω /km)	x_v (Ω /km)	b_v (mS/km)	
2	8,0	0,433	0,367	3,13	0+j0
3	1,0	0,132	0,070	62,00	0+j0
4	6,5	0,216	0,183	6,26	0+j0
5	8,0	0,357	0,378	3,03	0+j0
6	7,5	0,433	0,367	3,13	0+j0
7	8,5	0,606	0,378	3,03	0+j0
13	7,5	0,606	0,378	3,03	700+j200
15	7,0	0,200	0,098	136,00	2 000+j500
16	4,2	0,131	0,093	161,00	1 500+j400
17	3,5	0,200	0,098	136,00	1 200+j270
18	3,2	0,200	0,098	136,00	1 500+j500
19	3,5	0,606	0,354	3,23	100+j30
20	7,0	0,606	0,354	3,23	200+j80
21	4,5	0,866	0,366	3,12	300+j100
22	2,1	0,510	0,366	3,12	150+j50
23	2,0	0,866	0,366	3,12	250+j90
24	4,0	0,200	0,098	136,00	500+j200
25	3,1	0,510	0,366	3,12	300+j100
26	3,0	0,200	0,098	136,00	400+j120
27	2,0	0,866	0,366	3,12	250+j80
28	1,5	0,131	0,093	161,00	500+j150
29	2,0	0,200	0,098	136,00	250+j70
30	3,6	0,866	0,366	3,12	950+j320
31	6,0	0,866	0,366	3,12	550+j200
32	4,5	0,866	0,366	3,12	350+j100
33	4,0	1,212	0,377	3,02	100+j30
34	2,5	1,212	0,377	3,02	120+j40
35	12,0	0,866	0,366	3,12	250+j80
36	3,5	0,510	0,366	3,12	200+j70
37	2,5	0,866	0,366	3,12	300+j110
38	3,4	0,866	0,366	3,12	700+j200
39	2,0	0,200	0,098	136,00	200+j70
40	2,5	0,866	0,366	3,12	300+j120
41	4,0	0,200	0,098	136,00	1 000+j300
42	2,1	1,212	0,377	3,02	200+j60
43	1,5	1,212	0,377	3,02	250+j70
44	6,0	0,866	0,366	3,12	200+j80
45	3,0	0,866	0,366	3,12	300+j100
46	2,3	1,212	0,377	3,02	200+j80
47	3,5	1,212	0,377	3,02	250+j90
48	7,0	0,866	0,366	3,12	200+j70
49	1,5	1,212	0,377	3,02	250+j100
50	2,5	1,212	0,377	3,02	200+j70
51	5,0	1,212	0,377	3,02	100+j30
52	6,0	1,212	0,377	3,02	100+j30

13. LITERATURA

- [1] D. S. Johnson, C. R. Aragon, L. A. McGEACH and C. Schevon, OPTIMIZATION BY SIMULATED ANNEALING: AN EXPERIMENTAL EVALUATION; PART I, GRAPH PARTITIONING, AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, preprint, pp. 865-892.
- [2] H. D. Chiang and R. J. Jumeau, OPTIMAL NETWORK RECONFIGURATIONS IN DISTRIBUTION SYSTEMS: PART 2: SOLUTION ALGORITHMS AND NUMERICAL RESULTS *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp. 1568-1574,
H. D. Chiang and R. J. Jumeau, OPTIMAL NETWORK RECONFIGURATIONS IN DISTRIBUTION SYSTEMS: PART 1: A NEW FORMULATION AND A SOLUTION METHODOLOGY, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1902-1909.
- [3] Y. T. Hsiao, C. C. Liu, H. D. Chiang and Y. L. Chen, A NEW APPROACH FOR OPTIMAL VAR SOURCES PLANNING IN LARGE SCALE ELECTRIC POWER SYSTEMS, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 3, August 1993, pp. 988-996.
- [4] Y. T. Hsiao, H. D. Chiang, C. C. Liu and Y. L. Chen, A COMPUTER PACKAGE FOR OPTIMAL MULTI-OBJECTIVE VAR PLANNING IN LARGE SCALE POWER SYSTEMS, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, May 1994, pp. 668-676.
- [5] H. D. Chiang, J. C. Wang, J. Tong and G. Darling, OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT, REPLACEMENT AND CONTROL IN LARGE-SCALE DISTRIBUTION SYSTEMS: SYSTEM MODELING AND A NEW FORMULATION, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, February 1995, pp. 356-369.
- [6] K. P. Wong and S. Y. W. Wong, HYBRID GENETIC/SIMULATED ANNEALING APPROACH TO SHORT-TERM MULTIPLE-FUEL-CONSTRAINED GENERATION SCHEDULING, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 776-784.
- [7] A. H. Mantaway, Y. L. A. Magid and S. Z. Selim, INTEGRATING GENETIC ALGORITHMS, TABU SEARCH, AND SIMULATED ANNEALING FOR THE UNIT COMMITMENT PROBLEM, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, August 1999, pp. 829-836.
- [8] J. Zhu, G. Bilbro and M. Y. Chow, PHASE BALANCING USING SIMULATED ANNEALING, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 4, November 1999, pp. 1508-1513.

- [9] K. Y. Lee, X. Bai and Y. M. Park, OPTIMIZATION METHOD FOR REACTIVE POWER PLANNING BY USING A MODIFIED SIMPLE GENETIC ALGORITHM, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, November 1995, pp. 1843-1850.
- [10] S. Sundhararajan and A. Pahwa, OPTIMAL SELECTION OF CAPACITORS FOR RADIAL DISTRIBUTION SYSTEMS USING A GENETIC ALGORITHM, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, August 1994, pp. 1499-1507.
- [11] M. Delfanti, G. P. Granelli, P. Marannino and M. Montagna, OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT USING DETERMINISTIC AND GENETIC ALGORITHMS, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, August 2000, pp. 1041-1046.
- [12] R. A. Gallego, A. J. Monticelli and R. Romero, OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 4, November 2001, pp. 630-637.
- [13] A. S. Safiaggianni and G. J. Salis, OPTIMUM VOLTAGE REGULATOR PLACEMENT IN A RADIAL DISTRIBUTION NETWORK, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000, pp. 879-886.
- [14] B. Stojanović, METODA „SIMULACIJE KALJENJA I NJENA PRIMENA NA KOMPENZACIJU U RADIJALNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, Magistarski rad, Beograd, 1997.
- [15] A. Sarić, PRIMENA METODE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE ZA REŠAVANJE PROBLEMA KOMPENZACIJE REAKTIVNE SNAGE I REGULACIJE NAPONA U DISTRIBUTIVNIM SISTEMIMA, Doktorska disertacija, Beograd, 1997.
- [16] H. D. Chiang, J. C. Wang, O. Cockings and H. D. Shin, OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENTS IN DISTRIBUTION SYSTEMS: PART 1: A NEW FORMULATION AND THE OVERALL PROBLEM, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990, pp. 634-642.
- [17] H. D. Chiang, J. C. Wang, O. Cockings and H. D. Shin, OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENTS IN DISTRIBUTION SYSTEMS: PART 2: SOLUTION ALGORITHMS AND NUMERICAL RESULTS, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990, pp. 643-649.
- [18] M. Čalović, A. Sarić and M. Đukanović, DYNAMIC PROGRAMMING BASED MULTI-STAGE OPTIMIZATION OF SHUNT CAPACITORS IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEMS, Archive of Electrical Engineering, 1996, 79, (6), pp. 479-488.
- [19] J. J. Grainger and S. Civanlar, VOLT/VAR CONTROL ON DISTRIBUTION SYSTEMS WITH LATERAL BRANCHES USING SHUNT CAPACITORS AND VOLTAGE REGULATORS: PART 1: THE OVERALL PROBLEM, PART 2: THE SOLUTION METHOD AND PART 3: THE NUMERICAL RESULTS, IEEE Transactions, Vol. PAS-104, No. 11, November 1985, pp. 3278-3297.
- [20] A. Sarić, M. Čalović, JEDAN ALGORITAM ZA PRORAČUN NAPONSKIH STANJA, TOKOVA SNAGA I GUBITAKA U RADIJALNOM DISTRIBUTIVNOM SISTEMU, „Elektrodistribucija”, god. 20, (1992), br. 3, str. 127-140.
- [21] M. E. Baran and F. F. Wu, OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989, pp. 725-734.
- [22] M. E. Baran and F. F. Wu, OPTIMAL SIZING OF CAPACITORS PLACED ON RADIAL DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989, pp. 735-743.
- [23] R. F. Cook, OPTIMIZING THE APPLICATION OF SHUNT CAPACITORS FOR REACTIVE VOLT-AMPERE CONTROL AND LOSS REDUCTION, AIEE Trans. , Vol. 80, August 1961, pp. 1961.
- [24] P. J. Laarhoven and E. H. L. Aarts, SIMULATED ANNEALING THEORY AND APPLICATION, Reidel, Dordrecht, 1987.
- [25] K. P. Wong and C. C. Fung, SIMULATED – ANNEALING BASED ECONOMIC DISPATCH ALGORITHM, IEE Proc. Part C, 1993, 140, (6), pp. 509-515.
- [26] G. K. Purushothama and L. Jenkins, SIMULATED ANNEALING WITH LOCAL SEARCH – A HYBRID ALGORITHM FOR UNIT COMMITMENT, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, February 2003, pp. 273-278.

Rad je primljen u uredništvo 30. 07. 2004. godine



Branko D. Stojanović je diplomirao na elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, odsek energetska, smer elektroprivreda 1981. godine. Magistrirao je na istom fakultetu, smer električna oprema i postrojenja 1997. godine. Oblast njegovog naučnog istraživanja je primena metode „simulacije kaljenja” u radijalnim distributivnim mrežama. Zaposlen je u Tehničkom opitnom centru pri KoV u Beogradu.

Postupak za povećanje korišćenja kondenzatora i poboljšanje kompenzacije reaktivne energije

Stručni rad

UDK: 621.319.4; 621.3.016.25; 621.3.018.1

Rezime:

U radu je prikazan postupak za povećanje faktora snage potrošača sa kondenzatorima i poboljšanje kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnoj mreži, bez novih ulaganja. To se zasniva na (novom) postupku za povećanje korišćenja (postojećih) kondenzatora u mreži potrošača. Ideja je da se kondenzatorske baterije podeli na deo sa fiksno priključenim kondenzatorima snage Q_{CF} i deo koji se, po potrebi, automatski uključuje i reguliše zadati $\cos\phi$. Time se veći deo kondenzatora, kod industrijskih potrošača, trajno priključuje na sekundarne sabirnice transformatora (srednji napon/niski napon) i koristi svih 8 760 h/godišnje, umesto uobičajenih 2 000-3 000 h/godišnje. Znatno veći iznosi (približno za 4 puta) za snage stalno priključenih kondenzatora (Q_{CF}), u odnosu na iste dimenzionisane da se izbegnu rezonance za harmonike reda $h < 17$, se dobija ju izborom vrednosti $Q_{CF} = S_{nt}/(8I_{uk})$. Time se, primenom naše ideje, rezonantna učestanost postavlja na 450 Hz, ali se radi o fiktivnoj rezonanci pošto transformatori sprege trougao/zvezda predstavljaju otvoreno kolo za struje 9-tog harmonika na sekundarnoj strani transformatora, a time i kroz kondenzatore.

Cljučne reči: *popravka faktora snage, povećanje korišćenja kondenzatora, industrijski potrošač, distributivna mreža*

Abstract:

PROCEDURE FOR USAGE CAPACITORS INCREASING AND REACTIVE ENERGY COMPENSATION IMPROVEMENT

Procedure for power factor improvement of consumers with capacitors and electrical power distribution, without new investment is presented in this paper. By usage increased of existing installed in industrial consumer mains is supposed. It is based on the (new) procedure for (existing) capacitors usage increasing. The idea is to divide into two parts: part with fixed capacitors (Q_{CF}) connected permanently, and part with condensers which are „switched on/ switched off capacitor banks” automatically and power factor control. So that a greater part of industrial consumers capacitors are connected permanently and use all 8 760 h/year, instead of 2 000- 3 000 h/year. The values selection $Q_{CF} = S_{nt}/(8I_{uk})$, i. e. permitted values for fixed capacitors power (Q_{CF}), are increased 4 times, approximately, in relation to values selected to avoid resonance for order harmonic $h < 17$. This way, resonance frequency is adjusted on 450 Hz, but resonance for order harmonic $h=9$ is fictitious, as the delta/star connection transformer is open circuit for triplen harmonics.

Key words: *power factor correction, usage capacitors increase, industrial consumer, electric power distribution system*

1. UVOD

Zbog izraženih potreba za reaktivnom snagom u distributivnim mrežama (DM) [1–3], po važećem Tarifnom sistemu Elektroprivrede Srbije [4], potrošači se sada stimulišu da dostignu faktor snage $\cos \mathbf{j} = 1$, umesto ranije zahtevane vrednosti $\cos \mathbf{j} = 0,95$. Međutim, i pored toga, nije došlo do povećanja faktora snage industrijskih potrošača. U praksi su česti slučajevi da se kod potrošača i dalje registruje značajna potrošnja prekomerne reaktivne energije, npr. ne dostižu se ni vrednosti faktora snage $\cos \mathbf{j} = 0,95$, i pored dovoljne snage kondenzatorskih baterija i dobro podešene automatske kompenzacije (AK). Pogotovu su retki slučajevi da potrošač dostigne vrednosti faktora snage $\cos \mathbf{j} \geq 0,98$, a potpuno eliminisanje potrošnje reaktivne energije i dostizanje vrednosti $\cos \mathbf{j} = 1$ praktično nije moguće.

Objašnjenje je u gubicima reaktivne snage i energije na transformatorima srednji napon/niski napon (SN/NN) koji ulaze u obračunatu reaktivnu energiju koja se uobičajeno meri na mestu priključka potrošača na mrežu srednjeg napona. Delom tome doprinosi i nemogućnost da promene snage kondenzatorske baterije u potpunosti prate promenu reaktivnih (induktivnih) opterećenja potrošača. Interesantno je da, ne retko, izmerena potrošnja reaktivne energije (W_Q) ne opada ni kod potrošača kod kojih je potrošnja aktivne (W_P) a time i reaktivne (W_Q) energije znatnije smanjena. To znači da nekompenzovana potrošnja reaktivne energije, praktično, ostaje ista u apsolutnom iznosu, a ova činjenica će u radu biti i objašnjena, u poglavlju 3. Štaviše, relativna vrednost W_Q/W_P se povećava, odnosno faktor snage ($\cos \mathbf{j}$) se smanjuje, čime se i objašnjavaju, čak, i nešto veći iznosi obračunate prekomerne reaktivne energije kod potrošača koji su smanjili potrošnju aktivne energije i čije kondenzatorske baterije rade u automatskom režimu. Kao primer navodimo slučaj jednog velikog potrošača („NOVKABEL”, Novi Sad) čije su potrošnje aktivne (W_P) i reaktivne (W_Q) energije sa vrednosti $W_{P1} \approx 25\,000\,000$ kWh/god. i $W_{Q1} \approx 25\,000\,000$ kvarh/god, opale tokom poslednjih godina na vrednosti $W_{P2} \approx 15\,000\,000$ kWh/god. i $W_{Q2} \approx 18\,000\,000$ kvarh/god. dok je registrovana potrošnja reaktivne energije ostala približno ista (6 000 000 kvarh/god), i pored toga sto u mreži potrošača na sekundarnim sabirnicama u 18 trafostanica TS 10(20)/0,4 (kV/kV) rade kondenzatorske baterije ukupne snage 8 200 kvar u režimu ispravne automatske kompenzacije (AK), a maksimalno reaktivno opterećenje je opalo na oko 5 600 - 5 800 kvar. I pored uloženog truda na poboljšanje rada automatske kompenzacije, nije došlo do bitnijeg smanjenja izmerene potrošnje reaktivne energije. Potrošnja re-

aktivne energije pomenutog potrošača je, ipak, smanjena na samo 1 000 000 kvarh/god, tako što je veći deo kondenzatora iz sastava pomenutih kondenzatorskih baterija, ukupne snage 5 200 kvar, uključen u stalan rad. Radi se o rešenju koje donosi značajnu dobit potrošačima čiji se kondenzatori koriste na nov način, ali i distributivnim preduzećima što će biti pokazano u poglavlju 4 rada. Za takav zakret u postupku korišćenja kondenzatora, pored ideje bilo je potrebno:

- izvršiti odgovarajuće računске provere i analize [5], koje su potvrdile pretpostavku da dozvoljene snage za fiksno priključene kondenzatore na niskonaponskoj strani transformatora 10 (20)/0,4 kV/kV mogu biti znatno veće, u odnosu na prihvaćena ograničenja (5-7 % S_{nt} -nominalne snage transformatora), ali tačno utvrđene vrednosti i
- razviti odgovarajuće tehničko rešenje koje će omogućiti primenu ove ideje [6],

pa će to biti predmet daljih razmatranja u ovom radu (poglavlje 2).

Takođe, treba primetiti da razmatrane kondenzatorske baterije proizvode ukupno oko 41 000 000 kvarh/god. i da prekompenzovani deo od 24 000 000 kvarh/god. (ili 58,5 %) odlazi u mrežu srednjeg napona i služi da zadovolji potrebe drugih distributivnih potrošača. Naravno, da je opravdano da se ovo koristi u praksi, pošto je prenos pomenute reaktivne energije ekonomičniji nego da se ista doprema iz elektrana i prenosne mreže. Takođe, treba proveriti kako ovo utiče na naponske prilike u distributivnoj mreži. Za dugoročniju primenu ovog rešenja, treba utvrditi pod kojim uslovima je opravdanije da se reaktivna energija dobija na račun lokalne prekompenzacije nego da se investira u nove kondenzatorske baterije kod potrošača, odnosno treba utvrditi odgovarajuće kriterijume. Kako se primena ovog postupka pokazala kao opravdana u velikom broju slučajeva, što je i pokazano u poglavlju 4 rada, to predlažemo da ovaj postupak bude uvršćen kao jedan od vidova za kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama i mrežama potrošača. To postaje posebno značajno, ako se ima u vidu da se kondenzatori za kompenzaciju reaktivne energije, koji su instalirani u mrežama niskog napona većih potrošača, koriste delimično - samo u periodima kada postoji tražnja za reaktivnom energijom u mreži tih potrošača. U zavisnosti od toga da li preduzeće radi u jednoj ili više smena, pomenuti kondenzatori su u radu od 1 500 - 5 000 h/godišnje, ili samo oko 2 500 - 3 000 h/godišnje u proseku.

2. POSTUPAK ZA POVEĆANJE KORIŠĆENJA KONDENZATORA

2.1. Ideja i postupak za povećanje korišćenja kondenzatora

Na osnovu dosadašnje primene postupka i sprovedenih istraživanja, procenjeno je [7] da bi se ukupno moglo dobiti dodatnih 150-200 Mvar, i to u centrima potrošnje, povećanjem korišćenja već instaliranih kondenzatora (po snazi i po vremenu) kod većih potrošača u industriji Srbije. To je moguće uz primenu postupka koji se predlaže i ovde opisuje. Ideja je da se veći deo kondenzatora trajno priključi na sekundarne sabirnice transformatora 10(20)/0,4 kV/kV i koristi svih 8 760 h/godišnje umesto dosadašnjih 1 500-3 000 h/godišnje u proseku. Time se vreme korišćenja kondenzatora povećava približno 3-6 puta. U praksi se to realizuje [6], tako što se kondenzatorske baterije podele na dva dela (slika 1):

- deo sa fiksno uključenim kondenzatorima snage Q_{CF} , i
- deo koji se, po potrebi, automatski uključuje i reguliše zadati $\cos\phi$,

tj. predloženi postupak se praktično realizuje bez dodatnih ulaganja, na jednostavan način. Tehničko rešenje za primenu postupka je jednostavno, a izloženo je u patentnom prikazu [6] i studiji [7].

Osnovna prednost je u dokazu da, dozvoljene snage fiksno priključenih kondenzatora na niskonaponskoj strani transformatora, mogu imati za oko 4 puta veće vrednosti, u odnosu na domaće i inostrane preporuke-tabela 1, iako su oba kriterijuma definisana iz razloga da se izbegne opasnost od rezonantnih pojava pri postojanju viših harmonika struje i napona u mreži. Naime, neopterećen transformator

SN/NN sa stalno priključenim kondenzatorima na niskonaponskoj strani transformatora predstavlja redno R-L kolo sa zanemarljivim omskim otporom za struje viših harmonika, i ulazi u rezonancu ukoliko je ispunjen uslov:

$$Q_c = S_{nt} / (h^2 u_k) \quad (1)$$

Da bi se izbegla pojava rezonance za harmonike reda $h < 17$, snage pomenutih kondenzatora se ograničavaju na iznose $Q_c \leq S_{nt} / (h^2 u_k)$, odnosno na najviše dozvoljene vrednosti koje se izračunavaju iz izraza

$$Q_c = S_{nt} / (289 u_k) \quad (2)$$

gde su S_{nt} i u_k -nominalna snaga i napon kratkog spoja transformatora. Tako izračunate najviše dozvoljene vrednosti, po izrazu (2), su date u tabeli 1, pod 1 i 2. Primenom naše ideje [5, 6] – izborom odgovarajućih vrednosti po izrazu (1), za $h=9$, tj. po izrazu :

$$Q_{CF} = S_{nt} / (81 u_k) \quad (3)$$

dobijaju se znatno veći iznosi za snage stalno priključenih kondenzatora (tabela 1, pod 3). Rezonantna učestanost se time postavlja na 450 Hz, ali se radi o fiktivnoj rezonanci pošto transformatori sprege trougao/zvezda predstavljaju otvoreno kolo za struje 9-tog harmonika na sekundarnoj strani transformatora, a time i kroz kondenzatore. Proračuni i analize [5] pokazuju da ukupna efektivna vrednost struja svih viših harmonika za tako dimenzionisane kondenzatore ne može preći dozvoljeni iznos, ukoliko je ukupna harmonijska distorzija napona u dozvoljenim granicama ($THDu \leq 5\%$). Višegodišnje provere

Tabela 1.

Dozvoljene snage za fiksno priključene kondenzatore na niskonaponskoj strani transformatora 10(20)/0,4 kV/kV da bi se izbegle opasnosti od rezonance [5,6], po različitim preporukama:

Nominalne snage transformatora S_{nt} (kVA)	100	160	250	315	400	630	1 000	1 250	1 600
Snage kondenzatora Q_c [kvar] 1. TEHNIČKI PRIRUČNIK Rade Končar, Zagreb, 1980.	6	10	15	18	20	28	-	-	-
2. COMPENSATION D' ENERGIE REACTIVE, EDF, 1988.	7	11	18	22	28	44	50	62	80
3. Po M. Kostiću [5, 6] (ili $Q_{CF} = S_{nt} / (81 u_k)$)	30	50	77	97	124	195	206	257	330
U slučajevima kada je snaga kratkog spoja na strani višeg napona $S'_K \leq (6-7) S''_K$ -snage kratkog spoja transformatora, vrednosti u vrsti 3 su manje, tj. $Q_{CF} = (1 + S'_K / S''_K) \cdot S_{nt} / (81 u_k)$									

u praksi [7] su potvrdile rezultate analize [5] da praktično ne postoji opasnost od pojave rezonance u mrežama gde se kondenzatori koriste po ovom postupku. Pri donošenju odluke o primeni datog tehničkog rešenja, u konkretnim uslovima, treba voditi računa da li u mreži potrošača postoje izvori harmonika struje 7. i 11. reda koji stvaraju harmonike napona čije su vrednosti iznad dozvoljenih 5 %, kao i o režimu reaktivnih opterećenja u distributivnim mrežama (DM). Pokazalo se [7] da su to bili ograničavajući faktori samo u oko 7 % slučajeva, na uzorku od 300 transformatora SN/NN na kojima je ovaj postupak primenjen.

Takođe je važno primetiti da su padovi napona, pri uključenju ovako dimenzionisanih baterija kondenzatora, manji od dozvoljenih 1,5 %, pošto je:

$$\begin{aligned} DU \% &= u_k \% \cdot Q_{FK}/S_{nt} = 100/81 = \\ &= 1,23 \% < 1,5 \% \end{aligned} \quad (4)$$

jer je $Q_{FK}/S_{nt} = 100/(81u_k \%)$. Time je ispunjen i uslov da struje uključenja baterija tih kondenzatora budu $< 100 I_{Cn}$.

Primena ovog postupka zahteva određene promene u odnosu na dosadašnju praksu, u strukturi i režimu rada kondenzatorskih jedinica iz sastava kondenzatorske baterije.

2.2. Poboljšanje kompenzacije reaktivnih snaga po postupku za povećanje korišćenja kondenzatora

Poboljšanje kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama (DM) se zasniva na novom postupku za povećanje korišćenja (postojećih) kondenzatora u mreži potrošača. U ovom poglavlju se izlaže suština primene tog postupka i procenjuju efekti koje on donosi. Postupak za povećanje korišćenja kondenzatora (PPKK) je u prvo vreme korišćen da se viškovi kapacitivne energije koja se proizvodi na sabirnicama 0,4 kV jednog transformatora (ili transformatorske stanice) preko tog transformatora prenesu do najbližeg transformatora (ili najbliže transformatorske stanice) čija reaktivna opterećenja nisu zadovoljavajuće (ili nisu uopšte) kompenzovana - npr. sa sekundarnih sabirnica TS2, čija je snaga fiksne kompenzacije $Q_{FK} > Q_2$ (induktivnog opterećenja) do potrošača transformatorske stanice TS1 čije je reaktivno opterećenje Q_I . Time se postiže da i ovi potrošači zadovolje svoje potrebe za reaktivnom energijom bez ulaganja u kompenzaciju u TS 1 (slika 1).

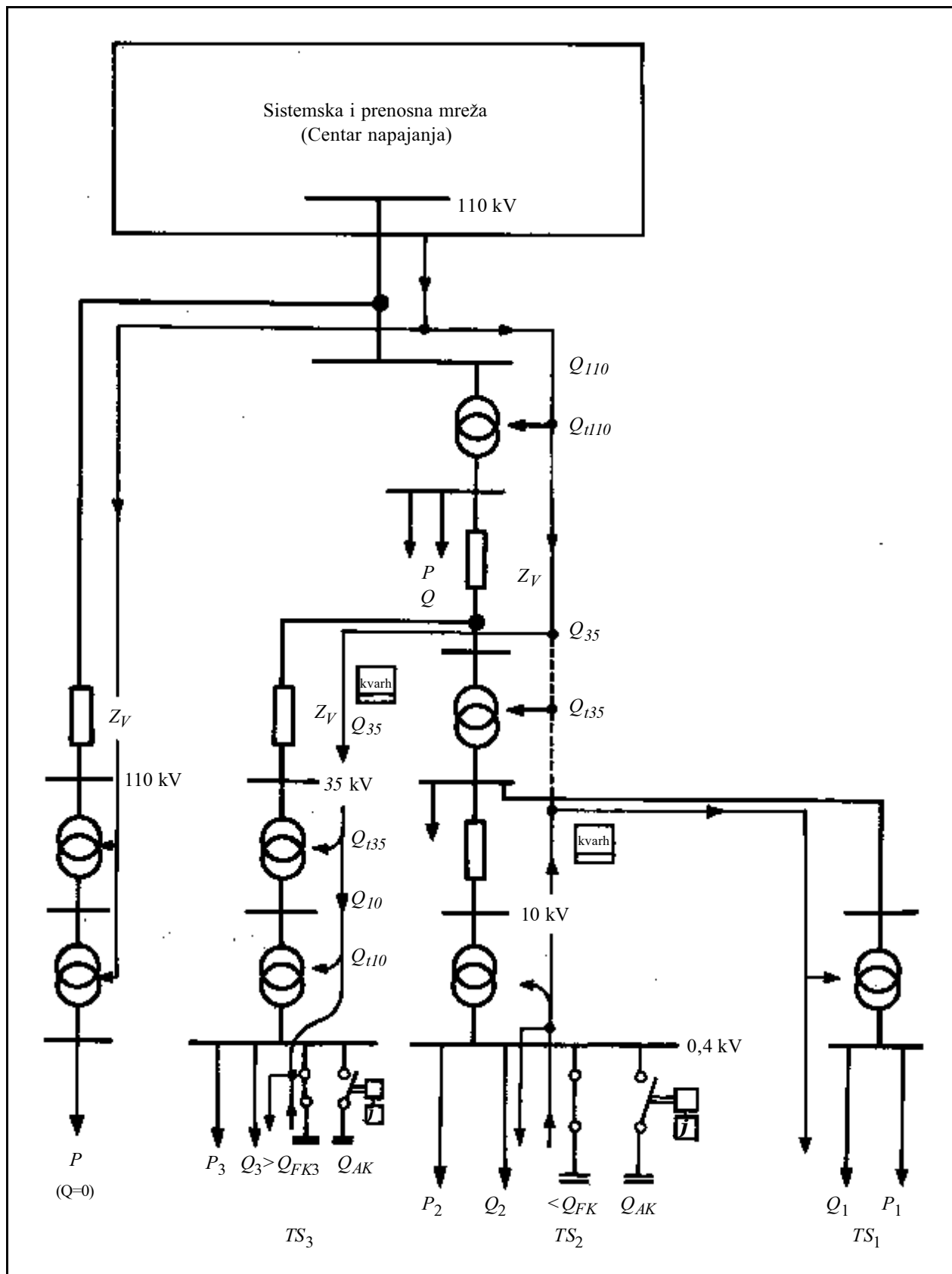
Ukoliko transformatorske stanice TS1 (jedna ili njih više) pripadaju drugom potrošaču, viškovi proizvedene reaktivne energije u TS2 (jednoj ili više) mogu se, fizikalno gledano, na isti način iskoristiti za

zadovoljavanje potreba za reaktivnom energijom potrošača koji se napajaju iz transformatorske stanice TS1. Jedino razlike u iznosu gubitaka, zbog prenosa reaktivnih snaga, postaju veće ukoliko se „električna razdaljina” transformatorskih stanica TS1 i TS2 povećava. Pri tome treba reći da su gubici snage pri prenosu reaktivnih snaga iz TS2 u TS1, po pravilu, za nekoliko puta manji nego u slučajevima kada se reaktivna energija dobija iz elektrana. Naime, veći industrijski potrošači, sa instaliranim kondenzatorima, se po pravilu napajaju iz transformatorske stanice TS 35/10 kV/kV preko kratkih vodova 10 kV ($DU < 1 \%$), koje u svom sastavu imaju još jedan (ili više) transformatora Tr 35/10 kV/kV preko kojih se može (eventualni) višak kapacitivne energije slati do potrošača koji se napajaju iz tih transformatora. Tako se sa aspekta distributivne mreže može tretirati kao da je deo kondenzatora, koji odgovara snazi rekompensacije potrošača, direktno priključen na sekundarne sabirnice u TS 35/10 (kV/kV).

U vrlo retkim slučajevima kada su viškovi u proizvodnji kapacitivne energije u TS2 toliki da se ona koristi i za „električno udaljenje” potrošače koji se napajaju iz transformatorske stanice TS3 (slika 1), potrebno je proveriti da li je to još uvek isplativije nego da se investira u kompenzaciju u TS3. Naravno da je, do ugradnje kondenzatorskih baterija u TS3, uvek korisno da se reaktivna energija doprema iz TS2.

Očigledno je da navedeni postupak za povećanje korišćenja postojećih kondenzatora dovodi do poboljšanja kompenzacije reaktivnih snaga date distributivne mreže u tački priključenja iste na prenosnu mrežu, ili na tzv. centar napajanja (slika 1). To je posledica činjenice da je omogućeno znatno veće korišćenje postojećih kondenzatora kod pojedinih potrošača nego da se oni koriste samo do nivoa koji omogućava da faktor snage tog potrošača dostigne željeni nivo, npr. $\cos \phi = 0,95-0,98$. Naime, jedan broj potrošača raspolaže, sa kondenzatorima koji mogu proizvesti i nekoliko puta veće količine kapacitivne energije nego što su njihove potrebe. S druge strane, veliki broj potrošača priključenih na 10 kV nije uopšte, ili nije zadovoljavajuće, kompenzovan, iako se često nalaze blizu potrošača čiji kondenzatori nisu dovoljno iskorišćeni, pa je ekonomski i tehnički najčešće opravdano da se iskoriste njihovi viškovi u kapacitivnoj snazi i energiji.

Naravno da nekih značajnijih isporuka viškova reaktivne (kapacitivne) energije nije moglo biti, pre primene ovog rešenja, čak ni kada potrošači koji se napajaju iz TS 2 nisu u radu, zbog ograničenja po kojima su dopuštena uključenja kondenzatora relativno malih snaga na sekundarne sabirnice neopterećenih transformatora (tabela 1, pod 1 i 2), tako da te



Slika 1. Distributivna mreža sa potrošačima priključenim na 10 kV i 35 kV i prikazom tokova reaktivnih opterećenja u slučaju sa fiksnom prekompensacijom potrošača ($Q_{FK} > Q_2$) u transformatorskoj stanici TS_2

snage jedva prevazilaze reaktivne snage praznog hoda transformatora na koje su priključeni. Tek sa podizanjem ograničenja za snage fiksno priključenih kondenzatora za oko četiri puta (tabela 1, pod 3) omogućeno je da se najveći deo viška u snazi raspoloživih kondenzatora koristi za obezbeđenje reaktivne energije za najbliže potrošače u distributivnoj mreži, i to tokom svih 8 760 h u godini. Očigledno je da se radi o novom pristupu kompenzaciji reaktivnih snaga u distributivnim mrežama koji ima za cilj da se prvo iskoriste već postojeći kondenzatori u mrežama potrošača, pa da se tek potom, u sledećoj fazi, razmatra potreba za investiranjem u dodatnu kompenzaciju.

Suštinski gledano primena postupka za povećanje korišćenja (postojećih) kondenzatora dovodi do :

1. Povećanja faktora snage potrošača čiji se kondenzatori koriste po predloženom postupku, i
2. Poboljšanja kompenzacije u DM, na način kao da je deo kondenzatora, koji odgovara snazi prekompenzacije, direktno priključen na sekundarnoj strani u TS 35/10 (kV/kV),

pa u zbirne efekte treba uračunati iste po oba osnova koje prethodno treba posebno analizirati i utvrditi.

Pored energetskih efekata koji se mogu jednostavno utvrditi i ekonomski valorizovati, primećeni su i pozitivni uticaji [7] na suzbijanju i ublažavanju štetnih uticaja viših harmonika struje i napona, koji često bivaju multiplicirani u mrežama sa kondenzatorima. Naime, korisno je uočiti da

– reaktansa transformator SN/NN - kondenzatori snage $Q_C = S_{nt}/(81u_k)$ predstavlja rezonantno kolo za 9. harmonik pa time i redni široko-pojasni L-C filter za susedne harmonike 7-tog i 11-og reda gledano iz mreže srednjeg napona); a

– ti isti kondenzatori snage $Q_C = S_{nt}/(81u_k)$ sa reaktansom transformatora SN/NN i napojne mreže obrazuju paralelni široko-pojasni L-C filter za harmonike struje 7-tog i 11-og reda, koji dolaze iz mreže niskog napona,

i da su time znatno ublažene opasnosti od harmonika 7-og i 11-og reda [5], a opasnosti od rednih i paralelnih rezonanci za harmonike reda $h \geq 11$ praktično su eliminisane pošto su uvek priključeni kondenzatori snage $Q_C \geq S_{nt}/(81u_k)$.

Kondenzatorske baterije predloženih snaga i konfiguracija bi mogle biti i najzastupljeniji u distributivnim mrežama i mrežama potrošača, a u znatnom delu mreža to i jesu posle realizovanih primena [7], pa je to dodatni razlog da se pristupi izučavanju režima rada distributivnih mreža sa kondenzatorskim baterijama tipičnih snaga i konfiguracija, pri

postojanju viših harmonika struje i napona u istim, i izradu odgovarajućih studijskih analiza.

3. POVEĆANJE FAKTORA SNAGE POTROŠAČA NA BAZI POSTUPKA ZA POVEĆANJE KORIŠĆENJA KONDENZATORA

3.1. Kompenzacija reaktivne energije u transformatorskim stanicama TS SN/NN na uobičajen način

Uočene teškoće da se, pomoću kondenzatorske baterije u automatskom radu, dostigne traženi nivo kompenzacije reaktivnih opterećenja, po pravilu su veće što su tražene vrednosti faktora snage veće i što su opterećenja potrošača niža. Uticaji oba navedena faktora biće razmotreni i analizirani na osnovu (realnih) dijagrama aktivnih i reaktivnih opterećenja potrošača.

Na slici 2 prikazani su dijagrami opterećenja za dva različita potrošača- familije gornjih krivih sa indeksom „1” i donjih krivih sa indeksom „2”, koji se napajaju iz identičnih transformatora. Naravno da to mogu biti i dijagrami opterećenja istog potrošača za različite nivoe potrošnje-normalni (projektovani) nivo potrošnje (krive 1) i nivo snižene potrošnje (kriva 2). Radi jednostavnosti pretpostavljeno je da su smanjenja opterećenja ravnomerna, tj. da ordinate krivih 2 iznose 50 % ordinata krivih sa indeksom 1. Pored dijagrama ukupnih aktivnih opterećenja (P_S), posebno su prikazana opterećenja motornih potrošača (P_M) i pretpostavljeno je da su ona po vrednosti jednaka sa reaktivnim opterećenjima (Q_M) istih, tj. da je $Q_M = P_M$, i da ona čine ukupnu potrošnju na niskonaponskim sabirnicama transformatora, na kojima se meri i reguliše faktor snage.

Izmerena vrednost reaktivnih opterećenja (Q_S) na mestu merenja (primarnoj strani transformatora) uključuje i gubitke reaktivne snage (Q_I) na transformatorima, pa je

$$Q_S = Q_M + Q_I \quad (5)$$

pri čemu su vrednosti reaktivnih opterećenja na sekundarnoj strani (Q_M) jednake odgovarajućim iznosima aktivnih opterećenja, tj. $Q_{M1} = P_{M1}$ i $Q_{M2} = P_{M2}$. Gubici reaktivne snage (Q_I) na transformatorima su približno stalni pošto opterećenja transformatora ne prelaze 50-60 % nominalnog. Potrebne snage kondenzatorske baterije (Q_C) za dostizanje tražene vrednosti faktora snage, npr. $\cos \phi = 0,95$, na mestu merenja, tj. na primarnoj strani transformatora, se određuju po izrazu:

$$Q'_{C 0,95} = Q_S - 0,328 P_S \quad (6)$$

gde su P_S i Q_S – aktivna i reaktivna opterećenja izmerena na primarnoj strani.

Po formuli (6) izračunate su odgovarajuće vrednosti snaga kondenzatorskih baterija za viši ($Q'_{C 10,95}$) i niži ($Q'_{C 20,95}$) nivo opterećenja, i tako utvrđene zavisnosti istih su prikazane na slici 2. Stvarna snaga kondenzatorske baterije se menja u zavisnosti od broja uključenih kondenzatora što zavisi od podešene vrednosti faktora snage („čista $\cos \mathbf{j}$ -regulacija”) ili podešene vrednosti reaktivnog opterećenja („var-regulacija”) i podešene širine (vrednosti) zone neosetljivosti (ZN) regulatora.

Automatska kompenzacija za održavanje visokog faktora snage u uskim granicama i pri različitim opterećenjima je relativno skupa: pored nešto složenijeg regulatora $\cos \mathbf{j}$, potrebno je da baterija sadrži i veliki broj manjih kondenzatorskih jedinica jednakih nominalnih snaga (Q_{CI}), ali je obično bolje da one budu različitih snaga-npr. u odnosu 1:2:2 ili 1:2:4:4 - kako bi se smanjio njihov broj. Međutim, najčešće nije neophodno da se vrednost faktora snage drži u uskim granicama, već je dovoljno da maksimalno podešena vrednost faktora snage bude npr. $\cos \mathbf{j} = 1$, tj. kada se dostigne iznos $Q_{ind} - Q_C = 0$, treba da se izvrši isključivanje jedne kondenzatorske jedinice, i obrnuto, kada se induktivno opterećenje poveća toliko da postane

$$Q_{ind} - Q_C > 1,2 Q_{CI} \quad (7)$$

uključuje se još jedna kondenzatorska jedinica snage Q_{CI} . Zona neosetljivosti (ZN) regulatora mora biti $\geq 1,2 Q_{CI}$, kako ne bi dolazilo do naizmeničnog isključivanja i uključivanja kondenzatora. Očigledno je da navedena „var-regulacija” omogućava da snaga uključenih kondenzatora bude ograničena sa linijom $Q_{AKmax} \approx Q_{MI}$ (odgovara $\cos \mathbf{j} \approx 1$), i linijom $Q_{AK1min} = Q_{MI} - 1,2 Q_{CI}$ (slika 2), tj.

$$Q_{MI} \geq Q_{AK1} \geq Q_{AK1min} \quad (8)$$

pri čemu je odstupanje od gornje granice određeno najmanjom mogućom razlikom stepenaste linije Q_{MI} i njoj najbliže stepenaste linije Q_{AK1max} koja se može dobiti kombinacijom odgovarajućih stepeni date baterije. Važno je primetiti da navedena „var-regulacija” omogućava održavanje visokog faktora snage (slika 2) tokom radnih smena sa normalnim opterećenjima. Očigledno je da će u režimima nižih opterećenja (krive sa indeksom 2 na slici 2), apsolutni iznosi nekompenzovane reaktivne energije tokom radnih smena ostati približno isti, ali će vrednosti faktora snage biti niže. Tako će u slučaju manjih opterećenja, vrednosti faktora snage biti manje od dozvoljenih (0,95) pa će potrošaču biti obračunata preko-

merna reaktivna energija iako ista nije registrovana na višem nivou opterećenja (krive sa indeksom 1).

Očigledno je da, u nedostatku fine regulacije snaga kondenzatorskih baterija, leže razlozi zbog kojih počinje da se registruje potrošnja prekomerne reaktivne energije kod većine potrošača kod kojih je nastupilo smanjenje proizvodnih aktivnosti, a time smanjenje opterećenja i potrošnje električne energije. Iako na prvi pogled izgleda da je rešenje u kondenzatorskim baterijama (KB) sa velikim brojem kondenzatora, na to se najčešće ne sme ići iz najmanje dva razloga:

- uključenje kondenzatora, na KB sa velikim brojem već uključenih kondenzatora, je praćeno velikim strujama uključanja koje mogu izazvati havariju kondenzatora koji se uključuje, i
- povećava se mogućnost da se uđe u rezonancu na učestanostima 11-og i 13-og harmonika (izraz 1), a uz to je takvo rešenje i dosta skuplje.

U konkretnom slučaju je moguće utvrditi stvarne snage uključenih kondenzatorskih jedinica iz sastava baterije. Promene tih snaga su prikazane stepenastom linijom Q_{AK1} (slika 2), za režim viših, i stepenastom linijom Q_{AK2} za režim nižih opterećenja. Očigledno je da te linije (slika 2) vrlo malo odstupaju od zamišljenih srednjih stepenastih linija Q_{AK1med} i Q_{AK2med} , a razlike u odgovarajućim količinama kapacitivne energije su još manje. To znači da je za analizu učinka kondenzatorskih baterija sa automatskom kompenzacijom dovoljno računati sa količinama reaktivne energije koje odgovaraju liniji srednjih snaga uključenih kondenzatora (slika 2), tj.

$$Q_{AKmed} \approx 0,5 (2Q_{max} - 1,2 Q_{CI}) \quad (9)$$

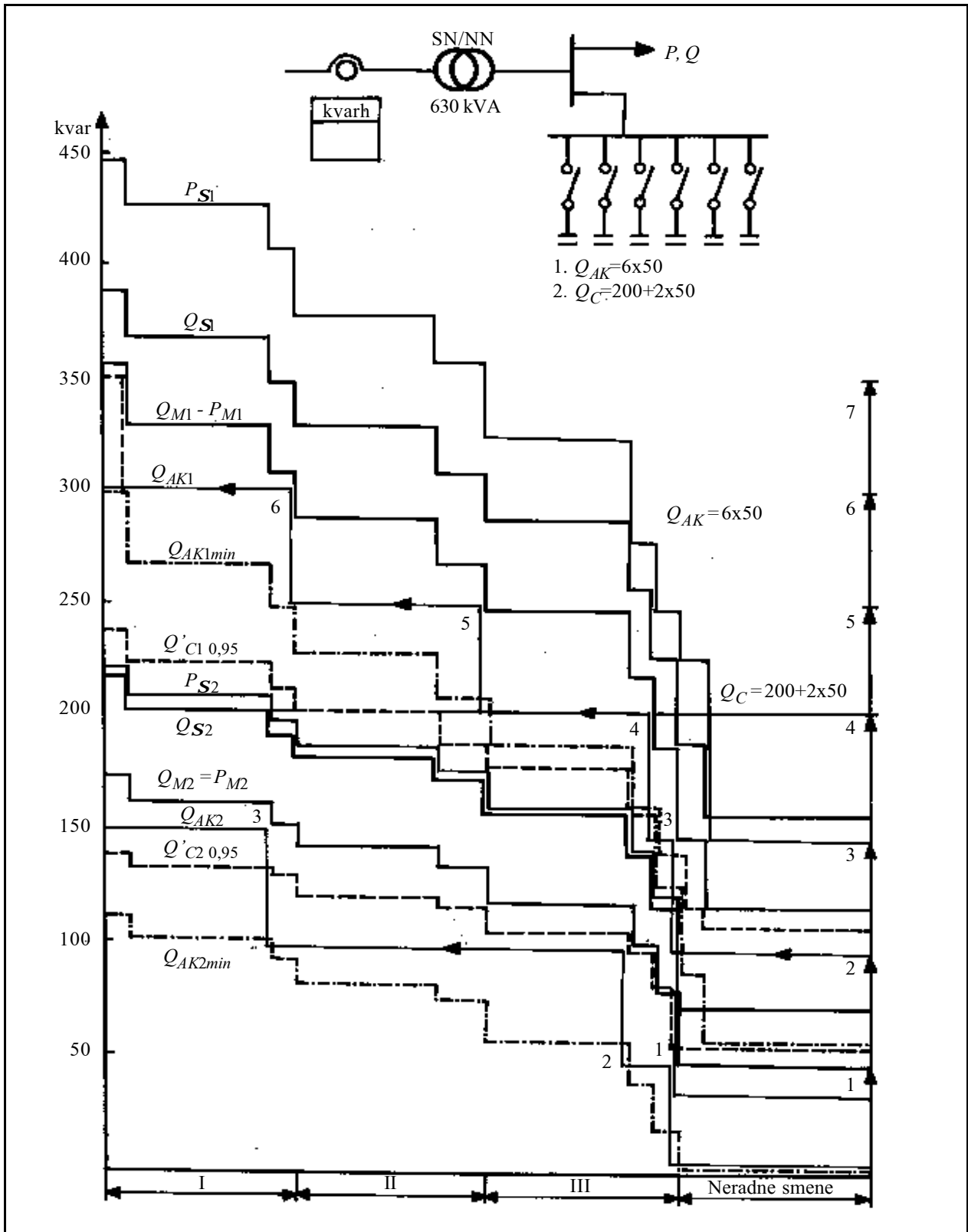
3.2. Kompenzacija reaktivne energije u TS SN/NN povećanjem korišćenja kondenzatora

Na osnovu dokazane i proverene činjenice da su dozvoljene snage stalno priključenih kondenzatora (vrednost pod 3 u tabeli 1) znatno veće od iznosa u ranijim tehničkim preporukama, uobličena je ideja da se kondenzatorske baterije sa automatskom regulacijom podele (šema na slici 2) na:

- deo sa fiksno uključenim kondenzatorima (Q_{FK}) i
- preostali deo, koji se, po potrebi, automatski uključuje (Q_{AK}) i reguliše zadati $\cos \mathbf{j}$.

Primena postupka za PKK omogućava da se veći deo (60-100 %) kondenzatora iz sastava baterija koristi tokom svih 8 760 h/godišnje kada je to potrebno. A to je, kako se pokazalo u praksi, često korisno iz više razloga:

1. Automatska regulacija ne omogućava da se u potpunosti kompenzuje potrošnja reaktivne energije



Slika 2. Dijagrami reaktivnih opterećenja potrošača na sabirnicama 0,4 kV ($Q_M = P_M$) i na strani višeg napona transformatora (Q_S) i snaga kondenzatorske baterije (uključenih kondenzatora) – u režimu automatske kompenzacije „1. $Q_{AK} = 6 \times 50$ ” (krive Q_{AK1} i Q_{AK2}) – sa kondenzatorskom baterijom iz fiksnog i automatskog dela „2. $Q_C = 200 + 2 \times 50$ ” (kriva Q_{FK+}) (tj. po postupku za povećanje korišćenja kondenzatora)

u mreži niskog napona, tj. na sabirnicama 0,4 kV na koje su baterije priključene.

2. Baterijama sa automatskom kompenzacijom na strani niskog napona se, po pravilu, ne mogu kompenzovati gubici reaktivne snage u transformatorima.
3. Ukoliko se potrošač napaja iz više trafostanica, viškovi kapacitivne energije su potrebni za zadovoljenje potreba u transformatorskim stanicama gde nije sprovedena kompenzacija ili je ona nedovoljna.
4. Reaktivna energija je potrebna za magnećenje i onih transformatora koji napajaju omsku potrošnju i u kojima se, po pravilu, ne instaliraju kondenzatorske baterije.

U tački 3.1. je pokazano da čak i u slučaju kada su reaktivna opterećenja znatno niža od instalirane snage kondenzatorske baterije, reaktivna energija potrošača neće biti u potpunosti kompenzovana (krive sa indeksom „2” na slici 2) iz razloga koji su navedeni pod 1 i 2. Interesantno je da su nekompenzovane količine reaktivne energije iste i u slučaju viših opterećenja (krive sa indeksom „1” na slici 2) pošto je snaga kondenzatorske baterije (6x50 kvar) određena upravo za ovaj režim. Istina je da bi regulator uključivao i 7-mu kondenzatorsku jedinicu (da postoji) u režimu maksimalnih opterećenja (naznačeno na delu krive Q_{AK1} crta-crta linijom slika 2), ali bi korišćenje tog kondenzatora bilo malo (200-300 h/godišnje) pa ugradnja istog nije ni predviđena. Primena **postupka za povećanje korišćenja kondenzatora** u cilju poboljšanja kompenzacije (tj. potpunog eliminisanja ili bar smanjenja) reaktivne energije biće pokazana na primeru potrošača koji je već analiziran. Na slici 2 su prikazani dijagrami reaktivnih opterećenja potrošača i dijagrami aktivnih snaga uključenih kondenzatora u oba režima automatske kompenzacije Q_{AK1} i Q_{AK2} . Na istoj slici je data i jednopolna šema napojne transformatorske stanice sa prikazom kondenzatorske baterije u dva režima.

1. Režim automatskog rada baterije $Q_{AK}=6 \times 50$ kvar
2. Režim kompenzacije sa kondenzatorskom baterijom (Q_C) iz 2 dela: deo sa fiksno uključenim kondenzatorima (Q_{FK}) i delom u automatskom radu (Q_{AK})

$$Q_C = Q_{FK} + Q_{AK} = 200 + 2 \times 50 \text{ (kvar)}$$

Na slici 2 je data i prava linija $Q_{FK}=4 \times 50=200$ kvar na koju su superponovane i snage kondenzatorskih jedinica koje se dodatno uključuju kada je to potrebno, tj. u režimu viših opterećenja, i to samo u nekim smenama: 5-ti kondenzator u vreme II smene, a 5-ti i 6-ti kondenzator u vreme I smene. Poređe-

njem efekata učinka kondenzatorske baterije u automatskom radu (Q_{AK1}) i u radu po navedenom postupku ($Q_{FK}+Q_{AK1}$), zaključuje se da je, u ovom drugom, kompenzacija reaktivne energije poboljšana za 100 kvar u vreme neradnih smena.

U režimu niskih opterećenja (krive sa indeksom „2” na slici 2), kada je baterija pripremljena za rad po postupku za povećano korišćenje kondenzatora, biće uključen samo njen fiksni deo od 200 kvar. U poređenju sa radom baterije u automatskom režimu (linija Q_{AK2}), kompenzacija je poboljšana tokom cele godine, i to: za 50 kvar u periodima I-ih smena, za 100 kvar u periodima II-ih i III-ih smena, i za 200 kvar u periodima neradnih smena. Tako je od ukupne (prirodne) potrošnje reaktivne energije od oko 920 000 kvarh/god. bilo kompenzovano

- samo 476 000 kvarh/god, dok je kondenzatorska baterija radila u režimu automatske kompenzacije (AK),
- dok je prelaskom u rad po postupku za povećanje korišćenja kondenzatora (PKK), kompenzovano 912 000 kvarh/god.

Jedino u vreme vršnih opterećenja (200-300 h godišnje) ostaje nekompenzovano 15 kvar (slika 2) ili oko 40 000 kvarh/god.

Često su snage fiksnih delova kondenzatorskih baterija veće od reaktivnih opterećenja potrošača u vreme manje intenzivnih radnih smena i neradnih smena, što dovodi do lokalne prekompenzacije. Analize pokazuju da je takva prekompenzacija dozvoljena u distributivnim mrežama sa nedostatkom reaktivnih snaga. Nedostatak reaktivnih snaga u mrežama EES EPS-a je značajan, posebno u sezoni visokih opterećenja, pa je pomenuta prekompenzacija čak i poželjna.

Činjenica, da postupak za povećanje korišćenja kondenzatora omogućava da potrošači znatnije poprave svoj faktor snage i sa postojećim baterijama, učinila je da on bude prihvaćen i od stručnjaka industrijskih preduzeća, bez čijeg učešća, i pristanka za korišćenje kondenzatorskih baterija realizacija projekta ne bi bila moguća.

4. POBOLJŠANJE KOMPENZACIJE REAKTIVNIH SNAGA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA PO POSTUPKU ZA POVEĆANJE KORIŠĆENJA KONDENZATORA

4.1. Nužnost i ciljevi poboljšanja kompenzacije reaktivnih snaga u napojnim čvorovima distributivnih mreža

Zbog velikog broja potrošača kod kojih nije zastupljena kompenzacija reaktivnih snaga, Elektro-

energetskom sistemu (EES) Srbije nedostaje 300-350 Mvar za potrebni nivo kompenzacije u letnjim mesecima. U zimskom periodu taj nedostatak je od 600-700 Mvar [7] zbog velikih gubitaka reaktivne snage u distributivnoj mreži (DM), najviše u transformatorima 110/X (kV/kV), i prenosnoj mreži (PM) EES EPS-a. To je i razlog da se po aktuelnom (iz 2001. godine) Tarifinom sistemu JP EPS-a [4] naplaćuje svaki utrošeni kvarh- od potrošača se zahteva $\cos \mathbf{j} = 1$. Posebno su izražene potrebe za, bar, dodatnih 200 Mvar reaktivne snage kako bi se, zbog eventualnog rada pojedinih generatora pri $\cos \mathbf{j} < \cos \mathbf{j}_n$, izbegla opasnost od smanjenja u proizvodnji aktivne energije [7]. Za taj iznos bi se smanjio i prenos reaktivnih snaga, od elektrana do mesta potrošnje, a time bi se

1. smanjili padovi napona, i povećale vrednosti napona na odgovarajućim vodovima prenosne mreže;
2. (a) smanjili gubici aktivne (i reaktivne) snage, i (b) oslobodio deo prenosnih kapaciteta elemenata EES.

Pomenuti padovi napona su toliki da su, u nekim čvorovima EES - napojnim tačkama DM, vrednosti napona niže od minimalnih dozvoljenih vrednosti $U_{min,i}$ – [1]. Sa povećanjem snaga elektrana i objedinjavanjem sve većeg broja istih u EES, električna udaljenost čvorova i potrošača od izvora se povećava, tako da traženi uslov za minimalne vrednosti napona u istim

$$U_i \geq U_{min,i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

može biti lakše ispunjen ukoliko su reaktivna opterećenja u datim čvorovima manja, što se postiže instaliranjem kondenzatorskih baterija, kao izvora reaktivnih snaga, u tim čvorovima ili u DM koje se napajaju iz tih čvorova.

Kada se u datom EES, za sve čvorove, ispuni uslov (10) i eliminišu tzv. lokalni deficiti reaktivne energije, najčešće postoji ekonomski interes za daljim povećanjem faktora snage instaliranjem dodatnih kondenzatorskih baterija. Tako se pokazuje da bi se, za tekući nivo reaktivnih opterećenja ($tg \mathbf{j} = 0,25-0,40$), kompenzacija reaktivnih snaga u DM oplatila za 1-1,5 godinu. Pokazuje se [2,3], da bi bilo isplativo ulagati u kompenzaciju sve do dostizanja ekonomskog koeficijenta reaktivne snage, čije se vrednosti, za pojedine čvorove EES - napojne tačke DM, nalaze u granicama

$$tg \mathbf{j}_{ec} = 0,10- 0,20 \quad (11)$$

To znači da bi u velikom broju čvorova, u proseku, trebalo priključiti najmanje 0,10-0,20 kvar/kW

maksimalnih aktivnih opterećenja kako bi se u zadovoljavajućoj meri ispunili osnovni ciljevi kompenzacije. Naša iskustva [7] pokazuju da bi u distributivnim konzumima, sa postojećim kondenzatorskim baterijama kod velikih potrošača, bilo moguće podići nivo kompenzacije od 0,05-0,10 kvar/kW maksimalnih aktivnih opterećenja u pomenutim čvorovima iz kojih se ti konzumi napajaju. To pokazuje da se primenom postupka za povećanje korišćenja kondenzatora kod potrošača može poboljšati kompenzacija reaktivnih snaga, u nekim čvorovima EES, a time u odgovarajućoj meri smanjiti i troškovi investiranja u nove kondenzatorske baterije.

4.2. Opravdanost i efekti povećanja korišćenja kondenzatora za poboljšanje kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama

Efekti kompenzacije reaktivnih snaga u električnim mrežama se utvrđuju na osnovu smanjenja gubitaka snage. Najčešće je osnovni kriterijum, za vrednovanje tih efekata, smanjenja marginalnih gubitaka snage zbog prenosa reaktivnih opterećenja, pošto povećanje faktora snage u mrežama nižih nivoa napona, uglavnom, dovodi samo do marginalnih smanjenja reaktivnih opterećenja u mrežama viših napona. Na uobičajeni način [2, 8, 9] su procenjene prosečne vrednosti marginalnih smanjenja gubitaka $(dP_{CuQ} / dQ)_i$ u kW/kvar za pojedine elemente mreža u EES EPS-a [10], a podaci relevantni za našu analizu su dati u tabeli 2. Odgovarajuće marginalne vrednosti smanjenja gubitaka na lokacijama ugradnje kondenzatora $(dP_{CuQ} / dQ)_i$ predstavljaju zbirne iznose istih na svim elementima do te tačke u EES, i za svaku narednu lokaciju se uvećavaju za vrednost istih na elementima između te i susedne lokacije. Tako utvrđene vrednosti za pojedine lokacije kondenzatora u distributivnoj mreži su, takođe, date u odgovarajućoj koloni tabele 2. Te vrednosti su sračunate za nivo opterećenja EES EPS-a od 5 000 MW i odgovarajuće - navedene vrednosti koeficijenta reaktivne snage ($tg \mathbf{j}$). Odgovarajuće godišnje uštede u smanjenju jediničnih gubitaka energije se mogu utvrditi po izrazu:

$$W_{Qcl} = S(dP_{CuQ} / dQ)_i \times t_{max Q,i} \quad (12)$$

gde su $t_{max Q}$, (h/god) - procenjene vrednosti trajanja maksimalnih gubitaka reaktivne snage $t_{max Q}$ (h/god.) za opterećenja na datim lokacijama- naponskim nivoima potrošnje. Vreme isplativosti uređaja za kompenzaciju je direktno srazmerno jediničnim troškovima za iste (C_{Ikvar}) a obrnuto srazmerno vrednosti jediničnih godišnjih ušteda energije ($W_{Qcl} \cdot C_{IE}$), i iznosi:

$$T_{ispl} = C_{Ikvvar} / (W_{Qc1} \cdot C_{IE}) \text{ (god.)} \quad (13)$$

S obzirom na to da su jedinične cene uređaja za kompenzaciju i jedinične cene energije nešto niže za više naponske nivoe, to njihov odnos C_{Ikvvar} / C_{IE} zadržava približno istu vrednost, pa je iznos potrebnih ušteta (u kWh/kvar) za otplatu troškova po 1 kvar uređaja za kompenzaciju dovoljno računati sa srednjim vrednostima pomenutih jediničnih cena, npr. sa vrednostima: $T_{Ikvvar} = 12$ USD/kvar i $C_{IE} = 0,04$ Eura/kWh.

Jedan od najekonomičnijih načina za neophodno poboljšanje kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama EES EPS-a [5,7] bi mogao biti predloženi postupak za povećanje korišćenja (postojećih) kondenzatora u mreži potrošača, pa će njegova primena biti analizirana u ovom poglavlju. Veći industrijski potrošači, sa instaliranim kondenzatorima, su direktno priključeni na srednji napon, tj. napajaju se:

1. Iz mreže 35 kV (P35), najčešće preko kratkih vodova napona ($DU < 1\%$) iz transformatorske stanice TS 110/35 (kV/kV), ili
2. Iz mreže 10 kV (P10), preko kratkih vodova srednjeg napona 10 kV iz transformatorske stanice TS 35/10 (kV/kV).

U oba slučaja se (povremeni) viškovi kapacitivne snage mogu direktno dovoditi na sekundarne sabirnice pomenutih transformatorskih stanica, pa je za bezbedno ostvarenje tog cilja razvijen postupak za povećanje korišćenja (postojećih) kondenzatora u mreži potrošača (Poglavlje 2 ovog rada). Očigledno

je da su efekti, od povećanja korišćenja kondenzatora, približni efektima koji bi se dobili od kondenzatorske baterije koja bi bila priključena na sekundarne sabirnice transformatorske stanice TS 110/X (kV/kV), odnosno na sekundarne sabirnice u TS 35/10 (kV/kV), i proizvodila istu količinu kapacitivne energije u kvarh. Sa postojećim kondenzatorskim baterijama kod velikih potrošača, je moguće podići nivo kompenzacije reaktivnih snaga

– za iznose od 0,10 - 0,20 kvar/kVA snage instaliranih transformatora u transformatorskim stanicama TS 35/10 (kV/kV) iz kojih se isključivo ili pretežno (više od 80 %) napajaju industrijski potrošači sa kondenzatorima;

– za iznose od 0,05 - 0,15 kvar/kVA snage instaliranih transformatora u transformatorskim stanicama TS 110/35 (kV/kV), koje samo delom (do 50 %) služe za napajanje potrošača sa kondenzatorima.

Naša iskustva pokazuju [7] da povećanje korišćenja kondenzatora u mreži navedenih potrošača dovodi do poboljšanja kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnoj mreži. Radi se o smanjenju gubitaka snage i padova napona na transformatorima 35/10 (kV/kV) i vodovima 35 kV, pa navedene efekte i posledice treba razmotriti i proceniti.

Opravdano je uvek da se pomenuti postupak koristi u praksi, kada je prenos pomenute reaktivne energije ekonomičniji nego da se ista doprema iz elektrana i prenosne mreže. To se utvrđuje na osnovu provere da li su gubici snage prenosa kapacitivne snage od tih kondenzatora do odgovarajućih mesta u distributivnoj mreži (DM) manji od pomenutih mar-

Tabela 2.
Marginalni gubici snage na pojedinim elementima mreže i efekti kompenzacija reaktivnih snaga na tipičnim lokacijama u EES, kao i od povećanog korišćenja kondenzatora (Q_{CF}) potrošača na 35 kV(P35) i 10 kV (P10)

Elementi mreže (EES)	$tg \mathbf{j}$	$(dP_{CuQ}/dQ)_i$	$SdP_{CuQ}/dQ)_i$	$Dt_{CF} = DW_{CF1}$	Porast napona	
	/	% kW/kvar	% kW/kvar	h/god = (kvarh/god.)/kvar	$\Delta u_{FC} (\%)$	S_{IFC} ↓ %
1. Mreža napona ≥ 110 kV		3,28			0,3-1	0,3- 1
2. Transformator 110/35 (kV/kV)	0,40	0,32	3,60		(0,5-1)	(0,8- 2)
Potrošač na 35kV (P35) sa (Q_{CF})		(-0,5)	(3,10)	3-6 000		↓
3. Mreža 35 kV	0,30	2,10	5,70		0,2-0,4	0,2- 0,4
4. Transformator 35/10 (kV/kV)	0,25	0,20	5,90		0,5-1,0	0,7- 1,4
Potrošač na 10 kV (P10) sa (Q_{CF})		(-0,5)	(5,40)	3-6 000		(1- 2,4)
5. Mreža 10 kV	0,20	2,70	8,60			0,7- 1,4
6. Transformator 10/0,4 (kV/kV)	0,20	0,20	8,80			0,7- 1,4
Potrošač na 0,4 kV	0,2-1			(1-4 000)		0,7- 1,4
7. Mreža 0,4 kV	0,15	1,00	9,80			0,7- 1,4

ginalnih gubitaka snage, tj. manji od datih vrednosti $S(dP_{CuQ}/dQ)_i$ u tabeli 2:

- 0,036 kW/kvar, kada su u pitanju sekundarne sabirnice transformatorske stanice TS 110/X (kV/kV), i
- 0,059 kW/kvar, kada su u pitanju sekundarne sabirnice transformatorske stanice TS 110/X (kV/kV).

Kako se, po pravilu, potrošači sa kondenzatorima napajaju iz navedenih transformatorskih stanica preko kratkih vodova srednjeg napona ($DU < 1\%$) sa malim gubicima snage, to je navedeni uslov skoro uvek ispunjen, pa ovaj postupak treba koristiti gde god za to postoje uslovi. Tako naša iskustva pokazuju da je prenos pomenutih reaktivnih (kapacitivnih) snaga praćen sa gubicima snage od 0,005 kW/kvar (boldirane vrednosti u tabeli 2, kolona $(dP_{CuQ}/dQ)_i$), u proseku, i da su oni uvek bili znatno manji od odgovarajućih iznosa za $S(dP_{CuQ}/dQ)_i$, na koje smo nailazili u praksi [7].

U oba slučaja (potrošača P10 i P11), zbog povećanja korišćenja kondenzatora, dolazi do povećanja napona u prenosnoj mreži napona ≥ 110 kV (za 0,3-1%), kao i transformatorima 110/35 kV/kV (za 0,5-1%). Dato povećanje napona u prenosnoj mreži se prenose u distributivnu mrežu samo u slučajevima kada regulator napona ne može da održi zadatu vrednost napona na sekundarnim sabirnicama u transformatorskoj stanici TS110/X kV/kV, tj. u vreme visokih opterećenja, kada je to i najkorisnije. U slučaju potrošača P10, sa uključenim kondenzatorima snage Q_{CF} , dolazi do povišenja napona na sekundarnim sabirnicama TS 35/10 (kV/kV) i odgovarajućem vodu 35 kV, i taj porast napona (0,7-1,4%) se u punoj meri prenosi kroz celokupnu distributivnu mrežu koja se napaja iz te transformatorske stanice (tabela 2, kolone $Du_{FC}\%$ i $Su_{FC}\downarrow$). To povećanje napona dovodi do smanjenja gubitaka snage u distributivnoj mreži i mreži potrošača u vreme kada su opterećenja i gubici snage najveći. U periodima kada su opterećenja najmanja, to može dovesti do vrednosti napona koje su, za (navedenih) 0,7-1,4%, više od nominalnih, ali su eventualne štete od toga male, zbog manjeg broja potrošača na mreži.

Za dugoročniju primenu predloženog postupka je bitna procena da postoji značajan broj distributivnih potrošača za koje je ekonomski opravdanije da se reaktivna energija proizvodi povećanjem korišćenja postojećih kondenzatora, nego da se investira u nove kondenzatorske baterije. To su potrošači za koje dodatni efekti od kompenzacije reaktivnih snaga u delu distributivne mreže počev od sekundarnih sabirnica transformatorske stanice TS 110/X (kV/kV), odnosno sekundarnih sabirnica u TS 35/10 (kV/kV), ne opravdavaju investiranje u istu. A takvih je, kako pokazuju i površne analize, više od raspoloživih viškova kapacitivne energije koji se mogu dobiti po-

većanjem korišćenja postojećih kondenzatora, pa bi sve raspoložive kondenzatorske baterije u mrežama potrošača trebalo iskoristiti po opisanom postupku.

4.3. Energetski efekti od povećanja korišćenja kondenzatora za poboljšanje kompenzacije reaktivne energije

Marginalni efekti od povećanja korišćenja kondenzatora, ili navedene fiksne kompenzacije snage (Q_{CF}), u mreži potrošača na 35 kV (P35) i potrošača na 10 kV (P10), su približni odgovarajućim efektima kompenzacije koja bi bila priključena na sekundarne TS 110/X (kV/kV), odnosno na sekundarne sabirnice u TS 35/10 (kV/kV). Odgovarajuće marginalne vrednosti smanjenja gubitaka na navedenim lokacijama za kondenzatora su date u tabeli 2, kao boldirane vrednosti u koloni $S(dP_{CuCF1}/dQ)_i$ u zagradi. Kako su efekti kompenzacije direktno srazmerne, pored vrednosti $S(dP_{CuCF1}/dQ)_i$ (kW/kvar), i (godišnjem) vremenu korišćenja kondenzatora t_{Qc} (h/god.), tj:

$$W_{CuQc1} = S(dP_{CuQ}/dQ)_i \cdot t_{Qc} \quad (14)$$

to se dodatni efekti navedenih fiksnih kompenzacija mogu utvrditi po sličnom izrazu

$$DW_{CF1} = \dot{a}(dP_{CuQ}/dQ)_{CF} \cdot Dt_{CF} \quad (15)$$

gde su procenjene vrednosti povećanja korišćenja kondenzatora Dt_{CF} (h/god.) = DW_{CF1} - dodatnoj količini proizvedene reaktivne energije u (kvarh/kvar/god.), i date u odgovarajućoj koloni tabele 2. Očigledno je da se efekti povećanog korišćenja kondenzatora, mogu izraziti u dodatnim količinama proizvedene kapacitivne energije DW_{CF1} (u kvarh).

Suštinski gledano primena postupka za povećanje korišćenja (postojećih) kondenzatora dovodi do poboljšanja kompenzacije reaktivnih snaga u meri kao da je deo kondenzatora, koji odgovara snazi prekompenzacije potrošača, direktno priključen na sekundarnoj strani u TS 35/10 (kV/kV). Taj deo je veći što manji deo kapacitivne energije, koju proizvode baterije stalno priključenih kondenzatora, odlazi u mrežu potrošača čije su baterije, a čija se vrednost potrošnje reaktivne energije (W_{Qp}) može izračunati po izrazima

$$W_{Qp} = \dot{a}(Q_i \cdot t_i) \quad (16a)$$

$$W_{Qp} = Q_{max} \cdot T_{maxQ}, \quad (16b)$$

(gde je T_{maxQ} vremena korišćenja maksimalne reaktivne snage (Q_{max})).

Od kapacitivne energije koju proizvode baterije stalno uključenih kondenzatora ukupne snage (Q_{CF}), za godinu dana (8 760 h):

$$W_{Qc} = Q_{CF} \cdot 8\,760 \quad (17)$$

u mrežu potrošača, čije su baterije, odlazi deo iste, čija se vrednost (W'_{Qp}) izračunava po izrazima

$$W'_{Qp} \leq \dot{a}(Q_i \cdot t_i), \text{ za } Q_{CF} \leq Q_{max} \quad (18a)$$

čija je najveća (gornja) vrednost:

$$W'_{Qp} \approx Q_{CF} \cdot (T_{max\,Q} \cdot Q_{max} / Q_{CF}), \text{ za } Q_{CF} \leq Q_{max} \quad (18b)$$

Preostali deo reaktivne energije, koji se šalje u DM i odlazi drugim potrošačima, umesto da dolazi iz elektrana, iznosi

$$W_{Q\,DM} = W_{Qc} - W'_{Qp} \quad (19a)$$

čija je najmanja (donja) vrednost:

$$W_{Q\,DM} \approx Q_{CF} \cdot (8\,760 - T_{max\,Q} \cdot Q_{max} / Q_{CF}), \text{ za } Q_{CF} \leq Q_{max} \quad (19b)$$

Relativni udeo reaktivne energije koja se šalje u distributivnu mrežu (DM) iznosi:

$$W_{Q\,DM} / W_{Qc} = 1 - (Q_{max} / Q_{CF}) \cdot (T_{max\,Q} / 8\,760) \quad (20a)$$

ili, za potrošače sa $Q_{max} \approx P_{max}$ (tj. za potrošače sa udelom motorne potrošnje $\geq 80\%$), se može približno proceniti

$$W_{Q\,DM} / W_{Qc} \approx 1 - (P_{max} / Q_{CF}) \cdot (T_{max\,P} / 8\,760) \quad (20b)$$

i zavisi od vrednosti odnosa (Q_{max} / Q_{CF}) i ($T_{max\,Q} / 8\,760$). Za uobičajene odnose $Q_{max} / Q_{CF} \approx P_{max} / Q_{CF} = 1-1,2$ i $T_{max\,P} / 8\,760 = 0,25 - 0,50$, vrednosti $W_{Q\,DM} / W_{Qc} = 0,50 - 0,70 = 50 - 70\%$, ili oko 60 % u proseku. To znači da, u proseku, oko 40 % kapacitivne energije, koju proizvode baterije stalno uključenih kondenzatora, ostaje u mreži potrošača a preostalih 60 % odlazi u distributivnu mrežu.

To je potvrđeno i na primeru pomenutog velikog potrošača („NOVKABEL”, Novi Sad) čije su potrošnje aktivne (W_P) i reaktivne (W_Q) energije tokom poslednjih godina iznosile $W_{PI} \approx 15\,000\,000$ kWh/god. i $W_Q \approx 18\,000\,000$ kvarh/god., a maksimalno reaktivno opterećenje je opalo na oko 5 500 - 6 000 kvar.

Registrovana potrošnja reaktivne energije ostala je približno ista (6 000 kvarh/god.), kao u ranijim godinama kada su opterećenja i potrošnja bili veći, i pored toga sto u režimu ispravne automatske kompenzacije (AK) rade kondenzatorske baterije ukupne snage 8 200 kvar na sekundarnim sabirnicama u 18 trafostanica TS 10(20)/ 0,4 (kV/kV) i uložnog truda na poboljšanje rada automatske kompenzacije. Potrošnja reaktivne energije pomenutog potrošača je smanjena na oko 1 000 000 kvarh/god., tek, kada je veći deo kondenzatora ukupne snage 5 200 kvar, iz sastava pomenutih kondenzatorskih baterija, uključen u stalan rad. Tako je, prelaskom kondenzatorskih baterija u rad po postupku za povećanje korišćenja kondenzatora (PPKK), kompenzovano 17 000 000 kvarh/god. od ukupne (prirodne) potrošnje reaktivne energije od 18 000 000 kvarh/god., dok je u režimu automatskog rada kondenzatorskih baterija bilo kompenzovano samo 12 000 000 kvarh/god. Samo u vreme visokih opterećenja (600-800 h godišnje) ostaje nekompenzovano 500-700 kvar ili oko 500 000 kvarh/god., dok je je preostalih 500 000 kvarh/god. posledica povremenog isključenja sa mreže pojedinih baterija kondenzatora iz ovih ili onih razloga. Takođe treba primetiti da navedene kondenzatorske baterije proizvode ukupno oko 41 000 000 kvarh/god. i da prekompenzovani deo od 24 000 000 kvarh/god. (ili 58,5 %) odlazi u mrežu srednjeg napona i služi da zadovolji potrebe drugih distributivnih potrošača, pa su za toliko smanjene isporuke reaktivne energije iz elektrana i prenosne mreže.

5. REZULTATI PRIMENE POSTUPKA NA PODRUČJU ELEKTROPRIVREDE SRBIJE

Kroz dosadašnju saradnju Instituta „Nikola Tesla” iz Beograda i Elektroprivrede Srbije, u periodu 2000-2002. godine, postupak za povećanje korišćenja kondenzatora (PPK) je primenjen, kroz realizaciju studije i projekta sa istim nazivom, na kondenzatorske baterije koje su vlasništvo 75 srednjih i većih potrošača sa područja „Elektrodistribucije” Beograd, „Elektrovojvodine” Novi Sad i „Elektrosrbije” Kraljevo [7]. U stalan rad su uključene kondenzatorske baterije ukupne snage 65 785 kvar, od čega se, po proceni, koristi oko 41 787 kvar u potpunosti (svih 8 760 h/ god.) i sa raspoloživom snagom za stalan rad (tabela 3).

Analize su pokazale da su, u režimu automatske kompenzacije (AK), kondenzatorske baterije se koristile sa oko 30 %, ili sa 2 630 h/god., u proseku. Sa prelaskom kondenzatorskih baterija na rad po postupku za povećano korišćenje kondenzatora (PPKK), kompenzacija reaktivne energije potrošača se poboljš-

Tabela 3.

Podaci o kondenzatorima uključenim u stalan rad i proizvedenoj reaktivnoj (kapacitivnoj) energiji

Područja distributivnih preduzeća	Kondenzatori u stalnom radu			Proizvedena kapacitivna energija				Isporuke u dis- tributivnu mrežu
	Uključeno (kvar)	Koristi se		Automatske kompenzacije (AK)		Stalan rad kondenzatora		(60 %)
		%	kvar	%	kvarh/godišnje	%	kvarh/godišnje	kvarh/godišnje
Elektrodistribucija Beograd	19 010	50	9 505	30	24 979 140	100	83 263 800	49 958 280
Elektrovojvodina Novi Sad	18 520	60	11 112	30	29 202 336	100	97 341 120	58 404 672
Elektrosrbija Kraljevo	28 255	75	21 170	30	55 634 760	100	185 449 200	111 269 520
UKUPNO	65 785		41 787		109 816 236	100	366 054 120	219 632 472

šala za oko 1/3 - korišćenje kondenzatorskih baterija se povećalo sa 30 % na 40 % u proseku. Preostalih 60 % proizvedene reaktivne (kapacitivne) energije se, u periodima prekompenzacije potrošača, šalje u distributivnu mrežu.

Pri donošenju odluke o primeni datog tehničkog rešenja u konkretnim uslovima treba voditi računa da li u mreži potrošača postoje izvori harmonika struje 7. i 11. reda koji stvaraju harmonike napona čije su vrednosti iznad dozvoljenih 5 %, kao i o režimu reaktivnih opterećenja u DM. Pokazalo se da je to bio ograničavajući faktor u manje od 7 % slučajeva, na uzorku od 300 transformatora SN/NN. Kraće analize [7] su pokazale da je poboljšanje kompenzacije reaktivne energije povećanjem korišćenja postojećih kondenzatora, u svim realizovanim slučajevima, ekonomičnije nego da se reaktivna energija obezbeđuje iz prenosne mreže, a da je u oko 90 % slučajeva ekonomičnije nego da se to zameni ugradnjom dodatne kompenzacije u distributivnoj mreži.

Procena je [7] da još oko 100 Mvar instaliranih kondenzatora, kod industrijskih potrošača u Srbiji, radi na mreži samo oko 2 500 h/godišnje, a da se oko 30-40 Mvar zbog smanjenih potreba uopšte ne uključuje, pa bi njihovo korišćenje na izloženi način moglo dovesti do značajnog poboljšanja kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama.

6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak za povećanje faktora snage potrošača sa kondenzatorima i poboljšanje kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnoj mreži (DM), bez novih ulaganja. On se zasniva na (novom) postupku za povećanje korišćenja (postojećih) kondenzatora u mreži potrošača. Ideja je da se kondenzatorske baterije podele na deo sa fiksnom priključenim kondenzatorima snage Q_{CF} i deo

koji se, po potrebi, automatski uključuje i reguliše zadati $\cos \phi$. Time se veći deo kondenzatora, kod industrijskih potrošača, trajno priključuje na sekundarne sabirnice transformatora SN/NN i koristi svih 8 760 h/godišnje, umesto uobičajenih 1 500 - 4 500 h/godišnje. Znatno veći iznosi za snage stalno priključenih kondenzatora (Q_{CF}), u odnosu na iste dimenzionirane da se izbegnu rezonance za harmonike reda $h < 17$, se dobijaju izborom vrednosti $Q_{CF} = S_{nt}/(8I_{u\phi})$. Time se, primenom naše ideje, rezonantna učestanost postavlja na 450 Hz, ali se radi o fiktivnoj rezonanci pošto transformatori sprege trougao/zvezda predstavljaju otvoreno kolo za struje 9-tog harmonika na sekundarnoj strani transformatora, a time i kroz kondenzatore.

Uočava se da reaktansa transformator SN/NN-kondenzator snage $Q_c = S_{nt}/(8I_{u\phi})$, tj. rezonantno kolo za 9-ti harmonik, predstavlja široko-pojasni redni L-C filter za najbliže susedne harmonike 7-tog i 11-og reda, gledano sa sabirnica iz TS 35/10 (kV/kV) i mreže 10 kV. Time su izbegnute opasnosti od rezonanci i pri harmonicima reda 11 $h < 17$, zbog kojih postoje pomenuta ograničenja, za dozvoljene snage stalno priključenih kondenzatora (Q_{CF}), na relativno niske vrednosti. Objasnjeni su i razlozi koji dovode do nemogućnosti da potrošač, sa baterijama za automatsku kompenzaciju (AK) na strani niskog napona, ostvari visok faktor snage ($\cos \phi$) u tački priključka (merenja) na srednjem naponu, čak i kada raspolaže sa kondenzatorima dovoljnih (velikih) snaga. Pokazuje se da primena postupka za povećanje korišćenja kondenzatora omogućava da potrošač i sa postojećim kondenzatorskim baterijama značajno popravi svoj faktor snage.

Analize su pokazale da se, u režimu automatske kompenzacije (AK), kondenzatorske baterije koriste, u proseku, samo oko 30 % ili 2 630 h/god. Sa prelaaskom kondenzatorskih baterija na rad po postupku

za povećano korišćenje kondenzatora (PPPK), kompenzacija reaktivne energije se poboljšala za oko 1/3 sa aspekta potrošača - iskorišćenje kondenzatorskih baterija se povećava sa 30 % na 40 %. Pošto su kondenzatori uključeni neprekidno, preostale količine proizvedene reaktivne (kapacitivne) energije se, u periodima prekompenzacije potrošača, šalju u distributivnu mrežu - naravno gde je to iz tehničkih razloga dozvoljeno i ekonomski opravdano. Time se inicira i uvodi u primenu novi postupak u poboljšanje kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama, čiji je cilj da se prvo maksimalno iskoriste već postojeće kondenzatorske baterije u mreži potrošača, pa da se tek u sledećoj fazi razmotri potreba za investiranjem u dodatnu kompenzaciju.

7. LITERATURA

- [1] Studija PLANIRANJE IZVORA REAKTIVNIH SNAGA U EES EPS-a- I DEO, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 1999. godine, 252 strane.
- [2] M. Kostić, EKONOMSKI FAKTOR SNAGE I JEDINIČNI EFEKTI KOMPENZACIJE, Elektropriroda br. 1, 2001, str. 24-33.
- [3] M. Kostić, POSTUPAK ZA PRORAČUN I ANALIZU UKUPNIH MARGINALNIH EFEKATA KOMPENZACIJE REAKTIVNIH SNAGA, Elektropriroda br. 2, 2002, str. 39-45.
- [4] ODLUKA O TARIFNOM SISTEMU ZA PRODAJU ELEKTRIČNE ENERGIJE, JP EPS, Službeni glasnik Republike Srbije, april 2001. godine.
- [5] M. Kostić, VEĆE DOZVOLJENE SNAGE ZA FIKSNO PRIKLJUČENE KONDENZATORA NA NISKONAPONSKOJ STRANI TRANSFORMATORA 10(20)/0,4 kV/kV, 26. Savetovanje JUKO CIGRE, 2003. godine.
- [6] Patent broj 49030, POSTUPAK ZA POVEĆANJE KORIŠĆENJA KONDENZATORA NA SEKUNDARNOJ STRANI TRANSFORMATORA SN/NN U CILJU POBOLJŠANJA KOMPENZACIJE, Upišan 26. 03. 2003. godine u Registar patenata Srbije i Crne Gore.
- [7] STUDIJA I PROJEKAT POBOLJŠANJA KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE U EES EPS-a KORIŠĆENJEM POSTOJEĆIH KONDENZATORSKIH BATERIJA: I FAZA (2001. GODINE) I II FAZA (2002. GODINE)”, Institut „Nikola Tesla”, Beograd.
- [8] T. Gönen, ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM ENGINEERING, McGraw - Hill Book Company, 1986, pp 740
- [9] R. A. Zimmerman, ECONOMIC MERITS OF SECONDARY CAPACITORS, AIEE Trans.Vol. 72, 1953, pp 694-97.
- [10] M. Kostić, TROŠKOVI PRENOSA REAKTIVNIH SNAGA I TARIFNI STAVOVI ZA REAKTIVNU ENERGIJU, Elektropriroda br. 4, 2002, str. 13-27.

Rad je primljen u uredništvo 13. 02. 2004. godine



Miloje Kostić je rođen 01. 10. 1950. godine u Bioski, opština Užice. Srednju elektrotehničku školu je završio u Užicu 1969. godine. Na elektrotehničkom fakultetu u Beogradu je diplomirao 1974. godine, a magistrirao 1983. godine. Doktorirao je na Tehničkom fakultetu u Čačku 1990. godine.

U preduzeću „Prvi partizan”, u Užicu, radio je od 1974. do 1991. godine, kada prelazi u Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” u Beogradu, gde i sada radi. Šira područja rada su mu električne mašine, elektromotorni pogoni, električne mreže i industrijska elektroenergetika. U oblasti racionalizacije potrošnje električne energije, u proteklih 20 godina, uradio je i realizovao veliki broj studija i projekata, koji donose značajne energetske i velike finansijske uštede. U primenu uvodi savremena rešenja, ali i sopstvena tehnička unapređenja i patente, od kojih je ovaj poslednji uključen u prezentirani rad.

Do sada je objavio 75 radova u časopisima i zbornicima domaćih i međunarodnih konferencija iz navedenih područja svoga rada, kao i dve knjige – monografije autora.

Mirjana Stojanović,
Dragoljub Popović, Vladanka Aćimović-Raspopović i Jovanka Gajica

Primena simulacije u projektovanju elektroprivrednih telekomunikacionih mreža sa tehnologijom Internet protokola

Pregledni rad
UDK: 621.39

Rezime:

U ovom radu je objašnjena uloga metoda simulacije u projektovanju i razvoju multiservisnih elektroprivrednih telekomunikacionih mreža sa tehnologijom IP. Opisani su principi konstruisanja simulacionih modela i scenarija simulacije multiservisnih IP mreža. Zatim su prikazane glavne karakteristike nekoliko savremenih alata za simulaciju IP mreža. Proces simulacije pomoću simulatora NS2 (Network Simulator ver. 2) je ilustrovan na primeru rutiranja saobraćaja u mreži koja će povezivati nacionalne dispečerske centre zemalja jugoistočne Evrope (projekat SECI - Southeast European Cooperation Initiative).

Ključne reči: Internet protokol, simulacija, model, scenario, vizuelizacija, analiza rezultata

Abstract:

SIMULATION IN THE DESIGN PROCESS OF INTERNET PROTOCOL BASED POWER UTILITY TELECOMMUNICATION NETWORKS

In this paper, the role of simulation in the design and development of IP-based multiservice power utility communication networks is explained. The principles of building simulation models and generating simulation scenarios are described. Further, the main features of several advanced simulation tools for IP networks are presented. The simulation process using NS2 (Network Simulator ver. 2) is illustrated on the example of traffic routing in the future interconnection of national control centers of Southeastern Europe (the project SECI - Southeast European Cooperation Initiative).

Key words: Internet protocol, Simulation, Model, Scenario, Visualization, Trace analysis

1. UVOD

Istraživanja u oblasti mreža sa tehnologijom Internet protokola (IP) zasnivaju se na analitičkim metodima, simulaciji, eksperimentima i merenjima. Dok merenja i eksperimenti obezbeđuju sredstva za

ispitivanje realnih mreža, simulacija i analiza su ograničene na ispitivanje konstruisanih, apstraktnih modela.

Ograničenje metoda merenja i eksperimentalnih metoda je u tome što se oni mogu primenjivati samo na postojeći sistem ili delimično nova okruženja. Sa

Mr Mirjana Stojanović, dipl. ing. – e-mail: stojmir@kondor.imp.bg.ac.yu, Jovanka Gajica, dipl. ing.

– Institut Mihajlo Pupin, 11 050 Beograd, Volgina 15

Dragoljub Popović, dipl. ing, Jugoslovenski komitet CIGRÉ–JUKO CIGRÉ, 11 000 Vojvode Stepe 412

Prof. dr Vladanka Aćimović-Raspopović, dipl. ing. – Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu,
11 000 Beograd, Vojvode Stepe 305

druge strane, iako su analitički metodi ključni za suštinsko razumevanje ponašanja mreže, problem se ogleda u riziku da se primene modeli pojednostavljeni do te mere da se gube bitne karakteristike ponašanja mreže.

Simulacija je komplementarna sa analizom, zbog toga što omogućava verifikaciju ispravnosti analize i ispitivanje komplikovanih modela koje bi bilo teško ili nemoguće rešavati analitički. Usled heterogenosti i brzih promena IP tehnologije, ne postoji jedinstven i ograničen skup scenarija simulacije, dovoljan da pokaže da će se predloženi protokol ili projektovani sistem dobro ponašati u uslovima stalnog razvoja mreže. Pored problema da se definiše relevantan simulacioni model, mogu se javiti teškoće u verifikaciji da simulator tačno implementira željeni model. Zbog toga je preporučljivo da se koriste poznati i provereni alati, a jedan od najboljih načina za validaciju simulacije je da simulatori i pridruženi scenariji simulacije budu slobodno dostupni, tako da drugi istraživači mogu da provere efekte promene polaznih pretpostavki o simulacionom modelu, parametrima i scenariju.

Razvoj nove generacije elektroprivrednih telekomunikacionih (TK) mreža odvija se u pravcu multiservisnih IP mreža, u kojima su, delimično ili potpuno, integrisani operativni i poslovni servisi [1], [2]. Uvođenje fundamentalno nove koncepcije, tehnologije i servisa u elektroprivrednom telekomunikacionom sistemu zahteva temeljnu pripremu: definisanje strategije razvoja, evaluaciju prednosti i potencijalnih rizika i pravilno projektovanje mreže. U takvim okolnostima, uloga simulacije je višestruko korisna, kako u procesu odlučivanja o stepenu i dinamici integracije servisa, tako i u evaluaciji performansi projektovane mreže.

Cilj ovog rada je da ilustruje ulogu simulacije u razvoju i projektovanju elektroprivrednih multiservisnih IP mreža. Ukazano je na oblasti primene simulacije i objašnjeni su principi konstruisanja simulacionih modela i scenarija simulacije. Prikazane su glavne karakteristike nekoliko savremenih alata za simulaciju IP mreža, a proces simulacije je ilustrovan na konkretnom primeru mreže koja će povezivati nacionalne dispečerske centre zemalja jugoistočne Evrope.

2. OBLASTI PRIMENE SIMULACIJE U PROJEKTOVANJU IP BAZIRANIH ELEKTROPRIVREDNIH TK MREŽA

Metod simulacije može se primenjivati u studijskim istraživanjima i za potrebe evaluacije konkretnih rešenja predviđenih projektom IP mreže. Oblasti primene simulacije su:

- Evaluacija mogućnosti primene IP tehnologije u elektroprivrednom telekomunikacionom sistemu;
- Odlučivanje o stepenu integracije pojedinih operativnih i poslovnih servisa;
- Dizajn rešenja za implementaciju više nivoa kvaliteta servisa (QoS - *Quality of Service*);
- Evaluacija projekta mreže, testiranjem ponašanja u različitim uslovima rada;
- Realizacija i testiranje pilot-projekata za pojedine servise ili delove mreže.

Evaluacija primenljivosti IP tehnologije i odlučivanje o stepenu integracije servisa treba da uzmu u obzir specifične komunikacione zahteve svih ili skupa operativnih i poslovnih servisa. Korisno je analitički odrediti granične vrednosti bitnih performansi (najveće kašnjenje, džiter), a zatim primeniti simulaciju. Pri definisanju scenarija simulacije treba uzeti u obzir karakteristike topologije planirane mreže i linkova, prirodu saobraćaja u multiservisnoj mreži, protokolske profile za pojedine aplikacije i servise, kao i heterogenost verzija i implementacija pojedinih protokola.

Simulacija se primenjuje, samostalno i u kombinaciji sa analitičkim metodima, u svim elementima izbora **rešenja za implementaciju QoS** [2], [3], što obuhvata evaluaciju arhitektura QoS, varijante klasifikacije saobraćaja, izbor i konfigurisanje mehanizama opsluživanja paketa (uređivanje saobraćaja, vremensko raspoređivanje paketa, upravljanje redovima), upravljanje kvalitetom servisa, rutiranje QoS. Pri simulaciji rešenja za implementaciju QoS ispituju se i promene opsega parametara, s obzirom na postojanje nelinearne povratne sprege u IP mrežama, kada ponekad i veoma mala promena vrednosti parametra može potpuno da promeni numeričke rezultate (tipičan primer su RED algoritmi za upravljanje redovima).

Evaluacija projekta mreže treba da obuhvati proveru definisane topologije, primenjenih protokolskih profila, algoritama rutiranja, principa adresiranja i izabраниh rešenja za QoS [1], [4]. Potrebno je da se ispita ponašanje mreže u različitim uslovima rada, a posebno u najgorim uslovima (*worst case*) kao što su nagle promene saobraćajnog opterećenja, ispad pojedinih delova mreže, čas najvećeg opterećenja, ponašanje u uslovima opasnosti od zagušenja, asimetrične putanje podataka između krajnjih tačaka u suprotnim smerovima (npr. za TCP i ACK pakete). Poželjno je da se analizira skalabilnost mreže, tako što će se povećavati broj korisnika i saobraćajno opterećenje za red veličine (i više) i pokušati da odrede granice za posmatranu mrežu. U ovom slučaju se suočavamo sa potrebom da se definišu kompleksni scenariji simulacije i sa pitanjem koje su dozvoljene aproksimacije sa ciljem da se pojednostavi scenario,

a pri tome sačuvaju bitne karakteristike dinamičkog ponašanja mreže.

Simulaciju je poželjno kombinovati sa eksperimentalnim metodama i merenjima, naročito u početnim fazama izgradnje mreže, kada se instalira mrežna oprema ili u situacijama kada se integriše novi servis. U pilot projektima se merenjima ne mogu ispitati sve relevantne karakteristike buduće realne mreže, zbog toga što se oni realizuju sa ograničenim brojem aplikacija i korisnika. Simulator se u tom slučaju može upotrebljavati kao generator saobraćaja i/ili kao određište koje prihvata saobraćaj iz realne mreže. Na taj način se simuliraju različiti nivoi saobraćajnog opterećenja, broj korisnika i integracija raznorodnih servisa. U zavisnosti od karakteristika simulatora, pristup realnoj mreži može se obavljati na različitim slojevima protokolskog steka.

3. PRINCIPI KONSTRUISANJA SIMULACIONIH MODELA I SCENARIJA SIMULACIJE

Ključno svojstvo koje generalno otežava modelovanje i simulaciju multiservisnih IP mreža je heterogenost [5], koja se ogleda u više aspekata: topologija mreže, izbor simuliranih aplikacija, generisanje saobraćaja, dinamičko rutiranje saobraćaja, razlike u verzijama protokola i dr. To znači da ne postoji unapred definisan skup scenarija simulacije koji je dovoljan da verifikuje predložena rešenja. Problem se prevazilazi identifikacijom invarijantnih svojstava za karakteristike IP saobraćaja, proces dolazaka poziva, trajanje sesija, kao i pravilnim aproksimacijama modela i ispitivanjem ponašanja mreže u uslovi- ma promene skupa simulacionih parametara u širokom opsegu.

3.1. Topologija mreže

Topologiju mreže definišu čvorovi mreže koji su međusobno povezani linkovima. Čvorovi se najčešće modeliraju kao generički paketski komutatori, koji u zavisnosti od primenjene tehnologije i scenarija simulacije mogu imati specifične karakteristike (npr. čvor jezgra mreže, periferni čvor, MPLS čvor, komutacioni centar mobilne mreže i dr.). Sledeće bitno svojstvo je modeliranje mehanizama opsluživanja dolaznog i odlaznog saobraćaja, u zavisnosti od primenjenih rešenja za QoS (videti poglavlje 3.4). Takođe se modelira funkcija rutiranja saobraćaja - algoritmi i protokoli (videti poglavlje 3.5).

Model linka obavezno obuhvata parametre fizičkog linka kao što su kapacitet i vreme propagacije, a može da obuhvati i parametre protokola koji se primenjuje na sloju linka za podatke, kao i parametre

koji su relevantni za ukupne performanse mreže (cena, verovatnoća greške po bitu, srednje vreme između otkaza i dr.).

3.2. Izvori saobraćaja

Pravilno definisanje izvora (generatora) saobraćaja je jedna od ključnih tačaka u konstruisanju simulacionih modela, jer se pomoću izvora simuliraju profili ulaznog saobraćaja u smislu zahtevanog propusnog opsega i prirode saobraćaja. Iako u modeliranju izvora postoji određen broj invarijanti, ostaje otvoren problem definisanja većih scenarija simulacije sa realističnim kombinacijama saobraćaja [5]. Svakako treba istaći značajan napredak u razvoju alata za generisanje Web saobraćaja, poslednjih godina.

Modeli izvora saobraćaja mogu se najopštije klasifikovati na modele sa kratkoročnim korelacijama, kao što su Markovljevi i regresivni modeli i modele sa dugoročnim korelacijama. Razmatranja karakteristika navedenih klasa modela znatno prevazilaze okvire ovog rada, a iscrpan uporedni pregled može se pronaći npr. u [6]. U nastavku su navedeni tipični primeri modelovanja pojedinih izvora saobraćaja, imajući u vidu karakteristične aplikacije u elektroprivredi.

Jedan izvor govora se najčešće modeluje Markovljevim modelom sa dva stanja („ON-OFF”, eksponencijalna raspodela trajanja stanja). Iniciranje korisničkih sesija (daljinsko prijavljivanje, početak transfere fajlova, početak sesije za pretraživanje Web-a) se korektno opisuje Poasonovim procesima, a za opis veličine i trajanja konekcija koriste se log-normalne raspodele. Kombinacija više govornih izvora i izvora podataka često se opisuje Poasonovim procesom sa Markovljevom modulacijom (MMPP, *Markov Modulated Poisson Process*). Za opis video saobraćaja (*streaming*) koriste se fluidni modeli sa Markovljevom modulacijom, kao i autoregresivni modeli.

Za saobraćaj koji generišu SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) aplikacije koriste se sledeći modeli [4]:

- deterministički izvori za simulaciju periodičnog saobraćaja (merjenja, brojlara i sl.) koji generišu RTU-ovi i prosleđuju ga centrima upravljanja (CU);
- Poasonovi izvori za simulaciju spontanog podataka (statusi, indikacije, alarmi);
- razmena poruka (*messaging*) i fajl-transfer između centara upravljanja.

Samo-slični (*self-similar*) ili fraktalni procesi opisuju dugoročne korelacije¹⁾ u dolascima paketa koje su uočene u agregatnom Internet saobraćaju, a

¹⁾ Termin „dugoročan” označava intervale od nekoliko stotina milisekundi do nekoliko desetina minuta.

moгу prouzrokovati nepredviđeno kašnjenje i drastično smanjenje efikasnosti baferskih mehanizama u mrežnim ruterima. Samo-sličnim procesima se takođe modeliraju multimedijalni izvori saobraćaja i pokretna slika. Najjednostavniji način za simulaciju samo-sličnog saobraćaja je multipleksiranje većeg broja „ON-OFF” izvora sa Pareto raspodelom trajanja „ON” i „OFF” stanja [7].

Pored matematičkog modelovanja saobraćaja, većina alata za simulaciju pruža mogućnost rada sa zapisima realnog saobraćaja (*trace*), što se često koristi u simulaciji multimedijalnih izvora saobraćaja, izvora video signala i Web saobraćaja. U ovom slučaju se treba usredsrediti na zapise na nivou realnih izvora saobraćaja, a ne na nivou paketizovanog saobraćaja. Razlog za ovo je adaptivno upravljanje zagušenjima u IP mrežama, usled kojeg izvor saobraćaja reaguje na tok prenosa informacija i smanjuje brzinu emitovanja ako detektuje da je mreža delom u opasnosti od zagušenja. Posledica je da vremenski zapis emitovanja paketa u *trace* fajlu reflektuje i uslove u konkretnoj mreži u trenutku kada je veza ostvorena (fenomen oblikovanih *trace* fajlova [5]).

3.3. Raspodela saobraćaja

Raspodela saobraćaja izražava se matricom saobraćaja koja definiše izvor i odredište svakog toka saobraćaja koji se prenosi kroz mrežu, pri čemu matrica saobraćaja ne definiše putanje tokova od izvora do odredišta, već je to zadatak protokola i algoritama rutiranja implementiranih u čvorovima mreže.

3.4. Opsluživanje paketa u čvorovima multiservisne mreže

Simulacionim modelom svakog čvora multiservisne mreže treba da budu obuhvaćene relevantne karakteristike mehanizama za opsluživanje dolaznog i odlaznog saobraćaja. U uslovima podrške više nivoa QoS definišu se principi klasifikacije IP paketa i kontrole ulaznog saobraćaja u svakom ulaznom čvoru, kao i principi obrade različitih klasa dolaznog saobraćaja u svakom čvoru jezgra mreže. Za odlazni saobraćaj definišu se mehanizmi vremenskog raspoređivanja (*scheduling*) paketa iz različitih klasa po zajedničkom izlaznom linku, kao i mehanizmi za kontrolu zagušenja (upravljanje redovima - *queue management*). U komercijalno raspoloživoj mrežnoj opremi obično su implementirane razne varijante pojedinih mehanizama QoS i moguće su različite kombinacije, koje pokazuju dobre performanse pod uslovom da se pravilno konfigurishu odgovarajući ulazni parametri, u zavisnosti od konkretnih zahteva, primenjenih tehničkih rešenja i

saobraćajnog opterećenja u teleinformacionoj mreži. Detaljne simulacione studije o izboru mehanizama opsluživanja paketa i načinu konfigurisanja parametara mogu se pronaći u [3] i [8].

3.5. Rutiranje saobraćaja

Tradicionalni Internet protokoli rutiranja koriste algoritme koji se zasnivaju se na pronalazanju najkraćih putanja od izvora do odredišta²⁾, što često uslovljava neravnomerno opterećenje linkova u mreži i potencijalno može da prouzrokuje zagušenje pojedinih deonica.

Algoritmi rutiranja koji se primenjuju u elektroprivrednoj telekomunikacionoj mreži moraju da uzmu u obzir zahtevane komunikacione performanse kao što su raspoloživi propusni opseg, najveće dozvoljeno kašnjenje, najveći dozvoljen džiter ili najveći procenat izgubljenih paketa. Različite vrste saobraćaja zahtevaju i različite komunikacione performanse. Tako su za daljinsku zaštitu i prenos govora kritični kašnjenje i džiter. Za SCADA i transakciono orijentisane aplikacije potrebno je da se gubitak paketa svede na zanemarljivu meru (dopuštena verovatnoća izgubljenih poruka). Pored toga, za SCADA aplikacije najveće dozvoljeno kašnjenje od jednog do drugog kraja mreže treba da bude manje od 1 s.

Multimedijalni servisi u realnom vremenu, pored malog kašnjenja i džitera, zahtevaju velike propusne opsege. Definisane mere performansi i principa njihovog kombinovanja tako da se zadovolje zahtevi za QoS za pojedine klase saobraćaja, a da se pri tome omogući skalabilnost mreže, predstavlja ključni izazov u definisanju algoritama rutiranja u multiservisnim IP mrežama [9], a simulacije predstavljaju nezamenljiv alat u evaluaciji predloženih rešenja. Ovi problemi su relevantni za rutiranje u jednoj mreži (*intra-domain*), kao i pri povezivanju nekoliko nezavisnih mreža (*inter-domain*). Dodatni zahtevi postavljaju se za multicast rutiranje u kontekstu grupne komunikacije, kao i *peer-to-peer* (P2P) komunikacije.

Scenarijem simulacije takođe se proverava dinamika mreže - predložena rešenja za preusmeravanje i restauraciju saobraćaja, npr. usled ispada jednog ili grupe linkova. Isto tako, scenarijem simulacije moguće je proveriti kako se rutiranje saobraćaja prilagođava uslovima u mreži, da bi se poboljšale ukupne performanse (funkcije saobraćajnog inženjeringa - *traffic engineering*).

²⁾ Bazični algoritmi rutiranja su Dijkstra i Bellman-Ford, na kojima se zasniva većina današnjih Internet protokola rutiranja.

3.6. Protokolski profili

Ukupne performanse od jednog do drugog kraja mreže značajno zavise od transportnih protokola koji se koriste u krajnjim sistemima, zbog čega simulacionim modelima izvora i odredišta saobraćaja treba da budu pridružene komponente koje modeliraju relevantne informacije o transportnim protokolima.

Najveći broj aplikacija za prenos podataka (SCADA, poslovne aplikacije) koristi TCP transportni protokol, koji sadrži mehanizme za oporavak od grešaka i adaptivno upravljanje protokom, tako da su pojedine performanse rezultat interakcije tih mehanizama sa protokolima rutiranja i mehanizmima kvaliteta servisa. U simulaciji treba uzeti u obzir i verziju TCP protokola koja je predviđena projektom mreže, jer danas postoji desetak različitih implementiranih verzija, koje se međusobno razlikuju upravo u mehanizmima kontrole protoka.

Sa druge strane, deo aplikacija u realnom vremenu (prenos govora - VoIP i multimedijalne aplikacije u realnom vremenu) koriste transportni protokol u realnom vremenu - RTP (*Real-time Transport Protocol*) i pridruženi kontrolni protokol - RTCP (*Real-time Transport Control Protocol*). Ovo svojstvo je bitno za ispitivanje relevantnih mera performansi za aplikacije u realnom vremenu (kašnjenje i džiter).

U ispitivanjima Web saobraćaja i u slučaju *multicast* komunikacije, u simulaciji treba uzeti u obzir i elemente protokola sesije - uspostavljanje, održavanje i raskidanje korisničkih sesija, jer oni direktno utiču na način rezervisanja i korišćenja mrežnih resursa.

4. SIMULATORI IP MREŽA

Poslednjih desetak godina je ostvaren značajan napredak u razvoju alata za simulaciju mreža sa tehnologijom Internet protokola. S obzirom na dinamiku razvoja novih rešenja zasnovanih na IP tehnologiji, ovi alati se kontinuirano unapređuju i obogaćuju novim karakteristikama. Bitni zahtevi za simulatore IP mreža odnose se na mogućnosti simulacije globalnog Interneta (skalabilnost), efikasno izvršavanje simulacije i uštedu računarskih resursa. Većini alata pridruženi su pomoćni grafički alati za vizuelizaciju simulacije i obradu i analizu rezultata.

U nastavku su ukratko prikazane karakteristike simulatora OPNET Modeler, SSFNet i J-Sim, a zatim je detaljnije opisan simulator NS2, koji je korišćen u primeru simulacije prikazanom u poglavlju 5. Napominjemo da komparativne analize karakteristi-

ka pojedinih simulatora nisu publikovane u velikom broju, a postojeće publikacije uglavnom obuhvataju ograničen skup eksperimenata sa jednostavnim scenarijima simulacije [10], [11].

4.1. OPNET Modeler, SSFNet i J-Sim

OPNET Modeler [12] je komercijalni simulator koji podržava razne tehnologije LAN i WAN mreža (ATM, IP, mobilne mreže, bežični LAN i dr.) i implementira oko 400 funkcija za modelovanje protokola, elemenata mreže i dinamičkog ponašanja mreže. OPNET modeler pripada klasi simulatora vođenih događajima u diskretnom vremenu, a implementacija simulatora se zasniva na objektno-orientisanom konačnom automatu kombinovanom sa analitičkim modelom. Raspoloživ je za Windows i Unix platforme. Grafički korisnički interfejs (GUI - *Graphical User Interface*), kao i iscrpna dokumentacija sa primerima simulacionih studija predstavljaju jednu od glavnih prednosti ovog simulatora. Izvorni programi nisu slobodno dostupni, već je samo na raspolaganju mogućnost generisanja raznih scenarija simulacije sa variranjem ulaznih parametara.

SSFNet [13] je simulator sa slobodnom distribucijom i slobodno dostupnim izvornim programima. Namenjen je za modelovanje skalabilnih IP mreža i globalnog Interneta. SSFNet je simulator vođen događajima u diskretnom vremenu koji se implementira pomoću Java SSF (*Scalable Simulation Framework*) modula. Raspoloživ je za Unix i Windows platforme. Za opis apstraktnih simulacionih modela koristi se standardizovana sintaksa jezika DML (*Domain Modeling Language*), pomoću koje se mogu kreirati simulacioni modeli sa više desetina hiljada multiprotokolskih hostova i IP ruta.

J-Sim [14] implementira autonomnu arhitekturu zasnovanu na komponentama (ACA - *Autonomous Component Architecture*) na programskom jeziku Java. Telekomunikaciona mreža se modeluje hijerarhijski organizovanim komponentama, koje poseduju jednu ili više krajnjih tačaka - portova. Razmena informacija o tekućem simulacionom vremenu obavlja se preko skupa unapred definisanih portova. J-Sim uvodi koncept centralizovanog upravljanja nezavisnim instancama izvršavanja simulacije (*background thread manager*), koji omogućava svim aktivnim instancama globalno praćenje simulacionog vremena. Programski jezik Java je pogodan za implementaciju ACA koncepta zbog svojih karakteristika kao što su nezavisnost od platforme, objektna orijentacija, ugrađeno izvršavanje višestrukih instanci i dr. Distribucija i izvorni programi J-Sim su slobodni.

4.2. NS2 i pridruženi alati

Simulator NS2 [15] je druga generacija mrežnog simulatora NS (*Network Simulator*), razvijenog polovinom devedesetih godina u okviru DARPA VINT (*Virtual Inter-Network Testbed*) projekta, u saradnji nekoliko vodećih američkih univerziteta. Veoma rasprostranjena upotreba (primenjuje se u većini američkih i zapadno-evropskih naučno-istraživačkih institucija), intenzivan razvoj, kao i slobodna distribucija i slobodno raspoloživi izvorni programi predstavljaju glavne razloge našeg opredeljenja za korišćenje ovog simulatora.

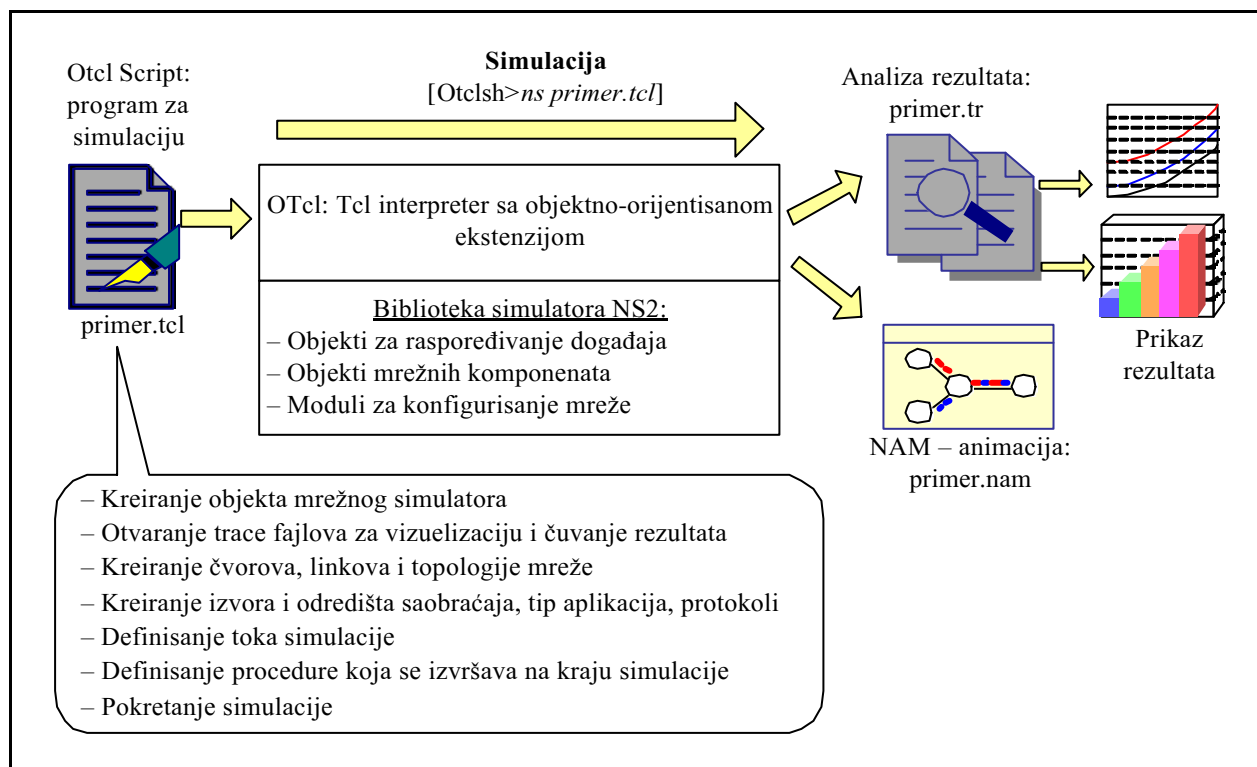
NS2 je multi-protokolski simulator koji implementira različite aplikacione protokole (Telnet, FTP, HTTP), transportne protokole (UDP, razne verzije TCP, RTP, RTCP), *unicast* i *multicast* protokole rutiranja, MAC protokole za simulaciju lokalnih računarskih mreža, protokole za mobilne IP mreže, protokole za satelitsku komunikaciju. Nedavno je u NS2 integrisana podrška simulacije Web aplikacija sa „Web caching” funkcijama i HTTP protokolom. NS2 sadrži bogat skup generatora saobraćaja i ima mogućnost rada sa uzorcima realnog saobraćaja. Simulator takođe obuhvata biblioteke za kreiranje raznovrsnih topologija mreže i pruža mogućnosti za generisanje komplikovanijih scenarija simulacije, kako u pogledu skalabilnih mreža,

tako i u pogledu multiprotokolskih slojeva i heterogenih izvora saobraćaja. U simulatoru su implementirani mehanizmi kvaliteta servisa, kao što su razni algoritmi za opsluživanje paketa, diferencirani servisi, MPLS i dr.

NS2 pripada klasi simulatora vođenih događajima u diskretnom vremenu. Razvijen je metodama objektno-orijentisanog programiranja, na programskom jeziku C++, sa korisničkim interpreterom objektno-orijentisanih Tcl³⁾ (OTcl) skriptova. Raspoloživ je za razne verzije operativnih sistema Unix (Sun OS, Free BSD, Linux) i Windows (95/98/2000/NT/XP).

Na slici 1 je prikazan korisnički aspekt procesa simulacije pomoću NS2. Da bi se koristio simulator potrebno je programirati skript na jeziku OTcl, u kome će se kreirati objekat simulatora, otvoriti pomoćni fajlovi za čuvanje rezultata i podataka za animaciju simulacije, konfigurisati topologija mreže, definisati tipovi izvora i protokoli i napraviti scenario simulacije (raspored događaja u diskretnom vremenu). Moduli za raspoređivanje događaja i objekti mrežnih komponentata razvijeni su na programskom

³⁾ Tcl (*Tools Command Language*) - programski jezik sa jednostavnom sintaksom, koji se koristi za razvoj *stand-alone* aplikacija ili ugrađen u druge aplikacione programe. Distribucija i izvorni kod su slobodno dostupni, <http://www.tcl.tk>



Slika 1. Korisnički aspekt procesa simulacije pomoću NS2

jeziku C++⁴⁾. Dodavanje novih komponenata simulatoru (npr. nova verzija nekog protokola, novi algoritam za upravljanje redovima i dr.) vrši se dopunom izvornog C++ koda, a zatim kompilacijom i linkovanjem sa postojećim bibliotekama. OTcl moduli za konfigurisanje mreže omogućavaju efikasno uspostavljanje relacija između kreiranih mrežnih objekata. Sprega OTcl i C++ objekata ostvaruje se pomoću OTcl interfejsa koji za svaki C++ objekat kreira analogni OTcl objekat i uspostavlja potrebnu kontrolu.

Implementacija u okruženje realne mreže dostupna je u ograničenom obliku, kroz interfejs koji se naziva „emulator” (NSE), a raspoloživ je za Unix platforme. Za potrebe emulacije na raspolaganju je ekstenzija za raspoređivanje događaja u realnom vremenu. Emulator se može programirati kao generator i odredište saobraćaja, kada funkcioniše u jednom od dva režima: 1) transparentnom, u kome nema interakcije sa konkretnim transportnim protokolom, već su raspoložive opcije emulacije događaja na nivou IP paketa i 2) protokolskom, kada se emulira TCP transporni protokol. NSE se intenzivno unapređuje poslednjih godina, prvenstveno kroz javno dostupne eksperimentalne platforme sa Web korisničkim interfejsima, kao što je EMULAB [16].

Simulator je spregnut sa alatom za animaciju - **NAM** (*Network Animator* [15]), koji omogućava vizuelno praćenje procesa simulacije - tokova saobraćaja, stanja linkova, stanja mrežnih čvorova, stanja redova i dr. Grafički interfejs omogućava prikaz definisane topologije mreže u izabranom obliku koji je pogodan za vizuelno praćenje simulacije, kao i pridruživanje različitih boja tokovima ili klasama saobraćaja. Preko korisničkog interfejsa koji je sličan *CD player*-u moguće je pokrenuti, ubrzati, usporiti i zaustaviti simulaciju ili je pozicionirati na željeno mesto na vremenskoj osi. Takođe je implementirana funkcija filtriranja - moguće je posmatrati određeni tip paketa, mrežni čvor, tok saobraćaja ili tip saobraćaja. Funkcija monitorisanja omogućava kontinuirani nadzor vrednosti specificiranih promenljivih. NAM je koristan alat za početnu proveru ispravnosti scenarija simulacije programiranog OTcl skriptom: da li topologija mreže odgovara zamišljenoj, kako se usmeravaju tokovi saobraćaja, da li su korektno definisani odgovarajući događaji u vremenu i dr.

Analiza rezultata simulacije obavlja se na osnovu *trace* fajla koji generiše simulator. U *trace* fajl se upisuje unapred definisani podskup ili celokupan

⁴⁾ Dualnost programskih jezika je princip koji koriste i drugi simulatori, a potiče od potrebe da se poveća efikasnost procesa simulacije. U simulatoru NS2 se programiranje scenarija simulacije obavlja pomoću OTcl, koji je jednostavan za razumevanje, učenje i primenu. Efikasna obrada generisanih događaja omogućena je zahvaljujući C++ jezgu simulatora.

skup događaja (generisanje paketa, pridruživanje redu, prosleđivanje, odbacivanje paketa i dr.) sortiran po diskretnom vremenu simulacije. Generisanje odgovarajućih grafičkih prikaza na bazi *trace* fajla može se obavljati pomoću nekoliko slobodno dostupnih alata opšte namene, među kojima su poznati **Xgraph** (raspoloživ za Unix platforme) i **Gnuplot** (raspoloživ za Unix i Windows platforme).

Trace Graph [17] je novi alat, raspoloživ za Linux i Windows platforme, specifično razvijen za obradu i analizu NS2 *trace* fajlova. Meni sa informacijama o mreži omogućava prikaz i memorisanje informacija o simulaciji, posmatranom čvoru, kašnjenju između krajnjih tačaka (u jednom smeru i ukupno), kašnjenju između dva specificirana mrežna čvora, broju tranzitnih čvorova, vremenu obrade paketa u čvoru i dr. Dvodimenzionalni grafički prikaz rezultata obuhvata skup raznovrsnih funkcija: propusna moć u funkciji kašnjenja, džitera ili vremena obrade paketa, džiter u funkciji vremena generisanja, prosleđivanja, prijema ili odbacivanja paketa, razne kumulativne funkcije raspodele, histogrami i dr. Trodimenzionalni grafički prikaz rezultata obuhvata funkcije broja generisanih, primljenih prosleđenih ili odbačenih paketa (bajtova) u funkciji kombinacija izvornih, odredišnih i tranzitnih čvorova. Trace Graph koristi biblioteke programskog paketa MATLAB. NS2 *trace* fajl se može memorisati u formi „mat” (MATLAB) fajla radi efikasnije ponovne obrade i analize rezultata.

5. PRIMER SIMULACIJE POMOĆU NS2 - RUTIRANJE SAOBRAĆAJA U TELEINFORMACIONOJ MREŽI SECI ZEMALJA

5.1. Teleinformaciona mreža SECI zemalja

Projektovanje i izgradnja Teleinformacione mreže SECI (*Southeast European Cooperation Initiative*) zemalja [18] inicirani su predlogom i projektnim zadatkom Elektroenergetskog Koordinacionog Centra (Beograd) i, nakon proširenja obuhvatom izgradnje infrastrukturne telekomunikacione mreže, prihvaćeni su od strane SECI članica kao prioritetni projekat. Mreža je projektovana za povezivanje nacionalnih dispečerskih centara (NDC) sledećih elektroprivrednih organizacija: EPS (Srbija), EPCG (Crna Gora), MVM (Mađarska), NEK (Bugarska), ZEK (Bosna i Hercegovina), HEP (Hrvatska), Transelectrica (Rumunija), PPC (Grčka), TEAS (Turska), KESH (Albanija), ESM (Makedonija), kao i ELES (Slovenija) u svojstvu posmatrača, i treba da omogući razmene *real-time* (SCADA), dispečerskih i pogonskih podataka i govora između navedenih NDC. Ove razmene poda-

taka neophodne su za nadzor i obezbeđenje sigurnosti rada interkonektovanih elektroenergetskih sistema (EES), realizaciju energetske transakcije i rad buduće regionalne berze električne energije. Kritični zahtevi za rad ove mreže su zahtevane performanse razmene (vremenska kašnjenja, integritet i raspoloživost) SCADA podataka: telemerenja aktivne i reaktivne snage interkonektivnih i internih vodova, snaga generatora, napona sabirnica, frekvence, statusa prekidača i rastavljača, regulacione greške sistema i dr. Uz ove podatke obuhvaćene su i periodične časovne poruke sa proračunima stanja EES, programima proizvodnje i razmene energije i sl.

Na osnovu procene obima podataka koje će svaki NDC razmenjivati sa svim ostalim partnerima u interkonekciji SECI zemalja, uz zahtevane performanse neophodno je obezbediti protoke od 128 kb/s. Za postizanje ukupnog protoka SCADA podataka i periodičnih poruka projektovani su kanali od 2 Mb/s (E1). Za dodatni saobraćaj (transakcije, *file transfer*, govor i dr.) koji se nije mogao preciznije specificirati i kvantifikovati planirana su još tri E1 kanala.

Za razmenu SCADA podataka i kraćih periodičnih poruka biće korišćen aplikacioni profil sa IEC TASE.2 (ICCP) *messaging* protokolom preko TCP/IP transportnog profila.

Postepena izgradnja Teleinformacione SECI mreže praktično je započeta i ostvaruje se kroz izgradnju telekomunikacione infrastrukture i tačkatačka ICCP (ICCP- *Inter-Control Center Communication Protocol*) linkova.

Heterogena priroda informacija kao i različiti zahtevi za QoS ukazuju na neophodnost projektovanja multiservisne IP mreže, koja će podržavati različite nivoe kvaliteta servisa. U tom smislu, simulacije se mogu primeniti za dizajn rešenja za QoS, u evaluaciji projekta mreže kao i u okviru pilot-projekata u početnim fazama rada mreže. U nastavku je prikazan primer dizajna dinamičkog rutiranja agregatnog IP saobraćaja u mreži SECI i verifikacija rešenja simulacijom i analizom dobijenih rezultata pomoću simulatora NS2 i pridruženih alata.

Napominjemo da primer koji sledi predstavlja samo ilustraciju jednog od niza mogućih simulacionih eksperimenata pomoću NS2, na primeru realne topologije mreže. Verifikacija kompletnog projekta SECI metodom simulacije znatno prevazilazi okvire ovog rada, a potencijalno predstavlja predmet sveobuhvatnog studijskog istraživanja.

5.2. Algoritam dinamičkog rutiranja i saobraćajni inženjering

Pretpostavljeno je da se u mreži primenjuje decentralizovano rutiranje saobraćaja, zasnovano na

izračunavanju vektora rastojanja čvora ka svimredištima - *Distance Vector* (DV), pomoću Bellman-Ford-ovog algoritma. Ovaj algoritam rutiranja je primenjen u nekoliko mrežnih protokola, među kojima je najpoznatiji BGP (*Border Gateway Protocol*), koji se koristi za rutiranje saobraćaja između nezavisnih domena u globalnom Internetu.

Bazični algoritam izračunavanja DV je sledeći: minimalno rastojanje od posmatranog čvora do odredišta predstavlja putanju sa najmanjim zbirom cena linkova, a proračun se vrši pomoću vektora rastojanja koje susedni čvorovi razmenjuju periodično. Ako posmatrani čvor obeležimo sa 1, a odredišni čvor sa N , tada se minimalno rastojanje $D(N, 1)$ određuje iz izraza:

$$D(N, 1) = \min_i D^1(N, i), \quad (1)$$

gde i označava svaki čvor susedan čvoru 1, $D^1(N, i)$ je vektor rastojanja od 1 do N , preko čvora i .

$D^1(N, i)$ se izračunava iz izraza:

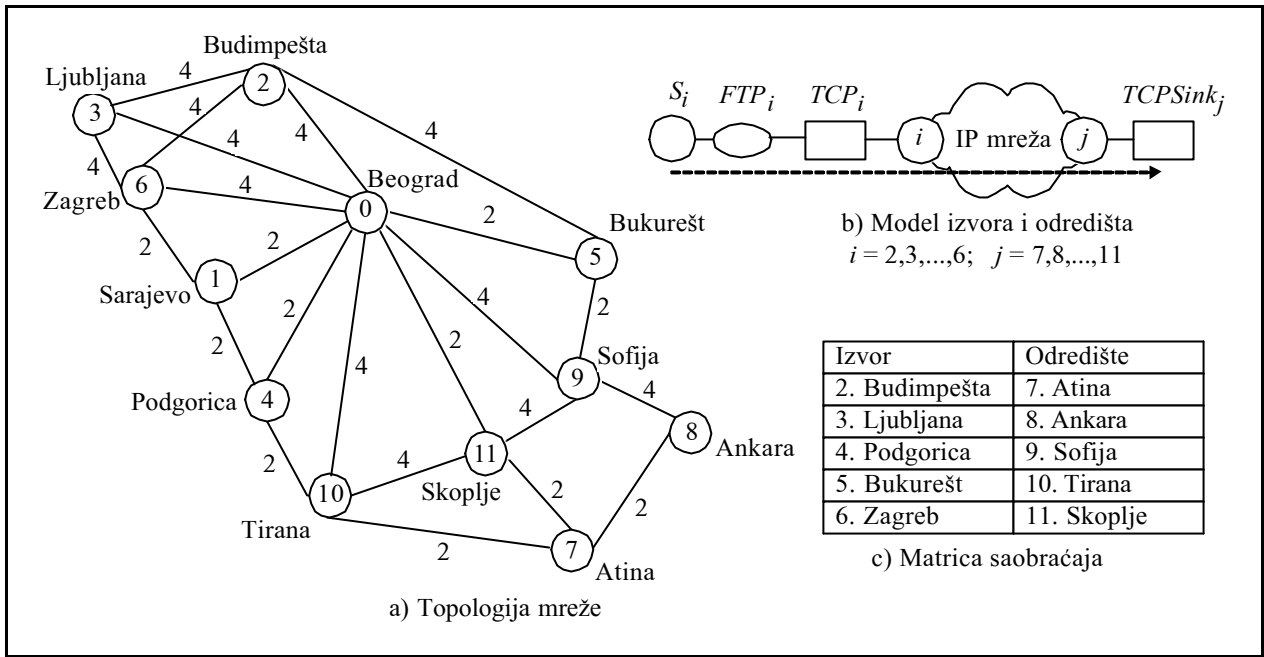
$$D^1(N, i) = c_{1i} + \min_j D^1(N, j), \quad j \neq 1 \quad (2)$$

gde j označava svaki čvor susedan čvoru i (izuzimajući čvor 1 da bi se izbegle beskonačne petlje), c_{1i} je cena linka $1-i$, a $D^1(N, j)$ rastojanje od čvora i do čvora N , preko susednog čvora j . Postupak se iterativno ponavlja dok se ne dođe do čvorova susednih čvoru N .

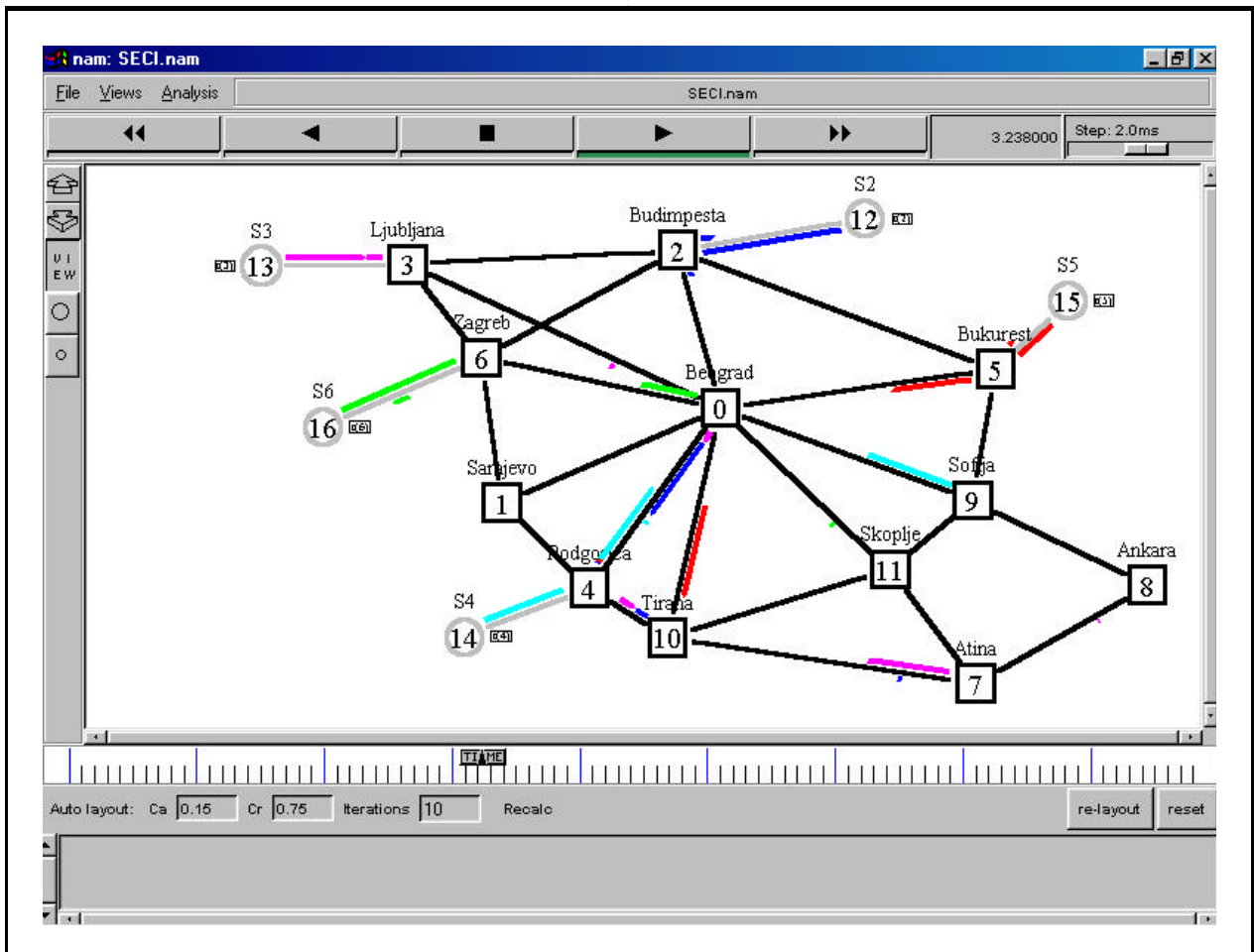
DV protokol ima mogućnost dinamičkog preusmeravanja saobraćaja u slučaju ispada nekog linka, kao i usled promene cene. Ako cena linka reflektuje jednu ili više relevantnih mera performansi, u procesu saobraćajnog inženjeringa moguće je dinamički prilagođavati rutiranje saobraćaja uslovima u mreži.

Predloženi algoritam za definisanje inženjeringa za IP saobraćaj je sledeći:

- Cena svakog linka je određena raspoloživom marginom propusnog opsega, a najniža cena je 1;
- Početne cene linkova dodeljuju se prema prognozi saobraćajnog opterećenja;
- Linkovi su dimenzionisani tako da njihovo prosečno saobraćajno opterećenje ne prelazi 50 % od maksimalnog rezervisanog kapaciteta;
- Saobraćajni inženjering funkcioniše na sledeći način:
 - a) ako se margina raspoloživog propusnog opsega smanji ispod 50 %, cena linka se udvostručava;
 - b) ako se margina raspoloživog propusnog opsega poveća iznad 80 %, cena linka se dvostruko umanjuje, uz uslov da je minimalna cena 1.



Slika 2. Simulacioni model



Slika 3. Vizuelizacija simulacije (NAM)

5.3. Simulacija i rezultati

Simulirana mreža se sastoji od 12 čvorova, povezanih kao na slici 2-a), dupleksnim linkovima sa rezervisanim kapacitetima 8 Mb/s za prenos IP saobraćaja i sa kašnjenjem usled propagacije 2 ms. Početne cene linkova su prikazane na slici 2-a) i pretpostavljeno je da su iste za oba smera komunikacije.

Agregatni IP saobraćaj (slika 2-b) simuliran je FTP izvorima, koji emituju saobraćaj brzinom 2 Mb/s. FTP izvorima su pridruženi agenti transportnog protokola TCP (verzija protokola je Tahoe), povezani na odgovarajuće čvorove u skladu sa zadatom matricom saobraćaja (slika 2-c). Odredišta saobraćaja (TCPSink) povezuju se na čvorove mreže definisane matricom saobraćaja. Veličina TCP paketa je 1 000 By, a prozor prijemnika je podešen na 20 paketa. Svi čvorovi koriste algoritam *DropTail*⁵⁾ za upravljanje izlaznim redovima, koji podrazumeva odbacivanje paketa kada se napuni fizički red.

Pretpostavljena je *default* veličina reda od 50 paketa. U svim čvorovima mreže primenjuje se DV rutiranje.

Trajanje simulacije je 9 sekundi. Izvori saobraćaja S_2, S_3, \dots, S_6 uključuju se sukcesivno u trenucima 0,5, 0,7, ... 1,3. Izvor S_6 prestaje emitovanje saobraćaja u trenutku $t = 4,0$ s. Ostali izvori emituju saobraćaj do trenutka $t = 8,0$ s.

Struktura i glavni delovi OTcl skripta za opisani scenario prikazani su u prilogu. Na slici 3 je prikazan izgled NAM ekrana u trenutku $t=3,2$ s.

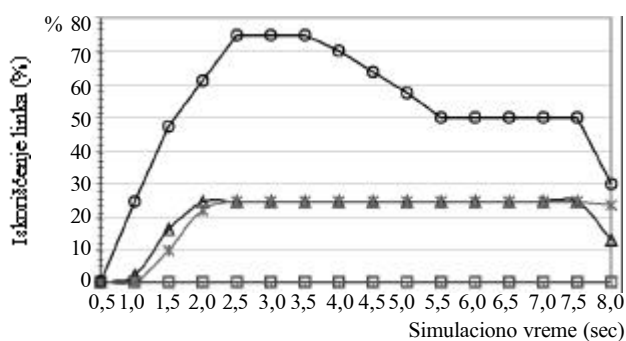
U skladu sa početnim cenama linkova i algoritmom opisanim u poglavlju 5.2, DV proračunava sledeće optimalne putanje: 2-0-11-7 za tok saobraćaja Budimpešta - Atina, 3-0-11-7-8 za tok saobraćaja Ljubljana - Ankara, 4-0-9 za tok saobraćaja Podgorica - Sofija, 5-0-10 za tok saobraćaja Bukurešt - Tirana i 6-0-11 za tok saobraćaja Zagreb - Skoplje. Zajednički tranzitni čvor za sve tokove je čvor 0 (Beograd). Ako se ne primenjuje saobraćajni inženjering, saobraćaj se usmerava na opisani način tokom čitavog trajanja simulacije.

Ako se primeni saobraćajni inženjering, kada opterećenje linka 0-11 pređe 50 %, cena se udvostručava. Istovremeno se dvostruko umanjuje cena linkova koji su opterećeni manje od 20 % (0-1, 0-2, 0-3, 0-4, 0-5 i 0-6), što prouzrokuje dinamičko preusmeravanje saobraćaja Budimpešta - Atina na pu-

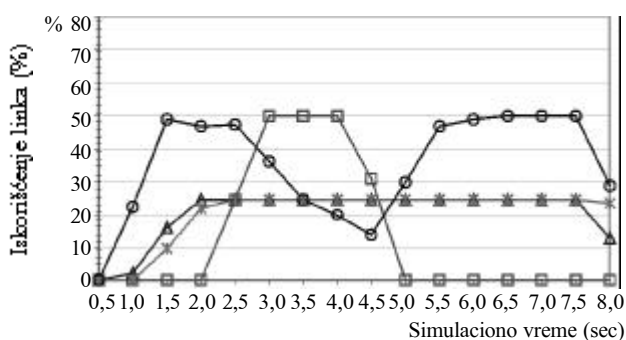
⁵⁾ U realnoj mreži bi trebalo primeniti WRED (*Weighted Random Early Detect*) sa odgovarajuće podešenim težinskim faktorima i parametrima za svaku klasu saobraćaja. Ova aproksimacija ne utiče na prikazani simulacioni eksperiment, jer se ne ispituju uslovi zagušenja u mreži. Simulaciona studija o načinu podešavanja WRED parametara za razne klase saobraćaja je data u [8].

tanju 2-0-4-10-7 i saobraćaja Ljubljana - Ankara na putanju 3-0-4-10-7-8. Kada izvor S_6 prekine emitovanje saobraćaja, link 0-11 ostaje neiskorišćen, njegova cena se dvostruko smanjuje, usled čega se tokovi saobraćaja Budimpešta - Atina i Ljubljana - Ankara ponovo preusmeravaju preko ovog linka.

Pomoću programa Trace Graph dobijene su vrednosti iskorišćenog propusnog opsega za odlazne linkove čvora 0, na osnovu čega je izračunato iskorišćenje svakog linka. Dijagrami na slici 4 prikazuju efekat optimizacije iskorišćenja linkova usled primene saobraćajnog inženjeringa.



a) bez saobraćajnog inženjeringa

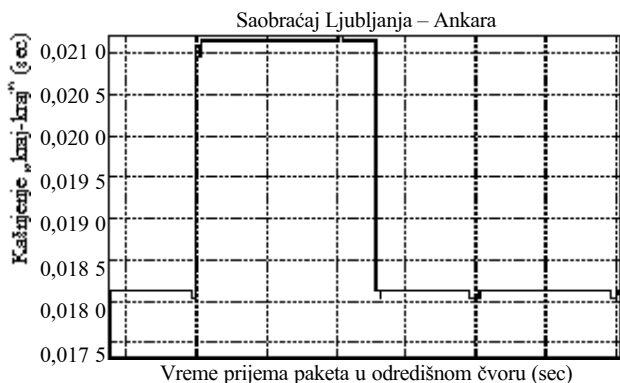


b) sa saobraćajnim inženjeringom

Slika 4. Efekat saobraćajnog inženjeringa na optimizaciju korišćenja odlaznih linkova

Usled dinamičkog preusmeravanja saobraćaja povećava se broj *hop*-ova, za pojedine tokove saobraćaja, što prouzrokuje povećanje kašnjenja „kraj-kraj”. Ovaj efekat je prikazan na slici 5, za tok saobraćaja Ljubljana - Ankara (dijagram je direktno generisan iz programa Trace Graph). Pri tome se zaključuje da je uvećanje kašnjenja za 3 ms prihvatljivo za sve tipove saobraćaja u agregatu. Dalje poboljšanje algoritma rutiranja i saobraćajnog inženjeringa može se realizovati uzimanjem u obzir ograničenja za kašnjenje za pojedine klase saobraćaja, pri

izboru alternativnih putanja u skladu sa razmatranjima iz poglavlja 3.5.



Slika 5. Efekat dinamičkog usmeravanja toka saobraćaja na kašnjenje „kraj-kraj“

6. ZAKLJUČAK

U razvoju elektroprivrednih multiservisnih IP mreža simulacija se primenjuje za određivanje načina integracije servisa, dizajn rešenja za QoS, kao i za potrebe verifikacije projekta konkretne mreže. Poželjna je kombinacija simulacije sa drugim metodima - analitičkim, eksperimentalnim i mernim. S obzirom na skalabilnost, heterogenost i dinamiku potrebno je koristiti proverene alate, definisati razne modele i scenarije simulacije i pažljivo interpretirati rezultate. Drugo pravilo je da pokušamo da usmerimo simulacije ka suštinskom razumevanju dinamičkog ponašanja mreže u QoS okruženju, što daje vrednije i relevantnije zaključke od čisto numeričkih rezultata.

Multiprotokolski simulator NS2 sa pridruženim alatima pruža veliki skup mogućnosti za definisanje različitih scenarija simulacije IP mreža u elektroprivredi. Slobodna distribucija i dostupnost izvornog koda omogućavaju kontinuiranu nadgradnju simulatora, a istraživačima pružaju mogućnost dodavanja i verifikacije sopstvenih rešenja.

7. LITERATURA

- [1] Radni materijali CIGRÉ WG D2.07, 2003 i 2004.
- [2] M.Stojanović, J.Gajica, MULTISERVISNE IP MREŽE: PRISTUP REALIZACIJI NOVE GENERACIJE ELEKTROPRIVREDNIH TELEKOMUNIKACIONIH MREŽA, Zbornik radova 12. Simpozijuma JUKO CIGRÉ, V.1, str. 3-12, Bečići, maj 2004, (rad po pozivu).
- [3] M.Stojanović, NOVI PRISTUP PROJEKTOVANJU ELEKTROPRIVREDNIH TELEKOMUNIKACIONIH MREŽA, Elektroprivreda, broj 3, 2003, str. 74-86.
- [4] G. Fahlén, C. Samitier, TELECONTROL NETWORK DESIGN ISSUES USING IP TECHNOLOGY, CIGRÉ Colloquium, October 1999, Krakow, Poland.
- [5] S. Floyd, V. Paxson: DIFFICULTIES IN SIMULATING THE INTERNET, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 9, no. 4, August 2001, pp. 392-403.
- [6] A. Adas, TRAFFIC MODELS IN BROADBAND NETWORKS, IEEE Communications Magazine, vol.35, no.7, July 1997, pp 82-89.
- [7] M. E. Crovella, A. Bestavros, EXPLAINING WORLD WIDE WEB TRAFFIC SELF SIMILARITY, Boston University, Technical Report TR-95-015, October 1995.
- [8] M. Stojanović, V. Aćimović-Raspopović, A NOVEL APPROACH FOR PROVIDING QUALITY OF SERVICE IN MULTISERVICE IP NETWORKS, FACTA UNIVERSITATIS: Series Electronics and Energetics, vol. 17, no. 2, August 2004, pp. 261-274.
- [9] A. Alkahtani, M. Woodward, K. Al-Begain, AN OVERVIEW OF QUALITY OF SERVICE (QOS) AND QOS ROUTING IN COMMUNICATION NETWORKS, PGNet Networking Conference, Liverpool, 2003.
- [10] D. M. Nicol, COMPARISON OF NETWORK SIMULATORS, research results on simulation performance analysis. [Online]. Available: <http://www.ssfnet.org/Exchange/gallery/dumbbell>
- [11] G. F. Lucio, M. Paredes-Farrera, E. Jammeh, M. Fleury, M. J. Reed, OPNET MODELER AND NS-2: COMPARING THE ACCURACY OF NETWORK SIMULATORS FOR PACKET-LEVEL ANALYSIS USING A NETWORK TESTBED, International Conference WSEAS 2003, Greece, October 2003.
- [12] INTRODUCTION TO USING OPNET MODELER, OPNETWORK 2002, Simulation and Modeling, SYSC 4005/5001.
- [13] Scalable Simulation Framework and SSFNet. [Online]. Available: <http://www.ssfnet.org>
- [14] DRCL J-Sim. [Online]. Available: <http://www.j-sim.org>
- [15] Network Simulator NS2 and Network Animator NAM. [Online]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam>
- [16] EMULAB - Network Emulation Testbed. [Online]. Available: <http://www.emulab.net>
- [17] J. Malek, Trace Graph - Network Simulator NS Trace Files Analyzer, 2003. [Online]. Available: <http://www.geocities.com/tracegraph>
- [18] Teleinformation System Among National Dispatch Centers of SECI Countries - FINAL REPORT; Elektrotek Concepts, Inc. , January 2002.

8. Prilog: STRUKTURA OTCL SKRIPTA ZA OPISANI SCENARIO SIMULACIJE

```
# Kreiranje objekta simulatora
set ns [new Simulator]
# Otvaranje ns i NAM trace fajlova
set f [open SECI.tr w]
$ns trace-all $f
set nf [open SECI.nam w]
$ns namtrace-all $nf
# Trajanje simulacije
set testTime 8
# Kreiranje cvorova mreze i oblika za NAM
for {set i 0} {$i < 12} {incr i} {
    set n($i) [$ns node]
    $n($i) shape "square"
}
# Nazivi cvorova (NAM)
$n(0) label Beograd
...
$n(11) label Skoplje

# Indeks boja za NAM
$ns color 1 Black
$ns color 2 Blue
...
$ns color 6 Green
# Povezivanje cvorova
$ns duplex-link $n(0) $n(1) 8Mb 2ms
    DropTail
...
$ns duplex-link $n(10) $n(11) 8Mb 2ms
    DropTail
# Rutiranje - Distance Vector
$ns rtproto DV
# Cost funkcije
$ns cost $n(0) $n(1) 2
$ns cost $n(1) $n(0) 2
...
$ns cost $n(0) $n(11) 2
$ns cost $n(11) $n(0) 2
...
$ns cost $n(10) $n(11) 4
$ns cost $n(11) $n(10) 4

# FTP/TCP izvori i odredista saobracaja
for {set i 2} {$i < 7} {incr i} {
    set s($i) [$ns node]
    $ns duplex-link $s($i) $n($i) 2Mb 1ms
    DropTail
    set t($i) [new Agent/TCP]
    $t($i) set packetSize_ 1000
    $t($i) set window_ 20
    $ns attach-agent $s($i) $t($i)
    set ftp($i) [new Application/FTP]
    $ftp($i) attach-agent $t($i)
    $ftp($i) set type_ FTP
    set sink($i) [new Agent/TCPSink]
    $ns attach-agent $n([expr 5+$i])$sink($i)
    $ns connect $t($i) $sink($i)
    $t($i) set fid_ $i
}
# Generisanje saobracaja
$ns at 0.5 "$ftp(2) start"
$ns at 0.7 "$ftp(3) start"
...
$ns at $testTime "$ftp(5) stop"
$ns at 4.0 "$ftp(6) stop"
# Saobracajni inzenjering
$ns at 1.5 "$ns cost $n(0) $n(11) 4"
...
$ns at 1.5 "$ns cost $n(0) $n(4) 1"
...
$ns at 4.1 "$ns cost $n(0) $n(11) 2"
# Procedura zavrsetka simulacije
proc finish {} {
    global ns f nf
    $ns flush-trace
    close $f
    close $nf
    exec nam -f dynamic-nam.conf SECI.nam &
    exit 0
}
$ns at [expr $testTime + 1.0] "finish"
# Pokretanje simulacije
$ns run
```

Rad je primljen u uredništvo 06. 07. 2004. godine



Mirjana Stojanović je diplomirala je 1985, a magistrirala 1993. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Telekomunikacije. Zaposlena je u Institutu Mihajlo Pupin od 1985. godine, na poslovima razvoja i projektovanja u oblasti telekomunikacionih mreža. Učestvovala je ili rukovodila razvojem više tehničkih rešenja uređaja za prenos podataka i govora, sistema za nadzor i upravljanje telekomunikacionom opremom, kao i projektovanjem javnih i funkcionalnih telekomunikacionih mreža. Autor je ili koautor više od 45 naučnih i stručnih radova iz oblasti telekomunikacionih mreža. Od profesionalnih zaduženja član je Inženjerske komore Srbije, član međunarodne organizacije IEEE, član međunarodne radne grupe CIGRE D2-17 i član upravnog odbora evropske COST akcije 279, koja se bavi analizom i projektovanjem multi-servisnih telekomunikacionih mreža.



Dragoljub Popović rođen je u Novom Pazaru 1941. godine. Gimnaziju završio u Kraljevu, a diplomirao 1964. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Elektronika i telekomunikacije. Na istom fakultetu završio je i dvogodišnju specijalizaciju za upravljanje elektroenergetskim sistemima. Po diplomiranju radio je 1964-1970. godine u institutima „M. Pupin” i IRITEL na razvoju elektronske telefonije, digitalnih (PCM) prenosnih sistema, 1970-1971. godine kod UNIVAC-a na izgradnji računarskih komunikacionih mreža, od 1971-1993. godine u JUGEL-u na razvoju i izgradnji teleinformativnih, SCADA i EMS sistema i na automatizaciji HE, 1993-2002. godine u EPS-u, gde je vodio razvoj i izgradnju SCADA/EMS sistema i računarskih komunikacionih mreža, a sada radi kao nezavisan konsultant. Kao vodeći inženjer, rukovodilac projekata i ekspert inicirao je i učestvovao u projektovanju i izgradnji svih značajnijih sistema za dispečersko i daljinsko upravljanje u elektroprivredama bivše Jugoslavije i u JUGEL-u u periodu 1971-2002. godine. Kao autor ili koautor objavio je preko 40 stručnih radova i izradio veći broj elektroprivrednih gran- skih i JUS standarda. Bio je dugogodišnji stručni izvestilac i predsednik STK 35 – Telekomunikacije i daljinsko upravljanje JUKO CIGRÉ, predsednik jugoslovenske Komisije za standarde 57/Nacionalnog IEC TO 57 – Upravljanje i komunikacije u elektroenergetskom sistemu i član je IEC TC 57/WG 07 – Komuni- kacioni protokoli kompatibilni sa ITU standardima.



Vladanka Aćimović-Raspovović je vanredni profesor Saobraćajnog fakulteta u Beogra- du na Katedri za telekomunikacioni saobraćaj i mreže. Diplomirala je 1976. godine, a magi- strirala 1984. godine, na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Telekomunikacije. Doktorirala je 1995. godine na Saobraćajnom fakultetu u Beogradu, u oblasti optičkih tele- komunikacionih mreža. Njen naučno istraživački i stručni rad pripada široj oblasti radio i optičkih sistema prenosa, a posebno telekomunikacionog saobraćaja i mreža. Samostalno, ili sa koautorima objavila je oko 90 naučnih i stručnih radova. Autor je ili koautor 26 studija i projekata i dva univerzitetska udžbenika. Od profesionalnih zaduženja, član je međunarodne organizacije IEEE, stalni član užeg tima međunarodne ekspertske grupe koja se bavi primenom ICT tehnologija u rečnom saobraćaju i transportu i član Inženjerske komore Srbije.



Jovanka Gajica je diplomirala na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu, smer Radioko- munikacije 1976. godine. Od 1977. godine je zaposlena u Institutu „Mihajlo Pupin”, na po- slovima razvoja i projektovanja telekomunikacionih sistema. Učestvovala je razvoju više ra- zličitih tipova telekomunikacionih uređaja, kao i u izradi više projekata, studija, tehničkih re- šenja za potrebe elektroprivrednih telekomunikacionih sistema. Autor je ili koautor više od 40 stručnih radova. Od profesionalnih zaduženja član je JUKO CIGRÉ od 1983, sekretar STK 35 (Telekomunikacije i daljinsko upravljanje) od 1993. godine i član Inženjerske komore Sr- bije. Od 1998. godine je član posmatrač Međunarodne organizacije CIGRÉ, (STK 35, odnosno Studijski komitet D2 od 2002. godine). Član je SCTF35.08. CIGRÉ „Field experiences and measurement methods for Digital Power Line Carrier Systems” od 2002. godine.

Modeli ulaska elektroprivrednih kompanija na telekomunikaciono tržište

Stručni rad
UDK: 621.39; 621.315

Rezime:

U radu su izloženi modeli za ulazak elektroprivrednih kompanija na telekomunikaciono tržište koji su definisani na osnovu istraživanja načina na koji su postojeći alternativni telekom operatori, u Evropi i nekim drugim svetskim regionima, ušli na tržište telekomunikacija. Predstavljene su opcije, koje su u stvari vrste usluga koje elektroprivredne kompanije mogu pružati na telekomunikacionom tržištu. Takođe su predstavljene i mogućnosti različitih segmenata elektroprivrednog sistema za primenu identifikovanih modela i njihovih opcija.

Ključne reči: elektroprivredne kompanije, modeli, telekomunikaciono tržište

Abstract:

ELECTRICITY COMPANY MODELS FOR ENTERING TELECOMMUNICATIONS MARKET

This paper deals with electricity company models for entering telecommunications market, which are defined as a result of researching European and some other telecommunication markets, and ways used by existing alternative telecom operators for entering their national telecom markets. Telecom services are presented as model options for entering telecom market. Also, telecom opportunities for each segment of electricity sector are presented.

Key words: electricity companies, models, telecommunications market

1. UVOD

Sektori prenosa, distribucije i isporuke električne energije u Evropi, su suočeni sa tekućim periodom radikalnih promena. Rastući trendovi privatizacije, liberalizacije i konkurencije iziskivale su fundamentalne promene u strukturi i poslovnim ciljevima kompanija iz ovih sektora, njihovoj organizacionoj kulturi, kadrovima, i tržišnoj i potrošačkoj orijentaciji. Ovaj period promena je, takođe nastupio u vreme kada se većina navedenih kompanija suočila

sa povećanim ekonomskim pritiscima, upravo od strane vlastitih organizacionih elemenata. Godišnji rast u isporuci električne energije, u poslednjih nekoliko godina, procenjen je na 1 % do 2 %, u većini zemalja Zapadne Evrope. S druge strane, granične vrednosti u isporuci električne energije su iznosile od 2 % do 3 % [1].

Ipak, u obliku regionalnih ili nacionalnih monopola, ove poslovne aktivnosti opstaju kao stabilne, niskog rizika, i visokih stopa prihoda. Nastojanja ili potrebe za inovacijom, bilo u tehnologiji ili razvoju

novih servisa, su stoga tradicionalno ograničene. Nastupajući rast konkurencije na tržištu isporuke električne energije, potiče sve veći broj kompanija da istraže i razviju strategije za diverzifikaciju servisa, što bi im donelo konkurentsku prednost na tržištu.

Paralelno sa navedenim periodom radikalnih promena u okviru sektora isporuke električne energije, telekomunikaciona industrija prolazi kroz još brži proces liberalizacije, i dostiže mnogo više nivo konkurencije u odnosu na navedene monopoliste iz elektroenergetskog (EE) sektora.

Opšta pojava širom Evrope i razvijenog sveta je učešće elektroprivrednih kompanija (EP), kao alternativnih telekomunikacionih operatora, na liberalizovanim telekomunikacionim (TK) tržištima. Skoro svi drugi nacionalni TK operatori u Evropi, podrazumevaju učešće odgovarajućih EP kompanija (obično iz sektora distribucije, odnosno isporuke električne energije).

U nastavku rada će se predstaviti opšti modeli koji su na raspolaganju elektroprivredama ukoliko se odluče za ulazak na tržište telekomunikacija, a koji su rezultat obimnog istraživanja evropskog TK tržišta i tržišta električne energije i respektivnih tržišta u drugim svetskim regionima. Istraživanjem je obuhvaćeno blizu 30 nacionalnih tržišta telekomunikacija i električne energije.

2. MODELI ULASKA ELEKTROPRIVREDNIH KOMPANIJA NA TELEKOMUNIKACIONO TRŽIŠTE

U zavisnosti od organizacionog oblika i strukture elektroprivrede, postoje različiti putevi za njen ulazak na telekomunikaciono tržište. Ovi putevi pokrivaju širok opseg TK usluga, protežući se od jednostavnog iznajmljivanja osnovnih sredstava, kao što je iznajmljivanje ili ustupanje zemljišta za izgradnju TK mreža, pa do kompleksnih *managed* usluga, kao što su pružanje usluga prenosa podataka koristeći IP VPN. Veoma je bitno imati generalnu predstavu o skali (value chain) telekomunikacionih usluga u okviru tržišta, što pomaže u uočavanju prednosti i ograničenja u odnosu na potencijalno pozicioniranje elektroprivrede na TK tržištu, kao i poznavanje potrebnog nivoa tehnološke i tržišne stručnosti za pružanje određene vrste usluga. Kako raste kompleksnost TK usluga, rastu i poslovni rizici pružanja tih usluga, ali i potencijalni prihodi koji se mogu ostvariti njihovim pružanjem.

Kao rezultat istraživanja načina učešća inostranih EP kompanija kao alternativnih operatora na TK tržištima svojih zemalja, definisana su tri modela za ulazak na tržište telekomunikacija:

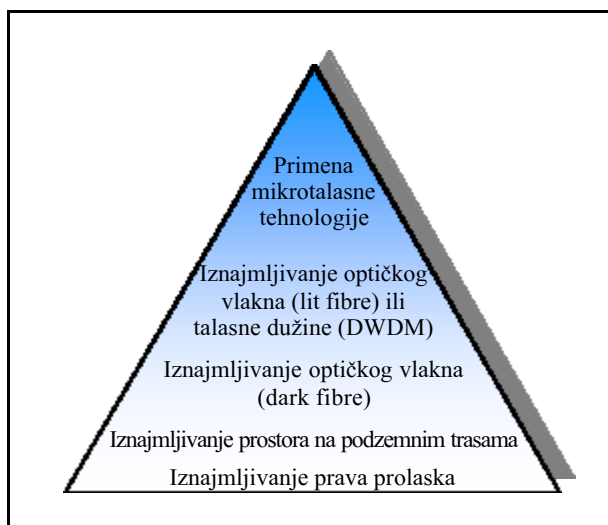
- Model 1: Fiksne mreže bez upravljanja servisima;
- Model 2: Fiksne mreže sa upravljanjem servisima;
- Model 3: Učešće u pružanju usluga mobilnih komunikacija.

U nastavku rada će se predstaviti navedeni modeli, sa svojim opcijama učešća na TK tržištu.

2.1. Model 1

– Fiksne mreže bez upravljanja servisima

Ovaj model se odnosi na usluge fiksnih mreža bez upravljanja servisima, i sadrži pet opcija, koje su predstavljene skalom TK usluga na slici 1.



Slika 1. Skala TK usluga
– fiksne mreže bez upravljanja servisima

2.1.1. Opcija 1: Ustupanje ili iznajmljivanje prava prolaska

Pravo prolaza (*engleski Right-of-way*) je uobičajeno pravo „starih” elektroprivreda da svojom infrastrukturom (npr. dalekovodima) prođu preko terena u privatnom ili javnom vlasništvu bez ikakve rente, odnosno uz jednokratno obeštećenje vlasniku zbog smanjenja funkcionalnosti terena ili poseda u širem smislu.

Sposobnost EP kompanije da direktno ostvari prihode od ustupanja prava prolaska zavisi od zemljišnog fonda koji ima na raspolaganju, prava pristupa, i od prirode sporazuma, odnosno ugovora, koje ima sa vlasnicima zemljišta. Kompanija može biti u poziciji da prenese dozvole prava prolaska na bilo koju TK kompaniju koja je zainteresovana, bilo za korišćenje zemljišta, ili za prava prolaska preko tih zemljišta. Međutim, elektroprivrede često nisu jedini ili većinski vlasnici zemljišta i, u većini slučajeva su u procesu deregulacije i privatizacije, prodale

svoje zemljišne posede, smatrajući da nisu neophodni za osnovnu delatnost preduzeća.

Problemi koji se mogu javiti kod primene ove opcije su da se ugovori za prava prolaska mogu odnositi na prava prolaska u svrhu elektrifikacije, te stoga ne važe za telekomunikacione svrhe, bar ne za komercijalne telekomunikacije.

Primena ove opcije je najniži nivo ulaska elektroprivrede na TK tržište, te stoga i ostvarenje najnižih prihoda. Ipak, elektroprivrede su u veoma jakoj poziciji da, koristeći svoja prava prolaska, odnose i iskustva sa vlasnicima zemljišta, ostvare konkurentsku prednost za pružanje usluga višeg nivoa sa skale TK usluga.

Jedan od novijih primera gde je kompanija javnog servisa iskoristila svoja prava prolaska, ostvarujući konkurentsku prednost u građenju TK optičke mreže, je *Transco*, britanska kompanija za prenos i distribuciju gasa, koja je prenela svoja prava prolaska TK operatoru *186k*; i *Transco* i *186k* su u sastavu kompanije *Lattice*, koja je vlasnik infrastrukture.

Takođe, *Helsinki Energia*, regionalna kompanija za distribuciju električne energije, ustupa prava prolaska i svoju EE infrastrukturu za razvoj mreža telekom operatorima, ali sama ne pruža komercijalne TK usluge.

2.1.2. Opcija 2: Iznajmljivanje prostora na podzemnim trasama

Tokom godina, izgradnja i razvoj EE mreža uslovljavala je raskopavanje drumova, pločnika i zemljišta radi postavljanja naponskih kablova. Na mnogim lokacijama, posebno u urbanim područjima, elektroprivrede su vršile ukopavanje cevi, u koje su se polagali naponski kablovi, a često su se postavljale i rezervne cevi namenjene budućem proširenju kapaciteta mreže. Takođe su gradile i interne TK mreže, koristeći cevi koje su ukopavane paralelno sa EE infrastrukturom.

Rezerva prostora u cevima kod kojih je prečnik daleko veći od prečnika instaliranih kablova, kao i već položene rezervne cevi, predstavljaju veliku pogodnost za TK operatore, posebno u urbanim područjima gde su cene iskopa faktor koji najviše učestvuje u ceni koštanja izgradnje mreže. Troškovi iskopavanja se mogu izbeći uvlačenjem optičkih kablova u postojeće cevi.

Prodaja pomenutih cevi ili njihovo iznajmljivanje može da bude aranžman sa niskim rizikom za profitiranje EP kompanije, međutim, kao i kod iznajmljivanja prava prolaska, konkurentska prednost posedovanja ovih cevi može poslužiti kao osnova za pružanje TK usluga višeg nivoa.

Primer kompanije koja profitira na korišćenju potencijala sopstvenih podzemnih cevi za pružanje komercijalnih TK usluga je britanska *Scottish and Southern Energy*, čija je strategija bila postavljanje cevi TK namene u toku radova na izgradnji električne mreže, čime se ostvaruje ušteda jer nije potrebno ponovno kopanje pri instaliranju optičkih kablova. Sličan primer iz druge privredne grane je *Bord Gáis Éireann*, irska kompanija za prenos i distribuciju gasa, koja je za razvoj sopstvene optičke mreže koristila cevi koje su insertovane u cevi za protok gasa. Po osnovanju alternativnog operatora *Aurora Telecom*, nastavlja pružati komercijalne TK usluge.

2.1.3. Opcija 3: Iznajmljivanje optičkog vlakna bez elektronske opreme (Dark fibre)

Dark fibre je pojam koji se odnosi na optički medijum koji je instaliran, ali se, još uvek ne koristi za prenos signala (ne nose svetlost, otuda naziv „dark”). TK operatori koji kupuju ili iznajmljuju dark fibre će dodati svoju elektronsku opremu i „osvetliti-light” optička vlakna za prenos TK saobraćaja.

Optički kablovi se, u EE sistemu, mogu instalirati na više načina:

- Paralelno sa dalekovodima;
- Obmotavanjem oko naponskih vodova dalekovoda ili vezivanjem uz konstrukciju dalekovoda;
- Provlačenjem kroz rezervne podzemne cevi za naponske kablove, ili kroz namenske telekomunikacione cevi.

Osnovna prednost ovih instalacionih metoda je ta da elektroprivreda, kao vlasnik i eksploatator infrastrukturne trase, ima značajnu konkurentnu i ekonomsku prednost i potencijal za iznajmljivanje ili prodaju dark fibre TK operatorima, koji u suprotnom moraju graditi infrastrukturu i sopstvenu mrežu, kompletnu ili deo do priključenja na svoju mrežu. Dakle, elektroprivrede imaju potencijala da profitiraju od prodaje ili iznajmljivanja „dark” fiber-a, kombinujući postojeća prava prolaska i stručnost i veštinu u upravljanju projektovanjem infrastrukture, u cilju organizovanja mreže optičkih kablova, koji se instaliraju na gore navedene načine.

Usluga prodaje ili iznajmljivanja „dark” fibre je često prvi, ako ne i jedini, nivo na skali TK usluga, na koji se elektroprivrede odlučuju, kao strateški korak pri ulasku na TK tržište. Prodaja „dark” fibre predstavlja pogodan način da se nadoknadi značajan deo troškova izgradnje mreže, i na taj način smanje rizici ukupnih ulaganja. Primeri kompanija javnog servisa koje su prodale, ili iznajmljuju višak „dark” fibre kapaciteta svojih optičkih mreža su predstavljani u tabeli 1:

Alternativni operatori
koji pružaju dark fibre usluge

Tabela 1.

Država	Alternativni operator
Austrija	OMV
Belgija	Electrabel
Danska	Powercom
Irska	ESB
Nemačka	Ruhrgas
Italija	SNAM
Španija	Union Fenosa, Iberdrola
Švedska	Svenska Kraftnat
Velika Britanija	SurfTelecoms

2.1.4. Opcija 4: Iznajmljivanje optičkog vlakna sa elektronskom opremom (Lit fibre) ili talasne dužine (wavelength fibre)

„Lit” fibre je optičko vlakno kroz koje se vrši prenos signala u obliku svetlosnih impulsa. Optičko vlakno se „osvetljava” da bi se omogućio optički prenos. Postoji nekoliko tehnologija koje se trenutno koriste pri prenosu optičkih signala. S obzirom na to da korisnici upravljaju svojim TK uslugama, prodaja „lit” fibre se kategoriše kao *unmanaged* usluga. *Wavelength fibre* je segment „lit” fibre tržišta, nastao pojavom tehnologije multipleksiranja po talasnim dužinama (*Wave Division Multiplexing - WDM*), a posebno *Dense Wave Division Multiplexing* (DWDM). Ovo je rezultiralo postepenim povećanjem postojećih optičkih kapaciteta i omogućilo da se različite talasne dužine istog optičkog vlakna iznajmljuju različitim operatorima, ili velikim korisnicima kao što su ISP¹⁾ ili ASP²⁾.

Na ovom nivou skale TK usluga kompanija još uvek ima značajnu konkurentsku prednost, jer njena postojeća infrastruktura predstavlja osnovu TK mreže. U svakom slučaju, prihodi od eventualnog iznajmljivanja dark fibre su manje impresivni od potencijalnih prihoda koji se mogu ostvariti od iznajmljivanja „lit” fibre. U ovoj fazi, kompaniji su potrebni kadrovi sa velikim nivoom stručnosti u definisanju ciljnih tržišta, i u primeni dostupnih specifičnih TK tehnologija. Investicije u TK opremu u cilju „osvetljavanja” optičkih mreže je takođe značajno veće. Stoga, na ovom nivou skale TK usluga, preporučljivo je da kompanija razmotri mogućnosti podele investicionih i drugih rizika sa partnerom ili partnerima.

Dobar primer kompanije čija je strategija ulaska na TK tržište bila pružanje „lit” fiber usluga, uključujući *wavelength fibre*, je *186k* u Velikoj Britaniji.

¹⁾ Internet Service Provider

²⁾ Application Service Provider

186k je novi alternativni TK operator koji primenjuje DWDM tehnologiju širom Velike Britanije, i čija je osnova za izgradnju optičke mreže bila gasna infrastruktura *Transco* kompanije. Primeri ostalih kompanija koje nude, ili će nuditi usluge „lit” fibre su predstavljeni u tabeli 2:

Tabela 2.

Alternativni operatori koji pružaju „Lit” fibre usluge

Država	Alternativni operator
Danska	Powercom
Irska	Bord Gais
Španija	Red Electrica, Iberdrola
Švedska	Vattenfall

2.1.5. Opcija 5: Primena mikrotalasne tehnologije

EP kompanije ostvaruju prihode od telekomunikacija koristeći i druge tehnologije, pored optičke tehnologije, u cilju formiranja fiksne mreže za pružanje komercijalnih servisa. Jedan od načina je korišćenje mikrotalasne tehnologije i njoj pridružene infrastrukture. Mnoge kompanije imaju sopstvene TK mreže i opremu zasnovanu na mikrotalasnoj tehnologiji, sa dovoljno rezerve kapaciteta, koji se ne koriste za podršku osnovnoj delatnosti, i koji se mogu koristiti u fiksnim mrežama, za pružanje komercijalnih servisa na otvorenom tržištu. Upotreba mikrotalasne tehnologije u fiksnim mrežama može doprineti unapređenju rutiranja, i pružanju usluga na lokacijama koje mreža ne bi pokrivala kada bi bila primenjivana samo optička tehnologija. Neki od primera alternativnih operatora koji pružaju FWA (WLL)³⁾ usluge su predstavljeni u tabeli:

Tabela 3.

Alternativni operatori koji pružaju FWA usluge

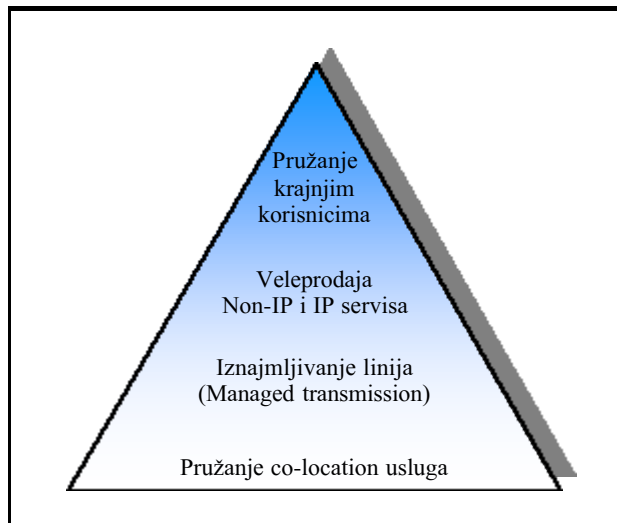
Država	Alternativni operator
Danska	Copenhagen Energy Tele
Italija	ACEA
Španija	Abrared

2.2. Model 2 - Fiksne mreže sa upravljanjem servisima

Ovaj model se odnosi na usluge fiksnih mreža sa upravljanjem servisima, i sadrži četiri opcije učešća na tržištu telekomunikacija, koje su predstavljene skalom TK usluga na slici 2. Za pružanje ovih usluga elektroprivrede i dalje imaju konkurentsku prednost,

³⁾ Fixed Wireless Access (Wireless Local Loop) – Obezbeđivanje korisničkog pristupa putem bežičnog linka.

jer su većinu ovih usluga pružale u okviru elektroprivrednog sistema kao podršku osnovnoj delatnosti.



Slika 2. Skala TK usluga - fiksne mreže sa upravljanjem servisima

2.2.1. Opcija 1: Pružanje co-location usluga

Co-location je koncept pružanja usluga trećim licima, a odnosi se na razmeštanje TK opreme na lokaciji koja je u vlasništvu kompanije. Tržište ovih usluga se počelo razvijati paralelno sa primenom novih tehnologija u mrežama za pristup za LLU⁴⁾, kao što je ADSL⁵⁾. Zahtevi za smeštanjem servera i TK opreme iziskuju potrebe za fizičkim prostorom za tu namenu, kao i pratećim uslugama. Ovaj koncept se odnosi i na razmeštanje prenosne opreme za mobilne mreže, optičke primo-predajne opreme, i komutacione opreme u fiksnim TK mrežama.

Spektar co-location usluga koje EP kompanije nude kreće se od jednostavnog izdavanja zemljišta, objekata, ili iznajmljivanja prostora u objektima, do iznajmljivanja prostorija ili slobodnih rekova u potpuno klimatizovanom okruženju sa različitim načinima napajanja, rezervnim napajanjima i kompletnom uslugom održavanja. Većina kompanija je u mogućnosti da, duž optičke rute, ponudi klimatizovani prostor, rasvetu i napajanje, prvenstveno u tačkama interkonekcije. Elektroprivrede, posebno, imaju mogućnost da, koristeći EE mrežu i svoje objekte, kroz pružanje EE usluga, pružaju i usluge co-location za instaliranje TK opreme.

⁴⁾ Local Loop Unbundling - Proces razvezivanja pretplatničke petlje. Omogućuje drugim telekomunikacionim kompanijama i provajderima usluga pristup lokalnoj mreži dominantnih operatera, i direktnu isporuku telekomunikacionih usluga do korisnika.

⁵⁾ Asymmetric Digital Subscriber Line

Co-location se u nekim zemljama smatra kao deo procesa isporuke TK usluge, pa se stoga ne razmatra kao mogućnost sopstvenog učešća u telekomunikacijama. Ipak, neke kompanije nude co-location, kao što je *Telehouse*, čije je ime postalo sinonim za tu vrstu usluge. Co-location tržište je takođe usko povezano sa, sve većim, tržištem trgovine propusnim opsegom, u kojima kompanije kao što je *Band-X* postaju posrednici između kupaca i prodavaca propusnog opsega, i nude co-location uslugu na mestu „trgovine”.

Tabela 4.

Neki od alternativnih operatera koji pružaju co-location usluge

Država	Alternativni operator
Austrija	EVN, WELL.COM
Danska	Powercom
Španija	Iberdrola
Nemačka	VEAGCOM
Poljska	Tel-Energo
Velika Britanija	186k
SAD	FPL Fiber Net

U tabeli 4 su predstavljeni neki od alternativnih operatera koji pružaju co-location, kao jednu od svojih usluga.

2.2.2. Opcija 2: Iznajmljivanje linija (Managed transmission)

Ovaj domen usluga obično obuhvata obezbeđivanje end-to-end konekcija, koristeći transmisioni protokol zasnovan na primenjenoj transmisionoj tehnologiji, na primer SDH, obezbeđujući određenu širinu propusnog opsega, na primer STM-1 (155 Mbit/s). Ovaj tip usluge često se javlja u vidu privatne iznajmljene linije (leased line), i predstavlja permanentnu konekciju između dve tačke. Iznajmljivanje linija, obično, koriste poslovni korisnici u cilju povezivanja geografski udaljenih kancelarija, ili drugi TK operatori, radi pružanja usluga na lokacijama do kojih ne mogu dopreti na drugi način. Za razliku od dial-up konekcija, iznajmljene linije su permanentno dodeljene korisniku, i uvek su aktivne. Korisnik ove usluge je, pored propisanih mesečnih novčanih naknada, dužan izmiriti i jednokratnu naknadu za uspostavljanje konekcije.

S obzirom na to da se kroz iznajmljene linije ne vrši prenos signala drugih korisnika, zagarantovan je veliki nivo kvaliteta i bezbednosti saobraćaja, ali, s druge strane, korisnici ove usluge plaćaju zakupninu i za one kapacitete linije koji, eventualno, nisu iskorišćeni.

Na ovom nivou skale TK usluga, EP kompanije su u mogućnosti da iskoriste stručnost u upravljanju SDH mrežama, i iskustvo u pružanju ove vrste usluga, s obzirom na to jda su ove usluge pružale za potrebe funkcionisanja, i u okviru poslovnog sistema elektroprivrede.

Neki od alternativnih operatera koji na TK tržištu pružaju usluge iznajmljivanja linija su predstavljeni u tabeli 5:

Tabela 5.
Alternativni operatori koji pružaju usluge iznajmljivanja linija

Država	Alternativni operator
Austrija	EVN, WELL.COM, UTA (United Telecom austria)
Belgija	Electrabel, Codenet
Danska	Powercom
Holandija	CasTel
Nemačka	EveTel
Norveška	Enitel
Češka	Aliatel, ČEZTel
Slovačka	Energotel
Poljska	NOM
Mađarska	Pan Tel
Velika Britanija	Energis
Čile	Manquehue Net

2.2.3. Opcija 3: Veleprodaja Non-IP i IP servisa

Veleprodajni (*engleski wholesale*) Internet Protocol i Non-IP servisi namenjeni su drugim TK operatorima i provajderima usluga, koji formiraju pake te usluga i nude ih na tržištu krajnjim korisnicima kao *End-User Services*. Non-IP Wholesale se odnosi na obezbeđivanje propusnog opsega skupa sa Non-IP rutiranjem, ili komutacionim protokolima, kao što su paketski Frame Relay ili ATM⁶, i komutacijom kola kod telefonskih usluga. IP Wholesale nudi usluge koje se zasnivaju na pristupu IP mreži, kao što je obezbeđenje serverskih kapaciteta ASP/ISP provajderima. U tabeli 6 su predstavljeni neki od alternativnih operatera koje su osnovale EP kompanije, a koji na TK tržištu posluju kroz primenu ove opcije modela.

Za pružanje usluga na ovom nivou skale TK usluga neophodna je stručnost u upravljanju tehnologijama zastupljenih TK mreža, te stoga, za EP kompaniju nije preporučljiv ulazak na ovaj segment tržišta, osim ako imaju veliko višegodišnje iskustvo u pružanju ovakvih usluga u sistemu elektroprivre-

de, ili uz partnerstvo sa kompanijom koja poseduje ove kvalitete i koja će nadomestiti neiskustvo i nedovoljnu stručnost u ovoj oblasti.

Tabela 6.
Neki od alternativnih operatera koji na veliko trguju IP i Non-IP servisima

Država	Alternativni operator
Austrija	EVN, WELL.COM, UTA (United Telecom Austria)
Švedska	Sydskraft, Vattenfall Regionat
Danska	Powercom, SAES Energi Service
Irska	Aurora Telecom
Nemačka	VEAGCOM
Češka	Aliatel
Mađarska	Pan Tel
SAD	AFN (American Fiber Networks), FPL
Argentina	Silica Networks

2.2.4. Opcija 4: Pružanje usluga krajnjim korisnicima

Na ovom nivou skale TK usluga postoji velika grupa usluga koje se nude poslovnim i rezidencijalnim korisnicima, i u segmentima u okviru ovih tržišta. Najjednostavniji oblik end-user usluga je prodaja propusnog opsega, koji može biti kupljen „na veliko”. Za TK operatore koji pružaju end-user usluge nije neophodno da poseduju vlastitu TK mrežu, s obzirom da mogu jednostavno „preprodavati” usluge, kao što su, na primer, telefonske usluge.

Primenjeni modeli pružanja usluga mogu biti veoma različiti, što će se videti iz opisa opcije Virtualnog operatera mobilne mreže (*Mobile Virtual Network Operator - MVNO*), u trećem modelu.

Potencijal mogućih prihoda je veoma veliki, stoga EP kompanija mora kombinovati iskustvo i stručnost na poljima marketinga i masovnog TK tržišta, da bi na pravi način pristupila segmentima tržišta koji se odnose na poslovne i rezidencijalne korisnike. EP kompanije su u situaciji da iskoriste veliku potrošačku bazu, i da osim usluga isporuke električne energije, tim potrošačima pružaju i TK servise.

Najjednostavniji primer pružanja end-user usluga u fiksnim mrežama je „preprodavanje telefonskih minuta”, i česta je strategija koju sprovode elektroprivredne, gasne ili vodoprivredne kompanije pri

ulasku na tržište telekomunikacija. Telefonske usluge se mogu ponuditi kao dodatak ostalim uslugama EP kompanije, u svrhu formiranja jedinstvenog paketa usluga. Konvergentno fakturisanje nosi mogućnost korisnicima da pojednostave način plaćanja, kroz jedinstven račun za telekomunikacione i usluge isporuke električne energije. Ipak, kako se specijalizovani servisi, kao što je prenos podataka paketnom komutacijom, sve više probijaju na masovno TK tržište, javljaju se trendovi korišćenja Internet protokola (IP) kao najefikasnijeg načina prenosa, i govora i podataka. Ovaj i ostali trendovi, kao što su sistemi za elektronsko prezentiranje i plaćanje računa (*Electronic Bill Presentment and Payment - EBPP*), treba da budu uzeti u razmatranje, kao deo strategije za pružanje TK usluga krajnjim korisnicima. Elektroprivreda mora shvatiti da je fakturisanje TK usluga daleko kompleksnije nego fakturisanje utrošene električne energije.

Neki od alternativnih operatera koji svojim korisnicima nude i govorne TK usluge su predstavljeni u tabeli 7:

Tabela 7.

Alternativni operateri koji korisnicima pružaju govorne usluge

Država	Alternativni operater
Austrija	UTA
Nemačka	Evetel, Hansenet Telekomunikation
Danska	Copenhagen Energy Tele
Holandija	CasTel
Norveška	Enitel
Poljska	NOM
Slovačka	Energotel
Velika Britanija	Energis

EP kompanije, takođe, moraju uvideti obim usluga koje korisnici očekuju od svojih provajdera, na primer ISDN i VPN. Digitalna mreža integrisanih servisa (*Integrated Service Digital Networks - ISDN*) je u veoma raširenoj upotrebi, i koristi se i za prenos podataka i za prenos govora. ISDN omogućuje prenos digitalnih podataka velikim brzinama protoka, i podržava aplikacije kao što je pristup Internetu ili lokalno umrežavanje. Usluge virtuelnih privatnih mreža (*Virtual Private Networks - VPN*) su još jedne od usluga koje su bliske korisnicima, a naročiti poslovnim korisnicima koji na ovaj način smanjuju troškove, jer nemaju potrebu ulaganja u sopstvenu TK infrastrukturu. VPN je privatna mreža za prenos podataka koja koristi javnu TK infrastrukturu.

Iako postoji prividna sličnost, VPN se razlikuje od usluge iznajmljivanja linija, koju može eksploatirati samo jedna kompanija. Ideja VPN je da se kompanijama pruže identične mogućnosti ali po mnogo nižim cenama, jer koriste zajedničku javnu infrastrukturu, a ne privatnu, čiji su troškovi izgradnje veliki. Koncept VPN omogućuje bezbedno deljenje javnih resursa, za prenos privatnih podataka. Primeri operatera koji pružaju usluge VPN, a osnovan je od strane elektroprivredne kompanije su predstavljeni u tabeli 8:

Tabela 8.

Alternativni operateri koji pružaju VPN usluge

Država	Alternativni operater
Austrija	EVN
Belgija	Codenet
Danska	Powercom
Holandija	CasTel
Velika Britanija	Energis

Neke od EP kompanija posluju na TK tržištu kao ISP. Primeri su predstavljeni u tabeli 9:

Tabela 9.

Alternativni operateri koji pružaju Internet usluge

Država	Alternativni operater
Austrija	UTA, WELL.COM
Nemačka	Evetel, Hansenet Telekomunikation
Norveška	Enitel
Švajcarska	DiAx
Španija	EresMas
Češka	Aliatel
Čile	Manquehue Net

2.2.4.1. Primena PLC tehnologije

Power Line Communication (PLC) je tehnologija koja koristi vodove niskog/srednjeg napona kao medije za prenos TK saobraćaja, i isključivo se vezuje za elektrodistributivne kompanije.

Ispitivanja su pokazala da ova tehnologija podržava prenos signala protoka od 2 Mbit/s do 10 Mbit/s, pa čak i do 45 Mbit/s. Elektroprivrede u Austriji, Francuskoj, Nemačkoj, Italiji, Španiji, Švedskoj i Švajcarskoj trenutno ispituju mogućnost njene komercijalne primene.

Međutim, iako još uvek nisu usvojeni standardi, neke od kompanija, kao što su *Ascom* i *DS2* nastavljaju investiranje u ovu tehnologiju. Za očekivati je dalji rast interesa za PLC tehnologijom, sa porastom brzine protoka koje bi ona podržala.

PLC ima potencijal za primenu kao tehnologija u mrežama za pristup, omogućujući TK operatorima da, preko naponskih vodova, rezidencijalnim korisnicima ponude značajan širokopojasni kapacitet. PLC se, takođe, može koristiti i u okviru domova, gde nudi mogućnosti za npr. umrežavanje računara, ili automatizaciju. Elektroprivrede su veoma zainteresovane za potencijalne mogućnosti upotrebe PLC, kao tehnologije u mrežama za pristup, za pružanje Internet usluga svojim potrošačima. U svakom slučaju, PLC je konkurent DSL i kablovskim tehnologijama, čija je primena u porastu sa porastom zahteva za digitalnom TV i mogućnostima da druge TK kompanije i pružaoci usluga imaju pristup mreži dominantnih operatora u procesu razvezivanja pretplatničke petlje, pružajući direktno usluge korisnicima.

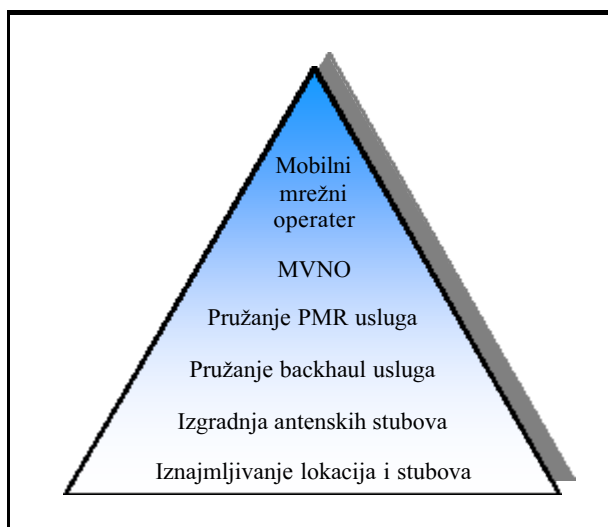
PLC predstavlja tehnologiju sa visokim poslovnim potencijalom i za sektor isporuke električne energije, i za TK sektor. Liberalizacija i deregulacija ovih sektora, procesi koji se trenutno odvijaju u Evropi, su glavni podstrek razvoju i eksploataciji ove tehnologije.

U 16 evropskih zemalja, kao i u više vanevropskih zemalja, u toku 2002. godine je izvršena implementacija PLC sistema na više mesta, i za različite svrhe [6]:

- U univerzitetskom domu u Ženevi je, u saradnji sa *Geneva energy supply company*, implementiran PLC sistem za pristup Internetu. Koristi ga 530 studenata, a brzina pristupa Internetu je 4,5 Mbit/s. Osim isporuke električne energije SIG (*Service Industriels de Geneve*) je realizovao backbone mrežu sa 250 km optičkih kablova u regionu Ženeve.
- *Freiburg Electricity Utility* (FEW) iz Švajcarske nudi svojim potrošačima brzi pristup Internetu korišćenjem PLC-a.
- U jugozapadnoj Nemačkoj provajder za isporuku električne energije EnBW (*Energie Baden-Wuerttemberg*) je završio prvu fazu implementacije PLC sistema i trenutno 700 potrošača koristi PLC pristup Internetu. Za ove potrebe je PLC sistemom opremljeno 68 trafostanica u Ellwangen-u i 12 trafostanica u predgrađu.
- Moskovska kompanija za isporuku električne energije *Energomgasbit* je u toku 2002. godine omogućila 20 000 PLC konekcija u gradu Zelenogorsk, koji ima 100 000 stanovnika. Moguć je pristup Internetu i korišćenje telefonije preko električne mreže.

2.3. Model 3 - Učešće u pružanju usluga mobilnih komunikacija

EP kompanije imaju dosta potencijala za učešće na tržištu mobilnih komunikacija, i dosta sličnosti sa mogućnostima u fiksnoj mreži u vezi eksploatacije infrastrukturnih (*hard assets*) i kadrovskih (*soft assets*) potencijala. Ovaj model sadrži pet opcija, i predstavljen je skalom TK usluga na slici 3.



Slika 3. Skala TK usluga - mobilne mreže

2.3.1. Opcija 1: Iznajmljivanje lokacija i stubova

Postojeći antenski stubovi su, obično, najlakši za eksploataciju u smislu stvaranja novih prihoda u oblasti telekomunikacija. EP kompanije su izgradile i poseduju svoje interne TK mreže, radi zadovoljenja potreba i za specifičnim uslugama kao što su telemetrija ili PMR (*Private Mobile Radio*) sa redundantnim sistemom napajanja, koje javna TK mreža nije podržavala. Elektroprivredne TK mreže često sadrže veliki broj antenskih stubova. Ovi stubovi obično imaju prostora i za postavljanje dodatnih antena, pa bi verovatno bili atraktivni za mobilne TK operatore. U nekim slučajevima, slobodni prostor na antenskim stubovima se može iznajmiti Sites and Towers⁷⁾ kompaniji, koja zatim projektuje, gradi i održava antenske sisteme za potrebe operatora mobilne mreže.

Takođe, mogu se iznajmiti i lokacije na krovovima poslovnih zgrada EP kompanija, koje su obično smeštene u urbanim zonama i na svojim krovovima imaju već instalirane antene za interne telekomunikacije, što ih čini posebno atraktivnim za operato-

⁷⁾ Kompanije koje se bave uređenjem prostora, lokacija i projektovanjem, izgradnjom i održavanjem objekata i stubova na kojima se instalira telekomunikaciona oprema.

re mobilnih mreža. Jedan od problema korišćenja poslovnih zgrada u navedene svrhe je taj da se mora obezbediti pristup 24 časa dnevno, 7 dana u nedelji, za potrebe održavanja sistema.

Zemljište u krugu EE objekata, npr. trafostanica, takođe se može iznajmiti Sites and Towers kompaniji, čime se obezbeđuje dovoljno prostora za izgradnju antenskih stubova ili razmeštanje TK opreme. I ostali objekti, dalekovodi, se mogu iznajmiti pod sličnim uslovima, te rešiti neke od specifičnih problema, npr. smanjenje pogonske sigurnosti.

Postoji veliki broj EP kompanija koje iznajmljuju lokacije za mobilne telekomunikacije. Neke od njih su predstavljene u tabeli 10:

Tabela 10.

Neki od alternativnih operatora koji iznajmljuju lokacije i stubove mobilnim operatorima

Država	Alternativni operator
Belgija	Electrabel
Danska	Eltra
Francuska	EdF
Španija	Union Fenosa
Velika Britanija	GPU Power, Yorkshire Electricity

2.3.2. Opcija 2: Izgradnja antenskih stubova (samostalno ili sa partnerom)

Mnogi mobilni mrežni operatori, poslove projektovanja, izgradnje i održavanja antenskih mesta, dodeljuju Tower kompanijama. Većina EP kompanija traži načine ostvarenja zarade od delatnosti koje su, još uvek, sporedne delatnosti kompanije. Mnoge od njih imaju obučene kadrove sa iskustvom u radio-komunikacijama, i većina već posluje sa određenim fondom lokacija za postavljanje antenskih stubova, koji uključuje iznajmljivanje mobilnim operatorima slobodnih antenskih mesta na stubovima, uz neke od dodatnih usluga vezanim za održavanje. Kompanije koje se nalaze u ovakvoj poziciji, bi mogle iskoristiti svoje iskustvo i stručna znanja za organizovanje Sites and Towers poslovanja, i obezbeđenja velikog fonda lokacija za postavljanje antenskih stubova, uz pružanje usluga projektovanja, izgradnje, i održavanja. Za izgradnju antenskih stubova su potrebne investicije, i tu postoji rizik, s obzirom da nema garancija da će uvek biti zainteresovanih operatora za iznajmljivanje tih kapaciteta. Takođe je potrebno sprovesti jak marketing kapaciteta i usluga, svojim snagama ili angažujući neku od marketiških agencija, da bi se potencijali ovog segmenta tržišta iskoristili u potpunosti.

Postoji relativno veliki broj kompanija koje su bez partnera ušle na Sites and Towers tržište, pružajući usluge izgradnje antenskih stubova i usluge vezane za opsluživanje antenskih mesta. Neke od njih su predstavljene u tabeli 11:

Tabela 11.

Primeri samostalne izgradnje antenskih stubova i uređenja antenskih mesta

Država	Alternativni operator
Irska	ESB
Švedska	Svenska Kraftnat
Velika Britanija	Scottish and southern Energy, Surf Telecoms

EP kompanija može pozitivno proceniti svoje potencijale za izdavanje postojećih stubova, a zatim pristupiti pregovorima sa nekom od Sites and Towers kompanija, kao strateškim partnerom. Aranžmani mogu biti u obliku, ili prodaje zemlje i navedenih kapaciteta, iznajmljivanja, ili u formi zajedničkog ulaganja, gde obe kompanije preuzimaju deo poslovnog rizika, ali i dele potencijalne prihode. U takvom partnerstvu, Sites and Towers kompanija u posao unosi marketišku stručnost i iskustvo, iskustvo u uređenju i razvoju lokacija i u pružanju usluga tog tipa, dok EP kompanija obezbeđuje fizičke kapacitete, kao što su postojeći stubovi, zemljište i objekti.

Ključni faktor ovakvog pristupa je da se EP kompanija mora detaljno da upozna sa stanjem i odnosima na Sites and Towers tržištu, radi definisanja optimalne strategije, u cilju izbora odgovarajućeg strateškog partnera.

Primeri kompanija koje su sa strateškim partnerom ušle u posao pružanja usluga razvoja lokacija za mobilne komunikacije su predstavljene u tabeli 12:

Tabela 12.

Primeri izgradnje antenskih stubova i uređenja antenskih mesta, uz učešće partnera

Država	Alternativni operator
Španija	Red Electrica
Velika Britanija	Eastern Group Telecoms, SpectraSite Transco

2.3.3. Opcija 3: Pružanje backhaul usluga

U okviru mobilnih telekomunikacija, *backhaul* se može opisati kao metod obezbeđenja TK kapaciteta od mobilne bazne stanice, do lokacije u mreži

odakle se usluga dalje može distribuirati i, konačno, isporučiti na odredište. Backhaul prenos TK saobraćaja može koristiti fiksne linije ili bežičnu tehnologiju. U 2G mrežama backhaul kapaciteti su pretežno zasnovani na mikrotalasnim *point-to-point* linkovima, uz ograničenu primenu optičkih kablova. Međutim, nove 3G mreže zahtevaju znatno veći propusni opseg za povezivanje svake od baznih stanica sa mrežnom komutacionom infrastrukturom. Da bi se zadovoljili ovi zahtevi za dodatnim kapacitetom, kod pružanja backhaul usluga se očekuje veći procenat korišćenja optičkih vlakana, ali će svakako, u nešto manjem obimu, i dalje koristiti mikrotalasna tehnologija. Elektroprivredne kompanije koje poseduju optičku i mikrotalasnu infrastrukturu, koja se koristi za potrebe interne komunikacije, mogu kroz dalji razvoj svojih mreža, ponuditi usluge backhaul prenosa mobilnim mrežnim operatorima.

Primeri alternativnih operatora koji pružaju backhaul usluge drugim operatorima su Tel-Energo u Poljskoj i Pan Tel u Mađarskoj.

2.3.4. Opcija 4: Pružanje usluga Privatne Radio Mobilne mreže (PMR)

Zbog konfiguracije EE mreža, EP kompanije imaju veoma velike potrebe za mobilnim komunikacijama, a zbog specifičnih zahteva EE sistema, mnoge od ovih kompanija su i investirale u izgradnju privatnih mobilnih radio mreža (PMR). Kako je napredovala tehnologija u javnim mrežama, korišćeni PMR sistemi su zastareli i postali skupi za održavanje. Međutim, javne mobilne mreže ne zadovoljavaju uvek specifične zahteve EP kompanija, i svaka kompanija mora definisati optimalnu strategiju po pitanju mobilnih komunikacija.

Jedno od potencijalnih rešenja je da se postojeća infrastruktura starih PMR sistema nadogradi u komercijalnu mrežu, koja će pružati PMR usluge za više kompanija. Ovakvo rešenje može realizovati jedna kompanija samostalno, ukoliko poseduje dovoljno infrastrukturnih kapaciteta, ili udruživanjem nekoliko kompanija. Neke od EP kompanija su procenile opravdanim investiranje u organizovanje međumnog privatnog radio sistema, koji se onda, može nuditi kao usluga ostalim kompanijama. U ovakvim slučajevima se kao pogodnosti, ističu stručnost u mobilnim radio vezama za interne potrebe, kao i detaljno poznavanje potreba i zahteva elektroprivrede i sličnih kompanija, pri eksploataciji takvih veza.

Druga mogućnost eksploatacije postojeće PMR infrastrukture bi bila iznajmljivanje viška kapaciteta. Međutim, u mnogim slučajevima je to neizvodljivo, jer su obično interni mobilni sistemi u

potpunosti iskorišćeni za prenos sopstvenog TK saobraćaja.

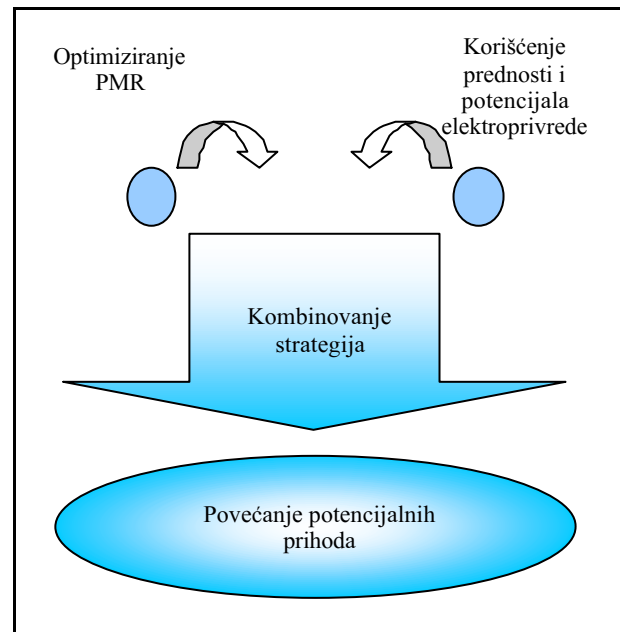
Problem sa razvojem PMR servisa u komercijalne svrhe je taj što se u mnogim zemljama dodela radio spektra za potrebe kompanija, odnosi na „nužni tip” usluga, te je stoga regulisano legislativom, i obično je licencirano. Zbog toga je malo verovatno da bi takva regulacija odobrila komercijalni pristup „nužnom” frekvencijskom spektru.

Primeri alternativnih operatora koji komercijalno pružaju usluge PMR mreže su predstavljeni u tabeli 13:

Tabela 13.
Alternativni operatori koji pružaju komercijalne PMR servise

Država	Alternativni operator
Češka	Aliatel
Velika Britanija	GridCom

Dodatne mogućnosti povećanja potencijalnih prihoda proizilaze iz sagledavanja mogućnosti kombinovanja strategije PMR sistema i strategije za iskorišćenje Sites and Towers potencijala. Korišćenjem novih tehnologija, optimizira se elektroprivredni PMR sistem, što za posledicu ima smanjenje potrebnog prostora za instaliranje antena na antenskim stubovima, pa se dodatni slobodni prostor može ponuditi mobilnim operatorima. Slika 4 ilustruje prednosti ovakve kombinacije.



Slika 4. Kombinovanje strategija optimiziranja i korišćenja prednosti i potencijala elektroprivredne kompanije

2.3.5. Opcija 5: Virtuelni operator mobilne mreže (MVNO)

Koncept Virtuelnog operatora mobilne mreže (MVNO) je već primenjen u Danskoj, Švajcarskoj, Španiji i u Velikoj Britaniji, a očekuje se i njegova šira primena sa rastom konkurencije u mobilnim uslugama, što uslovljaju direktive EC.

OFTEL, regulatorno telo u Velikoj Britaniji, definiše MVNO kao „Organizacija koja nudi pretplatu i usluge mobilne mreže, ali nema dodeljen frekventni spektar.” Ova definicija pokriva različite oblike pod kojima MVNO može pružati usluge (kao affinity partner u oblasti marketinga, provajder usluga, viši provajder usluga, ili kao kompletni MVNO) [1].

Ulazak na TK tržište u obliku MVNO, posebno je atraktivan za kompanije kao što je elektroprivreda, koje imaju veliku potrošačku bazu, što im omogućuje da, koristeći svoj pozitivni imidž profitabilnog privrednog giganta i marketiško iskustvo, nude mobilne TK usluge, bez rizičnih investicija u mrežnu TK infrastrukturu.

Virtuelni operatori mobilnih mreža su relativno novija pojava na tržištu mobilnih komunikacija, ali sve više primera (*PowerGen*, *Centrica* i *Energis*, u Velikoj Britaniji) pokazuje da MVNO postaje uspešan i visoko kotiran biznis, i da ima veliki potencijal za ostvarenje strateških ciljeva ulaska na tržište telekomunikacija.

2.3.6. Opcija 6: Mobilni mrežni operator

Mnogo više kompanija je na tržište telekomunikacija ušlo u obliku potpunih mobilnih mrežnih operatora, nego kao MVNO. Međutim, razmatrajući razvijenost i složenost javnih mobilnih mreža, može se zaključiti da su retke EP kompanije koje su sposobne da adekvatno razviju mobilnu mrežu bez investiranja strateškog partnera sa iskustvom na polju javnih mobilnih komunikacija. Alternativno rešenje bi bila kupovina raspoloživih deonica nekog od postojećih mobilnih operatora.

Neke od EP kompanija koje su na tržište mobilnih komunikacija ušle kao mrežni operatori su:

- *Tele.ring* (Austrija), poseduje 2G i 3G licence;
- *Vivendi* (Francuska), čija telekomunikaciona poslovica *Cegetel* poseduje deo akcija SFR mobilnog operatora;
- *Enel* (Italija), čija telekomunikaciona poslovica *Wind* poseduje 2G licencu;
- *Enitel* (Norveška), u partnerstvu sa *Sonera*-om, osnovao *Broadband Mobile* (iako *Enitel* namerava prodati svoje deonice *Broadband Mobile*-a);

- *EdP* (Portugal), njegova telekomunikaciona poslovica *Oni* i španska *Iberdrola* su partneri norveškom telekomunikacionom operatoru *Telenor*, koji je dobio 3G licencu u Portugalu;
- *Endesa* i *Union Fenosa* (Španija) su partneri sa *Telecom Italia*, u *Auna* grupi, u čijem sastavu je i mobilni operator *Retevision Movil* (AMENA);
- *diAx* (Švajcarska) poseduje mobilnog operatora *dSpeed*, koji je dobio 3G licencu u Švajcarskoj.

3. MOGUĆNOSTI RAZLIČITIH SEGMENTATA EP SISTEMA ZA PRIMENU DEFINISANIH MODELA

Bitno je uočiti da se ovaj rad fokusira više na karakteristične prednosti i potencijale EP kompanija, nego na njihovu poslovnu i vlasničku strukturu. Vertikalna i horizontalna integracija, udruživanje i otkupljivanje akcija, multi-utilities i bundled usluge, sve su to trendovi u okviru sektora svih privrednih tržišta, pa je iz tog razloga veoma teško odrediti granice, pa čak i definisati privrednu kompaniju. Od početka liberalizacije evropskog privrednog tržišta, tradicionalna struktura EP kompanija je prošla kroz radikalne promene, uključujući različite nivoe privatizacije i regulacije, u zavisnosti od toga koja je država u pitanju. Na primer, danas u Evropi postoji mnogo primera gde su, u sektoru kao što je elektroenergetski, segmenti proizvodnje, prenosa, distribucije i isporuke (snabdevanja) razdvojeni, samostalni poslovni subjekti, ili su deo poslovanja neke druge kompanije. U pogledu trendova, osnovna infrastruktura i procesi „tradicionalnih” kompanija i dalje postoje, međutim izvršena je njihova raspodela po novim segmentima, tako da svaki segment poslovanja EP kompanije poseduje karakterističan tip prednosti za bavljenje telekomunikacionom delatnošću.

Svaka kompanija javnog servisa, pa i elektroprivreda, poseduje kombinaciju „hard” i „soft” potencijala i prednosti. „Hard” potencijali elektroprivrede se odnose na prenosnu i distributivnu infrastrukturu (nadzemne električne vodove i dalekovode, i podzemne kablovske trase i cevi), zemljište, komunikacione tornjeve, i, u nekim slučajevima, razvijene interne TK sisteme. „Soft” potencijali podrazumevaju ranije razvijene poslovne procedure, stručnost i iskustvo u upravljanju mrežama, podršku poslovanju, veštine marketinga, fakturisanja i naplate za upravljanje velikom potrošačkom bazom, i kompanijin pozitivan imidž i brand name. „Hard” i „soft” potencijali „tradicionalnih” EP kompanija će se predstaviti u nastavku, kroz opis operativnih segmentata EE sektora.

Elektroenergetska industrija se, obično, sastoji od četiri glavna operativna segmenta:

- Produkcija;
- Prenos;
- Distribucija;
- Isporuca, odnosno snabdevanje električnom energijom.

Ovakva podela je napravljena na osnovu stanja u EE sektorima zapadnoevropskih zemalja, a i u većini zemalja CIE nakon sprovedenih reformi i restrukturiranja svojih EE sektora. U našoj zemlji elektroprivredni sistem se još uvek sastoji iz prva tri navedena segmenta, gde je segment isporuke električne energije objedinjen u segmentu distribucije. Nakon restrukturiranja EE sektora koje nas čeka u bliskoj budućnosti, sa ciljem usklađivanja sa strukturom evropskog EE tržišta, gde nakon deregulacije i liberalizacije EE tržišta kompanije iz navedenih segmenata samostalno posluju na tržištu, ovakva podela će biti aktuelna i kod nas.

3.1. Produkcija električne energije

Produkcija električne energije predstavlja pretvaranje izvora energije, kao što je ugalj, ili obnovljivi izvori, u električnu energiju. Proizvedenom energijom se napaja prenosna mreža. Najčešće, jedini telekomunikacioni potencijali koje može da ima kompanija za proizvodnju električne energije, je zemljište, kao što su lokacije na kojima su izgrađene elektrane. Postoji mogućnost da ove kompanije poseduju i internu telekomunikacionu infrastrukturu, ali ona, u većini slučajeva, ima ograničen potencijal u smislu komercijalne eksploatacije.

3.2. Prenos električne energije

Mreža za prenos prenosi proizvedenu energiju kroz mrežu, pokrivajući velika područja, često na nacionalnom nivou. Električna energija, u ovoj fazi, je najvećeg naponskog nivoa. Operator prenosa poseduje značajne potencijale koji se mogu iskoristiti u telekomunikacione svrhe, kao što su to učinile sledeće kompanije: Verbund u Austriji, Tractebel u Belgiji, ESB u Irskoj, Enel u Italiji, Statnett u Norveškoj, PSE u Poljskoj, EDP u Portugalu, Svenska Kraftnet u Švedskoj i National Grid u Velikoj Britaniji.

3.3. Distribucija električne energije

Električna energija se nakon prenosa kroz prenosnu mrežu, transformiše na niži naponski nivo i distribuira kroz regionalne distributivne mreže, preko nadzemnih i podzemnih naponskih vodova. Kompanije za distribuciju električne energije, kao i kompanije za prenos električne energije, poseduju

značajne potencijale koji se mogu eksploatirati u telekomunikacionoj delatnosti. Primeri su: Energie Oberösterreich u Austriji, Eltra u Danskoj, EnBW u Nemačkoj, Union Fenosa u Španiji, EOS u Švajcarskoj i Scottish Power u Velikoj Britaniji.

3.4. Isporuca električne energije

Nakon regionalne distribucije električne energije, sektor Isporuca „prodaje” električnu energiju potrošačima. Isporučiocu su odgovorni za marketing, prodaju i naplatu električne energije. Neke kompanije za isporuku su iskoristile potencijale potrošačke baze, stručnosti i iskustva u marketingu usluga, i svoj brand name, da bi nudili telekomunikacione usluge kao deo paketa multi-usluga, u nekim slučajevima reklamirajući pogodnosti „jednog računa” za energiju i telekomunikacione usluge. Ovaj trend je najrazvijeniji u Velikoj Britaniji, gde je regulatorni okvir uslovio odvajanje poslovanja distribucije i isporuke električne energije u elektroenergetskom sektoru. Primeri kompanija koje su spektru usluga koje pružaju, osim usluga isporuke električne energije, dodale telekomunikacione usluge, prvenstveno preprodavajući govorne telefonske usluge, su Innogy, PowerGen i Scottish Power.

Mogućnosti učešća kompanija iz različitih funkcionalnih celina EE sektora na telekomunikacionom tržištu su predstavljeni u tabeli 14.

Tabela 14.

Potencijali elektroprivrednih kompanija za učešće na telekomunikacionom tržištu

<p>Produkcija električne energije Iznajmljivanje lokacija i stubova - zemljište, objekti, zgrade</p>
<p>Prenos električne energije Iznajmljivanje lokacija i stubova - zemljište, zgrade, objekti, antenski stubovi, dalekovodi Usluge optičkih mreža - prava prolaska, podzemni vodovi, nadzemni vodovi visokog napona, nacionalna pokrivenost Usluge optičkih mreža - usluge sa upravljanjem servisima (managed services) PMR (Private Mobile Radio)</p>
<p>Distribucija električne energije Iznajmljivanje lokacija i stubova - zemljište, zgrade, objekti, antenski stubovi, dalekovodi Usluge optičkih mreža - prava prolaska, podzemni vodovi, dalekovodi srednjeg naponskog nivoa, niskonaponska mreža, regionalna pokrivenost Usluge optičkih mreža - usluge sa upravljanjem servisima (managed services) Optičke backhaul usluge PMR (Private Mobile Radio)</p>
<p>Isporuca (snabdevanje) električne energije Iznajmljivanje lokacija i stubova - zemljište, zgrade Pružanje usluga krajnjim korisnicima (End-user services) - preprodaja telefonskih usluga rezidencijalnim korisnicima MVNO</p>

4. REGULATORNI ASPEKT

Reforme i liberalizacija tržišta električne energije ima značajan uticaj na organizacioni oblik i strukturu kompanija koje posluju na tim tržištima, širom Evrope. Stepem liberalizacije tržišta električne energije je različit od države do države. U nekima je dostignut željeni stepen liberalizacije i reforme su završene, u nekima je u toku, dok je u nekim državama liberalizacija još u planu, ali se sve kompanije restrukturiraju i spremaju za nove uslove poslovanja na konkurentnom i regulisanom tržištu. Zakoni određene države i regulatorni pristup EP kompanijama ima direktan uticaj na mogućnost tih kompanija za stupanje na TK tržište.

Kao što se može videti, ne postoji „jedan način” za ulazak EP kompanija na TK tržišta, što je rezultat različitosti u evropskim TK legislativama, regulatornim okolnostima i stepenu konkurencije. Iako EU nastoji harmonizovati ove prilike potrebno je mnogo godina da bi se otklonile razlike u legislativnim politikama, odvijanju regulatornih procesa, i one vremenski uskladile.

Dominantni nacionalni TK operatori održavaju značajan nivo tržišne penetracije, i na sve načine nastoje uticati na kompleksne regulatorne procese i osporiti ulazak novih operatera na tržište. EP kompanije koje nameravaju ući na TK tržište moraju kontinuirano pratiti i analizirati regulatorne okolnosti, i sa stanovišta telekomunikacija i stanovišta osnovne delatnosti, i održavati korektne odnose i kontakte sa regulatornim telima ovih sektora.

5. ZAKLJUČAK

U toku poslednjih petnaestak godina brojne elektroprivrede širom sveta započinju širenje svoje delatnosti u domenu telekomunikacija van elektroprivrede, kao posledica deregulacije energetskog sektora, i deregulacije i liberalizacije TK tržišta. Stepem deregulacije TK tržišta varira od zemlje do zemlje, ali je prisutan opšti trend ka širenju EP kompanija izvan sopstvene osnovne delatnosti, pružanjem spoljnih komercijalnih TK usluga.

Generalno, elektroprivrede su veoma zainteresovane za iskorišćenje prednosti poslovanja na liberalizovanom TK tržištu, pre svega, zbog mogućnosti povećanja vrednosti akcija, obezbeđivanjem novih usluga i povećanom efikasnošću, kao i generisanja novih izvora prihoda.

U radu su definisana tri modela za ulazak EP kompanija na TK tržište. EP kompaniji koja se odlučila za ulazak na TK tržište, na raspolaganju su svi navedeni modeli. Za koji će se model elektroprivredna kompanija opredeliti, to zavisi od profila kompa-

nije, odnosno od njenih infrastrukturnih, kadrovskih, stručnih i iskustvenih potencijala, kao i od stanja deregulacije EE sektora i stanja na TK tržištu na koji kompanija želi ući.

Poseban značaj ima mogućnost primene PLC tehnologije, kao tehnologije kojom bi se mogle realizovati lokalne mreže i mreže za pristup, koristeći infrastrukturu za isporuku električne energije i kućne električne instalacije. Komercijalna primena ove tehnologije u svetu je još uvek u fazi razvoja, iako postoje određeni primeri eksperimentalne primene u nekim od EP kompanija. Sa daljim razvojem ove tehnologije, kroz rast brzina protoka koje bi mogla podržati, PLC tehnologija bi mogla biti katalizator koji bi omogućio sve masovnije učešće EP kompanija na TK tržištu, i koji bi postojećim alternativnim operatorima rešio problem „pristupa poslednje milje” i omogućio samostalno pružanje usluga krajnjim korisnicima.

6. LITERATURA

- [1] Vujičić I., MODELI ULASKA ELEKTROPRIVREDNIH KOMPANIJA NA TELEKOMUNIKACIONO TRŽIŠTE SA OSVRTOM NA MOGUĆNOSTI ELEKTROPRIVREDE REPUBLIKE SRPSKE, Magistarski rad, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2004.
- [2] Vujičić I., Gospić N., STRATEGIJE ULASKA ELEKTROPRIVREDNIH KOMPANIJA NA TELEKOMUNIKACIONO TRŽIŠTE, XI Telekomunikacioni Forum - TELFOR 2003, rad 7.1., Beograd, novembar 2003.
- [3] Vujičić I., Gospić N., ALTERNATIVNI OPERATORI NA EVROPSKOM TELEKOMUNIKACIONOM TRŽIŠTU, XI Telekomunikacioni Forum - TELFOR 2003, RAD 7.2., Beograd, novembar 2003.
- [4] Gospić N., Vujičić I., UČEŠĆE ELEKTROPRIVREDNIH KOMPANIJA NA EVROPSKOM TELEKOMUNIKACIONOM TRŽIŠTU, Simpozijum o saobraćaju - Savremene strategije razvoja saobraćajnog sistema - Evropa i naša zemlja, rad 2.3. Beograd, jun 2004.,
- [5] Adkins I., STRATEGIES FOR UTILITIES IN THE EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS MARKET, Reuters & Mason Communications, London, 2001.
- [6] Paroški M., PRENOS PODATAKA PREKO VOĐOVA NISKOGRADSKOG NAPONA, Dvadesetšesto savetovanje JUKO CIGRE, Teslić, 25-30. maj 2003.
- [7] ALTERNATIVE NETWORKS IN THE CENTRAL AND EASTERN EUROPEAN COUNTRIES, ISPO - European Commission 2000-2001, november 2000
- [8] TELECOM OPPORTUNITIES FOR ELECTRIC UTILITIES - OVERVIEW, Telecom Power 2000, december 1999. (<http://www.igigroup.com>)

[9] Budde P., UTILITIES AS NETWORK OPERATORS, Submission for the Broadband Advisory group, august 2002. (<http://www.noie.gov.au>)

[10] Lewis A., INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION OPPORTUNITIES FOR POWER UTILITIES, (<http://www.electricityforum.com>)

Rad je primljen u uredništvo 23. 06. 2004. godine



Igor R. Vujičić rođen je 1977. godine u Sarajevu, gde je završio osnovnu školu. Srednju školu je završio u Beogradu. Diplomirao je 1999. godine na Vojnoj akademiji RV i PVO u Beogradu, na odseku za radarsku tehniku. Magistrirao je 2004. godine na Saobraćajnom fakultetu u Beogradu, na odseku za poštanski i telekomunikacioni saobraćaj. Po diplomiranju, radio je kao radarski oficir u Vojsci Republike Srpske, a od 2000. godine zaposlen je u Elektroprivredi Republike Srpske, gde se i sada nalazi na radnom mestu inženjera za dokumentaciju i bazu tehničkih podataka, u ZDP Elektrobijeljina.

Primena metode konačnih elemenata u analizi složenih uzemljivačkih sistema

Originalni naučni rad
UDK: 621.316.99

Rezime:

Metoda konačnih elemenata predstavlja moćan alat za rešavanje vektorskih polja. Kada su u pitanju složeni uzemljivački sistemi, primena metode konačnih elemenata vrlo je otežana zbog velike razlike u dimenzijama poprečnog preseka konstruktivnih elemenata (trake i vertikalne sonde) uzemljivača. U ovom radu se za praktične analize uzemljivačkih sistema sa stacionarnom strujom odvođenja predlaže modelovanje tankih provodnika pomoću nizova ekvidistantnih nodalnih tačaka i prikazuju rezultati verifikacije predložene metode.

Ključne reči: metoda konačnih elemenata, modelovanje, nehomogeno tlo, 3D, asimetričnost, razvodno postrojenje, uzemljivač

Abstract:

COMPLEX GROUNDING SYSTEMS ANALYSIS USING FINITE ELEMENT METHOD

The Finite Element Method (FEM) is a powerful tool for vector fields solving. Because of large difference in dimensions of grounding electrode conductors' cross-sections and lengths, using of FEM in complex grounding systems analysis can be very difficult. Modeling of the grid conductors by closely spaced equipotential nodal sources is proposed and some results of the method verification are presented.

Key words: finite element method, modeling, non-uniform soil, 3D, asymmetry, substation, grounding electrode

1. UVOD

Metoda konačnih elemenata za analizu različitih fizičkih problema razvija se od 40-ih godina prošlog veka tako da je danas raspoloživo više sofisticiranih kompjuterskih programa čija je primena relativno lagodna i koja može biti čak i u grafičkom korisničkom okruženju. Zato predmet ovog rada nije matematičko modelovanje analiziranih sistema, već mogućnost primene postojećih komercijalnih programa za analizu praktičnih problema iz oblasti

uzemljenja. Ovde se problem stacionarnog strujnog polja rešava dobro razvijenim tehnikama za rešavanje elektrostatičkog problema, koje koriste komercijalni programi.

Fizički sistemi koji su predmet ovog rada mogu se svrstati u kategoriju složenih sistema opšte (proizvoljne) geometrije u beskonačnoj provodnoj sredini sa proizvoljnom geometrijom. Složeni uzemljivači, mrežasti i kombinovani sa vertikalnim sondama, predstavljaju strujne izvore opšte trodimenzionalne geometrije.

Isti se posmatraju u nehomogenoj sredini koja se sastoji od više izotropnih oblasti, međusobno različitim specifičnim otpornosti. Ove oblasti su takođe proizvoljne trodimenzionalne geometrije i mogu biti (konačne ili) beskonačne po jednoj, dve ili sve tri dimenzije.

1.1. Osnove za primenu predloženog pristupa

Prilikom rešavanja problema iz oblasti uslova bezbednosti u razvodnom postrojenju od primarnog interesa je određivanje otpora rasprostiranja uzemljivača odnosno raspodele potencijala (napona okca i koraka) na tlu prilikom zemljospoja u razvodnom postrojenju.

Iz literature [2,3] je poznato da za tipične uzemljivače (dimenzije uzemljivača, dijametar provodnika, dubina ukopavanja, specifični otpor tla) dijametar provodnika uzemljivača ima sekundaran uticaj na veličinu karakterističnih parametara: otpor rasprostiranja uzemljivača, napon koraka i napon perifernog okca, odnosno napon dodira.

1.1.1. Problem velikih razlika u dimenzijama

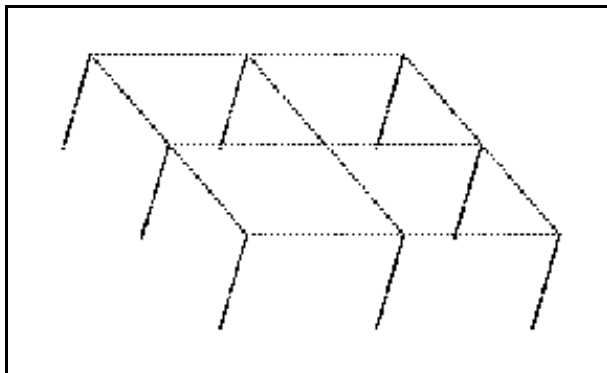
Sa aspekta modelovanja konačnim elementima, konstitutivni elementi uzemljivača, metalne trake i sonde, spadaju u red najsloženijih oblika, zbog velike razlike (do više hiljada puta) između dimenzija njihovog poprečnog preseka i njihove dužine. Situacija se vrlo otežava kada se radi o složenoj kombinaciji takvih elemenata (provodničke trake i sonde).

Ako se ima u vidu još i složenost geometrije i beskonačnost provodne sredine (tla), modelovanje uzemljivačkih sistema na klasičan način, podelom na konačne elemente, može postati nemoguće, sa aspekta potrebnih računarskih resursa i potrebnog računarskog vremena.

Problemi su vezani za ispunjavanje sledećih oprečnih zahteva: 1) dobar kvalitet konačnih elemenata, 2) što manji broj konačnih elemenata, 3) potreba za modelovanjem beskonačnosti (nehomogene) provodne sredine, odnosno graničnih uslova na spoljašnjim granicama modela.

Ispunjavanje sva tri zahteva vodi velikom broju konačnih elemenata, odnosno jednačina sistema koje treba jednovremeno rešiti.

Ovde se, radi prevazilaženja navedenih problema, predlaže jedan, za metodu nespecifičan, način modelovanja uzemljivačkih sistema tako što se tanki dugački provodnici modeluju nizovima nodalnih tačaka sa dovoljno malim rastojanjem između njih (slika 1).



Slika 1. Modelovanje uzemljivača definisanjem ograničenja stepena slobode potencijal u nodalnim tačkama koje svojim položajem obrazuju konturu uzemljivača

1.1.2. Analogija između problema stacionarnog strujnog polja i problema elektrostatičkog polja

Odavno je poznata [1] analogija između stacionarnog strujnog polja u delovima homogene provodne sredine i elektrostatičkog polja u homogenom dielektriku u kome nema slobodnih električnih opterećenja. Takođe je poznato da su granični uslovi na razdvojnoj površini dveju provodnih sredina različitih provodnosti formalno identični sa odgovarajućim graničnim uslovima za elektrostatičko polje, ako se vektor gustine električne struje \underline{J} zameni vektorom električnog pomeraja \underline{D} a specifična provodnost \underline{s} dielektričnom permitivnošću $\underline{\epsilon}$.

U ovom radu se umesto stacionarnog strujnog polja nastalog odvođenjem stacionarne struje sa uzemljivača posmatra ekvivalentno elektrostatičko polje, odnosno problem trodimenzionalnog stacionarnog strujnog polja rešava se kao njemu analogni problem elektrostatičkog polja.

1.1.3. Prilaz zadavanja ograničenja stepena slobode električni potencijal na ekvidistantnim nodalnim tačkama koje modeluju linijske provodnike

Klasičan prilaz modelovanju konačnim elementima bio bi mrežom konačnih elemenata sa definisanim izotropnim (!) osobinama materijala. Dimenzije ovih elemenata bile bi izuzetno mnogo manje od ukupne oblasti koju treba modelovati što bi, praktično, onemogućilo primenu metode konačnih elemenata, pre svega zbog potrebe za izuzetno velikim brojem konačnih elemenata, u slučaju analiziranja složenih uzemljivačkih sistema.

Međutim, kada se problem analizira kao njemu analogni elektrostatički, otvorena je mogućnost sledećeg prilaza:

Uzemljivački sistem, kao metalni objekat, ima ekvipotencijalnu površinu. Kada se posmatra raspodela potencijala u tlu oko uzemljivača, prilike se neće promeniti ukoliko se, misaonim eksperimentom, na graničnoj površini uzemljivač–tlo definiše potencijal uzemljivača a sam uzemljivač ukloni i/ili zameni zemljom.

Sada se može pribeći sledećem koraku koji je ključni:

Linijski, tj. dugački, tanki provodnici uzemljivača aproksimativno su modelovani nizovima bliskih ekvidistantnih ekvipotencijalnih nodalnih tačaka, tako razmeštenih u prostoru da formiraju konturu uzemljivača koji se analizira, kao na slici 1.

Pri tome, čitava oblast od interesa, kao i nodalne tačke koje modeluju uzemljivač, imaju električne osobine tla.

2. VERIFIKACIJA METODE

Verifikacija metode za potrebe ovog rada izvršena je nizom provera od kojih su neke prikazane u daljem tekstu:

A) *Poređenje sa teorijski tačnim rezultatom:*

Rešavanjem uzemljivača oblika čiji se otpor rasprostiranja može odrediti egzaktno pomoću matematičke formule.

B) *Poređenje sa raspoloživim računskim i eksperimentalnim rezultatima*

Poređenje sa rezultatima drugih metoda

Poređenje sa Kochovim eksperimentalnim rezultatima [2] dobijenim u elektrolitskoj kadi.

C) *Eksperimentalna provera merenjem u elektrolitskoj kadi.*

Poređenje sa vlastitim mernim rezultatima dobijenim u elektrolitskoj kadi u laboratoriji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu.

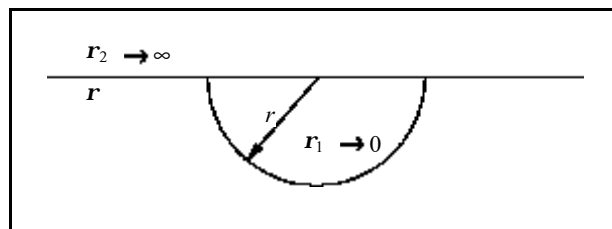
2.1. Otpor rasprostiranja uzemljivača oblika polusfere

Otpor rasprostiranja uzemljivača oblika polusfere, radijusa r , ukopanog kao na slici 2 u homogeno tlo specifične otpornosti r , može se tačno izračunati pomoću formule:

$$R = \frac{1}{2r} \quad (1)$$

Metodom konačnih elemenata određen je [4] otpor rasprostiranja uzemljivača oblika polusfere radijusa $r = 1$ m, ukopanog u homogeno tlo specifičnog otpora $r = 100 \Omega\text{m}$.

Čitav model sadržao je 30 000 elemenata sa 50 000 nodalnih tačaka. Uvažen je efekat slabljenja polja sa udaljenošću. Model je rešavan kao i svi u



Slika 2. Uzemljivač oblika polusfere u homogenom tlu

ovom radu zadavanjem konstantnog potencijala na nodalnim tačkama uzemljivača (10 864 tačaka).

Rešavanjem ovog jednostavnog 3D modela sa relativno malim brojem konačnih elemenata za otpor rasprostiranja dobijena je vrednost $R_{FEM} = 15,894 48 \Omega$ koja se od tačne vrednosti, prema (1), razlikuje za svega 0,13 %.

Na osnovu ovog poređenja, može se zaključiti jedino to da metoda konačnih elemenata može dati izuzetno tačne rezultate za otpor rasprostiranja uzemljivača.

U ovom radu analizirani su mrežasti uzemljivači koji se, kao kombinacija dugačkih tankih provodnika u jednoj ravni, bitno razlikuju od rešavanog polusferičnog – kako po obliku tako i sa aspekta modelovanja, o čemu je bilo reči ranije. O validnosti rezultata dobijenim za realne mrežaste uzemljivače više govore naredna poređenja.

2.2. Poređenje rezultata analiza metodom konačnih elemenata sa raspoloživim rezultatima drugih metoda

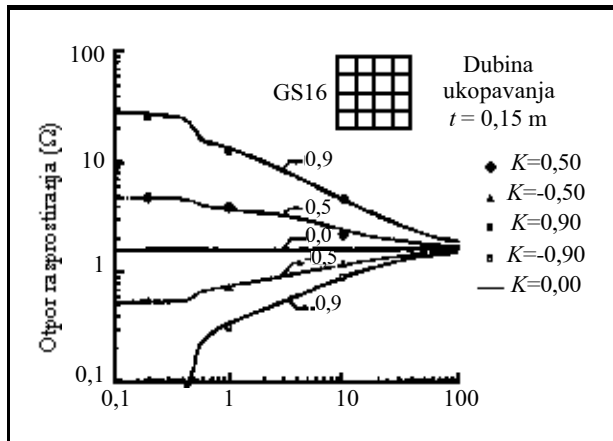
Autori su za potrebe drugih radova [6,7,8] izveli više stotina analiza različitih tipova uzemljivača u homogenom i različitim strukturama višeslojnog tla. U najvećem broju slučajeva rastojanje između nodalnih tačaka kojima su modelovani provodnici uzemljivača bilo je $A/192$ gde je A dužina provodnika. Izvršeno je poređenje otpora rasprostiranja dobijenih metodom konačnih elemenata na predloženi

Tabela 1.

Poređenje otpora rasprostiranja uzemljivača u homogenom tlu specifične otpornosti $r = 100 \Omega\text{m}$

Mreža	A	t	R_1	R_{FEM}	Odnos R_1 / R_{FEM}
	(m)	(m)	(Ω)	(Ω)	
GS4	10	0,5	4,689	4,672	1,00
GS16	10	0,5	4,460	4,289	1,04
GS16	50	0,5	1,022	0,969	1,05
GS64	50	0,5	0,913	0,902	1,01
GS64	100	0,5	0,472	0,459	1,03
GS256	100	0,5	0,424	0,440	0,96

način sa rezultatima dobijenim kompletnim računarskim modelovanjem, primenom dva različita računarska programa (ETF Beograd i EPRI [2,3,5]). U tabeli 1 dati su neki od rezultata za homogeno tlo za uzemljivače kvadratnih oblika sa 4, 16, 64 i 256 okaca ukopanih na dubinu t . Tu su sa R_1 označeni otpori rasprostiranja dobijeni pomoću računarskog programa razvijenog na ETF Beograd [5] a sa R_{FEM} otpori dobijeni metodom konačnih elemenata.



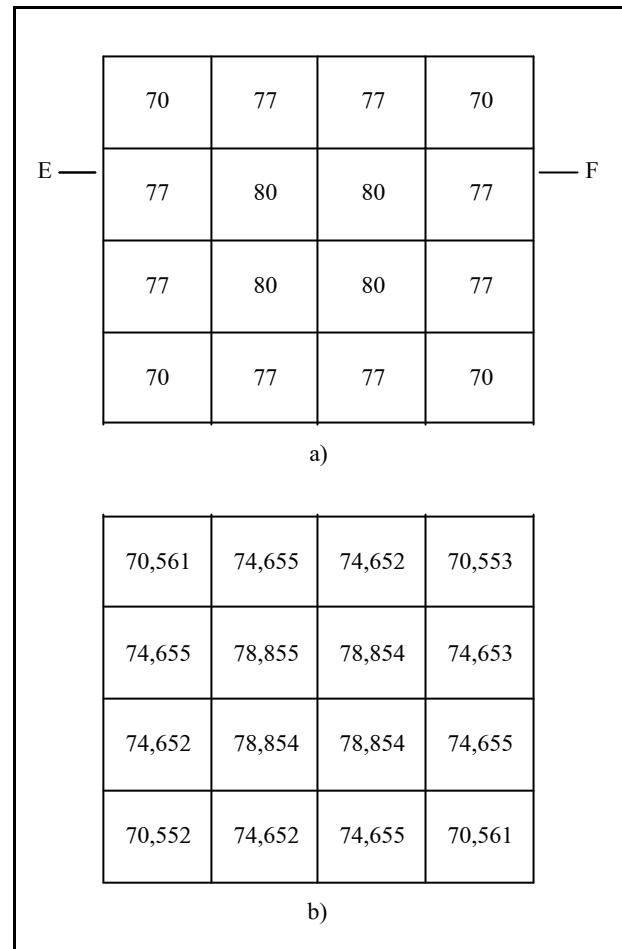
Slika 3. Poređenje rezultata za slučaj kvadratne mreže sa 16 okaca u uniformnom i dvoslojnom tlu

Na slici 3 dato je poređenje rezultata dobijenih na predloženi način sa rezultatima raspoloživim u [3] za neke slučajeve kvadratnog mrežastog uzemljivača GS16 sa 16 okaca, stranica $A=30$ m, ukopanog na dubinu $t = 0,5$ m u tlo ekstremne dvoslojne neuniformnosti. Koeficijent refleksije na slici 3 definisan je kao $K = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1}$, gde su r_1 i r_2 specifične otpornosti gornjeg i donjeg sloja, respektivno. Na osnovu poređenja sa raspoloživim računskim podacima dobijenim drugim metodama može se zaključiti da otpori rasprostiranja dobijeni metodom konačnih elemenata za mrežaste uzemljivače ukopane u homogeno i višeslojno tlo imaju praktičnu upotrebnu vrednost bar na nivou tačnosti drugih metoda.

2.3. Poređenje rezultata analiza metodom konačnih elemenata sa Kochovim merenjima u elektrolitskoj kadi

Za kontrolu tačnosti rezultata metode najvalidnije je poređenje sa mernim rezultatima, kada su ovi raspoloživi. Ovde se sa rezultatima Kochovih ispitivanja u elektrolitskoj kadi [2,3] porede rešenja dobijena metodom konačnih elemenata na modelima istih topografija kao kod Kochovih eksperimenata. Koch je, naime, izvršio merenja na modelima različite topografije, a oblika kvadrata stranica 120 mm

koji su bili postavljeni na površini elektrolita i modelovali su uzemljivače stranica 13,8 m na površini tla.



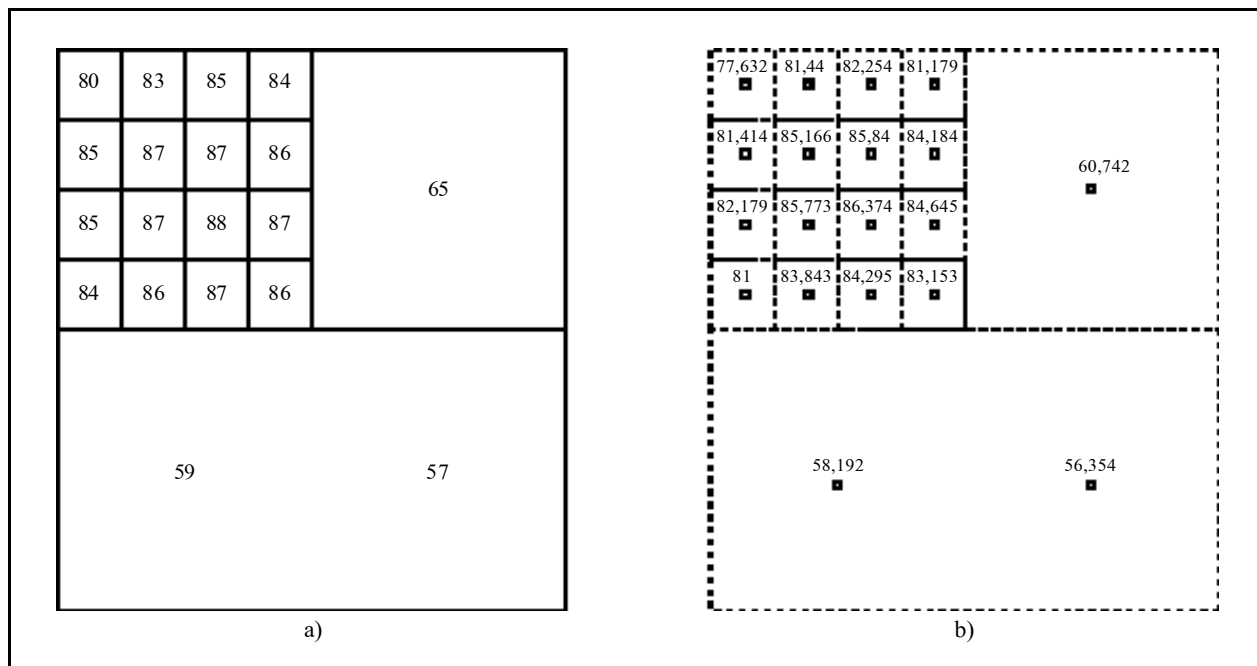
Slika 4. Kochov uzemljivač sa slike 4 iz [2,3]

a) Izmereni potencijal,
b) Potencijal određen metodom konačnih elemenata

2.3.1. Modeli

Uzemljivačke mreže identičnih topografija kao kod Kochovih ispitivanja, istih dimenzija $A=B=13,8$ m, na površini beskonačnog homogenog tla, modelovane su kao i sve mreže u ovom radu nizovima ekvidistantnih nodalnih tačaka na međusobnom rastojanju 8,62 cm. Ukupno je, u čitavom modelu, bilo 137 000 konačnih elemenata sa 262 500 nodalnih tačaka.

Raspodela potencijala (slike 4, 5 i 6) dobijena metodom konačnih elemenata (slike 4 i 5, sa indeksom b)) data je na isti način kao što su u [2,3] prikazani Kochovi merni rezultati (slike 4 i 5, sa indeksom a)). Na slici 6 prikazano je poređenje rezultata za mreže sa 1, 4, 16 i 64 okaca za pravce koji polove okca uz središnji provodnik navedenih simetričnih mreža (Kao na primer pravac $E-F$ na slici 4 odnosno pravac $A-A'$ na slici 7).

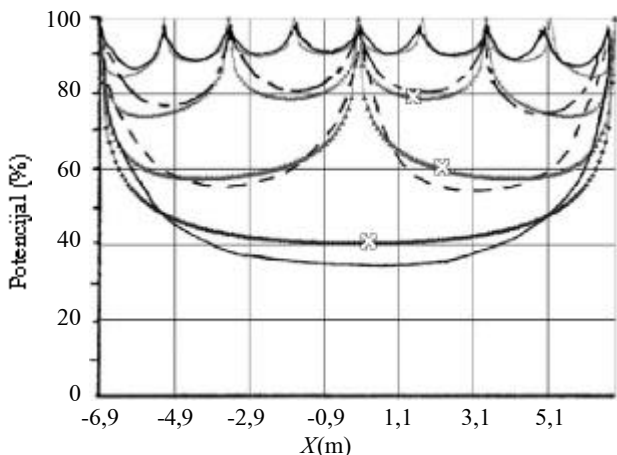


Slika 5. Kochov uzemljivač sa slike 7 iz [2,3]
a) Izmereni potencijal, b) Potencijal određen metodom konačnih elemenata

Može se zaključiti da se raspodela potencijala dobijena metodom konačnih elemenata odlično slaže sa Kochovim eksperimentalnim rezultatima.

2.4. Ispitivanja u elektrolitskoj kadi na ETF Beograd

Od interesa za inženjersku praksu su i uzemljivački sistemi u nehomogenim provodnim sredinama koje sadrže diskontinuitete sa različitim prostornim položajem i oblikom razdvojenih površina između različito provodnih sredina, odnosno između provodne i neprovodne sredine [6,7,8].



Slika 6. Raspodele potencijala po pravcima [2,3] Neobeležene linije: Kochovi merni rezultati; Obeležene linije: Raspodele određene metodom konačnih elemenata

Stoga je smatrano potrebnim vršenje merenja na modelima koji pored uzemljivača sadrže i određene diskontinuitete u provodnoj sredini. Ovi eksperimenti dali bi informacije o pravilnosti obuhvatanja graničnih uslova metodom konačnih elemenata.

U Laboratoriji za visoki napon Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu izvršen je niz eksperimenata u elektrolitskoj kadi od kojih su ovde predstavljene sledeći:

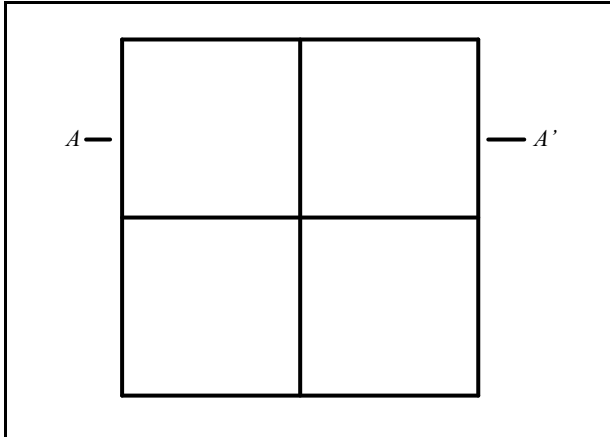
- Raspodela potencijala na tlu, iznad uzemljivača
- Neprovodna barijera u blizini uzemljivača. Raspodela potencijala na tlu, ispred i iza barijere
- Okno u blizini uzemljivača. Raspodela potencijala na zidovima okna.

2.4.1. Raspodela potencijala na tlu, iznad uzemljivača

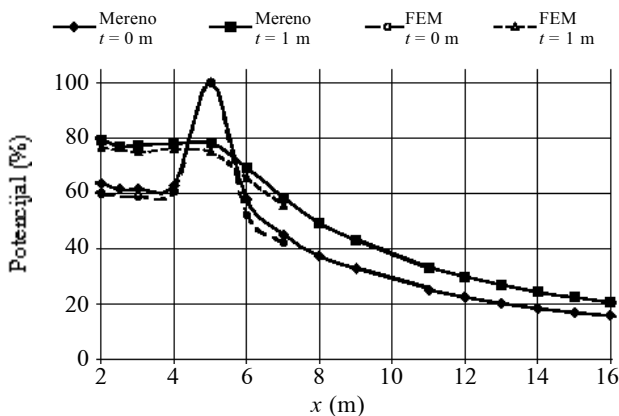
Metalna elektrolitska kada oblika cilindra dijametra 96 cm napunjena je vodom do visine $H_v=31$ cm. U njenom središtu postavljen je model uzemljivača tipa GS4, dimenzija $A=100$ mm, dijametra provodnika 0,7 mm. Usvojena je razmera modela 1:100 i izvršena su merenja koja odgovaraju različitim dubinama ukopavanja uzemljivača. Pomoću, u laboratoriji postojećeg cilindričnog konduktometra, izmerena je specifična otpornost vode koja je iznosila $18,9 \Omega\text{m}$.

Merena je raspodela potencijala na pravcu A-A' prikazanom na slici 7.

Na slici 8 grafički su prikazani rezultati merenja (puna linija) i rezultati dobijeni metodom konačnih elemenata (isprekidana linija) za dve dubine ukopavanja uzemljivača, $t = 0$ m i $t = 1$ m, u beskonačno homogeno tlo. U oba slučaja može se konstatovati dobro slaganje mernih i računskih rezultata raspodele potencijala, sa razlikom do 5 % potencijala uzemljivača u čitavoj prikazanoj prostornoj oblasti.



Slika 7. Pramac na kojem je posmatrana raspodela potencijala uzemljivača GS4

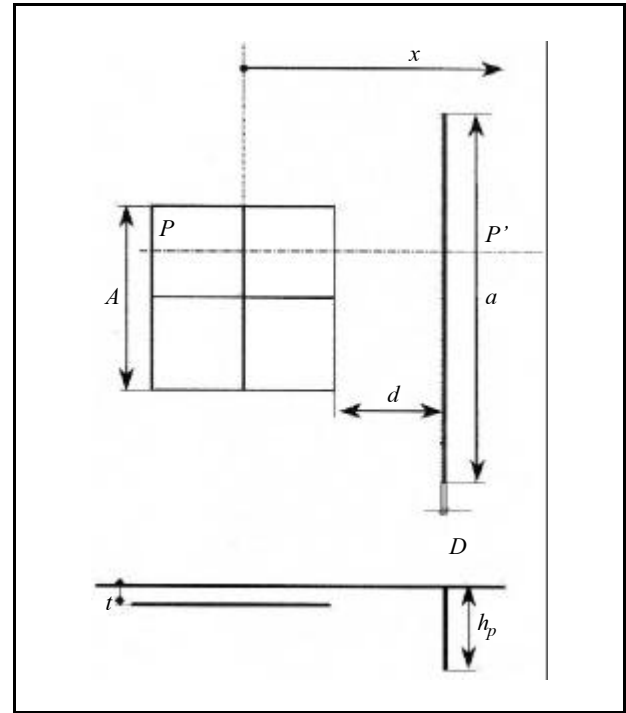


Slika 8. Izmerene i izračunate raspodele potencijala na tlu, na pravcu A-A' definisanom na slici 7, za dve dubine ukopavanja

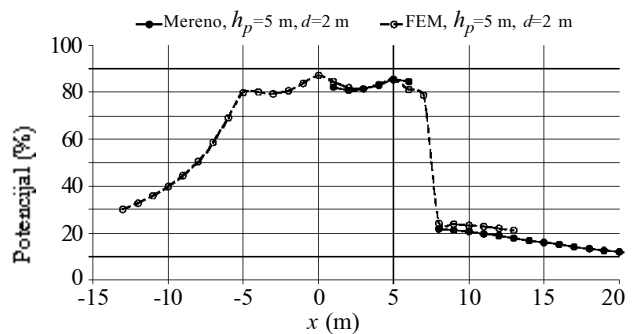
2.4.2. Neprovodna barijera u blizini uzemljivača. Raspodela potencijala na tlu, ispred i iza barijere

Neprovodna, gumena barijera dimenzija 20 cmx15 cmx0,5 cm postavljena je paralelno sa stranicom istog modela uzemljivača GS4 na rastojanju d , kao na slici 9. Dubina potapanja barijere je h_p i primala je vrednosti 5 cm i 10 cm dok je rastojanje d bilo 2 cm i 5 cm. Dubina potapanja uzemljivača bila je 1 cm. Razmera modela je 1:100. Mere-

na je raspodela potencijala na pravcu P-P' prikazanom na slici 9. Na slici 10 prikazani su neki od rezultata merenja (puna linija) i rezultati dobijeni metodom konačnih elemenata (isprekidana linija) za jednu od kombinacija gore navedenih dubina h_p i udaljenosti x .



Slika 9. Neprovodna barijera, dimenzija $a=20$ cm, $h \in \{5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}\}$ i $D=0,5$ cm, u blizini uzemljivača GS4, stranice $A=10$ cm, „ukopanog“ na dubinu $t=1$ cm



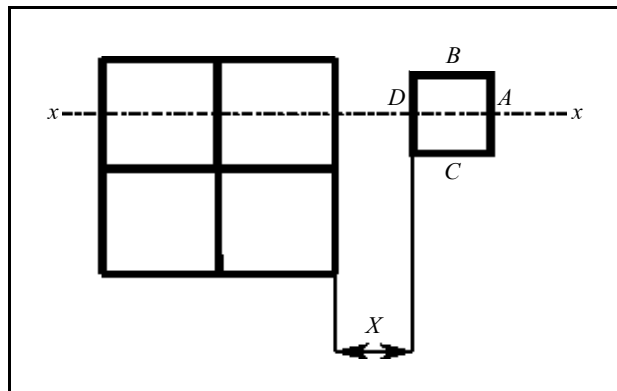
Slika 10. Izmerena i metodom konačnih elemenata izračunata raspodela potencijala na pravcu P-P' za $h_p=5$ m i $d=2$ m

I u eksperimentima sa neprovodnom barijerom konstatovano je dobro slaganje računskih i izmerenih potencijala.

2.4.3. Okno u blizini uzemljivača.

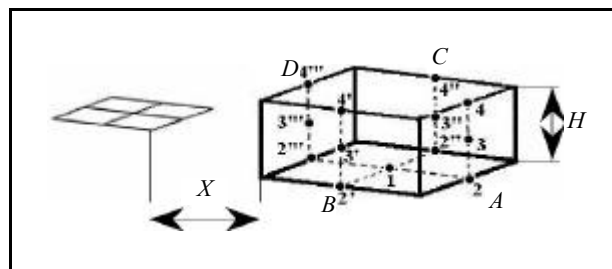
Raspodela potencijala na zidovima okna

Model okna dimenzija dna $2,4 \text{ cm} \times 2,4 \text{ cm}$ i dubine $H=2,1 \text{ cm}$ nalazi se na rastojanju X od uzemljivača $GS4$ dimenzija $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, dijametra provodnika $d=0,7 \text{ mm}$, koji je na dubini $t=1 \text{ cm}$. Situacija je prikazana na slici 11.



Slika 11. Okno na udaljenosti X od uzemljivača

Za tri rastojanja $X=\{0, 2 \text{ cm}, 5 \text{ cm}\}$ meren je potencijal na dnu (1) i na svakoj bočnoj stranici okna: A, B, C, D , na donjoj ivici (2), na polovini dubine okna (3) i na površini vode (4). Slika 12 objašnjava



Slika 12. Pozicije mernih tačaka

va pozicije mernih tačaka. Usvojena je razmera 1:100.

Rezultati merenja prikazani su u tabeli 2. Tabela 2 prikazuje izmerene potencijale i merne struje odvođenja J_g (mA) dok su tabelom 3 prikazani isti rezultati svedeni na $J_g = 100 \text{ mA}$ i izraženi u procentima potencijala uzemljivača ($V_g = 10,45 \text{ V}$) izmerenog pri struji odvođenja $J_g = 100 \text{ mA}$.

U tabeli 4 dati su rezultati, takođe u procentima napona uzemljivača, dobijeni metodom konačnih elemenata.

U tabeli 5 date su procentualne razlike mernih rezultata od računskih u procentima potencijala uzemljivača a u tabeli 6 su date ove razlike u odnosu na ispitivane vrednosti uzete za osnovu.

Na osnovu prikazanih rezultata ponovo se konstatuje dobro slaganje mernih i računskih rezultata.

Tabela 2.

Izmereni potencijali uzemljivača V_g pri navedenim strujama odvođenja J_g

Merna pozicija	Merna veličina	$X=0 \text{ cm}$				$X=2 \text{ cm}$				$X=5 \text{ cm}$			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	J_g (V)	5,11	5,63	5,36	*	4,35	4,30	4,40	4,25	3,17	3,29	3,30	3,33
	J_g (mA)	100	105	100	*	100	100	97	97	95	95	95	95
2	V_g (V)	4,53	5,44	5,82	*	3,72	4,20	4,39	5,55	2,90	3,23	3,23	4,00
	J_g (mA)	100	101	100	*	100	100	97	97	95	95	95	95
3	V_g (V)	4,51	6,30	7,00	*	3,55	4,6	4,90	6,50	2,70	3,30	3,40	4,30
	J_g (mA)	102	105	105	*	100	100	97	96	95	95	95	95
4	V_g (V)	4,61	6,50	7,20	*	3,55	4,70	5,10	7,20	2,70	3,34	3,43	4,38
	J_g (mA)	103	105	105	*	100	102	97	103	95	95	95	95

Tabela 3.

Izmerene raspodele potencijala u procentima potencijala uzemljivača

Merna pozicija	$X=0 \text{ cm}$				$X=2 \text{ cm}$				$X=5 \text{ cm}$			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	48,900	53,876	51,292	*	41,627	41,148	42,105	40,67	30,335	31,483	31,579	31,866
2	43,349	52,057	55,694	*	35,598	40,191	42,01	53,11	27,751	30,909	30,909	38,278
3	43,158	60,287	66,986	*	33,971	44,019	46,89	62,201	25,837	31,579	32,536	41,148
4	44,115	62,201	68,900	*	33,971	44,976	48,804	68,900	25,837	31,962	32,823	41,914

Tabela 4.

Procentualne raspodele potencijala dobijene metodom konačnih elemenata

Merna pozicija	X=0 cm				X=2 cm				X=5 cm			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	51,015	51,015	51,015	51,015	43,902	43,902	43,902	43,902	33,511	33,511	33,511	33,511
2	43,582	51,49	56,057	64,329	37,552	42,877	46,315	55,27	29,493	32,748	34,576	39,497
3	42,281	56,247	63,43	100,00	35,974	44,07	49,369	65,019	28,334	32,962	35,673	43,243
4	42,318	56,949	64,734	81,713	35,867	44,576	50,188	67,27	28,217	33,099	35,947	44,000

Tabela 5.

Procentualna razlika mernih od računskih rezultata izraženo u odnosu na potencijal uzemljivača kao osnovu

Merna pozicija	X=0 cm				X=2 cm				X=5 cm			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	2,115	2,861	0,277	*	2,275	2,754	1,797	3,232	3,176	2,028	1,932	1,645
2	0,233	0,567	0,363	*	1,954	2,686	4,305	2,16	1,742	1,839	3,667	1,219
3	0,877	4,04	3,556	*	2,003	0,051	2,479	2,818	2,497	1,383	3,137	2,095
4	1,797	5,252	4,166	*	1,896	0,4	1,384	1,63	2,38	1,137	3,124	2,086

Tabela 6.

Procentualna razlika mernih od računskih rezultata izraženo u odnosu na ispitivane vrednosti kao osnove

Merna pozicija	X=0 cm				X=2 cm				X=5 cm			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	4,325	5,31	0,54	*	5,465	6,693	4,268	7,947	10,47	6,442	6,118	5,162
2	0,537	1,089	0,652	*	5,489	6,683	10,25	4,067	6,277	5,95	11,86	3,185
3	2,032	6,701	5,31	*	5,896	0,116	5,287	4,53	9,664	4,379	9,642	5,091
4	4,073	8,444	6,05	*	5,581	0,889	2,836	2,366	9,212	3,557	9,518	4,977

3. ZAKLJUČAK

U ovom radu se za rešavanje složenih uzemljivačkih sistema u asimetričnom nehomogenom tlu, za slučaj stacionarnih režima, pomoću metode konačnih elemenata, predlaže rešavanje ekvivalentnog elektrostatičkog problema i to modelovanjem tankih provodnika pomoću ekvidistantnih ekvipotencijalnih nodalnih tačaka.

Na osnovu niza provera: poređenjem sa egzaktnim rezultatima, rezultatima drugih metoda i mernih rezultatima za homogenu i višeslojno tlo, kao i sa rezultatima dobijenim merenjem u elektrolitskoj kadi za različite geometrije trodimenzionalne prostorne nehomogenosti tla, zaključuje se da se predloženim postupkom za otpor rasprostiranja i raspodelu potencijala na tlu i u tlu dobijaju rešenja čija je tačnost zadovoljavajuća za inženjersku praksu.

Predloženi postupak bitno smanjuje računarsko vreme i potrebne računarske resurse.

4. LITERATURA

- [1] J. Surutka, ELEKTROMAGNETIKA, Građevinska knjiga, Beograd, 1986.
- [2] IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING, IEEE STD. 802000.
- [3] GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING, ANSI/IEEE STD. 801986.
- [4] I. Paunović, PRIMENA METODE KONAČNIH ELEMENATA PRI PROJEKTOVANJU UZEMLJIVAČA, 25. Savetovanje JUKO CIGRE, R2311, Herceg Novi, 2001, Zbornik radova.
- [5] J. Nahman, V. Đorđević, D. Salamon, IZRAZI ZA OTPORNOST RASPROSTIRANJA UZEMLJIVAČA U HOMOGENOM TLU I KOREKCIONI FAKTORI ZA NEHOMOGENO TLO, R2312, 25.

- Savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi, 2001, Zbornik radova.
- [6] I. Paunović, J. Nahman, UTICAJ LOKALNIH NEHOMOGENOSTI KONAČNIH DIMENZIJA U HOMOGENOM TLU NA KARAKTERISTIKE UZEMLJIVAČKIH SISTEMA I USLOVE BEZBEDNOSTI, R2307, JUKO CIGRE, 26. Savetovanje, Teslić, maj 2003.
- [7] J. Nahman, and I. Paunovic, SAFETY CONDITIONS IN MANHOLES IN THE VICINITY OF SUBSTATIONS, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, July 2003, p. p. 758761.
- [8] J. Nahman, and I. Paunovic, RESISTANCE TO EARTH OF EARTHING GRIDS BURIED IN MULTILAYER SOIL, IEE Proc. PtC, submitted

Rad je primljen u uredništvo 23. 06. 2004. godine



***Ivica Paunović** diplomirao je 1992. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Skoplju, na Elektroenergetskom odseku. Zvanja magistar i doktora nauka stekao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1997, odnosno 2003. godine. Od 1992. godine zaposlen je u JP „Đerdap”, Kladovo*



***Jovan Nahman** diplomirao je 1960. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Energetskom odseku. Zvanje doktora nauka stekao je na istom fakultetu 1969. godine. Do 2001. godine radio je kao nastavnik na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Kao redovni profesor u penziji izvodi nastavu na postdiplomskim studijama na Elektrotehničkom fakultetu.*

Nikola Miladinović

Standardi Međunarodne Elektrotehničke Komisije za jedinstvenu arhitekturu podataka, komunikacija i aplikacija u restrukturiranim elektroenergetskim sistemima

Pregledni rad
UDK: 621.3.05; 621.31; 621.391

Rezime:

Donošenje savremenih standarda za upravljanje i razmenu informacija u elektroenergetskim delatnostima je internacionalni strateški proces koji se odvija uz visok stepen kooperacije i koordinacije velikog broja institucija i učesnika u vezi sa tim delatnostima.

Konceptualna novost u tom strateškom pristupu je da on kroz niz spregnutih standarda Međunarodne Elektrotehničke Komisije razrađuje i promovise kompletnu komunikacionu arhitekturu od izvora podataka do raznovrsnih profila aplikacija, pod akronimom SCA (Seamless Communication Architecture - komunikaciona arhitektura bez barijera). U tim standardima, oslanjajući se na potencijale najnaprednijih softverskih i hardverskih metodologija i tehnologija, definiše se jedinstvena informaciona osnova za sve procese i aktivnosti, počev od automatskog upravljanja, pa do poslovnih i tržišnih funkcija na nivou regiona. Time se proširuju tradicionalni koncepti upravljanja i razmene informacija u elektroenergetskim kompanijama i sistemima i omogućuje usklađivanje sa globalnim zahtevima i trendovima u obavljanju svih funkcija. Pri tome se ne zanemaruju ni aspekti migracije od postojećeg stanja ka novim rešenjima.

U ovom radu se prikazuju glavni ciljevi i struktura te familije standarda, primenjene metode i alati, i dokle se došlo u njihovoj realizaciji i primeni. Cilj rada je da pomogne domaćoj stručnoj javnosti da se upozna sa tim novim pristupima i metodama i da se što pre organizovano krene u njihovu praktičnu realizaciju i primenu, jer je to veliki i izazovan posao, koga bi trebalo u dobroj meri obavljati vlastitim znanjem i snagama.

Ključne reči: restrukturirano tržište energije, efikasni složeni sistemi, standardizovana informaciona infrastruktura

Abstract:

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION STANDARDS FOR COMMON ARCHITECTURE OF DATA, COMMUNICATIONS AND APPLICATIONS IN RESTRUCTURED ELECTRIC POWER SYSTEMS

Making contemporary standards for information management and exchange in electric energy activities is an international strategic process, with high degree of cooperation and coordination between large number of included institutions and participants.

Conceptual innovation in that strategic approach is that it works out and promotes, through a series of coupled IEC standards, complete communication architecture from data source to different application profiles, under acronym SCA (Seamless Communication Architecture). In those standards, based on potentials of most advanced software and hardware methodologies and technologies is defined common

Nikola Miladinovic, dipl. ing. - JP Elektroprivreda Srbije - Centar za integralni informacioni sistem, 11 000 Beograd, Vojvode Stepe 412

information basis for all processes and activities, starting from automatic control, up to business and market functions at regional level. Thereby traditional concepts of control and information exchange in electric power companies and systems are expanded and harmonization with global requirements and trends in execution of all functions is enabled. Also, aspects of existing state to new solutions are not ignored.

This paper presents main goals and structure of that family of standards, together with applied methods and tools, and how far has their realisation and application gone. The paper aims to help domestic specialists to familiarize with those new approaches and methods and to begin as soon as possible their organized practical realization and application, for it is a big and challenging task, which should to a great extent be performed by means of our own knowledge and forces.

Key words: restructured energy market, efficient complex systems, standardized information infrastructure

1. UVOD

U današnje vreme je međuzavisnost između političko-ekonomskih kretanja i tehnološke infrastrukture često mnogo veća nego što se uviđa. To se pokazalo i u slučaju uvođenja nove tržišne i antimonopolski orijentisane zakonske regulative, nezavisnih regulatornih institucija i nezavisnih operatora u poslovanje elektroenergetskih kompanija u mnogim delovima sveta, dok će se kod nas to tek uočavati. Zbog neodgovarajuće tehnološke infrastrukture i nedovoljnog razumevanja osnovnih ciljeva, ni u razvijenim zemljama se ti procesi ne odvijaju bez problema, nego nailaze na nedoumice, skepse, pa i osporavanja. U sistemima koji su krenuli tim putem desilo se više krupnih poremećaja, kao što su kaskadni raspad u nekoliko velikih povezanih sistema, bankrotstva nekih velikih kompanija, nedopustiva skakanja cena, organizaciona restrukturiranja i smanjivanje broja zaposlenih, što je sve nekima izgledalo kao niz ubedljivih argumenata protiv tih procesa.

Međutim, opšta ideja iza tih procesa je **stvaranje savršenijih složenih sistema**, u kojima nema koncentrisanih funkcija u monopolskim koalicijama, nego se podstiče nezavisnost i konkurencija u izvršavanju mnogih funkcija i servisa, uz istovremeno obezbeđivanje potpunosti i kvaliteta sistema kao celine. Tu je, dakle, u prednjem planu *koordinirano unapređivanje mnogobrojnih funkcija i servisa*, dok je tek u drugom planu - razvoj kompanija i njihovih profita. Tako se, npr., kampanja američke regulatorne agencije za energiju oko izrade Standardnog Modela Tržišta vodi pod motom: „Cilj je da se naprave tržišta koja rade za potrošače.” Takvi novi ekonomski i društveni koncepti i modeli ne mogu se osporavati sa aspekta dugoročne perspektive. Mogu biti sporni samo načini na koje se oni na kratkoročnom planu realizuju, jer se usled njihove suptilnosti i kompleksnosti pri toj realizaciji mogu pojavljivati mnogi nedostaci, previdi i teškoće. Za njihovo izbegavanje i savladavanje neophodno je potpunije razumevanje tih procesa, kao i korišćenje adekvatnih metoda i alata, koji omogućuju smanjivanje rizika i

grešaka u tim procesima i bržu realizaciju novih rešenja.

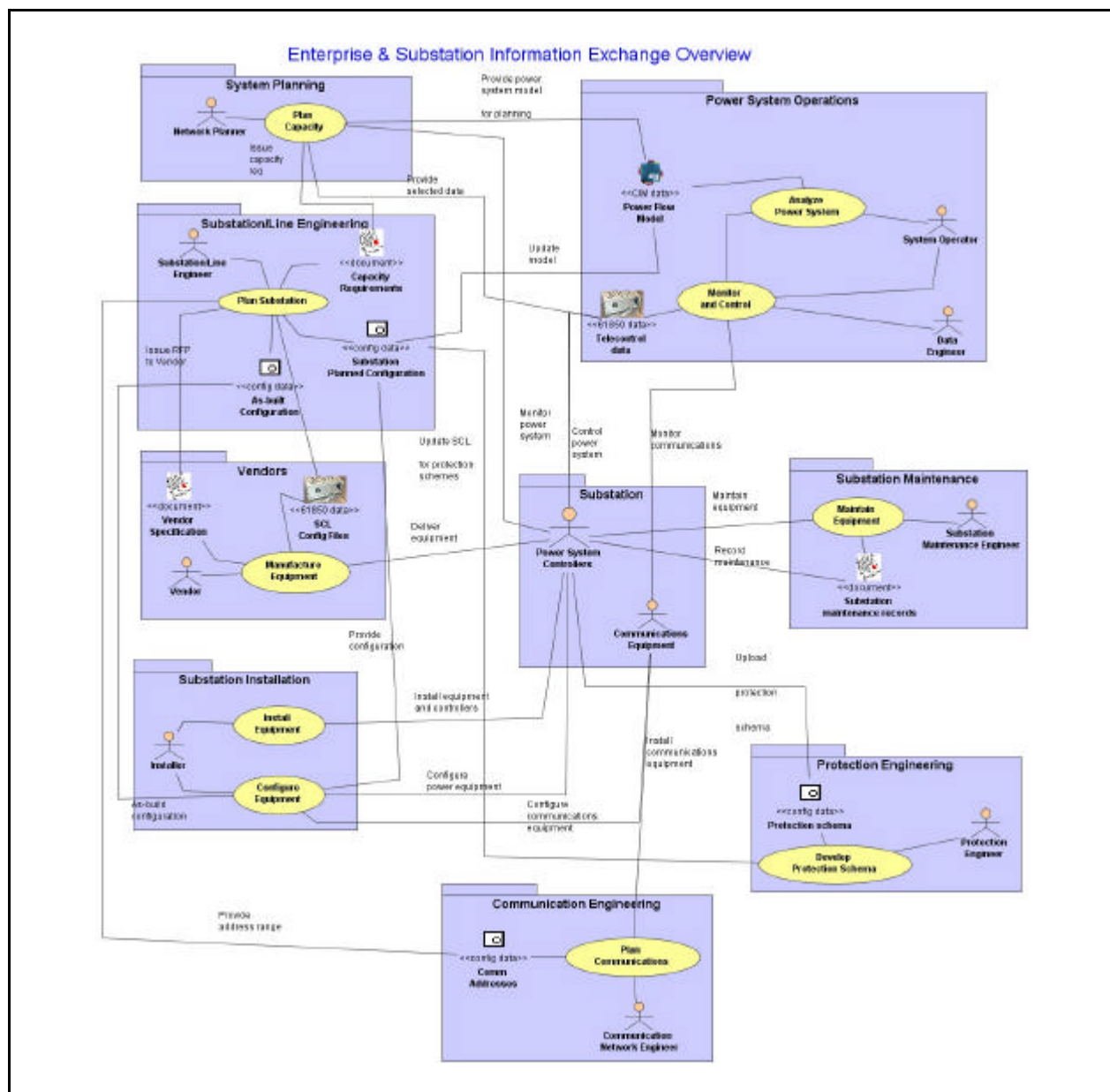
Iako je već dostupan veći broj parcijalno prikladnih metoda i alata, otežavajuća je okolnost što sve to treba objediniti - i opšte ciljeve koji se postavljaju i potrebne metode i alate, i što sve to predstavlja novost, tako da je (sa raspoloživim ljudskim resursima) teško obezbediti adekvatno rešavanje problema. Povoljna je, međutim, okolnost, što se na rešenjima po tim novim pristupima dosta koordinirano radi na nivou raznih međunarodnih udruženja, standardizacionih institucija, proizvođača opreme i korisnika. U tome se najviše odmaklo u okviru Tehničkog komiteta 57 Međunarodne elektrotehničke komisije, gde se realizuje široka familija novih standarda za upravljanje i razmenu informacija u elektroenergetskim sistemima. Tom realizacijom unutar IEC-a upravlja posebno telo - SPAG (Strategic Policy Advisory Board - Savetodavni odbor za stratešku politiku), ali se u širem smislu sve to razmatra, usaglašava i koordinira na raznim nacionalnim i internacionalnim institucionalnim nivoima.

Tu familiju standarda objedinjuje opšti koncept **komunikacione arhitekture bez barijera (SCA - Seamless Communication Architecture)**. U njemu se pri definisanju informaciono-tehnološke infrastrukture u nekom funkcionalnom ili poslovnom segmentu standardizuju svi profili potrebnih podataka, modela, servisa i aplikacija, polazeći od opštih dijagrama prikazanih na slikama 1 i 2, preuzetim iz dokumenata Tehničkog komiteta 57. Takva celovita i jedinstvena informaciona infrastruktura koristi se svuda bez modifikacija, bez obzira na lokaciju aplikacija, pri čemu se razmena podataka usaglašava sa aplikativnim kontekstima i aplikativno orijentisanim modelima. Na slici 1 prikazan je opšti model tokova informacija za sve aplikativne kontekste unutar nekog postrojenja i ka nivou preduzeća, a na slici 2 se vidi koji su sve aplikativni konteksti obuhvaćeni u paketima logičkih objekata za modelovanje aplikacija i njihovih interfejsa na nivou kontrolnog centra. Na toj slici se na levoj strani vide i naknadna proširenja prvobitnog koncepta o zajedničkom informa-

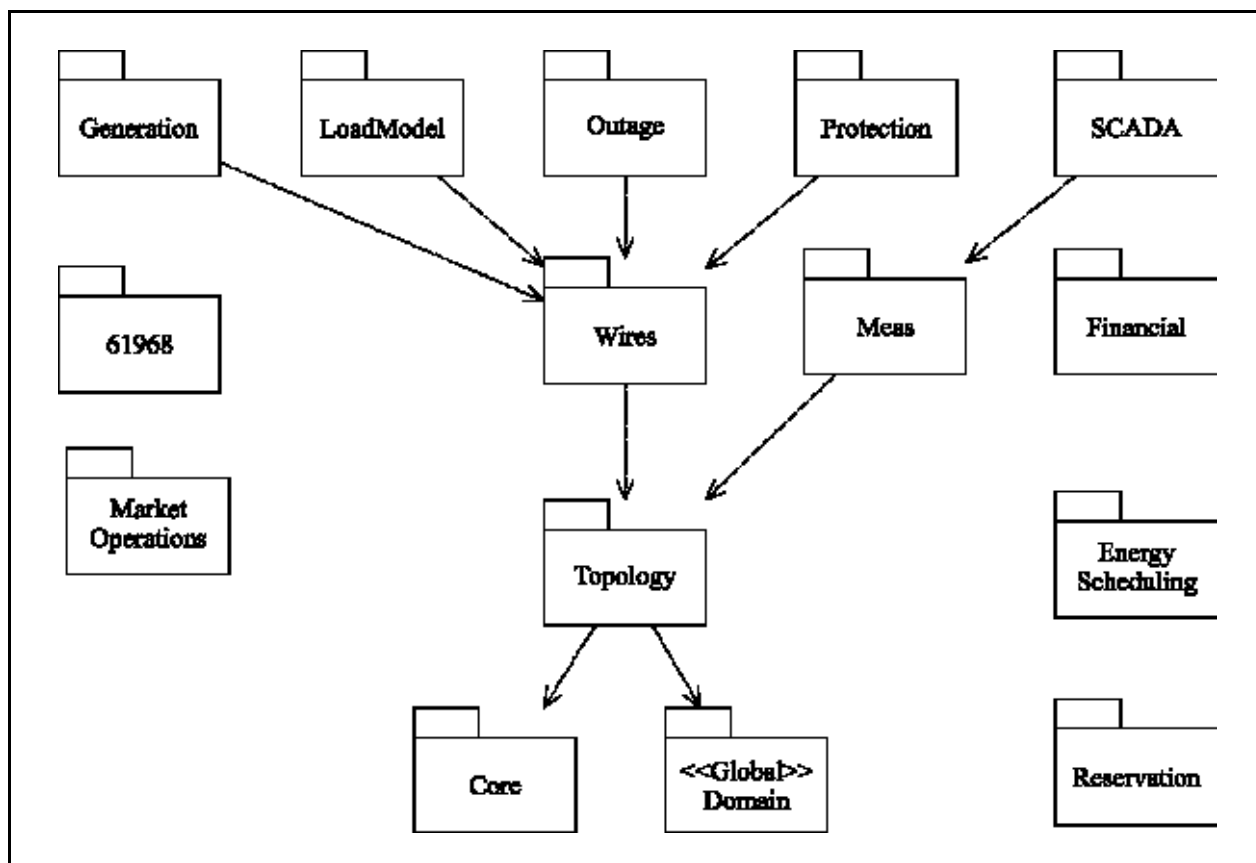
cionom modelu za aplikacije u centrima upravljanja. Shvatilo se, naime, da je svrsishodno u taj koncept uklopiti i druge aplikativne kontekste izvan okvira tih centara, tako da je danas zajednički informacijski model proširen čitavim zasebnim standardima, kao što su IEC 61980 za distributivne sisteme i IEC 62325 za tržišne operacije. Verovatno će se takva hijerarhijska struktura i dalje dopunjavati.

Sam SCA koncept nije direktan predmet ni jednog standardizacionog dokumenta. On samo postavlja opšti strateški okvir u kome se konkretno razrađuje širi skup specijalizovanih standarda. Oni identifikuju sve vrste specifičnih sadržaja i zahteva i specificiraju odgovarajuće profile rešenja, oslanjajući

se na već postojeće i široko prihvaćene standarde za arhitekture u informacionim tehnologijama, pružajući istovremeno mnoštvo otvorenih opcija. Time, SCA koncept ima za cilj da za određenu vrstu složenih sistema standardizuje informacionu infrastrukturu platformu i da specificira rešenja koja kompletno podržavaju novu viziju složenih sistema, sa efikasnim autonomnim podsistemima, koji imaju dobru međusobnu koordinaciju. Stoga taj koncept predstavlja bitnu kariku u metodološkom pristupu, bez koje se u stvari ne može u potpunosti ostvariti funkcionisanje elektroenergetskih sistema u skladu sa novim tržišnim regulativama, niti uklapanje u savremene metodološke i tehnološke koncepte.



Slika 1. Model tokova informacija između aplikacija unutar postrojenja i ka nivou preduzeća



Slika 2. Standardizovani paketi logičkih objekata za modelovanje u opštem informacionom modelu

Ovde će iz te familije standarda biti pre svega reči o tri grupe:

- Standard IEC 61970 *Energy Management System - Application Program Interface (EMS-API)*, čije su podgrupe: 61970-3xx (CIM - *Common Information Model*), 61970-4xx (CIS - *Component Interface Specifications*) i 61970-5xx (preslikavanja CIM-a i CIS-a na različite tehnološke platforme, uključujući XML),
- Standard IEC 61850 *Communication networks and systems in substations*, koji je harmonizovan sa IEC 61970 i predstavlja njegovo proširenje i komplementarnu dopunu, prekrivajući sve detalje i specifičnosti u prenosnim postrojenjima, i
- Standard IEC 62325 *Framework for deregulated electricity market communication*. Taj dokument predstavlja primenu ebXML specifikacija (*electronic business Extensible Markup Language*) i UN/CEFACT arhitekture, prilagođenu potrebama tržišta energije.

Što se tiče stepena dovršenosti ovih standarda, najviše je odrađeno na IEC 61850, koji je praktično u celini završen, zatim na IEC 61970, čijih je nekoliko bitnih delova završeno, dok je standard IEC 62325 još na nivou nacрта.

Ovi standardi se oslanjaju na mnoge druge moderne standarde, npr. za modelovanje složenih sistema pomoću UML-a, za specifikaciju rečnika u različitim aplikativnim domenima i formatiranje u XML-u, za izgradnju aplikativnih struktura korišćenjem arhitektura softverskih komponenta (Java, CORBA, DCOM, .NET) i Web servisa. Takođe, ova familija se i dalje dopunjuje nizom novih standarda, npr. za hidroelektrane, termoelektrane, distribuirane energetske resurse, infrastrukturne aspekte dizajna tržišta energije, i dr. Time se za sve interne i eksterne funkcije i poslove definiše jedinstvena i celovita informaciono-tehnološka osnova i infrastruktura, koja podržava interoperabilnost aplikacija na svim nivoima unutar i između pojedinih elektroenergetskih sistema. To omogućuje da se praktično za sve funkcionalne celine - operativni nadzor i upravljanje, zaštitu, projektovanje, planiranje, održavanje, finansijsko i tržišno poslovanje - može istovremeno obezbediti i prikladan nivo odvojenosti i povezivosti.

2. GLAVNI CILJEVI

Veliki deo funkcija u sistemima koji proizvode, prenose i distribuiraju električnu energiju može se

obavljati po unapred definisanim pravilima, čije se sprovođenje i nadziranje može prepustiti automatskim sistemima na raznim nivoima i lokacijama, uz male ili nikakve intervencije čoveka. Takva pravila se već duže vreme donose i dalje unapređuju, kako interno u velikim elektroenergetskim kompanijama, tako i na nivou širokih regionalnih asocijacija, u dokumentima kao što su „Grid Codes” (Mrežni propisi) i dr. Današnje tehnologije omogućuju visok stepen automatizacije u sprovođenju sve složenijih pravila i poslova u različitim prostornim okvirima, obuhvatajući konfigurisanje sistema, regulisanje režima rada, zaštitu i upravljanje, odvijanje funkcija sistemskih i tržišnih operatora, dijagnostiku kvarova, operativno planiranje i održavanje resursa.

Dokora su, međutim, sve te funkcije uglavnom realizovane zasebno, pa su za njihovo povezivanje i objedinjavanje u jedinstven sistem bili neophodni ljudski resursi. Da bi se u većoj meri koristile mogućnosti automatizacije i uklonile mnogobrojne interne i eksterne barijere između parcijalnih funkcija, potrebno je da kompanije i isporučioци opreme primenjuju nove standarde koji premošćuju te barijere. Na takvim standardima mogu se izraditi raznovrsne sofisticirane aplikacije i alati koji međusobno komuniciraju i automatski rešavaju složene zadatke prema unapred datim pravilima. To može elektroenergetske sisteme učiniti pouzdanijim i efikasnijim nego danas, jer će uvek i svuda biti raspoložive sve kritične informacije, koje pružaju veće mogućnosti za uočavanje različitih problema i iznalaženje rešenja, kako unutar pojedinih elektroenergetskih sistema, tako i između njih. To će omogućiti i da se razne upravljačke odluke donose sa većim razumevanjem i bez neizvesnosti. Tako koncipirani sistemi će raspolagati inteligencijom i na dnu i na vrhu, raspoređenom u milionima uređaja koji komuniciraju povezani u petlje sa povratnom spregom, obezbeđujući uvek potpun uvid u sve bitne elemente za sprovođenje neke aktivnosti. Tek sa takvom infrastrukturom može efikasno da zaživi restrukturirani koncept složenih sistema, jer ona omogućuje visok stepen nezavisnosti i konkurencije pri obavljanju parcijalnih funkcija i servisa i istovremeno potpunost i kvalitet celokupnog sistema.

U tržišno orijentisanim elektroenergetskim sistemima otvara se na svim strukturnim nivoima mnoštvo novih, kompleksnih i kritičnih problema, čije efikasno sagledavanje i rešavanje nije moguće bez snažne infrastrukturne podrške. Sposobnost brze adaptacije na ubrzani ritam promena, tržišnu konkurenciju, nagle skokove u potrošnji i zahtevima za energijom, smanjeni broj zaposlenih, i složenost i isprepletanost problema - nameće potrebu da se odvijanje poslovnih procesa prebacuje na visoku tehnolo-

logiju, koristeći stratešku kombinaciju integrisanog modelovanja poslovnih procesa, standardizovanog integrisanja podataka i aplikacija, i analitičkog odlučivanja. Zato je potreban nov način mišljenja, nove strategije i načini upravljanja, reinženjering poslovnih procesa, novi alati i tehnologije, da bi se optimizovale performanse postrojenja, troškovi i prihodi, i, sa poboljšanom profitabilnošću podržao dalji razvoj. Stoga se u planiranju aktivnosti u procesu restrukturiranja mora kao krupna stavka predvideti upravo implementacija adekvatne infrastrukturne podrške. Ilustracije radi, može se navesti, da je u studiji stranog konsultanta, u kojoj je koncipirana prva faza restrukturiranja EPS-a, preko 30 % ukupnih troškova restrukturiranja u toj fazi predviđeno upravo za takve namene.

3. DOMETI I METODE

Stari komunikacioni koncept, pre uvođenja komunikacione arhitekture bez barijera, podrazumevao je da se potrebne procesne informacije dovode od opreme u postrojenju do RTU-a korišćenjem paralelnih kablovskih veza, odakle su se one dalje prosleđivale ka kontrolnim centrima pomoću protokola specificiranih od strane TC 57 (serija standarda 60870-5-101, -102, -103, -104). Ta RTU tehnologija se i dalje koristi u postrojenjima, ali će se ubrzano zamenjivati kompjuterizovanim sistemima nazvanim IED-ovi (Intelligent Electronic Devices), koji komuniciraju preko lokalnih mreža. U njima su svi tipovi konfiguracionih, statusnih i procesnih informacija, za sve kategorije opreme i aplikacija, unapred organizovani prema IEC 61850 standardima u standardizovane funkcionalno grupisane logičke čvorove i njihove objekte, i koriste se apstraktni komunikacioni servisi iz već postojećih podesnih protokola.

Iako su protokoli u seriji IEC 61850 specificirani pre svega za komunikaciju u LAN okruženju, oni se mogu koristiti i za daljinsku komunikaciju u WAN-okruženju. Takvo rešenje uklanja barijeru različitih protokola, tako da se od nivoa primarne procesne opreme i IED-ova, pa sve do kontrolnog centra, komunikacija obavlja bez preslikavanja i konverzija, neposredno između obostrano istih apstraktnih logičkih čvorova, objekata i servisa. Neke vrste barijera mogu i dalje postojati, npr. u fizičkom komunikacionom sloju, ili na tzv. proxy uređaju, koji preuzima funkcije aplikacionog i komunikacionog servera za sve spoljnje korisnike. Bez obzira na to, uklanjanje barijera na apstraktnom komunikacionom nivou omogućuje efikasnije rukovanje podacima u okviru celokupnog sistema i umanjuje troškove implementacije novih rešenja tokom životnog ve-

ka sistema. U prelaznom periodu, dok se ne ispune svi uslovi za takvu komunikaciju, mogu se po potrebi praviti kombinovana rešenja, koristeći tzv. gateway uređaje za konvertovanje protokola iz serije IEC 60870-5 u protokol prema IEC 61850, ili obrnuto.

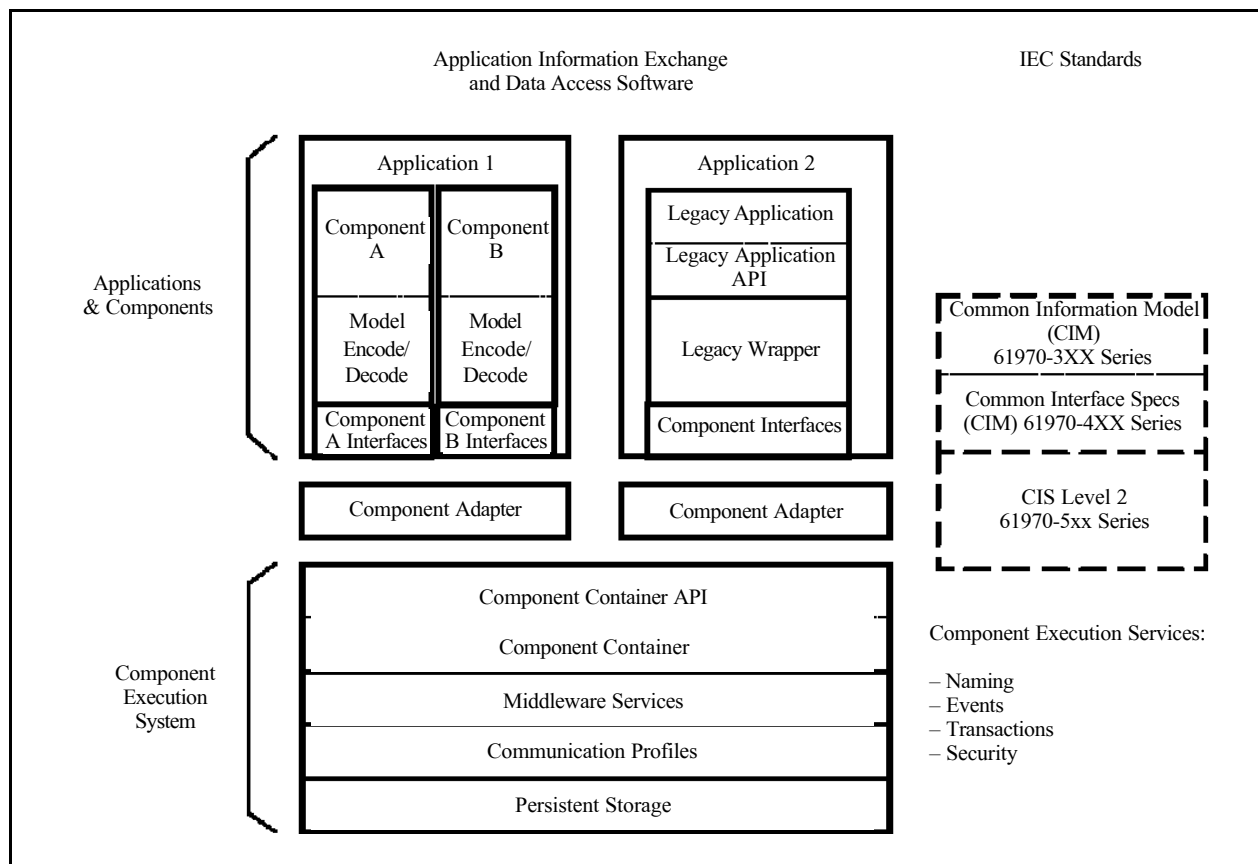
U restrukturiranim sistemima su pored procesnih podataka neophodne i konfiguracione informacije i tzv. meta podaci, koji opisuju procesne podatke - za sve učesnike, od elektrana do potrošača i kupaca - da bi se u realnom vremenu postiglo njihovo brzo i tačno integrisanje, konsolidovanje, slanje i interpretiranje. Novi standardi IEC 61850 i IEC 61970 u velikoj meri izlaze u susret svim tim zahtevima. Njihova glavna svojstva su:

- Oni daju opsežan skup semantičkih definicija procesnih i meta podataka za prenosna postrojenja i za celu mrežu.
- Razmena tih informacija bazirana je na skupu već standardizovanih opštih komunikacionih servisa i protokola, uključujući SOAP i TCP/IP, kao i primenu XML-a radi lakšeg konfigurisanja uređaja i sistema.
- Integrisanje konfiguracionih informacija iz prenosnih postrojenja u konfiguraciju i aplikacije u kon-

trolnom centru (CIM, Common Information Model) i obrnuto.

Da bi se uspostavila transparentna komunikacija između opreme u postrojenju i aplikacija u kontrolnom centru potrebno je prvo modelovati postrojenje pomoću konfiguracionog jezika SCL (Substation Configuration Language), definisanog u IEC 61870-6, i uklopiti taj model u model sistema u kontrolnom centru, koji se pravi po standardu za CIM u IEC 61950-3. Iako se ta dva jezika za modelovanje delimično preklapaju, postoje ipak i neke neujednačenosti, jer SCL ima kao konfiguracione entitete tzv. Logical Devices, dok su u CIM-u to tzv. Power Resources. Posebna radna grupa u TC 57 zadužena je za harmonizaciju CIM-a i SCL-a, da bi koncept arhitekture bez barijera (odnosno bez potrebe za preslikavanjima i konverzijama) bio što potpunije podržan.

Na slici 3 prikazan je na nivou blok šeme opšti koncept ostvarivanja visoko efikasne interoperabilnosti između aplikacija pomoću standarda IEC 61970. Sa leve strane (neosenčeno) su aplikacije i platforme softverskih komponenata koje nisu direktan predmet ove grupe standarda. Sa desne strane (osenčeno) su glavne tri podgrupe standarda IEC



Slika 3. Referentni model standarda IEC 61970

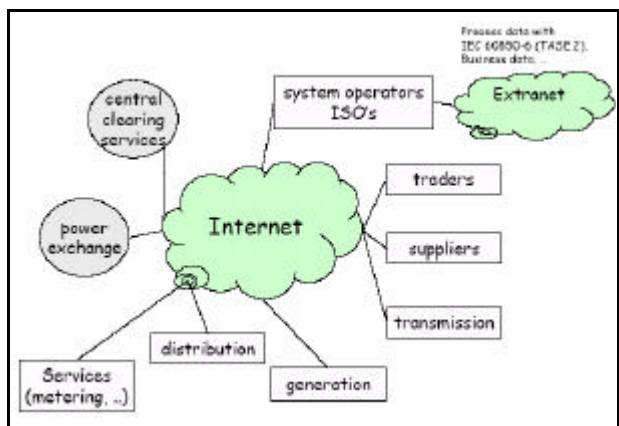
61970: CIM - gde se za različite aplikativne kontekste definišu standardni tipovi modela, CIS - gde se za svaku kategoriju aplikacija definišu modeli razmene informacija, i CIS-2. Nivo - gde se definišu preslikavanja tih modela na odgovarajuće komunikacione profile u raspoloživim serverskim platformama, uključujući i preslikavanje na jezike koji se koriste u tim platformama, kao što su C, C++, XML i dr. Na slici je naznačena horizontalna korespondencija između leve i desne strane. Tako u novoj Aplikaciji 1, treba pri njenoj izradi formirati model aplikacije prema podgrupi IEC 61970-3 (CIM), interfejse aplikacije prema podgrupi IEC 61970-4 (CIS), a preslikavanje na neku od tehnoloških platformi prema podgrupi IEC 61970-5. Kod starijih (zatečenih) aplikacija, kao što je Aplikacija 2, treba dograditi odgovarajuća prilagođenja.

U toku izrade ovih standarda, kao sastavi deo tog procesa, izveden je niz pilot projekata, u kojima je proveravana funkcionalnost rešenja i interoperabilnost. Zaključci i sugestije iz tih projekata uzeti su u obzir pri finalizaciji standardizacionih dokumenata. Tu se, dakle, radi o proverenim rešenjima, koja pri tom nisu zatvorena za dalja dograđivanja i usavršavanja. Takođe, razni proizvođači hardverske i softverske opreme već imaju u ponudi opremu i alate koji olakšavaju implementaciju takvih sistema, a prvi koraci u razvoju takvih rešenja preduzimaju se srećom i kod nas (u EDB-u, EV, CIIS-u).

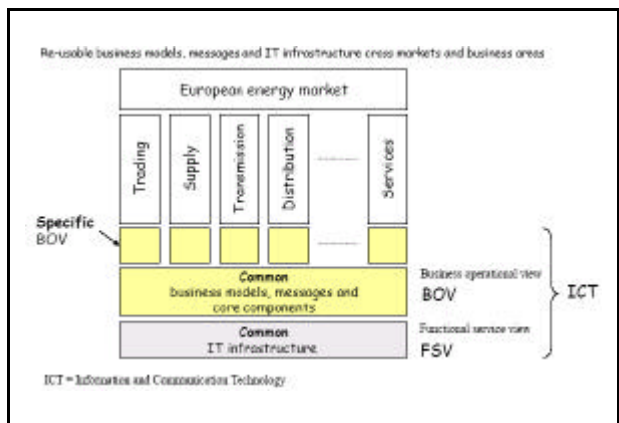
Treći ovde obuhvaćeni standard, IEC 62325, takođe se bavi jezikom, poslovnim modelima i dokumentima u sklopu različitih segmenata tržišta elektriciteta, kao što su tržište: sa cenama formiranim prema mestu odredišta (locational marginal pricing); bilateralno; za naredni dan; trenutno (real time); rezervnih kapaciteta; pomoćnih servisa. Njegov osnovni cilj je, kao što ilustruje slika 4, da svi učesnici na otvorenom tržištu energije mogu bezbedno i sa jedinstvenim procedurama da obavljaju poslovne aktivnosti preko Interneta. Na slici 5 se vidi da je težište tog standarda na zajedničkim osnovama, imlementiranim u informacionim i komunikacionim tehnologijama (ICT). Pri tome se dopušta i postojanje raznih specifičnosti i vodi se računa o konzistentnosti dizajna tih tržišta sa inženjerskim fundamentima elektroenergetskih sistema, oslanjajući se na funkcionalne servise koje obezbeđuje standard IEC 61970. On konceptualno prihvata ebXML inicijativu, podržanu i na nivou UN-a i projektovanu sa ciljem da se obezbedi elektronska interoperabilnost, koja omogućuje poslovnim akterima da automatski pronalaze jedni druge, da prave sporazume o trgovinskom partnerstvu i da obavljaju poslove, uz minimalnu ili u većini slučajeva nikakvu potrebu za ljudskom intervencijom. To daje zamah elektron-

skom poslovanju, baziranom na jeftinim i otvorenim standardnim mehanizmima. ebXML specifikacije i UN/CEFACT arhitektura trenutno su jedino standardizovano rešenje bazirano na Internetu i web tehnologijama, ali standardom se ne isključuje primena drugih naprednijih tehnologija, kao što su Web Servisi. Ova ebXML arhitektura obezbeđuje:

1. Način definisanja poslovnih procesa, uključujući razmenu poruka i njihov sadržaj.
2. Način registrovanja i uspostavljanja procedura u poslovnim procesima, korišćenjem odgovarajuće razmene poruka.
3. Način definisanja profila kompanije.
4. Način definisanja trgovinskih partnerskih sporazuma.
5. Jednoobraznu komunikacionu strukturu za prenos poruka.



Slika 4. Svi učesnici na otvorenom tržištu energije bezbedno komuniciraju preko Interneta



Slika 5. Standard IEC 62325 definiše zajedničke ICT osnove tržišta energije

Pored toga što komunikaciona arhitektura bez barijera, kakva se uspostavlja ovim standardima, podržava složene i promenljive procesne, organizacio-

ne i poslovne potrebe za razmenom informacija između učesnika na restrukturiranom tržištu energije, na takvoj arhitekturi se mogu dograđivati dodatni standardi, koji omogućuju funkcionalnu efikasnost i kvalitet bez barijera. Studije koje su sprovedene povodom skorašnjih masovnih ispada u Evropi i Americi, radi utvrđivanja uzroka i preporučivanja rešenja, ukazuju na promenjene potrebe za organizacijom, korišćenjem i održavanjem nacionalnih prenosnih mreža. Pre svega se nameće potreba za obaveznim „standardima” u pogledu pouzdanosti, mada još nije jasno ko bi te standarde donosio i šta bi oni sve obuhvatali. Takođe bi trebalo definisati podelu uloga i koordinaciju između kompanijskih kontrolnih centara i regionalnih ISO-a, posebno sa aspekta tranzita energije preko regiona. Danas se na nivo informacione infrastrukture i softverskih aplikacija delimično spušta čak i obuhvatanje podsticaja za investicije u mrežu i proizvodne kapacitete, uključujući i planiranje razvoja mreže i proizvodnih resursa, zatim mera za ograničavanje snage tržišta u izvesnim situacijama, što nameće i pitanje fleksibilnosti državne regulative u rešavanju takvih problema. Sva ta pitanja su danas na stolu i o njima se konstruktivno raspravlja na više nivoa, da bi se problemi jasno sagledali i da bi se formulisao jasan skup aktivnosti koje treba preduzeti. To je put da ubuduće ne dolazi do sličnih dramatičnih poremećaja, kakvih je bilo poslednjih godina. Pri tom postaje sve očiglednije, da taj put vodi preko **standardnog modelovanja** javnih poslovnih i procesnih pravila i implementacije informaciono-tehnološke infrastrukture i aplikacija baziranih na tim modelima.

Menadžeri kompanija, ali i odgovarajuće regulatorne i državne institucije, moraju biti svesni, da je za formiranje internog tržišta i uklapanje u regionalna tržišta, kao i za donošenje ispravnih operativnih i strateških odluka na tim tržištima, neophodna primena novih informacionih infrastrukture, metoda i alata. Oni im pružaju presudnu pomoć u postavljanju i dobijanju preciznih odgovora na mnoštvo pitanja vezanih za: uklapanje u mehanizme raznih segmenta tržišta energije, planiranje, upravljanje pouzdanošću sistema, upravljanje resursima, investicije, raspoloživost. Takva podrška, između ostalog, može da obezbedi:

- alate za tačno predviđanje satnih opterećenja i cena na tržištima u realnom vremenu i za naredni dan, i da omogući takvu strategiju ponuda kojom se, imajući u vidu pravila pogađanja na tržištu, postižu maksimalni profiti i na tržištima u realnom vremenu i za naredni dan,
- da se pomoću operativnih tržišnih mehanizama postižu optimalne vrednosti usluga prenosa, pod-

sticanje smanjenja prenosnih zagušenja i poboljšanje pouzdanosti,

- što višu raspoloživost, čime se poboljšava konkurentnost ponuda, prihodi i profit,
- preispitivanja da li se plan ISO-a (Nezavisnog Sistemskog Operatora) za angažovanje blokova uklapa u operativna ograničenja tih resursa i da li je on „optimalan” za te agregate u pogledu troškova, prihoda, profita i gubitaka, potrošnje energenata i zagađenja, odnosno, procenjivanje da li se sopstvenim planiranjem pogona jedinica smanjuju ili uvećavaju izgledi za veću zaradu, imajući u vidu i kaznene penale ako se ne slede dispečerske instrukcije ISO-a,
- izradu najboljih strategija koje na tržištima energije, rezervnih kapaciteta i pomoćnih servisa donose prihode koji pokrivaju operativne i kapitalne troškove svih resursa, vodeći računa i o gubicima u prenosu i zagušenjima,
- da se u sklopu planiranja resursa uključi i funkcija upravljanja rizicima, koristeći standardne metode za merenje i smanjivanje operativnih, tržišnih i kreditnih rizika, i omogući javni uvid,
- da se u specifičnim uslovima pravovremeno primene na tržištima korektivne i ograničavajuće mere radi izbegavanja nekonzistentnosti tržišnih mehanizama.

Metodološki pristup rešavanju celokupnog kompleksa ovih problema obuhvata nekoliko različitih faza, koje nisu striktno odvojene, nego se realizuju kroz višestruke iteracije i povratne petlje. Okvirno, te faze su:

1. Sistemski inženjering, gde se specificiraju okvirni funkcionalni zahtevi za dati projekat, opisuju se elementi sistema i njihova funkcionalna svojstva, i daju se osnovna usmerenja za rešavanje postavljenih zadataka.
2. Sledi detaljna razrada i formalno modelovanje projektovanog sistema, uključujući i specificiranje razmene poruka unutar i između svih funkcionalnih komponenata.
3. Faza izrade i implementacije softverskih i hardverskih komponenata rešenja, uključujući i testiranje.
4. U fazi primene razmatraju se i realizuju dodatne potrebe i unapređenja.

Druga i treća od navedenih faza su pokrivene ovde navedenim standardima u meri koja je neophodna za postizanje interoperabilnosti. Interna rešenja u pojedinim komponentama, kao i njihova struktura - stvar su isporučioaca tih rešenja, ali eksterno ona moraju da obezbeđuju interoperabilnost u skladu sa ovim standardima.

4. ZAKLJUČAK

Iskustva sa restrukturiranjem tržišta energije u drugim zemljama, koja pokušavamo da razumemo i iskoristimo, često nam u prednji plan dovode one aspekte tog procesa koji su vidljivi na površini, a ostaju prikriveni dubinski konceptualni, metodološki i infrastrukturni aspekti, koji su temelj čitavog procesa. Ovaj rad je pokušao da osvetli te temeljne komponente, koji su do danas kod nas nedovoljno poznati i shvaćeni. Organizovanim aktivnostima na podizanju naše sposobnosti da sa razumevanjem

primenjujemo te nove koncepte, metode, alate i standarde, bitno bi se ubrzala i olakšala njihova implementacija u našem okruženju.

5. LITERATURA

- [1] REFERENCE ARCHITECTURE FOR TC 57, rev. 5a, Dec. 2003, IEC.
- [2] WORKING DOCUMENTS of TC 57, <http://www.iec.ch>
- [3] NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING, USA FERC, July, 2002.

Rad je primljen u uredništvo 18. 08. 2004. godine



Nikola Miladinović (1941), diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1965. godine na odseku za telekomunikacije i elektroniku. Radio je na poslovima razvoja savremenih telekomunikacionih uređaja u Istraživačko Razvojnom Institutu Elektronske Industrije u Beogradu i u Hasler AG, u Bernu. U EPS-u je od 1973. godine angažovan takođe na razvojnim poslovima u sistemima daljinskog upravljanja. Predsednik je Komisije za standarde KSN 57 pri Zavodu za standardizaciju u Beogradu. Objavio je oko 50 stručnih i naučnih radova, većinom na domaćim i stranim stručnim konferencijama.

Dragan Trtica

Eksploataciona iskustva pri radu kontura regulacije u termoelektrani-toplani Zrenjanin

Stručni rad

UDK: 621.1.18; 621.1.182.2; 621.1.182.1

Rezime:

U radu su izneti neki od problema vezanih za rad kontura regulacije u „Termoelektrani - Toplani” u Zrenjaninu. Oni su rezultat primenjenih neadekvatnih projektnih rešenja pri izboru izvršnih organa kao i uticaja elektromagnetne interference na rad kontura regulacije. Takođe, u radu su prikazana rešenja koja eliminišu navedene probleme.

Ključne reči: kontura regulacije, izvršni organ, elektromagnetna interferencija

Abstract:

EXPERIENCE OF EXPLOATATION CONTOUR REGULATION AT THE ZRENJANIN POWER PLANT

Problems of operation of control loops regulation at Zrenjanin Power Plant are presented. They originate from inadequate design of actuators and the influence of electromagnetic interference on the control loops operation. A few practical solutions are presented.

Key words: control loops, actuator, electromagnetic interference

1. UVOD

TE-TO Zrenjanin čini blok jedinica od 120 MW instalisane električne snage. U svom sastavu ima dve kotlovske jedinice kapaciteta od po 330 t/h i oduzima kondenzacionu parnu turbinu sa dva regulisana oduzimanja. Specifičnost postrojenja ogleda se u kogenerativnom režimu rada koji omogućuje:

- proizvodnju toplotne energije za grejanje grada i tehnološke pare za industrijske potrošače,
- proizvodnju električne energije.

Sagledavajući tehnološke zahteve, sa stanovišta sistema regulacije i upravljanja, može se reći da su oni prilično strogi u pogledu brzine odziva regulisa-

nih veličina, kao i „jačine” sprege između pojedinih kontura regulacije.

Postojeće stanje opreme automatike u objektu TE-TO Zrenjanin odslikava prisutnost različitih proizvođača opreme. Naime, regulacioni deo smešten je unutar sistema TELEPERM ME, dok je upravljačka i nadzorna funkcija realizovana preko fizički razdvojenih sistema. Digitalnim sistemom TELEPERM ME realizovane su konture regulacije na kotlovskim jedinicama, redukciono - rashladnim stanicama i toplifikacionim izmenjivačima. Neka eksploataciona iskustva u radu kontura regulacija izložena su u ovom radu. Ona su rezultat rada inženjersko - tehničkog kadra TE-TO Zrenjanin u rešavanju problema tipa neadekvatnog izbora izvršnih organa na

Mr Dragan Trtica, dipl. el. ing. –

„EPS” JP „Panonske elektrane” Novi Sad, Termoelektrana - toplana Zrenjanin, 23 000 Zrenjanin, Pančevačka b. b.

pojedininim konturama i izmenjenih eksploatacionih karakteristika procesa i procesne opreme.

2. REGULACIJA NAPAJANJA KOTLA VODOM

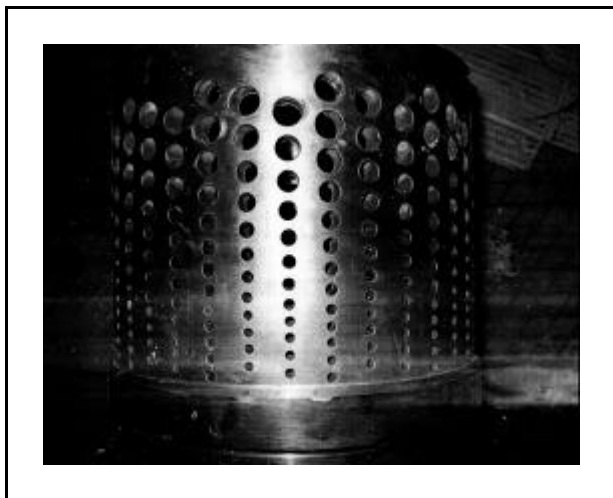
Regulaciju napajanja kotla vodom [1] sačinjavaju konture regulacije nivoa vode u bubnju kotla i regulacija broja obrtaja napojne pumpe. Nivo vode u bubnju kotla održava se preko tri regulaciona ventila: regulacionog ventila 30 % propusne moći, od punog kapaciteta napojne pumpe i dva regulaciona ventila za nominalno opterećenje kotla, od kojih je jedan radni, a drugi rezervni.

Broj obrtaja napojne pumpe, odnosno, DP na regulacionom ventilu za nivo, održava se hidrauličnom spojnicom. Servomotor na spojnici upravlja ventilom na dotoku ulja ostvarujući prenos obrtnog momenta elektro-motora s jedne strane i radnog kola napojne pumpe, s druge strane, bez neposrednog dodira [1]. Dosadašnja iskustva u radu ove konture regulacije mogu se analizirati iz sledećih uglova:

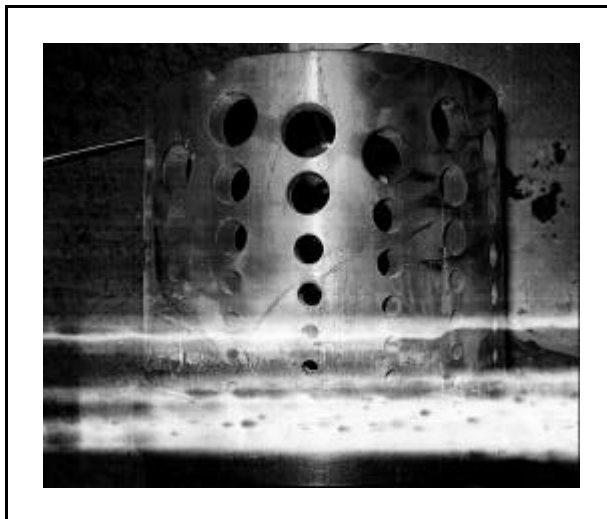
2.1. Neadekvatan izbor regulacionih ventila za nivo vode u bubnju kotla

U toku rada bloka sa različitim kotlovskim jedinicama, uočeno je da je regulacija nivoa vode na kotlu K-1 stabilnija u radu. Analizom odziva regulisane veličine nivoa vode za različite vrednosti poremećaja, pristupilo se utvrđivanju uzroka te nestabilnosti.

U remontnom periodu otvorena su oba regulaciona ventila za nivo na kotlovima K-1 i K-2, koja su predviđena za puno opterećenje. Izgled zatvarača ventila dat je na slikama 1 i 2.



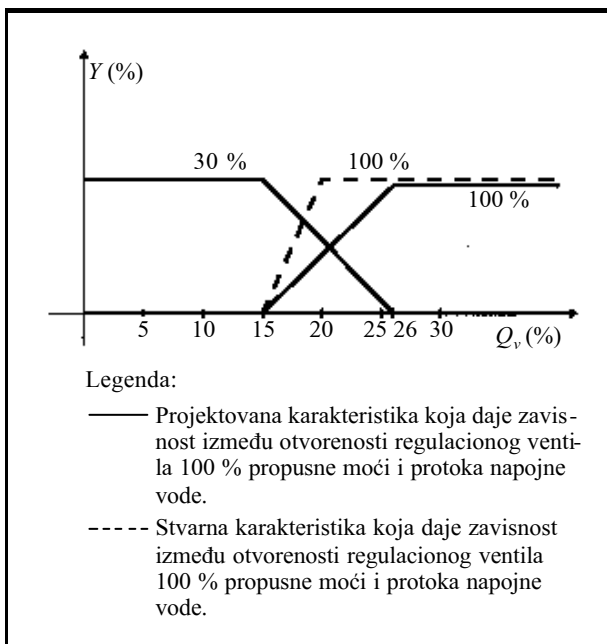
Slika 1. Sitasti zatvarač regulacionog ventila 100 % propusne moći za kotao K-1



Slika 2. Sitasti zatvarač regulacionog ventila 100 % propusne moći za kotao K-2

Upoređivanjem atestnih karakteristika ventila na oba kotla (moraju biti iste) sa ponovnim proračunima koeficijenata propusne moći ventila K_{VS} , dobijenim na osnovu stvarnog stanja uočeno je da je K_{VS} ventila na kotlu K-2 veći od projektne vrednosti koja je uneta u programsku strukturu konture ($K_{VS} = 420 \text{ t/h}$).

Projektom regulacije predviđena je kontinuirana, automatska smena u radu 30 % i 100 % regulacionog ventila, sa promenom opterećenja napojne pumpe (slika 3).



Slika 3. Karakteristika regulacionih ventila nivoa vode u bubnju kotla

U toku rada bloka „snimanjem” karakteristike otvorenosti ventila Y u zavisnosti od protoka napojne vode Q_V , uočeno je odstupanje ove karakteristike u odnosu na karakteristiku koja je upisana u programsku strukturu (slika 3), kada je u radu kotao K-2. Ovo je bio osnovni razlog zbog čega je u toku remonta obavljena demontaža armature na oba regulaciona ventila predviđena za nominalno opterećenje i to na obe kotlovske jedinice. Na slici 3 isprekidanom linijom data je stvarna karakteristika ventila. U takvom režimu rada 30 % regulacioni ventil se nije zatvorio, a regulacija nivoa vode sa 100 % ventilom je u automatskom režimu rada. Pomeranjem karakteristike zatvaranja 30 % regulacionog ventila i karakteristike otvaranja 100 % regulacionog ventila za 6 % u odnosu na projektne vrednosti ova regulacija je optimizirana, bez zamene ventila (slika 3).

2.2. Uticaj kvaliteta radnog ulja u hidrauličnoj spojnici napojne pumpe

U jednom dužem vremenskom periodu uočene su značajne promene DP na regulacionom ventilu za nivo. Karakterističan odziv promene DP u takvom režimu rada dat je snimkom na pisaču na slici 4. Velike promene DP na regulacionom ventilu „primoravale” su regulacioni ventil na učestalo otvaranje, odnosno zatvaranje. U pojedinim radnim tačkama ventila, porast DP na ventilu, primoravao je ventil da kreće u zatva-

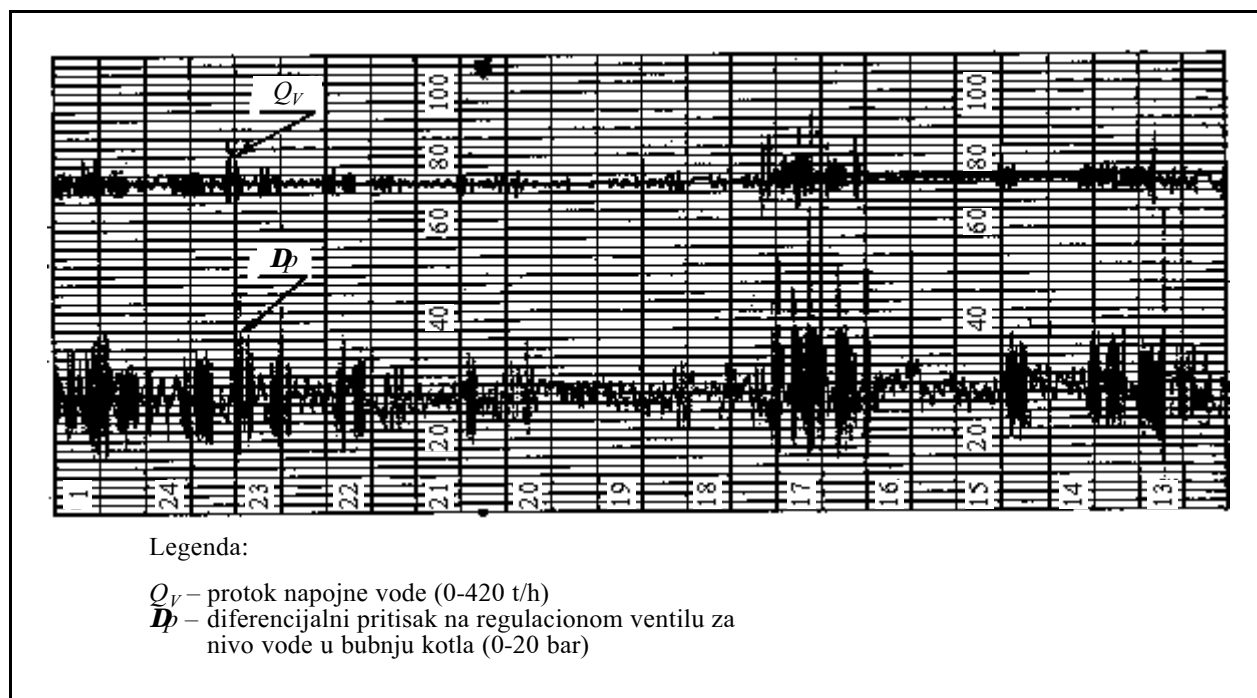
ranje do aktiviranja momentnog prekidača. Posledica ovog je zatvaranje zapornog ventila ispred regulacionog, a time i prekid napajanja kotla vodom. Analizom ulja u hidrauličnoj spojnici (HS) uočena je velika prisutnost vode. Prisustvo vode u prostoru između kola motora i radnog kola pumpe dovodi do povećanja DP na regulacionom ventilu, čime unosi poremećaj ne samo u regulaciju napajanja kotla vodom, već i u regulaciju temperature pregrejjane pare na izlazu iz kotla.

Zamenom radnog ulja u HS sa adekvatnim [2], rešeni su problemi u radu konture regulacije broja obrtaja napojne pumpe.

2.3. Prisutnost elektromagnetne interference (EMI) u konturi regulacije napajanja

Problem generisanja šuma na liniji prenosa analognih i digitalnih signala koji se vode u akviziciju, regulacioni sistem TELEPERM ME i indikaciju (instrumenti i pisači u termo - komandnoj sali) prisutan je od probnog rada pogona i manifestuje se na različite načine u zavisnosti od toga koji sistem se posmatra. Digitalni signali koji se vode u akvizicioni sistem zbog učestale promene logičkog stanja („0” → „1” i „1” → „0”) brzo pune RAM-disk, nakon čega dolazi do blokade akvizicije signala.

Problem koji se javlja na sistemu regulacije TELEPERM ME manifestuje se u izuzetno brzim i po amplitudi velikim oscilacijama strujnog signala. Ši-



Slika 4. Snimak sa pisača fizičkih veličina DP (0-20 bar) i Q_V (0-420 t/h)

roke mogućnosti digitalnog sistema TELEPERM ME ogledaju se tako što se pomenuti problem može rešiti ugradnjom softverskog filtra u vidu modula PT. Funkcija prenosa ovog modula u vremenskom domenu je: $Y(t) = x(t) (1 - e^{-t/T})$ i u s domenu: $Y(s) / X(s) = 1 / T_s + 1$

Na sledećoj slici ilustrovana je promena ulaznog signala pritiska vode na potisu predpumpne napojnog agregata. Na slikama 5a i 5b dat je deo programske strukture gde se mogu videti promene ulaznog signala pritiska u dva uzastopna vremenska intervala (EA, S, 6).



Slika 5a. Promena ulaznog signala u trenutku t



Slika 5b. Promena ulaznog signala u trenutku $t + D$ (D -perioda odabiranja)

Ugradnjom PT - člana sa vremenskom konstantom od $T = 5$ s, značajno su smanjene promene signala pritiska. Ove promene se mogu videti na slikama 6a i 6b (memorijska lokacija MA, 4, 13).



Slika 6a. Promena ulaznog signala nakon ugradnje PT-modula u trenutku t



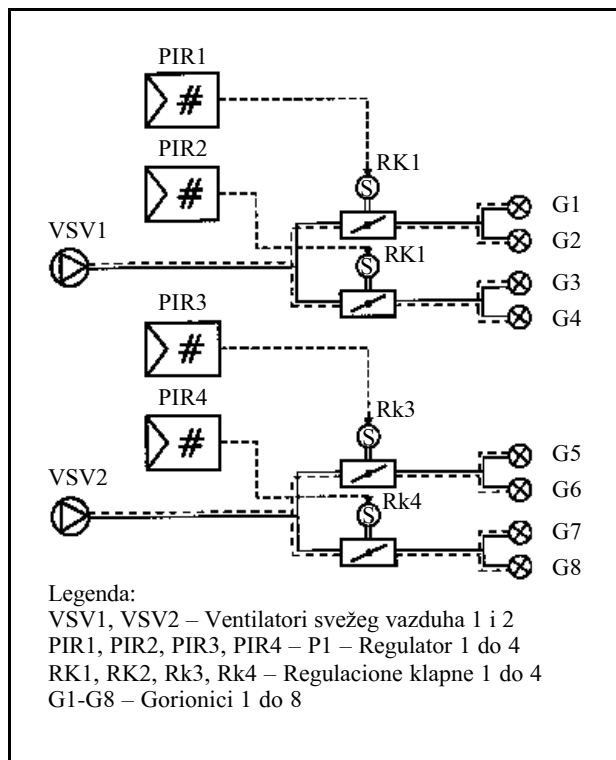
Slika 6b. Promena ulaznog signala nakon ugradnje PT-modula u trenutku $t + D$

3. REGULACIJA PROTOKA SVEŽEG VAZDUHA

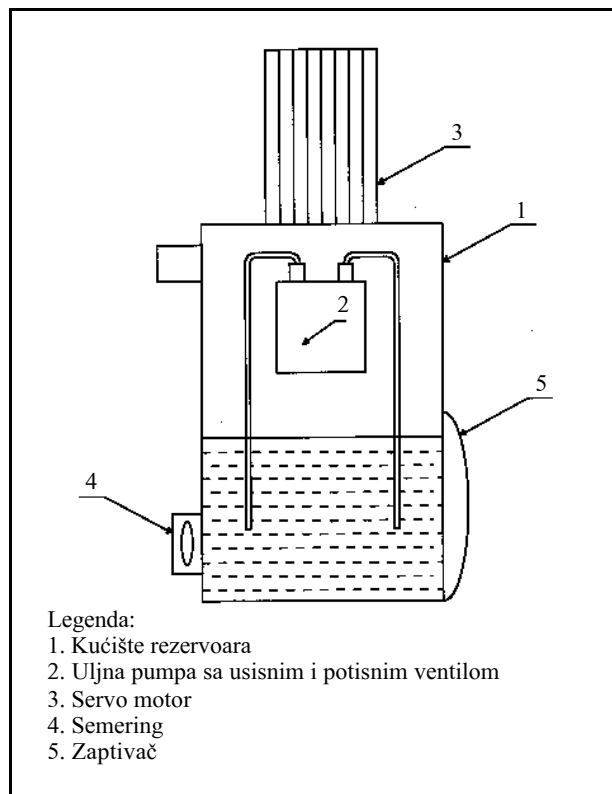
3.1. Rekonstrukcija elektrohidrauličnog servo pogona (EHS) na regulacionim klapnama za protok vazduha

Regulacija protoka vazduha za sagorevanje na obe kotlovske jedinice obavlja se sa 4 regulacione klapne (RK1, RK2, RK3 i RK4) (slika 7.). Svaka klapna reguliše količinu svežeg vazduha za dva gorionika koji su smešteni u dva nivoa. Pomeranje klapni obavlja servo-pogon, tipa EHS 350, proizvođača ATM iz Zagreba.

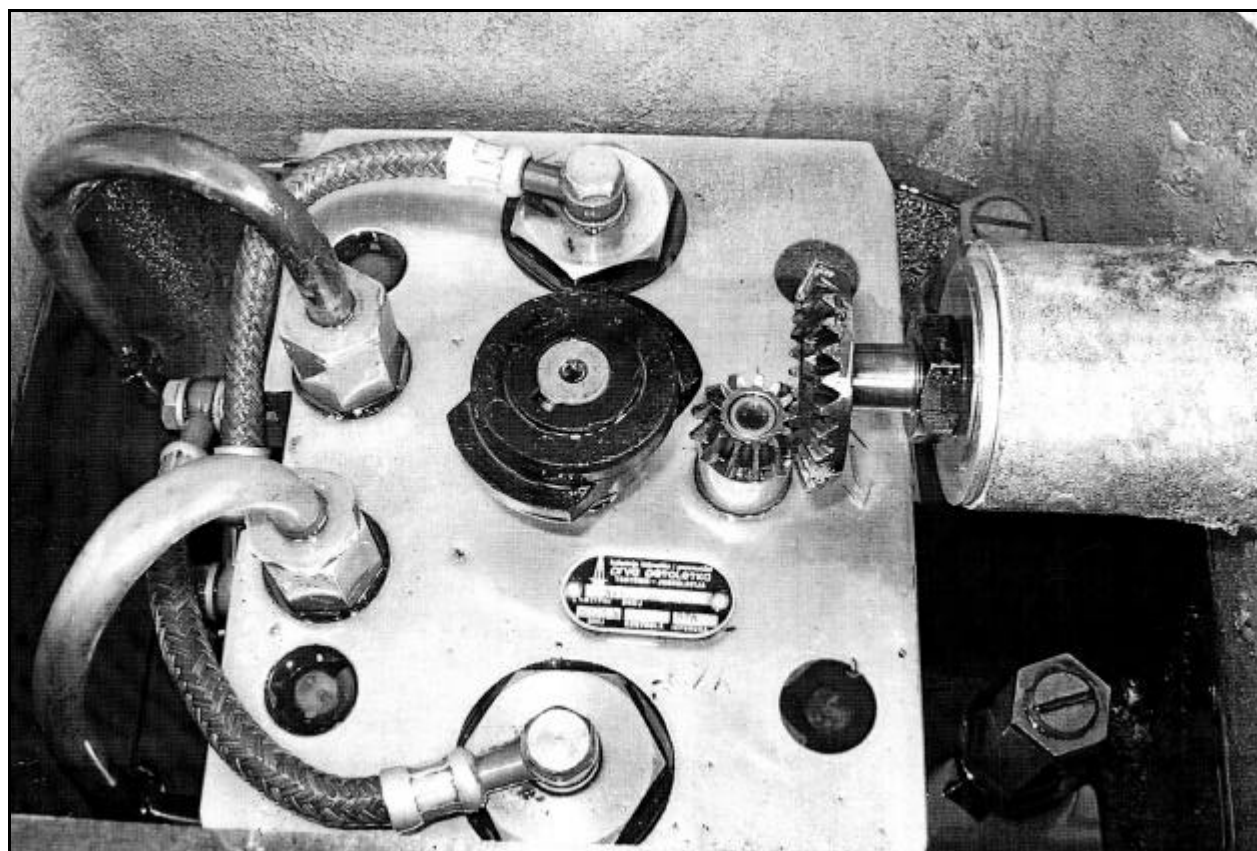
U toku eksploatacije pogona izvršni organi ove konture regulacije pokazali su se nepouzdanim. Naime, praćenjem odziva upravljačkog signala i regu-



Slika 7. Funkcionalna šema regulacije protoka svežeg vazduha



Slika 8. Šematski prikaz EHS-a



Slika 9. Digitalni snimak otvorenog kućišta uljnog rezervoara

lisane veličine u dužem vremenskom periodu uočena je neosetljivost odziva regulisane veličine pri dejstvu poremećaja. Analizom uzroka neosetljivosti konture, u remontanom periodu pristupilo se otvaranju elektrohidrauličnog servo-pogona. Uočeno je da je uljna pumpa smeštena u uljnom rezervoaru u toku rada dosta često je ostajala u radu na suvo (slika 8). Problem slabog zaptivanja na kućištu EHS i suviše visoko podignute pumpe u odnosu na dno kućišta, predstavljale su problem koji je za rezultat imao malu osetljivost regulacione klapne, pri delovanju upravljačkog signala iz regulatora.

Rešenje sa ugradnjom cevi, na usisnom i potisnom ventilu uljne pumpe, dužine $\frac{3}{4}$ od visine kućišta pokazalo se vrlo pouzdanim. U toku sezone 2003/2004. godine nije bilo problema u radu sa ovom konturom regulacije. Snimak odozgo, otvorenog kućišta uljnog rezervoara sa pumpom i montiranim cevima, dat je na slici 9.

4. ZAKLJUČAK

Značaj ovog rada ogleda se u činjenici što su izložena rešenja nastala kao rezultat jednog kvaliteta

nijeg pristupa u postupcima održavanja procesne opreme, odnosno tzv. održavanjem prema stanju. Permanentno praćenje i stanja svih fizičkih veličina na informacionom sistemu i pisačima u toku rada pogona treba da omogući uočavanje pojava nepravilnosti u radu procesne opreme i spreči pojavu zastoj bloka. Ono podrazumeva donošenje odluke o tome da li je sastavni deo sistema za ponovnu ugradnju, ili je potrebno iznalaženje novih rešenja, ili mora biti izbačen iz dalje upotrebe. Krajnji cilj ovakvog pristupa je da troškovi dijagnosticanja budu manji od ušteta koje se postižu na ovaj način.

5. LITERATURA

- [1] Trtica, D., PROJEKAT SISTEMA REGULACIJE NAPAJANJA KOTLA SA PRIRODNOM CIRCULACIJOM VODE, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2001.
- [2] POGONSKO UPUTSTVO ZA RAD NAPOJNIH PUMPI U TE-TO ZRENJANIN, blok 120 MW, Škoda-Eksport, Prag, 1985.

Rad je primljen u uredništvo 23. 06. 2004. godine



Dragan Trtica rođen je 1960. godine u Zrenjaninu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Elektrotehničkom odseku, smer Automatika i računarska tehnika. Magistrirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na smeru upravljanje sistemima.

Zaposlen je u Termoelektrani-toplani u Zrenjaninu, gde radi na radnom mestu Tehničkog direktora. Tokom rada specijalizovao se za rad na digitalnim sistemima TELEPERM, poznatog proizvođača SIEMENS.

Oblasti interesovanja: identifikacija i modeliranje procesa, procedure podešavanja sistema upravljanja.

Statička sigurnost elektroenergetskih interkonekcija

autor: dr Dragan P. Popović, dipl. ing.

Knjiga ima 170 strana. Izdavač je Institut „Nikola Tesla”, Beograd, ISBN 86-83349-03-9. Knjiga, pored Uvoda i Zaključaka, obuhvata 16 poglavlja. Spisak literature sadrži 216 bibliografskih jedinica. Recenzenti monografije su: prof. dr Jovan Nahman, dipl. ing., prof. dr Vladimir Strezoski, dipl. ing. i prof. dr Dragan S. Popović, dipl. ing.

Predmetni rukopis bavi se aktuelnom i složenom problematikom analize statičke sigurnosti složenih elektroenergetskih sistema (EES) u uslovima interkonekcija i liberalizovanog tržišta. U prvom poglavlju daje se pregled metoda analize statičke sigurnosti u postojećoj inženjerskoj praksi u okviru razvijenih sistema za nadzor i upravljanje EES-om. Posebno se razmatraju specifičnosti primene pomenutih sistema na EES Srbije i njegovo okruženje. Drugo i treće poglavlje opisuje matematičke modele za proračune tokova snage u postdinamičkim stacionarnim stanjima EES-a uz obuhvatanje efekata primarne i sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene sa susednim sistemima kao i efekata dispečerskih intervencija. Prikazuju se brzi raspregnuti postupci za proračune tokova snaga i naponskih prilika i ukazuje na moguća uprošćenja i ubrzanja proračuna. U četvrtom poglavlju opisuje se metode autonomne inicijalizacije analiza sigurnosti kod unapred zadatih redosleda opterećivanja izvora i/ili prethodno utvrđenih programa razmene snaga sa susednim

EES. U petom poglavlju razvija se metoda za modelovanje konvencionalnih energetskih transformatora, energetskih transformatora sa regulacijom faznog pomeraja i statičkih transformatora sa regulacijom faznog pomeraja (redni FACTS upravljači tokova snaga). Specifičnosti transformatora se obuhvataju preko injektiranja snaga na krajevima konvencionalnog transformatora sa odnosom transformacije koji je usklađen sa nazivnim naponima mreža, čime se čuva simetrija parametarskih matrica sistema i pojednostavljaju proračuni. Šesto poglavlje daje pregled determinističkih metoda za selekciju i rangiranje kritičnih poremeđaja u EES. U posebnom odeljku opisuje se metoda za brzu procenu toka i efekata primarne regulacije učestanosti povezanih EES. Izvode se jednostavni analitički izrazi na osnovu kojih se, pored procene toka regulacije, mogu utvrditi efekti najbitnijih činilaca i načini uticaja na ove procese. U sedmom poglavlju razvijaju se statički ekvivalenti za susedne EES. Daje se pregled postojećih pristupa i predlaže generalizovani ekvivalent za analize statičke sigurnosti, kojim se modeluju i efekti primarne regulacije učestanosti. Osmo poglavlje bavi se problematikom analize tokova snaga i naponskih prilika sistema kod poremećaja koji dovode do ostrvskog pogona delova EES. U poglavljima 9 do 16 opisuje se računarski program STATIC, koji je autor razvio za analize sigurnosti. Prikazuju se primene u proraču-

nima graničnih prenosnih mogućnosti mreža u okviru intekonekcija i u automatskoj inicijalizaciji analiza sigurnosti. Daju se primeri primene razvijenih metoda na EES Srbije i Crne Gore, u okviru kojih se koriste prethodno opisani postupci za modelovanje transformatora, kao i modeli za analize sistema kod prelaska u ostrvski pogon. U 16. poglavlju prikazuju se primeri primene razvijenih metoda u proračunima graničnih prenosnih kapaciteta EES Srbije povezanog sa susedima i u okviru Druge UCTE sinhronne zone. U zaključnim razmatranjima daje se sažeti pregled sadržine rukopisa i doprinosa autora razvoju razmatrane problematike i ukazuje na moguće pravce daljeg unapređenja metoda analiza statičke sigurnosti.

Kako se vidi iz prethodnog, u monografiji su obrađeni svi relevantni aspekti procene statičke sigurnosti složenih povezanih EES u uslovima otvorenog tržišta, od koncipiranja mate-

matičkih modela, preko razvoja odgovarajućih programskih paketa do primera konkretne primene na radu EES Srbije u okviru uključivanja u širu sinhronu zonu jugoistočne Evrope. U knjizi se, pored poznatih metoda i postupaka, prikazuju i originalna rešenja i doprinosi autora, posebno u oblasti analize tokova primarne i sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene, modelovanja nenominalnih transformatora, formiranja generalisanih statičkih ekvivalenata za susedne sisteme i proračuna režima sistema sa ostrvskim pogonom. Knjiga je napisana jasno i sveobuhvatno, sa primerima primena na realnim sistemima. Ona će pomoći inženjerima koji se bave analizom rada i planiranjem razvoja i pogona složenih povezanih EES da prošire i prodube svoja znanja i primenjuju naj-savremenije metode i koncepte u svom radu.

Prof. dr Jovan Nahman, dipl. ing.

Šta je to IP telefonija?

autor: Žarko Markov

Direkcija za telekomunikacije Elektropri-
vrede Srbije je omogućila izlaženje knjige „Šta
je to IP telefonija” i time napravila dvostruki
dobitak. Prvi je što se ova knjiga pojavljuje na
početku izgradnje nove telefonske mreže EPS-a,
pa se korisnicima buduće mreže predočava šta
nova tehnika paketske telefonije donosi. Drugi
dobitak je opšti, jer se stručnoj javnosti i teleko-
munikacionim poslenicima omogućava da se sa
svim aspektima ove aktuelne tehnike upoznaju
tekstom na srpskom jeziku.

Sama tehnika paketske telefonije je multidi-
sciplinarna oblast koja obuhvata poznavanje
svojstava: ljudskog glasa, analogne i digitalne
telefonske tehnike, svih vrsta komunikacionih
signalizacija, računarskih mreža i sistema, slu-
čajnih procesa i digitalne obrade signala. Zbog
toga se može reći da je autor knjige našao pr-
vu meru u opisivanju pojedinih svojstava, ne za-
nemarujući ni jednu oblast, ali i ne posvećujući
nekoj previše pažnje. Izvori za pisanje knjige su
u najvećem delu međunarodne preporuke i pro-
pisi o izgradnji telekomunikacione mreže i Inter-
neta. Knjiga je napisana precizno i razumljivo.

Osnovna svojstva obrađene materije u knji-
zi su savremenost teme, sveobuhvatnost, nepri-
strasnost i inženjerski pristup pri upoređivanju
stare i nove telefonske tehnike.

Savremenost teme se najbolje ogleda u ko-
rišćenju najnovijih ITU - T (**International Tele-
communication Union-Međunarodna unija za**

telekomunikacije) preporuka i IETF (**Internet
Engineering Task Force-Radna grupa za
Internet tehniku**) propisa čije je izdavanje po-
nekad datirano čak 2002. ili 2003. godine.

Sveobuhvatna obrada teme znači da je pa-
žnja posvećena i detaljima raznih paketskih
protokola (Asynchronous Transfer Mode - ATM,
Frame Relay - FR, Internet - IP), raznim nači-
nima paketizacije, proračunima iskorišćenosti
paketa, proračunima paketskih resursa i opisu
ukupnog kvaliteta paketske telefonije.

Inženjerski pristup se ogleda u korektnom
upoređenju pojedinih svojstava klasične i paket-
ske telefonske tehnike gde se, na primer, ukazu-
je na superiornost paketske tehnike pri uprav-
ljanju tokovima informacija u mreži. Istovreme-
no se ukazuje na to da kašnjenje informacije
kroz mrežu, koje je veliki nedostatak paketske
telefonije, praktično ne postoji u klasičnoj tele-
fonskoj tehnici.

Knjiga se suštinski sastoji od tri celine. To
je najpre skraćeni opis telefonske tehnike i po-
stojećih paketskih tehnika u obimu koji je potre-
ban za kasnije praćenje teme. U ovom delu su
naglašena ona svojstva koja su važna za paket-
sku telefonsku tehniku. U drugom delu se opisu-
ju tehnike realizacije paketske telefonske mreže,
kako sa gledišta mrežnih čvorova (upućivanje),
tako i u pogledu prenosa kroz mrežu (kompresi-
ja). U trećoj celini se daju kvantitativno opisa-
na svojstva prenosa ljudskog glasa kroz paket-

sku mrežu u pogledu kvaliteta glasa na prijemu. Ovde je naročito ukazano na niz činilaca i postupaka koji umanjuju kvalitet paketski prenetog govornog signala, a koji u klasičnoj telefonskoj tehnici ili nisu postojali (kompresija i višestruka kompresija, gubici paketa) ili je njihov uticaj bio zanemarljiv (kašnjenje i odjek govornog signala).

U knjizi se opovrgavaju neke predrasude koje su se već stvorile u vezi paketske telefonske tehnike. Jedna je pomenuta već na samom početku knjige i odnosi se na ime paketske telefonije koja se često naziva IP tehnikom ili VoIP tehnikom. Ukazujući na to da se u paketskoj telefoniji koriste sve paketske tehnike (izuzev tzv. X.25 tehnike), a ne samo Internet, autor pomaže da se shvati neadekvatnost ovih termina.

Slična stvar je i sa ukorenjenim shvatanjem da je osnovna prednost paketske telefonske tehnike smanjivanje bitskog protoka jednog telefonskog razgovora. U knjizi se pokazuje da je u paketskoj telefoniji potrebno utrošiti više bitskog protoka nego u klasičnoj digitalnoj tehnici da bi se ostvario isti kvalitet prenosa govornog signala. Samo u retkim slučajevima linkova malog protoka moguća je ušteda u protoku. Osnovna prednost paketske telefonske tehnike je, pak, u korišćenju univerzalne računarske mreže.

Ukazuje se i na ukorenjenu predrasudu o kompresiji. Naime, samo je kompresija zaglavljiva reverzibilna, te je kao takva jedina kompresija u strogom smislu, dok je kompresija govornog signala pre neki specifični postupak odabiranja nego kompresija.

Veoma je važno ukazivanje na jedan metod ocenjivanja kvaliteta govornog signala prenetog kroz paketsku mrežu. To je tzv. E model, koji se zasniva na načelu sabiranja svih uticaja na kvalitet govornog signala. Jednostavno rečeno, ovaj metod dozvoljava povećanje uticaja jednog uzroka pogoršanja govornog signala na račun drugog. Ovo načelo, još nedovoljno poznato i nije postojalo kod klasične telefonske tehnike, gde se svaki ometajući uticaj (šum, slabljenje, asimetrija, preslušavanje) morao držati u svojim granicama.

Izlaganje o kvalitetu prenetog govornog signala završava se popisom dvadesetak „zlatnih“ pravila paketske telefonije, koji u veoma sažetom obliku izlažu osnovne preporuke za kvalitetno korišćenje paketske tehnike za telefonsku uslugu.

Uzimajući sve u obzir, može se reći da su i autor a i Direkcija za telekomunikacije Elektroprivrede Srbije, kroz ovu knjigu dali jedan veoma vredan doprinos našoj stručnoj literaturi, a izloženi materijal ima i značajnu praktičnu primenu.

Recenzenti knjige su prof. dr Milorad Mirković i prof. dr Miroslav Lutovac. Knjiga ima 153 strane, a završava se popisom i objašnjenjem preko 120 termina korišćenih u paketskoj telefoniji. Oprema knjige je skromna ali je to višestruko nadoknađeno aktuelnošću njene sadržine.

Prof. dr Miroslav Lutovac

Uputstvo autorima za saradnju u stručnom glasilu „Elektroprivreda”

**U stručnom glasilu se objavljuju kategorisani članci:
originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi i stručni radovi
iz oblasti elektroprivrede, odnosno energetike.**

Pismo: ćirilica ili latinica. Na početku se navode imena autora sa zvanjima i akademskim titulama, naziv preduzeća, odnosno dela preduzeća ili ustanove sa adresom, kao i naslov rada (na srpskom i engleskom jeziku). Rezime rada (na srpskom i engleskom jeziku) sadrži kratko izloženu osnovnu strukturu i sadržaj rada, i ne treba da sadrži više od 200 reči. Ključne reči se takođe navode na srpskom i engleskom jeziku.

Treba izbegavati celovita matematička izvođenja vezana za relacije koje opterećuju proučavanje rada. Neophodna matematička izvođenja mogu se dati, po potrebi, kao celine u vidu jednog ili više priloga. Treba obavezno koristiti SI sistem jedinica i opšte prihvaćene pojmove.

Jednačine treba numerisati uz desnu marginu teksta, u malim (okruglim) zagradama. Pozivanje na jednačine u tekstu vrši se pomoću malih zagrada, a pozivanje na literaturu pomoću srednjih (uglastih) zagrada. Značenje skraćenice objasniti pri njenom prvom korišćenju u tekstu. Strane reči se prevode na srpski, a original se piše u zagradi iza prevoda. Napomena u tekstu treba da bude što manje, a ukoliko ih ima, treba da budu kratke. Napomene se označavaju rednim arapskim brojevima i navode se na dnu stranice, kao fusnote. Napomene u tabelama označavaju se malim slovima i navode se odmah ispod tabele. Na kraju rada prilaže se spisak korišćene literature. Za članke, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naslov ra-

da, pun naziv časopisa, broj i godina publikovanja i prvi i poslednji broj stranice. Za knjige, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naslov knjige, izdavač i godina izdanja. Za referate sa konferencija, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naziv referata, pun naziv konferencije, broj referata, mesto i vreme održavanja konferencije.

Rad ne treba da prelazi 15 kucanih strana formata A4 sa marginama od 3 cm. Tabele, slike i fotografije treba obeležiti po redosledu i uključiti u tekst.

Autor može dati predlog kategorizacije rada u skladu sa Uputstvom za uređivanje časopisa (originalni naučni rad, prethodno saopštenje, pregledni članak i stručni članak). Autor ne može istu ili sličnu verziju rada istovremeno ponuditi drugim časopisima radi objavljivanja.

Autor dostavlja rad u elektronskom obliku na disketi i na papiru, u tri primerka. Za elektronski oblik rada, preporučuje se autoru da koristi program za pisanje teksta Word i tip slova Times New Roman (font 12, a razmak 1,5).

Rad se šalje na adresu:

**ZAJEDNICA
JUGOSLOVENSKE
ELEKTROPRIVREDE**
Balkanska 13/II, 11000 Beograd