



Elektroprivreda

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

Godina **LVIII** Jul-Septembar Broj **3**
Year **LVIII** Jyly-September No. **3**

<i>Sadržaj</i>	<i>Strana</i> <i>Page</i>	<i>Content</i>
<i>Milić R. Stojić</i>		
<i>DOPRINOS NIKOLE TESLE U OBLASTI DALJINSKOG UPRAVLJANJA</i>	<i>3</i>	<i>NIKOLA TESLA'S CONTRIBUTIONS IN THE AREA OF REMOTE CONTROL</i>
<i>Dragan Petrović</i>		
<i>TESLINA INDUKCIONA MAŠINA – TEORIJSKO OBJAŠNJENJE DELOVANJA ELEKTROMAGNETNIH SILA I PRORAČUNA INDUKOVANE ELEKTROMOTORNE SILE</i>	<i>13</i>	<i>TESLA'S ELECTRO-MAGNETIC MOTOR - THEORETICAL EXPLANATION OF BOTH ELECTRO-MAGNETIC FORCES AND CALCULATION OF INDUCED ELECTRO-MAGNETIC FORCE</i>
<i>Dragan P. Popović</i>		
<i>GENERALIZOVANA METODA SIMULTANOG UPRAVLJANJA TOKOVIMA AKTIVNIH I REAKTIVNIH SNAGA U ELEKTROENERGETSKIM INTERKONEKCIJAMA</i>	<i>17</i>	<i>GENERALIZED METHOD FOR SIMULTANEOUS ACTIVE AND REACTIVE POWER FLOW CONTROL IN ELECTRIC POWER INTERCONNECTIONS</i>
<i>Jovan Nahman, Dragoslav Perić, Dragutin Salamon i Ivana Vlajić-Naumovska</i>		
<i>ŠTETE POTROŠAČA U GRADSKIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA USLED PREKIDA NAPAJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM</i>	<i>34</i>	<i>CUSTOMER COSTS IN MUNICIPAL DISTRIBUTION NETWORKS CAUSED BY ELECTRICAL ENERGY SUPPLY INTERRUPTIONS</i>
<i>Nikola Maričić</i>		
<i>PROCENA KARAKTERISTIKA IZVEDENE CEVNE NEREGULISANE MIKRO HIDROTURBINE</i>	<i>48</i>	<i>ESTIMATION OF CHARACTERISTICS OF NEW PROPELLER MICRO HYDRO TURBINE</i>
<i>Đorđe Bjegović, Branko Milosavljević, Čedomir Spaić i Nikola Vučinić</i>		
<i>KORIŠĆENJE VODA VELIKE MORAVE, DALJE AKTIVIRANJE HIDROENERGETSKOG POTENCIJALA</i>	<i>54</i>	<i>SEXPLOTTATION OF THE WATERS OF THE VELIKA MORAVA, FURTHER ACTIVATION OF HYDROENERGETIC POTENTIAL</i>
<i>Jordan Radosavljević, Mirosljub Jevtić i Miroslav Čirić</i>		
<i>ESTIMACIJA STANJA U RADJALNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA SA DISTRIBUIRANIM GENERATORIMA</i>	<i>63</i>	<i>STATE ESTIMATION IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATORS</i>
<i>Milenko Đurić, Vladimir Petrešin i Željko Đurišić</i>		
<i>ALGORITAM ZA MERENJE SNAGE OSNOVNOG HARMONIKA SA PROMENLJIVIM BROJEM ODBIRAKA</i>	<i>71</i>	<i>AN ALGORITHM WITH ADAPTIVE SAMPLING FOR THE POWER MEASUREMENT OF THE FIRST HARMONIC OF THE SIGNALS</i>
<i>Aleksandar Ranković i Andrija T. Sarić</i>		
<i>ANALIZA DOPUNSKIH MERA OBEZBEĐENJA MESTA RADA NA NADZEMNIM VODOVIMA</i>	<i>77</i>	<i>ANALYSIS OF TEMPORARY PROTECTIVE GROUNDING SCHEMES APPLIED FOR MAINTENANCE OF OVERHEAD DISTRIBUTION LINES</i>
<i>Žarko Markov</i>		
<i>O TRANZITNIM TELEFONSKIM VEZAMA U MREŽI EPS-a</i>	<i>88</i>	<i>ABOUT TRANSIT TELEPHONE CONNECTIONS IN THE EPS NETWORK</i>
<i>Miloš Prodanović i Momčilo Gojgić</i>		
<i>ZAJEDNICA JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE I TESLINI JUBILEJI</i>	<i>96</i>	<i>THE UNION OF YOUGOSLAV ELECTRIC POWER INDUSTRY AND TESLA'S JUBILEES</i>

IZDAVAČ:
PUBLISHER:

ZAJEDNICA JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE
UNION OF YUGOSLAV ELECTRIC POWER INDUSTRY

11 000 Beograd, Balkanska 13

Telefon: 2686-633, 2643-823, 2688-092, 2687-199 (centrala)

Telefaks: 686-398

Internet strana: www.eps.co.yu; www.epcg.cg.yu;

Elektronska pošta: jugel@sezampro.yu; jugel@beocity.net

DIREKTOR I GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK
DIRECTOR AND CHIEF EDITOR

Branislav A. Bošković, dipl. ing. el.

IZDAVAČKI SAVET
PUBLISHING COUNCIL

Branislav A. Bošković, dipl. ing. el.,

Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd, predsednik;

Prof. dr Jeroslav Živanić, dipl. ing. el., predsednik Upravnog odbora JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, član;

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

Dr Slobodan Ružić, dipl. ing. el., Agencija za energetske efikasnost, inženjering i konsalting
„Energy Saving Group”, Beograd, član;

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

Dragutin Martinović, dipl. ing. el., „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić, član;

REDAKCIONI ODBOR
EDITORIAL BOARD

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

Prof. dr Ilija Vujošević, dipl. ing. el., Elektrotehnički fakultet, Podgorica, član;

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

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

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

Prof. dr Dragutin Salamon, dipl. ing. el., Elektrotehnički fakultet, Beograd, član;

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

Dr Veselin Ilić, dipl. ing. el., „Elektroprivreda Crne Gore”, AD, Mojkovac, član;

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

Dr Duško Tubić, dipl. ing. el., JP „Elektromreža Srbije”, Beograd, predsednik;

Dr Rade Filipović, dipl. ing. el., Beograd, član;

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

Mr Gojko Dotlić, dipl. ing. el., JP „Elektromreža Srbije”, Beograd, član;

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

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

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

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

Mihajlo Gavrić, dipl. ing. građ., JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, član;

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

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

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

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

Lela Lončar, dipl. filolog, Beograd, član.

TEHNIČKI UREDNIK
TECHNICAL EDITOR

Jovo Todorović dipl. teh.

LEKTOR I PREVODILAC
LINGUISTIC REVIEW
& TRANSLATION

Zlata Milinović,
dipl. filolog

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Štampa: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

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

Tiraž: 1 000 primeraka

Circulation: 1,000 copies

CIP – Katalogizacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

620.9

621.31

ELEKTROPRIVREDA : časopis Zajednice
jugoslovenske elektroprivrede / glavni i
odgovorni urednik Branislav A. Bošković. –
God. 1, br. 1 (1948)– . – Beograd
(Balkanska 13) : Zajednica jugoslovenske
elektroprivrede, 1948– (Beograd :
Kultura). – 28 cm

Tromesečno

ISSN 0013-5755 = Elektroprivreda

COBISS.SR-ID 32023

Milić R. Stojić

Doprinos Nikole Tesle u oblasti daljinskog upravljanja

Stručni rad
UDK: 627.728; 621.398

Rezime:

S obzirom da se doprinosi Nikole Tesle u različitim područjima elektrotehnike ne mogu posmatrati izolovano, u uvodnom delu rada se najpre daje kraći pregled glavnih rezultata Teslinih istraživanja, inovacija i inženjerskih ostvarenja. U nastavku rada detaljnije se opisuje sistem daljinskog upravljanja sa naglaskom na prenos komandnih signala od nepokretnog predajnika do prijemnika na pokretnom objektu upravljanja, kao i realizacija upravljačkih signala za pokretanje izvršnih organa objekta. Daju se, takođe, i napomene u vezi uticaja Teslinog grandioznog dela na stanje i razvoj savremene elektrotehnike.

Ključne reči: Nikola Tesla, patenti, bežični prenos signala, daljinsko upravljanje

Abstract:

NIKOLA TESLA'S CONTRIBUTIONS IN THE AREA OF REMOTE CONTROL

Since Tesla's contributions in different areas of electrical engineering cannot be considered separately, in the introductory section of this paper a short review of Tesla's main results in the research, innovations, and engineering achievements are given. Then, Tesla's system of remote control is described in more details. The particular attention is paid to the command signals transmitting from the immobile emitter on the ground to the mobile receiver, as well as to the realization of control signals that start actuators of control plant. Some remarks about the influence of Tesla's grandiose deed on the present state and future developments of modern electrotechnique are also given.

Key words: Nikola Tesla, patents, wireless signal transmitting, remote control

1. UVOD

Nikola Tesla je najpre započeo školovanje u osnovnoj školi u Smiljanu 1863. godine a zatim nastavio u Gospiću. Od 1870. godine pohada višu realku (gimnaziju) u Rakovcu kod Karlovca, gde je maturirao 1873. godine. Dve godine kasnije upisuje Višu tehničku školu (politehniku) u Gracu. Iz Graca odlazi u Maribor 1878. godine a potom u Gospić,

gde kraće vreme predaje kao suplent u gimnaziji. Početkom 1880. godine odlazi u Prag, gde upisuje studije prirodne filozofije. Sudeći na osnovu ranijih istraživanja života i dela Nikole Tesle [1] i novijih istraživanja [2], Tesla je u Gracu i Pragu pripadao užoj grupi najboljih studenata. U vezi Teslinog univerzitetskog obrazovanja Franc Pichler, profesor Univerziteta u Lincu (Austrija) konstatuje: „Na osnovu apsolviranih predavanja nema sumnje da je

Prof. dr Milić R. Stojić – Elektrotehnički fakultet, 11 000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73, e-mail: estojic@etf.bg.ac.yu

Tesla dobio vredno akademsko obrazovanje koje će mu kasnije omogućiti plodno pronalazaštvo, vrhunsku inženjersku delatnost i solidne naučne osnove. Otuda ne delimo uvreženo mišljenje da je Tesla, poput Tomasa Alve Edisona, bio samouk, niti da je bio samoobrazovan kao Michael Faraday”.

Usled oskudice materijalnih sredstava, Tesla završava školovanje i 1881. godine zapošljava se u telefonskoj centrali u Budimpešti, gde započinje plodnu karijeru inženjera i ostvaruje svoje prvo otkriće: aparat za pojačanje glasa kod telefona. Opravdano se može pretpostaviti da je Tesla već tada znao za 50 godina star eksperiment francuskog fizičara Aragoa koji je uspeo da dovede u obrtno kretanje kružnu horizontalnu bakarnu ploču ispod koje je mehanički obrtao permanentan potkovičasti magnet sa polovima postavljenim neposredno ispod bakarne ploče, koja se okretala posredstvom obrtnog magnetnog polja koje je u ovom slučaju proizvodio permanentni magnet obrtan mehaničkim putem. Razumljivo, ovaj sistem se ne može posmatrati kao električni motor; pre je reč o sistemu transformisanja jedne mehaničke energije u drugu posredstvom magnetne indukcije kao transmisije. Tesli je sinula genijalna ideja da obrtno magnetno polje ostvari čisto električnim putem. Na statoru zamišljenog indukcionog motora postavio je naizmenično skupove namota određenog broja (broja polova) napajanih preko namotaja sa naizmeničnim strujama fazno pomerenih jedna u odnosu na drugu. Kod dvofaznog motora fazni pomeraj treba da bude $\pi/2$ radijana, kod trofaznog $3\pi/2$ radijana itd. Na taj način statorski namotaji proizvode obrtno magnetno polje sa sinhronom brzinom koja je, na primer, kod dvofaznog naizmeničnog motora jednaka $60 f/p$ obrtaja/min, gde je f učestanost naizmeničnog napona a p broj polova na statoru. Ako se unutar motora postavi rotor u vidu veверичинog kaveza ili sa kratko spojenim namotajem, rotor će se posredstvom indukcije obrtati zajedno sa obrtnim magnetnim poljem statorskih namotaja. Razlika između sinhronne brzine i brzine rotora (klizanje) je proporcionalna mehaničkom momentu ostvarenom na vratilu motora. Povodom ove ideje Tesla je u svojoj autobiografiji zapisao: „Svoje uzbuđenje, koje sam tom prilikom osetio, nisam u stanju da pobliže opišem... Hiljadu drugih tajni prirode koje bih slučajno otkrio dao bih za jednu koju sam od nje otrgao”. S idejom obrtnog magnetnog polja i konstrukcije indukcionog motora Tesla 1883. godine napušta Budimpeštu i prelazi u Edisonovo kontinentalno društvo najpre u Pariz a zatim u Strazbur, gde radi kao inženjer na održavanju i servisiranju dinamo mašina. Po saznanjima istraživača Teslinog dela, već u Strazburu Tesla konstruiše svoj prvi minijaturni indukcionni motor. Po preporuci inženjera Edisonovog kontinentalnog

društva, Tesla 1884. godine odlazi u SAD i zapošljava se u Edisonovoj električnoj kompaniji. Mada je Tesla visoko cenio Edisona, o čemu svedoče Tesline pohvalne reči o Edisonu povodom njegove smrti 1931. godine, njihova saradnja nije dugo trajala, jer je genijalni pronalazač Tomas Alva Edison, uvršćen u osam velikana američke istorije, bio veliki pobornik sistema jednosmerne struje i tvorac imperije u SAD i Evropi proizvodnje i korišćenja jednosmerne struje za osvetljenje i pogon dinamo mašina. Posle odlaska iz Edisonove kompanije i osnivanja svoje Tesla Electric Company 1887. godine, Tesla se sav posvećuje ostvarenju svojih zamisli: gradnji višefaznih naizmeničnih motora i generatora. Svoje patente indukcionog motora [3] i prenosa električne energije na daljinu [4] prijavljuje 1887. i 1888. godine, a ubrzo zatim 1888. i 1889. godine najpre još 7 a zatim 34 patenta. Mada su u to vreme već postojali generator i transformator naizmenične struje, svojim patentima Tesla je usavršio i zaokružio svoje grandiozno delo: konzistentan sistem proizvodnje, prenosa na daljinu i upotrebe polifaznih naizmeničnih struja za osvetljenje i pogon indukcionih motora.

Centralni i najznačajniji Teslin izum je indukcionni motor, pouzdan i robusan pretvarač električne u mehaničku energiju, koji je doprineo pobedi sistema proizvodnje, prenosa i korišćenja naizmenične struje nad tada odomaćenim sistemom jednosmerne struje. S obzirom na važnost pronalaska obrtnog magnetnog polja i indukcionog motora, posmatrajmo ovaj Teslin pronalazak u svetlu kasnijeg razvoja i trenutnog stanja tehnike i tehnologije. Sto dvadeset godina života indukcionog motora se može podeliti u tri perioda: faza konstantne brzine, faza promenljive brzine, zasnovana na razvoju analogne elektronike, i vektorsko upravljanje indukcionim motorom koje je teorijski obradio F. Blaschke u svojoj doktorskoj disertaciji 1974. godine [5]. Predloženi algoritam vektorskog upravljanja realizovan je posle više godina, tek zahvaljujući razvoju i povećanju brzine rada digitalnih računara. Savremeni vektorski upravljani indukcionni motor, po svojim karakteristikama, dostiže sve prednosti jednosmernog motora: veliki polazni momenat, kontinualnu promenu brzine i, što je od posebne važnosti, mogućnost upravljanja motorom preko dva nezavisna terminala: promenama fluksa statorskih namotaja i struje rotora (momenta motora), što je takav motor učinilo vrlo pogodnim u servo aplikacijama. U razvoju visoko kvalitetnih mikračunarski upravljanih elektromotornih pogona, sa vektorski upravljanim indukcionim motorom u ulozi izvršnog organa, veliki doprinos kod nas i u svetu dali su naši istraživači iz Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla” i sa Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu [6]. Valjano se procenjuje da se danas

u svetu koristi preko milijardu motora zasnovanih na Teslinom principu obrtnog magnetnog polja.

Posle pozitivne ocene Teslinog patenta i rezultata laboratorijskih ispitivanja indukcionog motora za Tesline izume se zainteresovala firma Vestinghaus, koja je proizvodila generatore za jednosmernu i monofaznu naizmjeničnu struju za potrebe osvetljenja. Usledila je plodna saradnja Tesle i Vestinghauusa koja je doprinela blistavoj pobedi Teslinog polifaznog sistema naizmjenične struje protiv sistema jednosmerne struje. Konačna pobjeda je izvojevana posle izgradnje hidroelektrane na Nijagari. Naime, na zahtev preduzeća Niagara Falls Power Company osnovana je 1890. godine međunarodna komisija eksperata da nađe najbolje rešenje za korišćenje energije Nijagarinih vodopada. I pored energičnog protivljenja Edisona i Lorda Kelvina, članova komisije, prevashodno zahvaljujući Georgu Westinghousu, usvojen je Teslin polifazni sistem; od 13 patenata ugrađenih u hidroelektranu na Nijagari 9 je Teslinih. Izgradnja hidroelektrane je započela 1893. godine, a prva tri generatora od po 5 000 KS su završena i puštena u rad 1895. godine. Hidroelektrana je kasnije dograđivana, a radi i danas. Visokonaponskim vodovima energija sa hidroelektrane je prenetna do 40 km udaljenog grada Bafala. Demonstracija Teslinog polifaznog sistema je najpre izvedena u Evropi 1891. godine povodom međunarodne izložbe u Frankfurtu a zatim 1893. godine na svetskoj izložbi u Čikagu (SAD). Posle ovih demonstracija, a naročito posle puštanja u rad hidroelektrane na Nijagari, koja je poslužila kao ogledni primer za izgradnju sličnih sistema, Teslin polifazni sistem je bio opšte prihvaćen i širio se poput plamena na olujnom vetru po celom svetu. Brzinu prihvatanja Teslinog polifaznog sistema ilustruju i primeri sa naših prostora. Naime, zahvaljujući Đorđu Stanojeviću, profesoru fizike na Vojnoj akademiji i Visokoj tehničkoj školi u Beogradu, velikom poborniku primene električne energije u Kraljevini Srbiji i ličnom prijatelju Nikole Tesle, nepune 4 godine posle izgradnje elektrane na Nijagari, izgrađena je prva elektrana po Teslinom sistemu na reci Đetinji u Užicu [7]. Povodom stogodišnjice postojanja elektrana je renovirana i ponovo puštena u rad 1999. godine. Kasnije 1903. izgrađena je veća slična elektrana u Vučju kod Leskovca, a zatim i elektrana u blizini Knjaževca. Sve tri prve naše elektrane i danas rade. Kada je ostvario svoj indukcionni motor i polifazni sistem, Tesla je imao 34 godine i da ništa drugo nije učinio ostao bi slavan i poznat kao jedan od najznačajnijih pionira u razvoju elektrotehnike. O tome svedoče i reči Lorda Kelvina, koji se u početku razvoja protivio uvođenju sistema naizmjenične struje: „Tesla je za razvoj elektrotehnike učinio više nego i jedan istraživač u području elektrotehnike do tada”.

Posle brilijantne pobjede i masovne primene Teslinog polifaznog sistema u svetu, Tesla je ostavio svoj plifazni sistem da ga drugi usavršavaju, šire i masovno proizvode, a zainteresovao se da istraži fenomene koje će izazvati struje viših frekvencija. Duži niz godina radi na proizvodnji struja visokih učestanosti najpre mehaničkim putem, povećavanjem broja namota na statoru i/ili ubrzavanjem rotora generatora. Na taj način uspeo je da proizvede struje učestanosti do 30 kHz, što je bila granica mehaničkih mogućnosti obrtnih delova generatora. Stoga Tesla nastoji da pronađe generator bez obrtnih delova i patentira jedan od svojih najlepših pronalazaka „Teslin transformator” zasnovan na korišćenju oscilatornog kola i električne varnice. Na taj način uspeva da proizvede struje učestanosti od nekoliko stotina kHz pri naponima koji su dostizali desetak miliona volti, koje se njemu u čast nazivaju „Tesline struje”. Ove struje su omogućile nove grane elektrotehnike: radiotehniku, upravljanje na daljinu (telemehaniku), luminiscentno osvetljenje, elektrotermiju (indukcione peći), tehniku visokog napona i dijatermiju (primenu Teslinih struja u medicini). Princip rada i konstrukciju generatora struje visoke učestanosti Tesla je opisao u svom osnovnom patentu iz 1891. godine i u brojnim kasnijim patentima između 1891. i 1898. godine u kojima daje brojna usavršavanja u pogledu varničara i otklanjanja nastalog električnog luka pomoću magnetskog polja, duvaljki sa komprimiranim gasovima i izolujućim tečnostima. Svoja otkrića u ovom području Tesla je saopštio u časopisu *The Electrical World* i u više predavanja u SAD, Londonu i Parizu. Svoja predavanja ilustruje vizuelnim svetlosnim efektima sa električnim lučnim lampama i cevima sa proređenim vazduhom (luminiscentne cevi), kao i fiziološkim dejstvima struje visoke učestanosti bezopasne po život čoveka. Ovi prikazi su doprineli i inače velikoj popularnosti Nikole Tesle, koga tada u stručnoj i bulevarskoj štampi nazivaju magom i čarobnjakom elektriciteta.

Najznačajniji Teslin pronalazak u oblasti struja visokih učestanosti je otkriće principa radiotehnike i bežičnog prenosa signala na daljinu. Naime, Tesla je pokazao kako se zračenja ovih struja (prostiranje elektromagnetskih talasa) i efekat rezonanse mogu iskoristiti za bežični prenos signala na velika rastojanja. Tesla je prvi dao ideju antene, bitnog elementa svakog emisionog i prijemnog radiouređaja. Posle požara koji je 1895. godine uništio njegovu laboratoriju u Njujorku, Tesla 1896. gradi drugu skromniju laboratoriju, takođe u Njujorku, pomoću koje uspeva da prenese visokofrekventne signale na daljinu od 30 km. Pronalazak radija se pripisuje Marconiju i nekolicini drugih istraživača većinom iz Italije i Engleske, među kojima se Tesla neopravdano

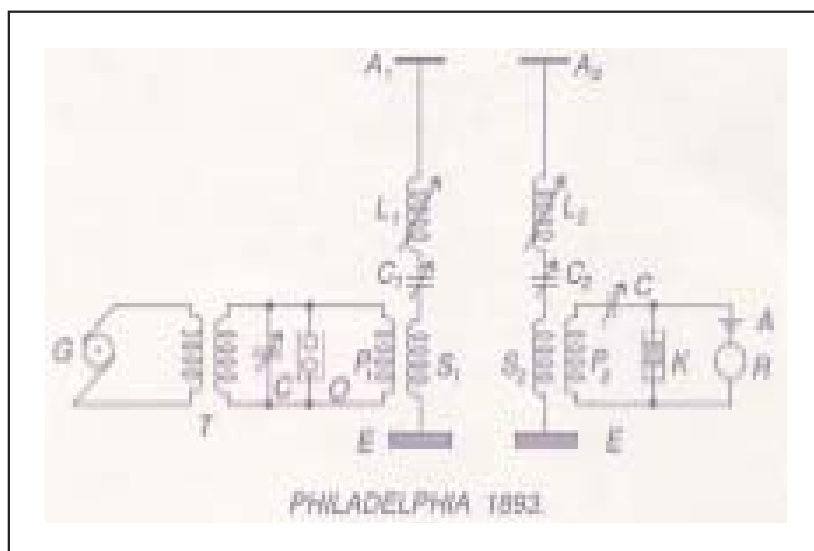
izostavlja. Tome su doprineli Markonijevi eksperimenti u prenosu radio signala najpre iz Engleske na Kontinent a zatim iz SAD u Englesku kao i lobi oko Markonija koji je zamerao Tesli da se prevashodno zalagao za prenos energije, a ne niskoenergetskih razumljivih signala na daljinu. Naši studiozni poznavoci Teslinog dela, kao profesori Jovan Surutka i Aleksandar Marinčić, argumentovano su dokazali da je u razvoju radija Tesla dao prve i fundamentalne doprinose. Tako J. Surutka konstatuje [8]: „(i) Tesla je prvi otkrio način proizvodjenja struja visokih učestanosti u vreme kada se znalo samo za kratkotrajna oscilatorna pražnjenja kondenzatora; (ii) Tesla je prvi upozorio na pogodnosti struje visoke frekvencije za bežični prenos energije i za prenos razumljivih signala; (iii) Tesla je prvi primenio princip usaglašavanja u rezonansu predajnika i prijemnika, uključujući tu i tehničko rešenje sistema četiri kola u rezonansi; (iv) Tesla je prvi pronašao emisionu i prijemnu antenu tipa antena-zemlja, kakva je dominirala u radiotehnici od samih početaka radiotehnike pa sve do pojave kratkih i ultrakratkih talasa”. Ali, prioritet u razvoju radija se još uvek pripisuje G. Markoniju, uprkos okončanja dugogodišnjeg sudskog spora, koji je u SAD trajao 40 godina. Naime, Vrhovni sud SAD je 1943. godine doneo presudu kojom se u SAD poništava osnovni Markonijev patent iz 1904. godine, zato što su mu prethodili Teslini seminalni patenti, a takođe i patenti Stona i Lodga u načinu postizanja rezonanse. Ovde treba dodati i radove Aleksandra Stepanoviča Popova, jednog od pionira radiotehnike u Rusiji. Presuda nije imala bitnog efekta, jer je nisu doživeli glavni akteri spora Nikola Tesla i Guglielmo Markoni (umro 1937. godine).

Od nekoliko stotina patenata prihvaćenih u SAD i Evropi ovde navodimo bez detaljnijih opisa samo najglavnije. Tesla 1896. započinje istraživanja X-zraka a 1897. godine istražuje mogućnost bežičnog prenosa energije i izvodi eksperimente sa daljinski upravljanim brodom pomoću radio signala. Godine 1899. u Koloradu Springsu konstruiše laboratoriju a 1900. godine i antenu Svetske radio stanice na Long Ajlendu. Prvi radni motor Tesline turbine patentira 1907. godine a 1908. testira Teslinu pumpu. Skice i proračune za aeromobil prijavljuje 1909. godine, 1911. godine ispituje svoje parne turbine i pumpu za koje dobija patent 1913. godine. Komercijalno značajan patent merača brzine prijavljuje

1914. godine i 1915. godine saraduje sa Valtam kompanijom u proizvodnji automobilskih tahogeneratora. Sa Bad kompanijom započinje saradnju 1920. godine u proizvodnji motora sa unutrašnjim sagorevanjem a 1928. godine patentira letilicu sa vertikalnim uzletanjem. Štaviše, 1929. godine bavi se procesom proizvodnje i prerade sumpora, gvožđa i bakra.

2. PRENOS RADIO SIGNALA NA DALJINU

Za razumevanje fundamentalnog doprinosa Nikole Tesle daljinskom upravljanju neophodno je najpre ukazati na Teslin istorijski patent iz 1897. godine „Sistem prenosa električne energije” (US patent br.645376), kojim je zaštitio svoj sistem četiri kola u rezonansi i sistem emisione i prijemne antene, šamatski prikazan na slici 1.



Slika 1. Teslin sistem četiri kola u rezonansi

U ovom patentu Tesla daje tehničku osnovu svog sistema sinhronizovane bežične telegrafije zasnovanog na primeni principa rezonanse između predajnika i prijemnika [8]. Na slici 1 se vidi da predajnik i prijemnik sadrže po dva rezonantna kola od kojih jedno čini antena, emisiona ili prijemna, sa elementima za spregu. Sva četiri kola treba da poseduju istu sopstvenu rezonantnu učestanost, da bi se efikasno prenela energija od predajnika ka prijemniku. U patentu Tesla opisuje postupak usaglašavanja rezonansi (tuning) promenama dužina i broja navojaka u svakom od induktivnih kalemova rezonantnih kalemova. Treba istaći da je u to vreme, kada o teoriji antena nije bilo pomena, Tesla eksperimentalnim putem pokazao da dužina antenskog provodnika, za-

jedno sa kalemom za spregu sa primarnim kolom, treba da bude oko četvrtine talasne dužine sopstvenih oscilacija odgovarajućeg rezonantnog kola. Ovaj princip se i danas primenjuje u konstrukciji antena [8]. Tesla je prvi konstruisao emisionu antenu, bitan element svakog emisionog i prijemnog uređaja. Po Teslinoj zamisli, antena je izolovan vertikalni provodnik završen na gornjem kraju telom velike kapacitivnosti, a donjim krajem vezanim za jedan kraj generatora signala visoke frekvencije; drugi kraj generatora vezan je za zemlju. Tokom 1899. godine Tesla je vršio intenzivna istraživanja u oblasti bežične telegrafije pomoću nove snažne radiostanice koju je izgradio u Koloradu Springsu.

3. PATENTI U OBLASTI DALJINSKOG UPRAVLJANJA

Svoj sistem predajne i prijemne antene sa 4 kola u rezonansi Tesla je najpre prikazao u svom predavanju u Franklinovom institutu u Filadelfiji u martu 1893. godine. Na predavanju Tesla je praktično demonstrirao predaju i prijem elektromagnetskih talasa i time dao fundamentalne principe u bežičnom prenosu signala, radiotehnici i daljinskom upravljanju.

Daljinsko upravljanje podrazumeva prenos komandi sa upravljačkog mesta na objekat upravljanja, koji može biti obično ili podvodno plovilo, pokretni objekat na zemlji, letilica u vazдушnom prostoru itd. Razumljivo je da se prenos komandi na udaljene objekte upravljanja mora vršiti bežičnim putem. U tom slučaju, predajnik generiše komandu u vidu signala pogodnog za prenos; na primer, u vidu kodovane povorke impulsa sa nosećim signalom visoke učestanosti. Prijemnik na objektu upravljanja detektuje upravljački signal i pretvara ga u komandu za realizaciju različitih zadatah operacija na objektu upravljanja. Upravljački signal je obično niskog energetskog nivoa pa je otuda neophodno da na objektu upravljanja postoje rezervoari energije sa komprimovanim vazduhom (pneumatski), uljem (hidraulički) ili električne (baterije), na račun kojih se pojačava snaga komandi potrebna za obavljanje zadatah operacija; na primer, pokretanje izvršnih organa. Zahvaljujući razvoju telekomunikacija i računarske tehnike, danas je ova oblast vrlo razvijena i široko primenjivana naročito u vojne svrhe, gde je poznata pod nazivom „Elektronska dejstva i protivdejstva”. Kao primer daljinskog upravljanja može da posluži savremeni radio komandni sistem protivvazdušne odbrane. Ako je takav sistem, na primer, jednokanalni po cilju a trokanalni po raketi, tada se na jedan cilj (neprijateljska letilica) istovremeno mogu navoditi tri rakete od kojih svaka preko antene RPK (radio predajnika komandi) prima svoje ko-

mande iz centra za navođenje prema zadatom „kodnom ključu” (obliku impulsno kodovanog signala), ugrađenog u raketu. Na taj način, svaka raketa „razume” samo svoj komandni signal preko koga se posredstvom kormila privodi na izračunatu kinematičku putanju, koja vodi raketu do susreta sa ciljem i njegovog uništenja.

3.1. Osnovni patent iz daljinskog upravljanja

Svoj osnovni patent iz oblasti daljinskog upravljanja [9] Tesla je podneo Patentnom zavodu SAD 1. jula 1898. godine pod br. 684 934. Patent je prihvaćen i objavljen 8. novembra 1898. godine pod br. 613 809 pod naslovom: „Metoda i aparature za upravljanja mehanizmima pokretnih plovila i vozila”. Tesla je od svog patenta očekivao veliki komercijalni efekat pa je preko ugledne advokatske kuće Hozeltajn u Londonu prijavio svoj pronalazak i van SAD u više zemalja: Belgiji, Brazilu, Nemačkoj, Velikoj Britaniji, Francuskoj, Italiji, Mađarskoj i Rusiji, koje su jedna za drugom prihvatale patent u različito vreme [10,11]. Patent nije prihvaćen u Austriji, Švedskoj, Norveškoj, Švajcarskoj i Danskoj. Primera radi, u Norveškoj patent nije registrovan, s obrazloženjem da postoji domaći pronalazak koji je opisivao postupak i aparaturu za bežično upravljanje torpedom.

Patent obuhvata sistem za daljinski prijem komandnih signala, sistem releja, baterije za napajanje motora i više mehaničkih naprava za spregu motora sa izvršnim organima. Usled ograničenog prostora, ovde se neće objašnjavati funkcionisanje brojnih mehaničkih sklopova prikazanih u patentu; radije se daje samo postupak prenosa upravljačkih signala na daljinu. Vrlina patenta se ogleda u činjenici da se ponudjenim rešenjem prvi put pokretnim objektom upravlja bežično sa velikog rastojanja, u bilo koje vreme i bez obzira na eventualne prepreke koje onemogućavaju optičku vidljivost između komandnog mesta i pokretnog objekta. U prvom postupku prenosa komandnih signala koristi se kontura većeg radijusa napajana iz generatora strujom visoke učestanosti ili strujom pražnjenja kondenzatora velike kapacitivnosti. U ovom slučaju prijemnik na pokretnom objektu poseduje antenu i oscilatorno kolo sa sopstvenom učestanošću usaglašenom sa učestanošću kratkotrajnog visokofrekventnog komandnog signala. Drugi postupak se u osnovi zasniva na prethodno opisanom Teslinom patentu predajne i prijemne antene sa 4 kola u rezonansi. U ovom slučaju predajnik je nepokretan na zemlji, a prijemnik na pokretnom objektu. Prijemnik poseduje antenu i koherer (osetljivi detektor radio signala). Koherer je naprava koju su prvi konstruisali Hughes, Lodge i Branley a ka-

No. 613,809.

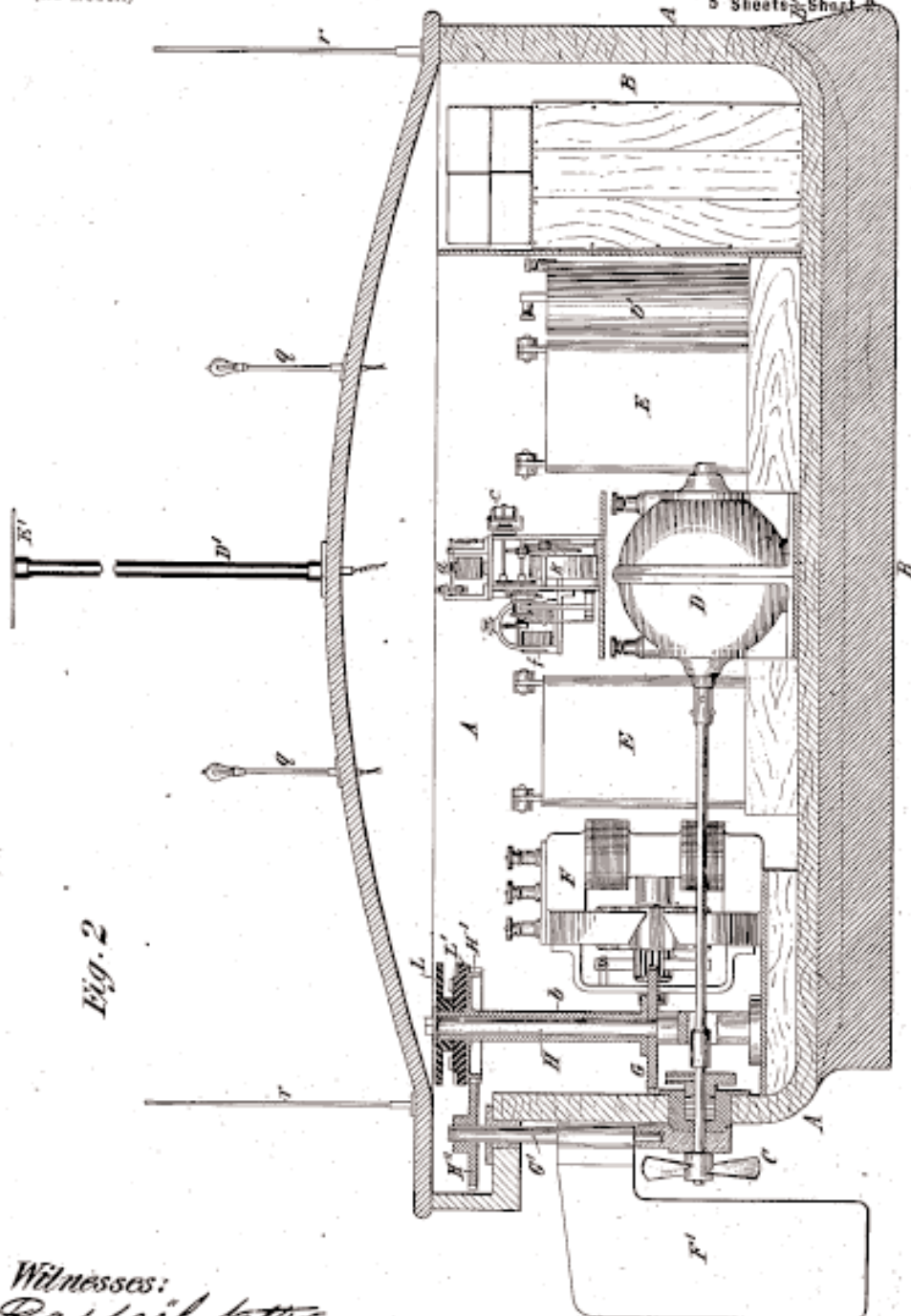
Patented Nov. 8, 1898.

N. TESLA.

METHOD OF AND APPARATUS FOR CONTROLLING MECHANISM OF MOVING VESSELS
OR VEHICLES.

(No Model.)

5 Sheets, Sheet #1



Witnesses:
Raphael Ketter
George Schorff.

Inventor:
Nikola Tesla

Slika 2. Prikaz poprečnog preseka broda

No. 613,809.

Patented Nov. 8, 1898.

N. TESLA.

METHOD OF AND APPARATUS FOR CONTROLLING MECHANISM OF MOVING VESSELS
OR VEHICLES.

(No Model.)

5 Sheets—Sheet 3.

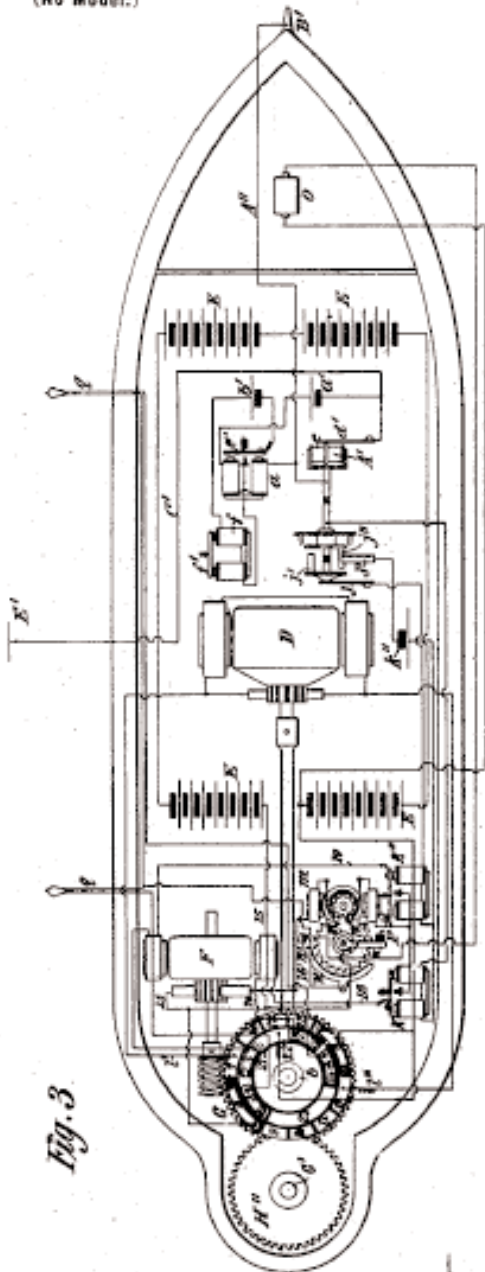


Fig. 3.

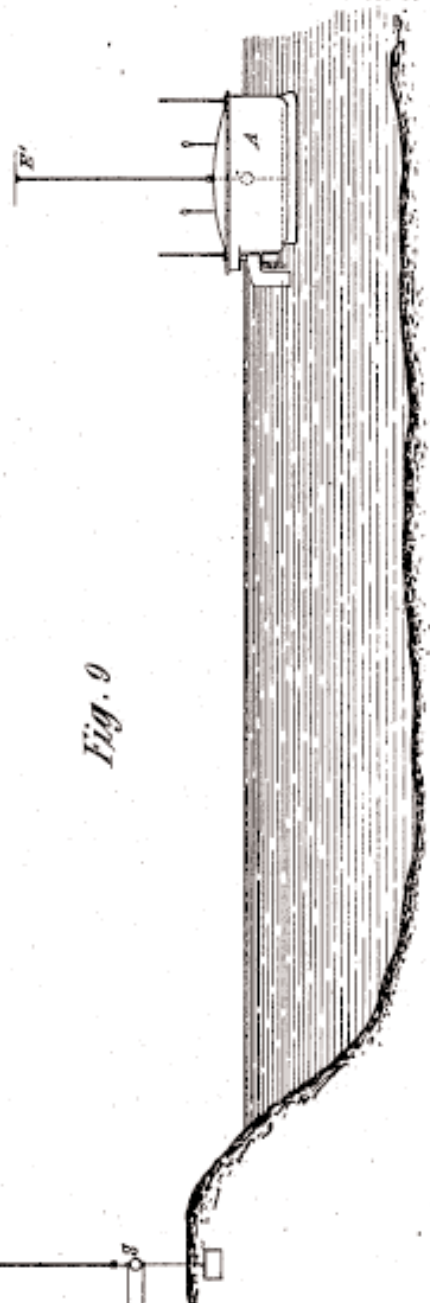


Fig. 9.

Witnesses:
Raphael Ketner
George Schuff.

Inventor
Nikola Tesla

Slika 3. Prikaz podužnog preseka broda.

snije usavršio Aleksandar Stepanovič Popov u Rusiji. Sastoji se od cevčice napunjene specijalnim sitnim prahom sa žičanim izvodima na krajevima između kojih, kad koherer nije pobuđen, postoji velika otpornost (oko jednog megaoma). Kad se koherer pobudi malim signalom, prah se zgusne i otpornost koherera se naglo smanji na nekoliko stotina oma i struja koherera naglo poveća. Ako se redno kohereru priključi namotaj elektromagnetnog relea, u trenutku pobude koherera kotva relea se zatvara. Deaktiviranje koherera i relea se postiže, bilo malim mehaničkim potresom ili ugaonim zaokretanjem cevčice, što je Tesla primenio. Oscilatorna kola predajnika i prijemnika poseduju iste usaglašene sopstvene učestanosti. Detektovani upravljački impulsi visoke učestanosti sa antene prijemnika su obično niskog energetskog nivoa pa nisu u stanju da pouzdano aktiviraju izvršne organe. Stoga prijemni impuls preko koherera aktivira pomoćne releje koji uključuju sisteme napajanja motora za pokretanje izvršnih organa.

Obimna patentna prijava [9] sadrži tehnički opis svih naprava i uređaja ponaosob i sistema upravljanja u celini, sa više tehničkih crteža i detaljnih obrazloženja načina funkcionisanja. Radi globalnog uvida, ovde se daju samo dve ilustracije daljinski upravljanog broda, poprečni izgled na slici 2 i podužni presek broda na slici 3. Brod pokreće propeler koji preko mehaničkog reduktora pogoni elektromagnetni motor napajan iz akumulatorske baterije. Pored mehanizma za pogon broda, brod poseduje i manji elektromagnetni motor, napajan sopstvenom baterijom, za pokretanje kormila preko pužastog prenosnika, tj. za određivanje smera kretanja broda: napred, ulevo ili udesno. Dakle, mehanizam daljinskog upravljanja svodi se na odašiljanje visokofrekventnog impulsa sa nepokretnog predajnika na zemlji na antenu prijemnika i koherer, koji preko programatora i pomoćnih releja uključuju napajanje motora koji pokreću izvršne organe (propeler i kormilo).

Teslin daljinski upravljani brodovi prvi put je prikazan na predavanju pod naslovom „O veštini teleautomatike” održanog 13. maja 1899. godine pred gostima Kluba privrednika u Čikagu. Na prijemu održanom u čast Nikole Tesle prisustvovali su mnogi ugledni gosti. Eksperimenti sa brodićem trajali su celu noć kada je Tesla zadivljenoj publici prikazao svoj brod (slike 3 i 4) dugačak šest stopa kojim je daljinski upravljao na malom veštačkom jezeru specijalno napravljenom u svrhe eksperimenta.

3.2. Usavršavanja osnovnog patenta

Od svojih patenata iz oblasti daljinskog upravljanja Tesla je mnogo očekivao pa ih je stoga pri-

javljivao u više zemalja Amerike i Evrope. U svojim predavanjima i napisima u stručnim časopisima naročito je naglašavao mogućnosti primene svojih izuma u vojne svrhe. O tome svedoče sledeća Teslina vizionarska predviđanja [10]:

Iako sam počeo ovaj izum pre mnogo godina i objašnjavao ga mojim posetiocima vrlo često u svojim laboratorijskim demonstracijama, postao je poznat tek mnogo kasnije, dugo posle njegovog usavršavanja, kada je, prirodno, pobudio mnogo diskusije i senzacionalnih izveštaja. Ali, pravu vrednost ove nove umetnosti nije shvatila većina, niti je shvaćena velika snaga osnovnog principa. Koliko sam najpreciznije mogao da sudim na osnovu brojnih komentara koji su se tada pojavili, rezultati koje sam dobio bili su smatrani kao posve nemogući. Čak i nekolicina koji su bili raspoloženi da priznaju praktičnost izuma, videli su u njemu samo samohodni torpeda koji je trebalo koristiti za uništavanje bojnih brodova i to sa sumnjivim uspehom. Opšti utisak je bio da sam se ja jednostavno bavio razmišljanjima o upravljanju takvim brodom pomoću Hercovih ili drugih zrakova. Postoje torpeda koja imaju električno upravljanje pomoću žica, a ima i načina za komuniciranje bez žica te je gornje zaključivanje, naravno, bilo očigledno. Da nisam ništa postigao, ništa više od toga, zaista bi napravio mali napredak; to predstavlja sredstvo apsolutnog kontrolisanja svih bezbrojnih reprodukovanih pokreta u svakom pogledu (bez obzira koliko ih je) kao i operacija svih unutrašnjih organa jednog individualnog automata. Kritika u pogledu kontrole automata, pri čemu može doći do ometanja, potiče od ljudi koji nisu čak ni sanjali o divnim rezultatima koji se mogu postići pomoću električnih vibracija. Svet se kreće polagano i teško je sagledati nove istine. Sigurno je da bi se primenom ovog principa moglo obezbediti oružje, kako za napad i za odbranu, tim većeg razornog dejstva, jer se može primeniti na podmornice kao i na leteće naprave. Faktički nema granice za količinu eksploziva koju može da ponese ili za daljinu na koju može da deluje, a greška je skoro nemoguća. Ali, snaga ovog novog principa ne sastoji se samo u njegovom razornom dejstvu. Njegovo usavršavanje uvodi jedan nov element ratovanja koji nikada ranije nije postojao - borbenu mašinu bez ljudi kao sredstva za napad i odbranu. Stalni napredak u tom pravcu mora u krajnjoj instanci da dovede do toga da rat postane samo takmičenje mašina bez ljudi i bez gubitka života; do stanja koje bi bilo nemoguće bez ovog novog koraka koji se, po mom mišljenju, mora ostvariti kao preliminarni korak ka trajnom miru. Budućnost će ili potvrditi ili negirati ova gledišta. Moje ideje po ovom pitanju iznete su s dubokim uverenjem ali i sa skromnošću.

Na osnovu ovih reči može se zaključiti da je Tesla prihvatio opravdanost primedbi savremenika da se njegova otkrića u području daljinskog upravljanja ne mogu efikasno i pouzdano koristiti u ratne svrhe zbog lakog ometanja. Naime, jednostavno je ustanoviti učestanost komandnog signala sa predajnika i zatim generisati ometajuće signale iste učestanosti, koji će, na primer, bežično upravljati torpeda skrenuti sa kinematičke putanje koja vodi do susreta sa ciljem (neprijateljskim ratnim brodom). Svestan ovih nedostataka osnovnog patenta, Tesla prijavljuje nove patente br. 723 188 i 725 605 sa ciljem unapređivanja osnovnog patenta u smislu tajnosti ili zaštite komandnih signala od ometanja. U ovim patentima Tesla koristi više komandnih signala različitih učestanosti i time prvi put inicira ideju prenosa komunikacionih signala u proširenom opsegu, koji omogućava da se signal sa ograničenim frekvencijskim spektrom u niskom području učestanosti prenese signalom daleko veće frekvencije. Tehnika proširenog spektra danas se često primenjuje u zaštiti informacija (kriptografiji). Pored toga, Tesla je u postupku detekcije komandnih signala na prijemniku ugradio i princip logičkog I-kola, koji je zaštićen u patentima br. 723 188 i 725 605. Patent br. 723 188 prijavljen je Patentnom zavodu SAD 16. jula 1900. godine, a odobren 17. marta 1903. godine pod naslovom „Način signalizacije”.

Pronalazak principa I-kola sastoji se u kombinaciji uređaja na predajniku i prijemniku za odašiljanje odnosno prijem komandnih signala različitih učestanosti. U ovom slučaju, predajnik i prijemnik poseduju dva ili više oscilatornih kola različitih i u parovima usaglašenih sopstvenih učestanosti. Logičko I-kolo omogućava da se upravljački signal koji preko koherera i pomoćnih releja treba da aktivira određenu operaciju na pokretnom objektu upravljanja generiše ne samo na osnovu jednog komandnog signala detektovanog na prijemniku, već na osnovu dva ili više takvih signala različitih učestanosti. Na taj način Tesla je obezbedio zaštitu komunikacije između predajnika i prijemnika od ometajućih signala iz drugih izvora. Stepenn zaštite se može poboljšati povećavanjem broja različitih komandnih signala.

U novije vreme pojavljuju se tekstovi posvećeni životu i delu Nikole Tesle u kojima se pronalasku principa I-kola pridaje epohalan značaj, kao začetku razvoja digitalnih računara. Neće se umanjiti značaj ovog otkrića zaštite informacija u daljinskom upravljanju ako kažemo da je njegova uloga u razvoju digitalne tehnike ipak preneglašena. Jer, u hardveru savremenog digitalnog računara logička kola imaju minornu ulogu u poređenju sa ostalim daleko složenijim hardverskim komponentama arhitekture digitalnog računara.

4. ZAKLJUČAK

Za razumevanje doprinosa Nikole Tesle elektrotehnici treba imati u vidu vreme u koje je Tesla ostvarivao svoje pronalaskes i patente, kraj 19. i prva polovina 20. veka. Na početku svoje naučne, istraživačke i plodne inženjerske delatnosti nauka o elektricitetu bila je tek izašla iz povoja, tako da većina Teslinih doprinosa ima fundamentalan značaj za dalji razvoj elektrotehnike. Nekoliko stotina Teslinih patenata prihvaćenih u SAD i više drugih tehnički razvijenih zemalja Amerike i Evrope mogu se po svojoj tematici svrstati u nekoliko kategorija: (I) Obrtno magnetsko polje, indukcioni motor i polifazni sistem proizvodnje, prenosa i korišćenja naizmjeničnih struja. (II) Teslin transformator, struje visokih frekvencija i njihove primene. (III) Antena i četiri kola u rezonansi, prenos signala na daljinu i, s tim u vezi, začetak radiotehnike. (IV) Sistem daljinskog upravljanja. (V) Više različitih patenata iz oblasti mašinstva. Ni jedna od ovih oblasti se ne može posmatrati izolovano jer su u svakom od narednih patenata ugrađena iskustva i rezultati eksperimentalnih istraživanja iz prethodnih inovacija. Stoga je u ovom radu najpre dat kratak pregled doprinosa Nikole Tesle elektrotehnici u celini, a zatim je detaljnije prikazan Teslin sistem daljinskog upravljanja.

Za svoje epohalne rezultate u razvoju elektrotehnike Tesla je dobio brojna priznanja: nekoliko počasnih doktorata uglednih univerziteta, medalja i odlikovanja međunarodnih profesionalnih udruženja, članstvo u akademijama nauka (Beograd i Zagreb). Osim toga, brojni su njegovi spomenici kod nas i u svetu. Ulice, ustanove i preduzeća nose njegove ime. Ipak, najveći spomenik Nikoli Tesli, koji će trajati za sva vremena, je jedinica magnetne indukcije „Tesla” u međunarodnom sistem jedinica SI (System International), prihvaćena na Međunarodnoj konferenciji za tegove i mere održanoj od 11. do 19. oktobra 1960. godine u Parizu [13]. Tesla je jedini Sloven, i to srpskog roda, koji ima svoju jedinicu u međunarodnom sistemu jedinica. Otuda se Tesla pominje u zakonima svih država u svetu i svim školama (osnovnim, srednjim i visokim) u kojima se izučavaju fizika i elektrotehnika.

O Tesli je napisano više knjiga naših i većinom inostranih autora nego o bilo kom drugom velikanu nauke. Nekoliko tih knjiga i monografija imaju stručni karakter, a većina su romanizirane biografije i publikacije iz domena naučne fantastike. Tesla i danas inspiriše svet kao osobenjak koji je u toku dugog života sačuvao harizmu genija i velikog vizionara. On nas svakodnevno podseća na svoje najveće delo idukcioni motor i polifazni sistem proizvodnje, prenosa i korišćenja naizmjenične struje za osvetlje-

nje i pogon mašina u industriji, električnoj vuči i svakodnevnom životu. To delo se praktično nije izmenilo za poslednih više od sto godina, samo se enormno uvećalo i tehnološki usavršilo, ono nas okružuje i podseća na Teslu na svakom koraku. Za ilustraciju ovog Teslinog dela neka posluže mišljenja dva poznata američka naučnika [14]. Tako B.A. Bohrend kaže: „Kad bi se u industrijskom svetu isključili i oduzeli rezultati Teslinog rada, točkovi industrije prestali bi raditi, stali bi tramvaji i električni vozovi, gradovi bi potonuli u mrak, a fabrike zamrle”, a profesor Berend konstatuje: „Bez Teslinih otkrića čovečanstvo bi utonulo u potpunu tamu i varvarizam ... Onima koji su došli posle njega, on nije ostavio skoro ništa da urade”.

4. LITERATURA

- [1] John J. O'Neill, PRODIGAL GENIUS: THE LIFE OF NIKOLA TESLA INVENTOR EXTRAORDINARY, Neville Spearman LTD, London, 1968.
- [2] Franz Pichler, ON THE UNIVERSITY STUDIES OF NIKOLA TESLA IN GRAZ AND PRAGUE, Proceedings of „Cybernetics and Systems 2004” Conference, University of Vienna, Austria, 13-16 April 2004, Edited by Robert Trapp, Publ. Comp., Vol. 11, pp.803-807.
- [3] Nikola Tesla, „ELECTRO-MAGNETIC MOTOR”, Patent No. 381.968, dated May 1, 1888, Application filed October 12, 1887, Serial No. 256.132.
- [4] Nikola Tesla, „ELECTRICAL TRANSMISSION OF POWER,” Patent No. 382.280, dated May 1, 1888, Application filed October 12, 1887, Serial No. 252.132.
- [5] F. Blaschke, DAS VERFAHREN DER FELDORIENTIERUNG ZUR REGELUNG DREHFELD MASCHINEN, Ph.D. Dissertation, TU Braunschweig, 1974.
- [6] Slobodan S. Vukosavić, DIGITALNO UPRAVLJANJE ELEKTRIČNIM POGONIMA, Akademski misao, Beograd, 2003.
- [7] Aleksandar - Kale Spasojević, Miodrag D. Glušević, STO GODINA ELEKTRIFIKACIJE UŽICA 1900-2000, Elektrodistribucija, Užice, 2000.
- [8] Jovan Surutka, TESLIN DOPRINOS ELEKTROTEHICI, Tehnika-Elektrotehnika, 1977.
- [9] Nikola Tesla, „METHOD OF AND APPARATUS FOR CONTROLLING MECHANISM OF MOVING VESSELS OR VEHICLES” Patent No. 613 809, Application filed, November 8, 1898.
- [10] Branimir Jovanović, NIKOLA TESLA - STO GODINA DALJINSKOG UPRAVLJANJA, u „Nikola Tesla - Sto godina daljinskog upravljanja”, Izd. Muzej Nikole Tesle, 1998, str. 9-19.
- [11] Jovan Perić, TESLINI PATENTI IZ OBLASTI DALJINSKOG UPRAVLJANJA, u „Nikola Tesla - Sto godina daljinskog upravljanja”, Izd. Muzej Nikole Tesle, 1998, str. 29-35.
- [12] Nikola Tesla, PROBLEMI POVEĆANJA Ljudske ENERGIJE, Slavija, Novi Sad, 1996.
- [13] Srđan Spiridonović, USVAJANJE NAZIVA „TESLA” ZA MEĐUNARODNU JEDINICU MAGNETNE INDUKCIJE, Zbornik radova Pete međunarodne konferencije „Tesla III milenijum”, str. V-1 - V-9.
- [14] Milosav Mirković, PESNIČKI ZVEZDOGRAM NIKOLE TESLE, Ljubostinja, Trstenik 2006.

Rad je primljen u uredništvo 1. 09. 2006. godine



Milić Stojić je rođen 1940. godine u Užicu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu je diplomirao, magistrirao i doktorirao 1963, 1965. i 1967. godine. U zvanja asistenta, docenta, vanrednog profesora i redovnog profesora za oblast automatike biran je 1963, 1969, 1975. i 1980. godine, respektivno. Održavao je nastavu iz automatike na redovnim i postdiplomskim studijama na svim elektrotehničkim fakultetima u Srbiji i Republici Srpskoj i na Vazduhoplovno-tehničkoj vojnoj akademiji. Bavi se teorijom stabilnosti, razvojem teorije i primenom osetljivosti, diskretnim transformacijama i digitalnim upravljanjem procesima i elektromotornim pogonima. Objavio je preko 180 naučnih radova, dva udžbenika sa ukupno 15 izdanja i autor/koautor je dve monografije na srpskom i po jedne na engleskom i ruskom jeziku.

Dragan Petrović

Teslina indukciona mašina – teorijsko objašnjenje delovanja elektromagnetnih sila i proračuna indukovane elektromotorne sile

Stručni rad
UDK: 621.395.722

Rezime:

Provodnici smešteni u žlebovima obrtnih električnih mašina su izloženi promenljivoj magnetnoj polju čija indukcija je znatno manja od vrednosti indukcije u međugvožđu mašine. U ovom radu biće dato teorijsko objašnjenje proračuna kako indukovane ems tako i sile koja deluje na provodnike i na zubce jedne obrtne električne mašine. Time će biti pojašnjeno zašto Nikola Tesla u svom čuvenom predavanju 1888. godine objašnjavajući delovanje obrtnog magnetnog polja govori o stvaranju „pritiska” po obimu rotora, a ne o silama koje deluju na provodnike smeštene u žlebove, kao uzroku stvaranja obrtnog momenta, što je uobičajeno a u suštini pogrešno.

Ključne reči: električne mašine, indukovane elektromotorne sile, elektromagnetne sile

Abstract:

*TESLA'S ELECTRO-MAGNETIC MOTOR - THEORETICAL EXPLANATION OF BOTH
ELECTRO-MAGNETIC FORCES AND CALCULATION OF INDUCED ELECTRO-MAGNETIC FORCE*

Conductors laid in slots of rotating electric machines are exposed to variable magnetic field the induction of which is considerably smaller than the value of induction in the air gap of a machine. This paper gives theoretical explanation of calculation as of induced electro-magnetic forces so of the force acting on conductors and teeth of a rotating electric machine. Thereby it will be explained why Nikola Tesla in his famous lecture in 1888, clarifying the action of rotating magnetic field talks about creating „pressure” on the rotor circumference, and not about forces acting on conductors laid in slots, as of the reason of creating the torque, which is usual but in fact wrong.

Key words: electric machine, induced electromotive forces, electrodynamic forces

1. UVOD

U cilju ostvarenja što veće vrednosti indukcije u magnetnom kolu električne mašine teži se da dužina međugvožđa bude što manja. To ostavlja manje prostora da bi se provodnici postavili baš u međugvožđu, te je nađeno rešenje da se oni smeste u izreza-

ne uzdužne žlebove u magnetnom kolu, kako statora tako i rotora. Time je rešen i problem njihovog boljeg učvršćenja i zaštite od oštećenja usled vibracija. Žlebovi mogu imati različit oblik - otvoren, poluzatvoren ili zatvoren, i primenjuju se zavisno od veličine mašine i njenog napona. U svakom slučaju, prisustvo žlebova remeti uniformnost magnetnog ot-

Prof.dr. Dragan Petrović, dipl. ing. el. - Elektrotehnički fakultet, 11000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

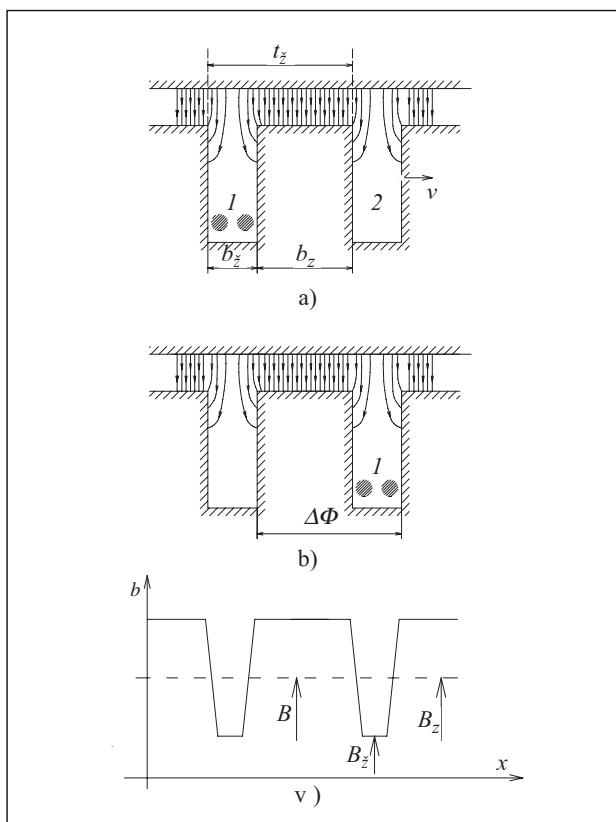
pora, jer je on znatno veći u zoni žleba, u odnosu na zubac. Linije magnetnog polja se grupišu u zoni zubaca, a mali njihov deo prolazi kroz sam žleb. Dakle, sami provodnici u žlebu su izloženi dejstvu magnetnog polja čija indukcija je znatno manja od indukcije koja se ima u međugvožđu.

Usled ove činjenice postavlja se pitanje da li će i indukovana elektromotorna sila provodnika u žlebu biti značajno smanjena kao i šta je sa elektromagnetnom silom koja deluje na provodnike i na celo magnetno kolo. Uz pretpostavku da su provodnici smešteni u otvorene pravougaone žlebove, u nastavku je prikazan način računanja indukovane ems i elektromagnetne sile.

2. INDUKOVANA ELEKTROMOTORNA SILA (EMS)

Faradej je još 1831. godine definisao zakon o računanju indukovane ems u provodniku dužine l koji se kreće brzinom v u magnetnom polju indukcije b :

$$e = l \cdot v \cdot b$$



Slika 1. Linije magnetnog polja i indukcija u međugvožđu i u žlebovima

Drugi način računanja te iste ems je na osnovu promene fluksa kroz površinu zamišljenog, ili stvarnog, strujnog kola čiji je element posmatrani provodnik:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \approx - \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Primenićemo taj zakon na proračun ems u provodnicima koji se nalaze u dnu žleba 1 prema slici 1 [1]. U posmatranom početnom trenutku provodnici u žlebu 1 se kreću zajedno sa žlebom brzinom v i presečani su sa malim brojem linija polja. U zoni žlebnog koraka t_z na slici 1.a, većina linija polja prolazi desno od posmatranih provodnika.

Posle vremena Δt usled brzine v žleb 1 dolazi u poziciju prikazanu na slici 1.b i većina linija polja u zoni t_z je sada sa leve strane žleba 1. Vreme za koje je provodnik prešao put t_z iznosi:

$$\Delta t = \frac{t_z}{v}$$

a promena fluksa kroz zamišljenu konturu čija je jedna strana posmatrani provodnik u žlebu 1 i čija dužina iznosi l je:

$$\Delta\phi = B_z \cdot b_z \cdot l + B \cdot b \cdot l = B \cdot t_z \cdot l$$

Prema slici 1.b srednja vrednost indukcije iznosi:

$$B = \frac{B_z \cdot b_z + B \cdot b}{b_z + b}$$

Prema Faradejevom zakonu je tada:

$$e = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = l \cdot v \cdot B$$

Dakle, indukovana ems je određena srednjom vrednošću indukcije u međugvožđu B a ne njenom znatno manjom vrednošću B_z koja se ima u žlebu.

Primena pravila o presecanju provodnika linijama magnetnog polja daje isti prethodni rezultat uz pravilno računanje brzina kojom se linije polja prebacuju sa jedne strane provodnika na drugu. Ta brzina je različita u zoni zubaca v_z i žleba v_z i da bi se isti broj linija ($\Delta\phi$) prebacio u toku Δt mora biti zadovoljena relacija:

$$B_z \cdot v_z \cdot \Delta t = B \cdot v \cdot \Delta t = B \cdot v \cdot \Delta t$$

Iz čega proizilazi da su:

$$v_z = v \cdot \frac{B}{B_z} \quad \text{i} \quad v \cdot v_z = v \cdot \frac{B}{B}$$

Brzina presecanja provodnika u žlebu v_z je znatno veća od brzine kretanja provodnika v , dok je br-

zina v_z manja. Time se objašnjava da u provodnicima u žlebu, iako su izloženi maloj indukciji B_z , usled povećanja brzine presecanja linijama polja indukovana ems ima vrednost kao da se ima uniformno polje čija je indukcija B i koje se kreće brzinom v .

3. ELEKTROMAGNETNE SILE U ZONI ŽLEBOVA [2]

U zoni žleba i susednih zubaca obično postoji magnetno polje koje potiče, s jedne strane od struja van te zone (namotaji statora ili rotora), kao i od struja koje prolaze kroz provodnike smeštene u posmatranom žlebu (fluks rasipanja). Neophodan uslov da bi se javila elektromagnetna sila na provodnik (ili na struju) jeste postojanje struje u provodniku i prisustvo linija magnetnog polja. Prema Laplasovom zakonu ta sila se računa prema relaciji $f = l \cdot i \cdot b$ gde je l - dužina provodnika kroz koji prolazi struja i , i nalazi se u magnetnom polju indukcije b .

Uz pretpostavku, koja odgovara realnom stanju kod električnih obrtnih mašina, da je provodnik smešten u žlebu i da kroz njega prolazi struja i_p , a da u međugvožđu mašine postoji magnetno polje koje stvaraju drugi provodnici (namotaji), tada u zoni žleba i susednih zubaca magnetno polje se sastoji iz dve komponente. Jedna je ona koja se ima u međugvožđu, a druga potiče od struje u posmatranom provodniku, koja se zove polje žlebnog rasipanja. Ove dve komponente uzrokuju sile na provodnik i na susedne zupce od kojih se kod obrtnih električnih mašina ostvaruje elektromagnetni moment.

Na slici 2.a je prikazana raspodela polja koja se ima u međugvožđu pri čemu je struja provodnika $i_p = 0$. Linije polja najvećim delom prolaze kroz zupce a samo mali deo kroz otvor žleba ulazi bočno u zupce (B_{b1} i B_{b2}), dok sasvim malo linija preseca provodnik (B_p). To proizilazi iz činjenice da je magnetna otpornost feromagnetnog materijala zanemarljiva u odnosu na otpornost vazduha u žlebu. Ako je srednja vrednost indukcije u međugvožđu B_δ , tada je fluks na ulazu u žleb ($y=0$):

$$\phi_{zo} = l \int_{-b_z/2}^{b_z/2} B_y dx = l \cdot B_\delta \cdot b_z$$

a deo tog fluksa koji se ima u preseku žleba gde je centar provodnika (visina h_p):

$$\phi_{zhp} = l \int_{-b_z/2}^{b_z/2} B_{hp} dx = l \cdot B_{hp} \cdot b \approx (0,002 \div 0,001) \cdot \phi_{zo}$$

Ovo je realna procena smanjenja fluksa na ovom preseku koja proističe iz detaljnijih proračuna žleba za ovakvu geometriju. Dalje, u bočne delove zubaca ulazi fluks

$$\phi_b = \frac{\phi_{zo} - \phi_{zhp}}{2}$$

što se malo razlikuje od $\phi_{zo}/2$.

Indukcije koje potiču od polja u međugvožđu i imaju se na bočnim stranama žleba (zubaca) i eksponencijalno se smanjuju po visini tako da su na visini $y=h_p$ skoro zanemarljive, te je odgovarajući fluks:

$$\phi_b \approx \frac{\phi_{zo}}{2} = l \cdot \int_0^{h_p} B_{\delta 1} dy = l \cdot \int_0^{h_p} B_{\delta 2} dy$$

Ako se imaju fluksovi ϕ_{zo} i ϕ_{zhp} , tada je indukcija kroz provodnik:

$$B_p = (0,002 \div 0,001) B_\delta$$

Na slici 2.b prikazane su linije polja koje potiču od struje u provodniku i_p , kao i raspodela indukcija B_{i1} i B_{i2} po visini žleba y . U delu $0 < y < h_p$ indukcije su praktično konstantne i međusobno jednake, ali suprotnog smera za dve strane žleba, i njihova približna vrednost je:

$$B_{i1} = B_{i2} = \frac{\mu_o \cdot i_p}{b_z}$$

Obzirom na to da ove indukcije imaju normalan smer na feromagnetni materijal to one izazivaju jednake sile privlačenja i imaju horizontalan smer (odnosno tangencijalan kod mašine). U bočne strane ulaze i linije polja iz međugvožđa čije su indukcije $B_{\delta 1}$ i $B_{\delta 2}$, tako da je rezultanta raspodela indukcije po visini h određena relacijom:

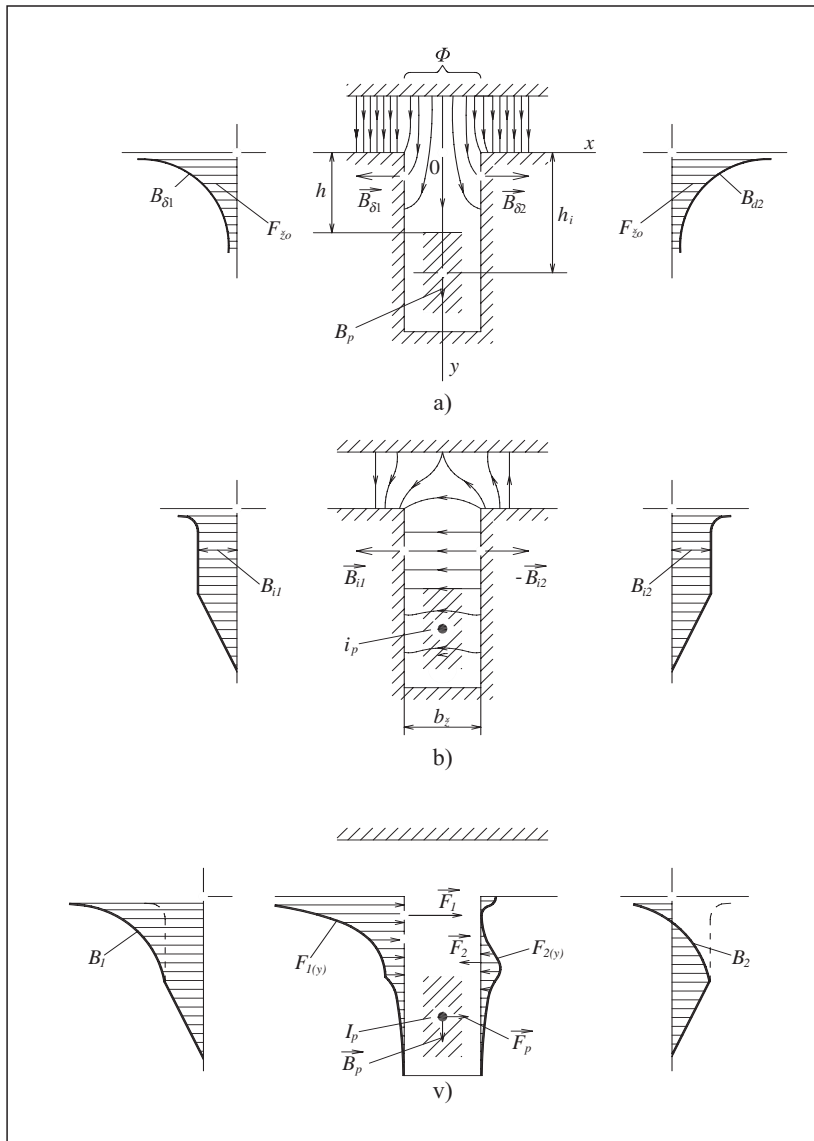
$B_1 = B_{\delta 1} + B_{i1}$ za levu stranu, a $B_2 = B_{\delta 2} - B_{i2}$ za desnu stranu zidova zubaca. Tangencijalna sila koja deluje na levi zubac iznosi:

$$F_2 = \frac{B_1^2}{2\mu_o}, \text{ a na površinu desnog zupca } F_2 = \frac{B_2^2}{2\mu_o}$$

Iznosi sila F_1 i F_2 i njihova promena po visini y su prikazani na slici 2v. One imaju smer prema sredini sa većim magnetnim otporom, tako da je rezultanta sila (odnosno momenat) usmerena sa leve na desnu stranu. Sila koja deluje na provodnik iznosi:

$$F_p = l \cdot B_p \cdot i_p \approx (0,002 \div 0,001) l \cdot B_\delta \cdot i_p = (0,002 \div 0,001) F$$

gde je F ukupna sila koja deluje u zoni žleba. Sila F_p ima takođe tangencijalan pravac, a smer joj se poklapa sa smerom rezultante sila privlačenja F_1 i F_2 . Dakle, na bočne strane žlebova tj. na zupce deluju



Slika 2. Elektromagnetne sile u oblasti žleba

Znači da na provodnik u žlebu deluje sila od nekoliko promila od sile koja deluje na zupce, tj. na feromagnetni materijal. Inače, kada bi se taj provodnik našao na površini feromagnetnog materijala na njega bi delovala ukupna sila F . Time što je provodnik smešten u žleb, elektromagnetne sile najvećim svojim delom deluju na zupce, a neznatna sila koja deluje na provodnike omogućava da mehanička čvrstoća njegove izolacije bude značajno smanjena.

4. ZAKLJUČAK

Dva su zaključka koja proizilaze iz prethodne analize:

1. Iako su provodnici smešteni u žlebovima izloženi smanjenoj vrednosti indukcije, indukovana ems u njima ima istu vrednost kao da se nalazi na površini feromagnetnog materijala (u međugvožđu) a da su izloženi srednjoj vrednosti indukcije međugvožđa.
2. Sile koje se javljaju u zoni zubaca najvećim delom deluju tangencijalno na bočne strane zubaca, a samo nekoliko promila tih sila deluje na provodnike smeštene u žlebovima. Dakle, elektromagnetne sile i odgovarajući moment zaista „potiskuju” rotor tj. njegov feromagnetni materijal, dok je udeo sila koje deluju na provodnike u žlebovima neznatan.

tangencijalne sile $F_1 - F_2 = F_b$, a pošto je ukupna sila u zoni zubca i žleba:

$$F_z = F = F_p + F_b \text{ to je:}$$

$$F_b = F - F_p = [1 - (0,002 \div 0,001)]F = (0,998 \div 0,999)F$$

5. LITERATURA

- [1] Radenko Wolf - OSNOVE ELEKTRIČNIH STROJEVA, Zagreb, 1985.
- [2] A. B. Ivanov - Smoljenskij - ELEKTRIČNE MAŠINE (na ruskom), Energija, Moskva, 1980.

Rad je primljen u uredništvo 01. 04. 2005. godine



Dragan S. Petrović je završio 1964. godine ETF u Beogradu, energetski odsek. Magistrirao je 1968. na ETF-u u Beogradu, a doktorirao 1977. godine u Zagrebu kod prof. B. Frančića. Oblast nastavnog, naučnog i stručnog rada su električne mašine, posebno asinhronne i sinhronne. Iz te oblasti je objavio značajan broj radova na domaćim i stranim konferencijama i časopisima. Na Pariskoj CIGRE-i izlagao je dva rada. Predsednik je komiteta A1- Obrtne električne mašine Juko - CIGRE. Redovan je profesor na ETF-u u Beogradu od 1991. godine.

Dragan P. Popović

Generalizovana metoda simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga u elektroenergetskim interkonekcijama

Originalni naučni rad
UDK: 621.3.07.8; 62-503.56

Rezime:

U radu se izlaže jedna generalizovana metoda za simultano upravljanje tokovima aktivnih i reaktivnih snaga u normalnim i havarijskim stanjima elektroenergetskih interkonekcija. Upravljanje tokovima aktivnih snaga vrši se pomoću energetske i statičke transformatora za regulaciju ugla i upravljane serijske kompenzacije reaktanse elemenata. Upravljanje tokovima reaktivnih snaga na izabranim elementima vrši se uvođenjem kompenzacije u odgovarajuće čvorove, koji prirodno gravitiraju tome elementu. Ova generalizovana metoda bazirana je na nestandardnim modelima tokova snaga, što obezbeđuje precizniju kvantifikaciju relevantnih tehničkih efekata uvedenih upravljanja. Karakteristike i mogućnosti razvijene metode utvrđene su na primeru realne elektroenergetske interkonekcije.

Ključne reči: *generalizovana metoda, energetske transformatori za regulaciju ugla, serijski FACTS kontroleri, kompenzacija, upravljanje tokovima aktivnih i reaktivnih snaga, realna interkonekcija*

Abstract:

GENERALIZED METHOD FOR SIMULTANEOUS ACTIVE AND REACTIVE POWER FLOW CONTROL IN ELECTRIC POWER INTERCONNECTIONS

This paper presents a generalized method for simultaneous active and reactive power flow control in normal and emergency states of electric power interconnection. Active power flow control is made by use of energy and static phase shifting transformer and controlled series compensation of element reactance. Reactive power flow control is made by introducing the compensation in corresponding nodes. This generalized method is based on nonstandard load-flow model, which enables more accurate evaluation of the relevant technical effects of power flow control. The characteristics and possibilities of developed method have been established on the example of real interconnection.

Key words: *generalized method, energy phase shifting transformer, series FACTS controller, active and reactive power flow control, compensation, real interconnection*

1. UVOD

Ovaj rad je nastao u kontinuitetu sa radovima [1–7]. U radovima [1–5] predmet pažnje je bilo

upravljanje tokovima aktivnih snaga, a radovi [6, 7] bavili su se upravljanjem tokovima reaktivnih snaga. Nakon tih radova, nametnula se ideja da se pokuša sa formulacijom jedne metode, koja će na si-

Prof. dr Dragan P. Popović, naučni savetnik Instituta „Nikola Tesla”, 11 000 Beograd, Koste Glavinića 9, e-mail: dpopovic@ieent.org

multani način da upravlja i aktivnim i reaktivnim snagama na izabranim elementima razmatrane interkonekcije. Uz to, izazov je bio da se razvije takva *generalna* forma metode, iz koje može da se generiše niz partikularnih slučajeva.

Radovi, koji su se odnosili na upravljanje tokovima aktivnih snaga [1–5], u prvom redu bili su motivisani novim zahtevima i izazovima, koje su nametnuli procesi liberalizacije tržišta električne energije, kao i činjenicama nesumnjive atraktivnosti, širokih mogućnosti i izazova koje mogu da pruže FACTS kontroleri. Tako na primer, u dokumentu [8], koji se odnosi na evropsku praksu, u cilju povećanja graničnih prenosnih kapaciteta [9, 10], na kritičnim deonicama, odnosno u cilju eliminacije „zagušenja” (congestion management) [11], preporučuje se upotreba, uz postojeće energetske transformatore za regulaciju ugla, serijskih FACTS kontrolera, kao tzv „soft measures”, koja, kako se to tvrdi u pomenutom dokumentu, ne zahteva značajnije investicije.

Predmet pažnje, pored tzv. klasičnih, energetskih transformatora za regulaciju ugla (Energy Phase Shifting Transformer - u daljem tekstu EPST), bili su elektronski, tiristorski upravljani statički transformatori za regulaciju ugla (Static Phase Shifting Transformer - u daljem tekstu SPST) i upravljana (takođe, tiristorski) serijska kompenzacija reaktanse dalekovoda (Controlled Series Compensation - u daljem tekstu CSC) [5].

Razvijena generalna forma metode [5] omogućuje obuhvatanje niza kombinacija primene EPST, SPST i CSC, u tzv. „aktivnom” i „pasivnom” modu. „Aktivni” mod primene je kada se vrši automatsko podešavanje ugla regulacije EPST i SPST, odnosno stepena kompenzacije reaktanse, u slučaju primene CSC, za unapred zadate tokove aktivnih snaga na izabranim elementima. U slučaju „pasivnog” moda primene, unapred se zadaju fiksne vrednosti ugla regulacije, odnosno stepena kompenzacije, a zatim se određuju tokovi snaga za fiksno podešenje ovih regulacionih parametara.

Za EPST, SPST i CSC, u daljem tekstu, biće upotrebljen termin - *kontroleri tokova snaga* (uz napomenu da SPST i CSC pripadaju kategoriji tzv. serijskih FACTS kontrolera tokova snaga) jer imaju mogućnost da upravljaju tokovima snaga (i to, neposredno, tokovima aktivnih snaga).

Radovi [6, 7], koji se odnose na upravljanje tokovima reaktivnih snaga, nastali su iz činjenice da je problematika naponsko-reaktivnih prilika veoma važna i za EES Srbije. Pri tome, posebno se imaju u vidu skorašnja iskustva vezana za radna stanja EPS-a koja su se dogodila dana 18. maja i 6. jula 2004. godine, kada je usled deficita reaktivne snage i energije

je u prenosnoj mreži (nastalih usled neraspoloživosti ili ispada iz pogona agregata u TE Nikola Tesla A i B), bila neophodna primena havarijskog isključenja dela potrošnje, kako bi se izbegle najteže posledice (naponska nestabilnost, odnosno „raspadi” delova EES) [12].

Nakon povezivanja Druge UCTE sinhronne zone sa glavnim delom UCTE mreže, koje je uspešno obavljeno 10. oktobra 2004. godine [13], EES Srbije će (uostalom, kao i ostale elektroprivredne kompanije, članice interkonekcije UCTE), biti u obavezi da striktno poštuje zahteve, kriterijume i standarde rada definisane u dokumentu [14]. U njemu se, u delu koji se odnosi na naponsko-reaktivna stanja, preporučuje da tokovi reaktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodovima budu minimizovani, kako bi se prenosni kapaciteti „oslobodili” za prenos aktivne snage.

S druge strane, u uslovima otvorenog tržišta električne energije i utvrđivanja energetske efikasnosti u prenosu, u kojima se sve kvantifikuje, a zatim i valorizuje, otvara se pitanje kako da se izvrši preciznija kvantifikacija relevantnih tehničkih efekata primene ovih kontrolera, odnosno uvedene kompenzacije, da bi se zatim izvršila korektna tehnoko-ekonomska analiza. Drugim rečima, neophodno je, između ostalog, da se preciznije kvantifikuju nastale promene u gubicima snage, kao i da se izvrše tačnije analize sigurnosti, posebno u slučajevima gubitka većih injektiranja.

Evidentno je da za te svrhe klasični model tokova snaga (prisustvo jednog referentnog čvora, koji istovremeno ima i ulogu balansnog čvora) nije pogodan. Razlog za to leži u činjenici da se sve promene (uključujući i promene u gubicima aktivne snage u odnosu na „polazno” stanje) lociraju samo na jedan generatorski (balansni) čvor, a što ne odgovara realnoj pogonskoj praksi.

U ovom radu daje se prikaz jedne *generalizovane metode za simultano upravljanje tokovima aktivnih i reaktivnih snaga*. Upravljanje tokovima aktivnih snaga obavlja se automatskim podešenjem ugla regulacije EPST i SPST i automatskim podešenjem stepena kompenzacije reaktanse, primenom CSC, za unapred zadate tokove aktivnih snaga na izabranim elementima, odnosno dalekovodima [5]. Upravljanje tokovima reaktivnih snaga na izabranim elementima, vrši se uvođenjem kompenzacije u odgovarajuće čvorove, koji prirodno gravitiraju tom elementu [6].

Na bazi izloženog generalizovanog matematičkog modela simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga i razvijene tehnike njegovog rešavanja, u Institutu „Nikola Tesla” razvijen je računarski program *UTOKARG* (Upravljanje TOKo-

vima, *A*-ktivnih i *R*-eaktivnih snaga, *G* - generalizovana verzija).

Karakteristike i mogućnosti ovoga računarskog programa utvrđene su na primeru realne elektroenergetske interkonekcije, koju sačinjavaju EES Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije. Na ovom primeru pokušano je da se sagleda stvarna upotrebna vrednost razvijene generalizovane metode, da ona ne bi ostala na nivou akademskog egzibicionizma njenog autora.

2. GENERALIZOVANI MODEL SIMULTANOG UPRAVLJANJA TOKOVIMA AKTIVNIH I REAKTIVNIH SNAGA

2.1. Generalno

Generalna matematička formulacija problema simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga je određivanje vektora upravljačkih varijabli *u*, koji će zadovoljiti sledeća dva sistema jednačina:

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

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

uz simultano zadovoljenje uslova:

$$u \in U \quad (3)$$

Veličina *x* je vektor varijabli stanja, a veličina *u* je vektor upravljačkih varijabli. U konkretnom slučaju elementi vektora upravljačkih varijabli *u* su:

- ϕ - ugao regulacije EPST i SPST;
- k_{sc} - stepen serijske kompenzacije reaktanse elementa, odnosno dalekovoda, u slučaju primene CSC;
- *QOC*, - iznosi ukupne snage kompenzacije reaktivne snage (koji se lociraju na unapred odabrane čvorove, sa takođe unapred definisanim učešćem u toj snazi), potrebnih za ostvarenje zadatih faktora snage na početku izabраних elemenata.

Upravljanje tokovima aktivnih i reaktivnih snaga modeluje se posredstvom sistema jednačina oblika (1). U slučaju upravljanja tokovima aktivnih snaga, veličina F^{SP} je vektor unapred zadatih tokova aktivnih snaga po odabranim elementima (transformatorima u slučaju EPST, odnosno dalekovodima u slučaju SPST i CSC).

U slučaju upravljanja tokovima reaktivnih snaga, veličina F^{SP} je vektor tokova reaktivnih snaga,

koje odgovaraju unapred zadatoj vrednosti faktora snaga na početku odabranih elemenata prenosne mreže. S obzirom da su predmet pažnje naponsko-reaktivne prilike u prenosnoj mreži, elementi koji se fokusiraju su TS 400/110 kV/kV i 220/110 kV/kV, kao i interkonektivni dalekovodi, na kojima je, kako je to već naglašeno, imperativ da se održava zadata vrednost faktora snage, u skladu sa UCTE dokumentom [14], odnosno odgovarajućim bilateralnim ugovorima između zainteresovanih EES-a.

U slučaju simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga, koordinate vektora F^{SP} su zadati tokovi aktivnih snaga, i tokovi reaktivnih snaga, koji odgovaraju unapred zadatim vrednostima faktora snaga, po odabranim elementima razmatrane interkonekcije. Potrebno je napomenuti, da je jedna od bitnih osobina ove razvijene generalizovane metode upravljanja mogućnost da se na jednom elementu upravlja tokovima i aktivnih i reaktivnih snaga.

Veličina *d* je vektor tzv. zadatih („demand”) varijabli, odnosno sistem jednačina oblika (2) je merodavan za uspostavljena nova ravnotežna stanja nastala: nakon dejstva kontrolera tokova aktivnih snaga i nakon izvršene kompenzacije reaktivne snage, kao i nakon poremećaja, ako se oni razmatraju. To su zapravo jednačine balansa snaga u čvorištima razmatrane interkonekcije, za pomenuta stanja.

U ovom radu, nova stacionarna (ili preciznije-kvazistacionarna) stanja su, iz već prethodno iznetih razloga i motiva, modelovana posredstvom nestandardnih modela tokova snaga (modela tokova snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima) [15].

Naravno, da bi formulisani problem upravljanja imao smisla, neophodno je da se ispuni uslov (3), odnosno da se vektor uvedenih upravljačkih varijabli *u* nalazi u propisanim granicama *U*.

U slučaju upravljanja tokovima aktivnih snaga, ugao regulacije EPST i SPST trebalo bi da bude u granicama ($-30^\circ \leq \phi < 30^\circ$), a stepen serijske kompenzacije reaktanse elementa, odnosno dalekovoda k_{sc} , u slučaju primene CSC ($k_{sc} \leq 40\%$).

Definisanjem maksimalno dozvoljenih vrednosti za snagu kompenzacije reaktivne snage omogućeno je da se, po njenom prevazilaženju tokom iterativne procedure, ova procedura zaustavi, jer je to ujedno bila dobra indikacija da problem upravljanja tokovima reaktivnih snaga nije bio adekvatno formulisan. Takođe, u ova ograničenja spada i uslov da ukupna vrednost injektiranja reaktivne snage čvorovima u kojima se vrši kompenzacija ne bude manja od nulte vrednosti, čime se izbegavaju slučajevi „prekompenzacije”.

2.2. Formulacija generalizovanog modela simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga

Saglasno prethodno datoj generalnoj formi modela upravljanja tokovima aktivnih snaga, sistem jednačina (1), u slučaju prisustva *NEPSTA* „aktivnih” EPST kontrolera (objašnjenje za sve uvedene oznake daje se u prilogu ovoga rada), imaće sledeći oblik:

$$\Delta P_{ci} = P_{ci}^{SP} - P_{ckm} = 0; i \in NEPSTA; k, m \in NEPST \quad (4)$$

u kojima veličina P_{ci}^{SP} predstavlja specificirani tok aktivne snage „kroz” EPST, čiji su krajnji čvorovi „k” i „m”, a veličina P_{ckm} predstavlja aktuelni tok aktivne snage „kroz” EPST, koji se određuje preko sledećeg izraza [5]:

$$P_{ckm} = g_{km} t^2 V_k^2 - t V_k V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \phi) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \phi)] \quad (5)$$

Sistem jednačina (1), u slučaju prisustva *NSPSTA* „aktivnih” SPST kontrolera, imaće sledeći oblik:

$$\Delta P_{ci} = P_{ci}^{SP} - P_{ckm} = 0; i \in NSPSTA; k, m \in NSPST \quad (6)$$

u kome veličina P_{ci}^{SP} predstavlja specificirani tok aktivne snage po elementu „k-m”, a veličina P_{ckm} predstavlja aktuelni tok aktivne snage po tom elementu, koji se takođe određuje preko izraza (5) [5].

U slučaju prisustva *NCSCA* „aktivnih” CSC kontrolera, jednačine (1) imaće sledeći oblik:

$$\Delta P_{ci} = P_{ci}^{SP} - P_{ckm} = 0; i \in NCSCA; k, m \in NCSC \quad (7)$$

u kome veličina P_{ci}^{SP} takođe predstavlja specificirani tok aktivne snage na elementu „k-m”, a veličina P_{ckm} predstavlja aktuelni tok aktivne snage na tom elementu, koji se određuje preko sledećeg izraza [5]:

$$P_{ckm} = g_{km} V_k V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) + \Delta g_{km} V_k^2 - V_k V_m (\Delta g_{km} \cos \theta_{km} + \Delta b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (8)$$

Dakle, upravljanje tokovima aktivnih snaga „kroz” energetske transformatore za regulaciju ugla, odnosno upravljanje tokovima aktivnih snaga po elementima (dalekovodima), na kojima su ugrađeni serijski FACTS kontroleri, modeluje se posredstvom sistema jednačina oblika (4), (6) i (7). Njih dakle ima onoliko, koliko ima „aktivnih” kontrolera, odnosno $NLUT = NEPSTA + NSPSTA + NCSCA$.

Sistem jednačina (1), u slučaju prisustva elementa na kojima se zadaje faktor snage $\cos \phi_{iz}$, odnosno vrši upravljanje tokovima reaktivne snage, imaće sledeći oblik:

$$\Delta Q_{ci} = Q_{ci}^{SP} - Q_{ckm} = 0; i \in NQU; k, m \in NC \quad (9)$$

u kome veličina Q_{ckm} predstavlja aktuelni tok reaktivne snage „kroz” element „k-m” [6].

Veličina Q_{ci}^{SP} , koja predstavlja specificirani tok reaktivne snage na početku elementa „k-m”, ima sledeći oblik:

$$Q_{ci}^{SP} = P_{km} \tan \phi_{iz} \quad (10)$$

u kome veličina P_{km} predstavlja aktuelni tok aktivne snage „kroz” element „k-m”, a veličina $\tan \phi_{iz}$ je trigonometrijska funkcija tg, koja odgovara zadatom faktoru snage $\cos \phi_{iz}$.

Saglasno ovoj relaciji, specificirani tok reaktivne snage Q_{ci}^{SP} nije konstantna veličina (za razliku od veličina $\cos \phi_{iz}$, odnosno $\tan \phi_{iz}$, koje su konstantne, unapred zadate veličine), već se menja u skladu sa promenama toka aktivne snage P_{km} . Te promene toka aktivne snage (koje nisu velike, ali nisu ni zanemarljive) su logična posledica uvođenja kompenzacije (ako se samo ti efekti analiziraju), koja zatim utiče na promene napona a time i gubitaka aktivne snage, što dovodi i do promena u tokovima aktivnih snaga.

U prethodno pomenutom kontekstu, potrebno je da se ponovi, da je jedno od bitnih svojstava ove razvijene generalizovane metode mogućnost da se na jednom elementu upravlja tokovima i aktivnih i reaktivnih snaga. Praktično je reč o prisustvu „aktivnog” kontrolera tokova snaga (EPST, SPST i CSC) na početku tog elementa, sa specificiranim tokom aktivne snage, a istovremeno se specificira i željena vrednost $\cos \phi_{iz}$, koja treba da se obezbedi ugradnjom kompenzacije reaktivne snage u selektivno odabrane čvorove.

U tim uslovima, specificirani tok reaktivne snage Q_{ci}^{SP} takođe nije konstantna veličina, već „trpi” mnogo veće promene u odnosu na slučajeve kad se analiziraju samo efekti uvedene kompenzacije, s obzirom na značajnije promene toka aktivne snage P_{km} , koje su uslovljene prisustvom kontrolera tokova snaga.

Prethodno date jednačine upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga trebalo bi da budu simultano zadovoljene sa odgovarajućim jednačinama balansa snaga, čija je generalna forma data preko sistema jednačina oblika (2).

Kako je to već naglašeno, za te svrhe korišćen je nestandardni model, u kome jednačine balansa za generatorske čvorove imaju sledeći oblik [15]:

$$\Delta P_i = P_{GOi} - k_{pi} \Delta f - P_i = 0, i \in NG \quad (11)$$

$$\Delta Q_i = Q_{GOi} + Q_{GOi} \frac{V_{GOi} - V_{Gi}}{s_{vi} V_{GOi}} - Q_i = 0, i \in NSV \quad (12)$$

koje moraju da zadovolje sledeća, tzv. „tvrda” ograničenja:

$$P_{G \min i} \leq P_{Gi} \leq P_{G \max i}, i \in NSV \quad (13)$$

$$Q_{G \min i} \leq Q_{Gi} \leq Q_{G \max i}, i \in NSV \quad (14)$$

Data ograničenja za snage generatora, za razliku od uobičajenih prilaza, nisu konstantne, unapred zadate veličine, već su funkcije aktuelnog stanja i parametara agregata [16].

Za postdinamička kvazistacionarna stanja nastala nakon dejstva sistema automatske sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene, i dalje su aktuelne jednačine balansa oblika (9), ali samo za generatore koji nisu uključeni u tu vrstu regulacije, kao i jednačine (10). Efekti sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene obuhvataju se preko sledećih jednačina:

$$\Delta P_i = P_{GOi} - k_{pi} \Delta f + k_{sl}^j DEB_j - P_i = 0, i \in NSV \quad (15)$$

$$RGS_j = P_{Rj} - P_{RPj} + B_j \Delta f = 0, j \in M \quad (16)$$

Jednačine (15) se odnose na generatore u regulacionim elektranama, a jednačine (16) definišu regulacione greške u posmatranim regulacionim basenima.

Dakle, sledeći logiku i tok funkcionisanja sistema za automatsku sekundarnu regulaciju, potrebno je naći takvo stanje u kome se regulaciona greška RGS_j anulira (naravno, ako u regulacionom basenu, gde je nastao debalans, postoji dovoljna regulaciona rezerva). Međutim, ako te rezerve nema u dovoljnom iznosu za nastali debalans aktivne snage DEB_j (što nije redak slučaj u praksi), dobiće se ostvareno postdinamičko kvazistacionarno stanje, u kome je realno preslikana (ne)mogućnost sekundarne regulacije da u potpunosti eliminiše nastalu regulacionu grešku.

Jednačine balansa snaga za potrošačke čvorove, koji nisu obuhvaćeni neposrednim učešćem uvedenih kontrolera tokova aktivnih snaga, odnosno uvedene relocirane kompenzacije reaktivne snage, imaju sledeći oblik:

$$\Delta P_i = P_{Li}(V_{if}) - P_i = 0 \quad (17)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Li}(V_{if}) - Q_i = 0; i \in NL \quad (18)$$

Prisustvo kontrolera tokova aktivnih snaga (EPST, SPST i CSC), kojih u *generalnom slučaju* ima NC ($NC = NUESPT + NUSPST + NUCSC$), predstavljenih posredstvom injektiranih snaga, za krajnja čvorišta elemenata na kojima su oni instalirani [1], dovodi do sledećih jednačina balansa:

$$\Delta P_i^C = P_{Li}(V_{if}) - P_i - P_{ci} = 0 \quad (19)$$

$$\Delta Q_i^C = Q_{Li}(V_{if}) - Q_i - Q_{ci} = 0; i \in NCU \quad (20)$$

gde NCU ($NCU = NESPT + NSPST + NCSC$) predstavlja skup, odnosno ukupan broj krajnjih čvorova svih elemenata na kojima su instalirani ovi kontroleri, bez obzira da li su u tzv. „aktivnoj” ili „pasivnoj” ulozi.

Prethodno date jednačine balansa neposredno proizilaze iz same prirode korišćenih injekcionih modela kontrolera tokova snaga, čija je generalna forma data u [1]. Takođe, kako je to pokazano u [1], priroda ovih modela obezbeđuje nepromenjenu matricu admitansi čvorova EES-a, dakle i njenu početnu simetričnost, što ima veliki praktični značaj sa simulacionih, odnosno numeričkih aspekata.

Da bi formulacija generalne forme metode upravljanja bila dovedena do kraja, potrebno je da se definišu upravljačke varijable. U slučaju ESPST i SPST to je urađeno veoma jednostavno, odnosno na eksplicitan način, preko ugla regulacije ϕ , uz neophodnost preračunavanja prenosnog odnosa t , kod EPST, tipa 4 (zadaje se veličina r , a ugao α iznosi 60°) i 5 (takođe, zadaje se veličina r , a ugao α iznosi 120°) [5]. Međutim, u slučaju CSC to nije moglo da se uradi na eksplicitan način, preko stepena kompenzacije reaktansi elementa na kome je on instaliran. To je urađeno na posredan način, preko promene susceptansi Δb_{km} , koja je korelisana aktuelnoj vrednosti stepena kompenzacije [5].

Upravljačke varijable, koje su definisane na eksplicitan način, preko uvedenih snaga kompenzacije reaktivne snage QOC_i , ($i \in NQU$), potrebnih da obezbede zadati faktor snage $\cos \phi_i$ na početku izabranih elemenata, relociraju se na NOC_i ($i \in NQU$) unapred definisanih čvorova u iznosima $QOC\check{c}_{ik}$, na sledeći način:

$$QOC\check{c}_{ik} = k_{Qik} QOC_i, i \in NQU; k \in NOC_i \quad (21)$$

gde je k_{Qik} koeficijent učešća čvora „ k ” u snazi kompenzacije QOC_i .

Potrebno je napomenuti, da sam izbor ovih čvorova, na koje se relociraju dobijeni iznosi kompenzacije reaktivne snage, asocirani izabranim elementima, predstavlja delikatniji deo razvijene metode upravljanja. Naravno, istu takvu delikatnost ima i definisanje koeficijenta učesća k_{Qik} izabranih čvorova.

Relociranje potrebne snage kompenzacije na NOC_i unapred definisanih čvorova dovodi do sledećih, novih jednačina balansa:

$$\Delta Q_{ik}^C = Q_{Lk}(V_k, \phi) - Q_k - QOC\check{C}_i = 0, \quad (22)$$

$$i \in NQU; k \in NOC_i$$

Na taj način, generalna forma modela za simultano upravljanje tokovima aktivnih (pomoću EPST, SPST i CSC) i reaktivnih snaga (posredstvom uvedene kompenzacije u odgovarajuće čvorove), svodi se na *jedinstveni sistem simultanih nelinearnih algebarskih jednačina*.

Taj sistem jednačina za postdinamička kvazistacionarna stanja, nastala *nakon dejstva primarne regulacije napona i učestanosti* sačinjavaju jednačine balansa oblika (4), (6), (7), (9), (11), (12), (17), (18), (19), (20) i (22), uz striktno zadovoljenje uslova (3), (13) i (14).

Za postdinamička kvazistacionarna stanja nastala *nakon dejstva sistema automatske sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene*, ovim jednačinama pridružuju se jednačine balansa oblika (15), i to samo za generatore koji su uključeni u sekundarnu regulaciju, kao i jednačine (16).

U ovim sistemima jednačina figurišu sledeće *dve grupe nepoznatih varijabli*:

- vektor *upravljačkih varijabli, koji ima tri subvektora*:
 - prvi - ϕ , dimenzije (NEPSTA+NSPSTA)(ugao regulacije EPST i SPST);
 - drugi - Δb_{km} , dimenzije NCSCA (promene susceptansi Δb_{km} , koja je korelisana aktuelnoj vrednosti stepena kompenzacije);
 - treći - QOC , dimenzije NQU (iznosi snaga kompenzacije koji se relociraju na odgovarajuća, unapred selektivno izabrana čvorišta NOC_i ($i \in NQU$), a koji su potrebni za ostvarenje zadatih faktora snaga $\cos\phi$, na početku odabranih elemenata).
- vektor stanja, koji sadrži subvektor θ , dimenzije (N-1), skalar f i subvektor V , dimenzije (NSV + NL).

Za stanje nastalo nakon sekundarne regulacije, vektoru stanja pridružuje se:

- subvektor **DEB**, dimenzije M , čiji su elementi iznosi debalansa aktivnih snaga u razmatranim regulacionim basenima, nastalih kao posledica nastalih promena u odnosu na polazno, ravnotežno stanje.

Na taj način, definisani matematički model upravljanja tokovima reaktivnih snaga svodi se na simultano određivanje vektora upravljačkih varijabli dimenzije (NLUT+ NQU) (u okviru prethodno pomenutih dozvoljenih granica U), tako da jednačine specificiranih (upravljanih) tokova aktivnih snaga (jednačine (4), (6) i (7)), jednačine specificiranih (upravljanih) tokova reaktivnih snaga (jednačine (9)), i jednačine balansa snaga (jednačine (11), (12), (15), (16), (17), (18), (19), (20) i (22)), uz striktno zadovoljenje uslova (3), budu *simultano* zadovoljene.

3. METODA REŠAVANJA FORMIRANOG GENERALIZOVANOG MODELA SIMULTANOG UPRAVLJANJA TOKOVIMA AKTIVNIH I REAKTIVNIH SNAGA

3.1. Uvodne napomene

Sasvim je jasno da prethodno formirani matematički model simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga može uspešno da se rešava primenom metode Newton-Raphson-a [17], imajući u vidu opšte poznate njene dobre osobine, prvenstveno vezane za pouzdane karakteristike kvadratne konvergencije.

Međutim, poseban izazov u pogledu traganja za jednostavnijim, ali i dalje efikasnim tehnikama rešavanja, pružao je sam način modelovanja kontrolera i uvedene kompenzacije, pri kome elementi matrice admitansi čvorova EES-a ostaju nepromenjeni po ugradnji kontrolera i potrebnih vrednosti snaga kompenzacije, uz očuvanje njene početne simetrije. U pomenutom kontekstu, inspiraciju za postavljeni cilj dao je opšte poznati brzi raspregnuti postupak Stott-Alsac-a [18], koji je u osnovi bio razvijen za rešavanje tzv. konvencionalnog modela tokova snaga.

Dakle, razvoj tehnike rešavanja formiranog modela simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga, pošao je od oblika rešenja koji daje primena metode Newton-Raphson-a [16] na prethodno date jednačine balansa snaga (jednačine (4), (6), (7), (9), (11), (12), (17), (18), (19), (20) i (22)), koje su merodavne za stanja nakon dejstva primarne regulacije napona i učestanosti.

Dalje, polazeći od tako dobijenog oblika rešenja, uvodi se niz opravdanih uprošćenja i pretpostavki kod formiranja odgovarajućih submatrica ko-

eficijentata. Pri tome, trebalo bi posebno da se naglasi, da su uvedena uprošćenja i pretpostavke bile samo u cilju pojednostavljenja same tehnike rešavanja (jer reč je samo o odgovarajućim modifikacijama matrice Jakobijana, koju daje metoda Newton-Rhapson-a), a ne samog formiranog modela simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga, koji je sačuvao svoju autentičnost.

Za formirani model upravljanja, a sve u pome nutom cilju pojednostavljenja njegove tehnike rešavanja, 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 sada već submatrica koeficijentata.

Sledeća uvedena uprošćenja, koja su detaljno prikazana i obrazložena u [15], proizašla su iz uobičajenog odnosa konduktansi i susceptansi u realnim visokonaponskim mrežama. Zatim, u submatricama koeficijentata za aktivnu snagu za module napone se usvaja nominalna vrednost, odnosno $V_n = 1$ p.u.

Novi momenat, u odnosu na prethodno rečeno, je prisustvo kontrolera tokova snaga u tzv. *P-konturi*, odnosno prisustvo kompenzacije reaktivne snage, relocirane na odgovarajuće čvorove u tzv. *Q-V konturi*. Kako je to pokazano i objašnjeno u [5] (dalja „obrada” „P-θ” konture) i u [6] (dalja „obrada” Q-V konture), bila su i moguća dalja odgovarajuća uprošćenja u tehnici rešavanja formiranog modela.

3.3. Brzi postupak sa razdvajanjem varijabli

Uz sve prethodno urađeno, koristeći ideju izloženu u [18] (u submatrici koeficijentata koja se odnosi na aktivne snage zanemaruju se rezistanse, a u submatrici koja se odnosi na reaktivne snage, dupliraju se šantovi), dobijaju se sledeća dva sistema raspregnutih jednačina, koja se sukcesivno iterativno rešavaju (smisao uvedenih subiteracionih indeksa k i l):

	k	$k+1$	
i/V	B'	$B'_{p\theta}$	B'_{pb}
sc/V	$B'_{p\theta}$	B'_θ	O
r/V	B_r	O	O
	F	O	F_r
	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$	$\Delta(\Delta b)$
	$\Delta(\Delta f)$		

(23)

1		$l+1$
$\ddot{A}Q^c/V$	B''	B_q
$\ddot{A}Q_c/V$	B_v	B_c
$\ddot{A}V$	$\ddot{A}QOC$	

(24)

U dobijenom sistemu jednačina (23), koji se odnosi na aktivne snage, subvektor debalansa („mismatch”) $\Delta P^c/V$, dimenzije $N-1$, određuje se saglasno prethodno datim relacijama (11), (17) i (19).

Subvektori $\Delta P_{pst}/V$ i $\Delta P_{csc}/V$, dimenzija ($NEPST+NSPSTA$) i $NCSCA$ respektivno, odnose se na „aktivne” kontrolere, odnosno na elemente na kojima se želi da ostvari zadati tok aktivne snage. Ovi subvektori se određuju posredstvom relacija (4), za EPST, (6), za SPST i (7), za CSC.

Skalar $\Delta Pr/V$ odgovara referentnom čvoru, koji se bira proizvoljno i koji ima fiksnu vrednost ugla (uobičajeno je da je to nulta vrednost), a uveden je radi eliminacije singulariteta.

U sistemu jednačina (24), koji se odnosi na reaktivne snage, subvektor debalansa $\Delta Q_c/V$, dimenzije $NSV + NL$, određuje se saglasno prethodno datim relacijama (12) i (18), odnosno relacijama (22) za NOC_i unapred definisana čvorišta u kojima se, saglasno takođe unapred zadatom faktorom učešća, relociraju dobijene potrebne snage kompenzacije reaktivne snage.

Subvektor $\Delta Q_c/V$, koji se odnosi se na elemente na čijem početku se želi ostvarenje takvog toka reaktivne snage, koji odgovara zadatoj vrednosti faktora snage, određuje se posredstvom relacije (9).

Na taj način, do traženih vrednosti upravljačkih varijabli, koje obezbeđuju zadate tokove aktivnih snaga i zadati faktor snage na odabranim elementima i vektora stanja, odnosno tokova snaga u svim elementima razmatrane interkonekcije, dolazi se sukcesivnim iterativnim rešavanjem dva raspregnuta sistema jednačina (23) i (24).

U njima, što se posebno naglašava, elementi svih prisutnih submatrica koeficijentata B' , B'_{pf} , $B'_{p\theta}$, B'_θ , B'_ϕ , B'_b , B'_{bb} , B'_r , F , F_r i B'' imaju konstantne vrednosti, za promenjenu topologiju. Pri tome, postoji sledeći identiteti: $B'_{pq} = B'_{pf}{}^T$ i $B'_{pb} = B'_{b}{}^T$ (T - oznaka za transpoziciju), a submatrice B'_ϕ i B'_{bb} imaju samo dijagonalne elemente.

Submatrice $B'_{p\theta}$, $B'_{p\phi}$ i B'_ϕ , dimenzija ($NEPSTA+NSPSTA$) \times ($N-1$), ($N-1$) \times ($NEPSTA+NSPSTA$) i ($NEPSTA+NSPSTA$) \times ($NEPST+NSPSTA$), respektivno, imaju sledeće elemente:

$$b'_{p\phi ci} = \frac{1}{x_{xcm}}; b'_{p\phi mi} = -\frac{1}{x_{xcm}}; b'_{p\theta ci} = \frac{1}{x_{xcm}}; b'_{p\theta mi} = -\frac{1}{x_{xcm}};$$

$$b'_{\phi ci} = \frac{1}{x_{xcm}}; \quad (25)$$

$i \in (NEPSTA+NSPSTA), k, m \in (NESPT+NSPST)$

gde je x_{km} - reaktansa elementa „ $k-m$ ”

Zatim, submatrice $B'_{pb}, B'_b\theta$ i B'_{bb} , dimenzija $(N-1) \times NCSCA, NCSCA \times (N-1), (NCSC) \times (NCSC)$, respektivno, imaju sledeće elemente:

$$b'_{pkci} = \frac{1}{x_{km}}; b'_{pbmi} = -\frac{1}{x_{km}}; b'_{b\theta ci} = \frac{1}{x_{km}}; b'_{b\theta mi} = -\frac{1}{x_{km}};$$

$$b'_{bb} = \sin\theta_{km}$$

$$i \in NCSCA, k, m \in NCSC \quad (26)$$

Dalje, submatrica F , dimenzije $(N-1) \times 1$ ima sledeće elemente:

$$F_i = \begin{cases} k_{pi} & i \in NG \\ 0 & i \in NL \end{cases} \quad (27)$$

a kvadratna submatrice B' , dimenzije $(N-1)$ je identična odgovarajućoj submatrici u poznatoj brznoj dekoplovanju metodi [18].

Takođe, kvadratna submatrica B'' , dimenzije $(NSV+NL)$, je identična odgovarajućoj submatrici u pomenutoj metodi. Jedina razlika je u uvećanoj dimenziji submatrice B'' (sada je $NSV+NL$), i proširenju dijagonalnih elemenata vezanih za generatore koji imaju statičku karakteristiku napon - reaktivna snaga (proširenje za veličinu $Q_{Goi} / (sV_{Goi}^2)$).

Submatrica Bq , dimenzije $(NSV + NL) \times NQU$ ima samo elemente koji su asocirani čvorovima u kojima se relociraju dobijeni iznosi snaga kompenzacije, čiji je oblik:

$$b_{qik} = k_{Qik}V_n, i \in NQU; k \in NOC_i \quad (28)$$

Dalje, submatrica Bv , dimenzije $NQU \times (NSV+NL)$, asocirana modulima napona, imaće elemente:

$$b_{vk} = b_{km} + 2b_{ko}, k \in NC \quad (29)$$

$$b_{vm} = b_{km}, m \in NC \quad (30)$$

Na kraju, submatrica B_c , je kvadratna, reda NQU , i ima samo dijagonalne elemente, koji imaju nultu vrednost.

Za stanja nastala nakon dejstva sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene, uz jednačine (4), (6), (7), (9), (11), (12), (17), (18), (19), (20) i (22), aktuelne su i jednačine (15), koje se odnose na generatore koji su uključeni u sekundarnu regulaciju učestanosti i snaga razmene i jednačine (16), koje definišu iznose regulacionih grešaka u posmatranim regulacionim basenima.

U [5, 15] je pokazano da se analognim postupkom (primena metode Newton-Raphson-a i uvođenje opravdanih pretpostavki i uprošćenja) dobijaju odgovarajuća dva sistema raspregnutih jednačina. Takođe, u [5, 15] je pokazano da je tako dobijeni, inače jednostavan model određivanja tokova snaga, moguće dalje uprostiti, što se postiže odvojenim računanjem regulacionih grešaka, odnosno debalansa podsistema.

Praktično je reč o još jednom raspregnutju tokom iterativne procedure, koje omogućuju osobine procesa sekundarne regulacije. Opravdanost tog raspregnutja proizilazi iz same „fizike” tretiranog fenomena, odnosno iz činjenice da se automatska sekundarna regulacija učestanosti i snaga razmene (naravno, uz ispunjenje svih uslova za njeno normalno funkcionisanje), obavlja mirno, sporo i, što je najznačajnije, u uslovima srazmerno malih promena veličina stanja.

Na taj način i dalje su aktuelni raspregnuti pod sistemi jednačina (23) i (24), s tim da su sada u vektoru $\Delta P/V$ prisutne, u skladu sa (15), koordinate vezane za regulacione elektrane, odnosno tokom iterativne procedure vrše se korekcije vektora $\Delta P/V$, koje bi trebalo praktično da eliminišu nastale regulacione greške.

Kao što se iz prikazanog modela određivanja tokova snaga uočava, on je formiran za najopštiji slučaj pojave regulacionih grešaka u svim regulacionim basenima, odnosno obuhvaćeni su slučajevi (koji se izbegavaju u praksi) njihovih neusklađenih primarnih i sekundarnih regulacionih konstanti. Inače, sa tog modela veoma se lako prelazi na slučaj kada je poznati *Darievsov* princip neintervencija [19] obezbeđen (potpuna usklađenost primarnih i sekundarnih regulacionih konstanti), odnosno kada figuriraju samo regulaciona greška podsistema u kome se desio poremećaj, a koja treba da se eliminiše dejstvom regulacionih elektrana samo toga podsistema.

Takođe, potrebno je napomenuti da prikazani model tokova snaga omogućuje određivanje i stanja u kojima nije bilo dovoljne regulacione rezerve (proces računanja se zaustavlja kada praktično nema više promena regulacione greške-indikacija da se ustalila, zbog nedostatka potrebne regulacione rezerve).

Na kraju, potrebno je posebno da se naglasi i istakne, da se u odnosu na prilaze koji su bili bazirani na klasičnom modelu tokova snaga [2, 3], sada javljaju submatrice F i F_r , koje su asocirane kvazistacionarnoj vrednosti jedinstvene učestanosti f . Indeks „ r ”, kako je to već rečeno, govori da se radi o referentnom čvoru.

Međutim, za razliku od klasičnog modela tokova snaga, u kome je referentni čvor (uveden iz istih razloga - eliminacija singulariteta) istovremeno i ba-

lanski, sada svi čvorovi imaju karakter balansnog. Odnosno, u uspostavljanju novih kvazistacionarnih stanja, dobijenih učinkom kontrolera, odnosno uvedene kompenzacije reaktivne snage (i poremećaja, ako se oni razmatraju), učestvuju svi generatorski čvorovi (srazmerno svojim primarnim, odnosno sekundarnim regulacionim konstantama) i svi potrošački čvorovi (u skladu sa svojim zavisnostima od napona i učestanosti).

Ova osobina razvijene metode evidentno omogućuje tačniju evaluaciju relevantnih tehničkih efekata uvedenih kontrolera tokova snaga i uvedene kompenzacije reaktivne snage (i efekata poremećaja, kada se razmatraju), a time omogućuje i tačniju tehn-ekonomsku analizu opravdanosti uvođenja kontrolera tokova snaga i kompenzacije reaktivne snage.

4. POSEBNI SLUČAJEVI GENERALIZOVANE METODE SIMULTANOG UPRAVLJANJA TOKOVIMA AKTIVNIH I REAKTIVNIH SNAGA

Da je u pitanju generalna forma razvijene metode, govori mogućnost generisanja niza njenih derivata.

Tako, u slučaju kada se vrši upravljanje samo tokovima aktivnih snaga, posredstvom EPST, SPST i CSC kontrolera, sistemi jednačina (23) i (24) transformišu se u sledeći oblik [5]:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 k & k+1 \\
 \begin{array}{|c|} \hline \Delta P^c/V \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline B' & B'_{p\phi} & B'_{pb} & F \\ \hline B'_{p\theta} & B'_{\phi} & O & O \\ \hline B'_{b\theta} & O & B'_{bb} & O \\ \hline B_r & O & O & F_r \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta \\ \hline \Delta \phi \\ \hline \Delta(\Delta b) \\ \hline \Delta(\Delta f) \\ \hline \end{array} \\
 \end{array} = \dots
 \end{array}
 \quad (31)$$

$$\begin{array}{cc}
 1 & 1+1 \\
 \Delta Q^c/V & = B' \Delta V
 \end{array}
 \quad (32)$$

U slučaju kada se vrši upravljanje samo tokovima aktivnih snaga, posredstvom SPST kontrolera, uz jednačinu (32), aktuelna je i sledeća jednačina [4]:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 k & k+1 \\
 \begin{array}{|c|} \hline \Delta P^c/V \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline B' & B'_{p\phi} & F \\ \hline B'_{p\theta} & B'_{\phi} & O \\ \hline B_r & O & F_r \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta \\ \hline \Delta \phi \\ \hline \Delta(\Delta f) \\ \hline \end{array} \\
 \end{array} = \dots
 \end{array}
 \quad (33)$$

U slučaju, analogno prethodnom, a koristi se konvencionalni model tokova snaga, uz jednačinu (32), aktuelna je i sledeća jednačina [3]:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 k & k+1 \\
 \begin{array}{|c|} \hline \Delta P^c/V \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline B' & B'_{p\phi} \\ \hline B'_{p\theta} & B'_{\phi} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta \\ \hline \Delta \phi \\ \hline \end{array} \\
 \end{array} = \dots
 \end{array}
 \quad (34)$$

U slučaju kada se vrši upravljanje samo tokovima reaktivnih aktivnih snaga, posredstvom uvođenja kompenzacije u odabrane čvorove, aktuelne su sledeće jednačine [6]:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 k & k+1 \\
 \begin{array}{|c|} \hline \Delta P/V \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline B' & F \\ \hline B_r & F_r \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta \\ \hline \Delta(\Delta f) \\ \hline \end{array} \\
 \end{array} = \dots
 \end{array}
 \quad (35)$$

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 1 & 1+1 \\
 \begin{array}{|c|} \hline \ddot{A}Q^c/V \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline B'' & B_q \\ \hline B_v & B_c \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \ddot{A}V \\ \hline \ddot{A}QOC \\ \hline \end{array} \\
 \end{array} = \dots
 \end{array}
 \quad (36)$$

Takođe, posebni slučaj prethodno date generalne formulacije upravljanja tokovima snaga je slučaj kada postoje samo NEPST i/ili NSPSTP „pasivnih” EPST, odnosno SPST kontrolera i NCSC „pasivnih” CSC kontrolera. Tada se samo utvrđuju efekti ovih „pasivnih” kontrolera, koji imaju unapred zadatu fiksnu vrednost ugla regulacije, odnosno unapred zadatu fiksnu vrednost stepena kompenzacije reaktanse, odnosno tokom proračuna tokova snaga ovi kontroleri ne menjaju unapred podešenu vrednost svojih regulacionih parametara.

U ovom slučaju, nema više submatrica $B'pq$, $B'pf$, $B'pb$, $B'pq$, $B'f$, $B'b$ i $B'bb$, jer uglovi regulacije ϕ i promene susceptansi Δb nisu više upravljačke varijable, tako da se tokovi snaga određuju iterativnim rešavanjem sledećih sistema raspregnutih jednačina:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 k & k+1 \\
 \begin{array}{|c|} \hline \Delta P^c/V \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline B' & F \\ \hline B_r & F_r \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta \\ \hline \Delta(\Delta f) \\ \hline \end{array} \\
 \end{array} = \dots
 \end{array}
 \quad (37)$$

$$\begin{array}{cc}
 1 & 1+1 \\
 \Delta Q^c/V & = B'' \Delta V
 \end{array}
 \quad (38)$$

U slučaju analognom prethodnom, ali se koristi konvencionalni model tokova snaga, aktuelne su sledeći sistemi raspregnutih jednačina [1]:

$$\Delta P^c / V^k = B' \Delta \theta^{k+1} \quad (39)$$

$$\Delta Q^c / V^k = B'' \Delta V^{k+1} \quad (40)$$

Na kraju, u slučaju da u razmatranoj interkonekciji ne postoje kontroleri tokova aktivnih snaga, ne uvažava se primarna regulacija napona generatora, i ne vrši se upravljanje tokovima reaktivnih snaga, ali se i dalje koristi konvencionalni model tokova snaga, polazni sistemi jednačina (23) i (24) se transformišu u poznati brzi raspregnuti postupak [18]:

$$\Delta P / V^k = B' \Delta \theta^{k+1} \quad (41)$$

$$\Delta Q / V^k = B'' \Delta V^{k+1} \quad (42)$$

5. RAČUNARSKI PROGRAM UTOKARG

Na bazi izloženog generalizovanog matematičkog modela simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga i razvijene tehnike njegovog rešavanja, u Institutu „Nikola Tesla” razvijen je računarski program *UTOKARG (Upravljanje TOKovima, A-ktivnih i R-ektivnih snaga, G - generalizovana verzija)*. U realizaciji ovog računarskog programa primenjen je *Visual Fortran Professional Edition 6.0.0*.

Unošenje ulaznih podataka i prikazivanje rezultata njihove obrade je omogućeno posebnim editorima za čiji je razvoj korišćen *Microsoft Visual Basic 5.0*. Ovim komponentama program je dobio na brzini manipulacije podacima i vizuelizaciji složenih problema kojima se bavi. U cilju dalje nadgradnje programa išlo se na što veću modularnost pomenuatih aplikacija, što nameće ubrzani razvoj softvera kojim se objedinjuje rešavanje matematičkih i grafičkih problema istovremeno.

Ova generalizovana verzija, koja pored glavnog programa ima 48 potprograma tipa subroutine, omogućuje tretiranje interkonekcija sa 10 000 čvorova, 30 000 grana, 2 000 generatora, 4 000 transformatora, 200 regulacionih basena, 100 EPST, 100 SPST i 100 CSC a, 100 elemenata na čijem početku se zadaje faktor snage i 500 čvorova na kojima se relociraju dobijeni iznosi snaga kompenzacije.

Sve ulazne datoteke, preko kojih se definiše polazno stanje, u potpunosti su kompatibilne sa odgovarajućim datotekama koje koristi unapređena verzija računarskog programa *STATIC* [15]. Ta činjenici

ca je posebno apostrofirana, jer govori o praktičnoj mogućnosti udobne komplementarne primene računarskih programa *STATIC* i *UTOKARG*, što nesumnjivo može da bude veoma korisno u praksi.

U radu, koji se nalazi u pripremi, detaljno će se izložiti struktura, mogućnosti, funkcije i karakteristike računarskog programa *UTOKARG*, sa posebnim naglaskom na prezentaciju dobijenih rezultata simulacija. Stoga, u ovom radu, ukratko će se samo naznačiti njegove osnovne mogućnosti, koje potvrđuju da je u pitanju generalna forma metode simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga, iz koje je moguće generisati niz partikularnih slučajeva. Te mogućnosti su sledeće:

1. Određivanje tokova snaga u slučaju kada je $NU-EPST = NUSPST = NUCSC = 0$ i $NQU = 0$, odnosno kada u razmatranoj interkonekciji nema instaliranih kontrolera tokova snaga i ugradnje dodatne kompenzacije reaktivne snage;
2. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoje samo *NEPST* „pasivnih EPST i/ili *NSPSTP* „pasivnih” SPST kontrolera. Tada se samo utvrđuju efekti ovih „pasivnih” kontrolera, koji imaju unapred zadatu fiksnu vrednost ugla regulacije;
3. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoje samo *NCSCP* „pasivnih” CSC kontrolera. Tada se samo utvrđuju efekti ovih „pasivnih” kontrolera, koji imaju unapred zadatu fiksnu vrednost stepena kompenzacije reaktanse;
4. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoje samo *NEPST* „pasivnih” EPST i/ili *NSPSTP* „pasivnih” SPST kontrolera i *NCSC* „pasivnih” CSC kontrolera. Tada se samo utvrđuju efekti ovih „pasivnih” kontrolera, koji imaju unapred zadatu fiksnu vrednost ugla regulacije, odnosno unapred zadatu fiksnu vrednost stepena kompenzacije reaktanse;
5. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoje samo *NEPST* i/ili *NSPSTA* „aktivnih” EPST, odnosno SPST kontrolera. Tada se utvrđuju efekti ovih kontrolera, koji automatski podešavaju svoj ugao regulacije, za zadati tok aktivne snage na elementima na kojima su instalirani;
6. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoje samo *NCSCA* „aktivnih” CSC kontrolera. Tada se utvrđuju efekti ovih kontrolera, koji automatski podešavaju stepen kompenzacije reaktanse, za zadati tok aktivne snage na elementima na kojima su instalirani;
7. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoje *NEPST* i/ili *NSPSTA* „aktivnih” EPST, odnosno SPST kontrolera i *NCSCA* „aktivnih” CSC kontrolera. Tada se utvrđuju efekti ovih kontrolera koji automatski podešavaju svoj ugao regu-

lacije, odnosno stepen kompenzacije, za zadati tok aktivne snage na elementima na kojima su instalirani;

8. Određivanje tokova snaga u slučaju utvrđivanja snaga kompenzacionih uređaja, lociranih na unapred specificirane čvorove, potrebnih da se ostvari zadati faktor snage na početku posmatranih elemenata;
9. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoji niz kombinacija prisustva „aktivnih” i „pasivnih” EPST i/ili SPST kontrolera. Tada se utvrđuju efekti ovih kontrolera, koji automatski podešavaju svoj ugao regulacije, za zadati tok aktivne snage na elementima na kojima su instalirani i efekti onih kontrolera koji imaju fiksni ugao regulacije;
10. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoji niz kombinacija prisustva „aktivnih” i „pasivnih” CSC kontrolera. Tada se utvrđuju efekti ovih kontrolera, koji automatski podešavaju stepen kompenzacije, za zadati tok aktivne snage na elementima na kojima su instalirani i efekti onih kontrolera koji imaju fiksni stepen kompenzacije;
11. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoji niz kombinacija prisustva „aktivnih” i „pasivnih” EPST, SPST i CSC kontrolera. Tada se utvrđuju efekti ovih kontrolera, koji automatski podešavaju svoje regulacione parametre, za zadati tok aktivne snage na elementima na kojima su instalirani i efekti onih kontrolera koji imaju fiksne vrednosti ovih parametara;
12. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoji niz kombinacija prisustva „aktivnih” i „pasivnih” EPST i/ili SPST kontrolera i kada se određuju snage kompenzacionih uređaja, lociranih na unapred specificirane čvorove, potrebnih da se ostvari zadati faktor snage na početku posmatranih elemenata. Tada se utvrđuju efekti ovih kontrolera, koji automatski podešavaju svoj ugao regulacije, za zadati tok aktivne snage na elementima na kojima su instalirani i efekti onih kontrolera koji imaju fiksni ugao regulacije, *simultano* sa određivanjem snaga kompenzacionih uređaja, lociranih na unapred specificirane čvorove, potrebnih da se ostvari zadati faktor snage na početku posmatranih elemenata;
13. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoji niz kombinacija prisustva „aktivnih” i „pasivnih” CSC kontrolera i kada se određuju snage kompenzacionih uređaja. Tada se utvrđuju efekti ovih kontrolera, koji automatski podešavaju stepen kompenzacije, za zadati tok snage na elementima na kojima su instalirani i efekti onih kontrolera koji imaju fiksni stepen kompenzaci-

je, *simultano* sa određivanjem snaga kompenzacionih uređaja, lociranih na unapred specificirane čvorove, potrebnih da se ostvari zadati faktor snage na početku posmatranih elemenata;

14. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoji niz kombinacija prisustva „aktivnih” i „pasivnih” EPST, SPST i CSC kontrolera i kada se određuju snage kompenzacionih uređaja. Tada se utvrđuju efekti ovih kontrolera, koji automatski podešavaju svoje regulacione parametre, za zadati tok aktivne snage na elementima na kojima su instalirani i efekti onih kontrolera koji imaju fiksne vrednosti ovih parametara, *simultano* sa određivanjem snaga kompenzacionih uređaja, lociranih na unapred specificirane čvorove, potrebnih da se ostvari zadati faktor snage na početku posmatranih elemenata.

Opcija 1. odgovara proračunu tokova snaga, kada nema upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga. Sve ostale opcije u primeni ovoga računarskog programa (2. - 14.) obuhvataju postojanje kontrolera tokova aktivnih snaga (energetskih transformatora za regulaciju ugla i serijskih FACTS kontrolera), odnosno obuhvataju prisustvo dodatne kompenzacije reaktivne snage, neophodne za ostvarenje zadanog faktora snage na početku odabranih elemenata.

Za opcije 2., 3. i 4., to su samo tzv. „pasivni” kontroleri, a za opcije 5., 6. i 7., to su samo „aktivni” kontroleri.

Opcija 8. odnosi se na slučaj upravljanja samo tokovima reaktivnih snaga, odnosno slučaj utvrđivanja snaga kompenzacionih uređaja, lociranih na unapred specificirane čvorove, potrebnih da se ostvari zadati faktor snage na početku posmatranih elemenata;

Ostale opcije 9., 10. i 11., pružaju mogućnost razmatranja niza kombinacija primene „aktivnih” i „pasivnih” SPST i CSC kontrolera.

Na kraju, opcije 12., 13. i 14., pružaju Korisniku ovoga programa mogućnost razmatranja niza kombinacija primene „aktivnih” i „pasivnih” SPST i CSC kontrolera, *simultano* sa utvrđivanjem snaga kompenzacionih uređaja, lociranih na unapred specificirane čvorove, potrebnih da se ostvari zadati faktor snage na početku posmatranih elemenata;

Prethodno pomenute tokove snaga moguće je odrediti za normalno stanje razmatrane interkonekcije i za stanja nakon poremećaja, kada postoje sledeće opcije izbora, odnosno formiranja liste poremećaja :

- ispadi samo generatora (jednostruki i višestruki);
- ispadi samo elemenata (transformatora i dalekovoda);

- kombinovani ispadi (generatora i elemenata);
- automatsko formiranje liste poremećaja u razmatranoj interkonekciji (obuhvataju se ispadi, u EES od interesa, svih elektrana i svih elemenata koji su opterećeni iznad unapred zadatog procenta od svog termičkog limita);
- simultana promena ukupne snage potrošača u EES od interesa.

Prva grupa poremećaja (ispadi samo generatora), kao zasebna celina, uvedena je da bi se precizno sagledali efekti poremećaja, koji, sudeći prema dosadašnjim, ne samo našim iskustvima, mogu da budu kritični u pogledu naponsko-reaktivnih prilika.

Automatsko formiranje liste poremećaja pruža veliku udobnost Korisniku, jer su selektovani potencijalno kritični ispadi elemenata, a „poremećaji” tipa simultane promene (povećanja) ukupne snage potrošača u analiziranom EES, mogu biti interesantni u kontekstu utvrđivanja, komplementarno sa strožijim prilazima pojave naponske (ne)stabilnosti

Potrebno je još jednom napomenuti da se u svim opcijama, u kojima su prisutni „aktivni” kontroleri, odvijanje računarskog programa zaustavlja, ukoliko tokom proračuna uglovi regulacije EPST i SPST i stepen kompenzacije, u slučaju primene CSC, prevaziđu raspoloživi opseg. To istovremeno predstavlja upozorenje Korisniku ovoga računarskog programa da preispita adekvatnost formulisanog problema upravljanja tokovima aktivnih snaga.

Takođe, definisanjem maksimalno dozvoljenih vrednosti za snagu kompenzacije reaktivne snage, omogućeno je da se, po njenom prevazilaženju tokom iterativne procedure, ova procedura zaustavi, jer je to ujedno bila dobra indikacija da problem upravljanja tokovima reaktivnih snaga nije bio adekvatno formulisan. U ova ograničenja spada i uslov da ukupna vrednost injektiranja reaktivne snage u čvorovima u kojima se vrši kompenzacija ne bude manja od nulte vrednosti, čime se izbegavaju slučajevi tzv. „prekompenzacije”.

6. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE RAZVIJENOG PROGRAMA UTOKARG

Derivati ove generalizovane metode već su bili prošli iskušenja svoje praktične primene na primerima realnih interkonekcija. U [1], analizirani su efekti serijskih FACTS kontroleri tokova snaga, u tzv. „pasivnom” modu primene, na primeru realne elektroenergetske interkonekcije, koju su sačinjavali EES SR Jugoslavije, dela Republike Srpske, Rumunije, Bugarske, Makedonije, Grčke i Albanije (Druge UCTE sinhrona zona).

U [2, 3], takođe na primeru Druge UCTE sinhrona zone, analizirani su efekti serijskih FACTS

kontrolera tokova snaga, u tzv. „aktivnom” modu primene, odnosno vršeno je upravljanje tokovima aktivnih snaga, automatskim podešenjem uglova regulacije ovih kontrolera. Prethodno pomenuto bilo je bazirano na konvencionalnom modelu tokova snaga.

Prilaz, baziran na nekonvencionalnim modelima tokova snaga testiran je u [4], kada je vršeno i poređenje sa rezultatima dobijenim prilazom, koji je bio zasnovan na konvencionalnom modelu tokova snaga. U [5], data je generalizovana metoda upravljanja tokovima aktivnih snaga, bazirana na nekonvencionalnim modelima tokova snaga, kada su testirane njene mogućnosti, pri simultanoj ugradnji serijskih FACTS kontrolera u tzv. „pasivnom” i „aktivnom” modu primene.

Testiranje mogućnosti razvijene metode upravljanja samo tokovima reaktivnih snaga izvršeno je u [6], tako da je ostao najvažniji deo, koji se odnosi na *simultano upravljanje tokovima i aktivnih i reaktivnih snaga*, odnosno deo koji se bavi testiranjem razvijenog računarskog programa **UTOKARG**.

To je urađeno na primeru realne elektroenergetske interkonekcije, sa 1 100 čvorova (120 generatora i 1 371 grana), koju sačinjavaju EES Srbije (SR), Crne Gore (CG), Bosne i Hercegovine (BH), Hrvatske (CRO), Mađarske (HU), Makedonije (MA), Rumunije (RO), Bugarske (BG), Grčke (GR) i Albanije (AL). Dakle, posmatrana je situacija koja je nastala nakon povezivanja Druge UCTE sinhrona zone sa glavnim delom interkonekcije UCTE.

Modelovane su kompletne visokonaponske mreže 220 i 400 kV u pomenutim EES (u EES Grčke, i relevantni delovi mreže 150 kV), uz napomenu da je kompletno modelovana mreža 110 kV u EES Srbije i sve TS 110/x kV/kV. Razmatrano je maksimalno stanje EES-a Srbije, koje je ostvareno 26 januara 2006 godine. Na slici 1. (koja je direktno generisana ovim računarskim programom) daju se tokovi aktivnih i reaktivnih snaga i naponske prilike na interkonektivnim dalekovodima razmatrane interkonekcije, uz napomenu da nema međusobnih razmena između razmatranih EES (osim razmene između BiH i CRO, u iznosu od 140 MW).

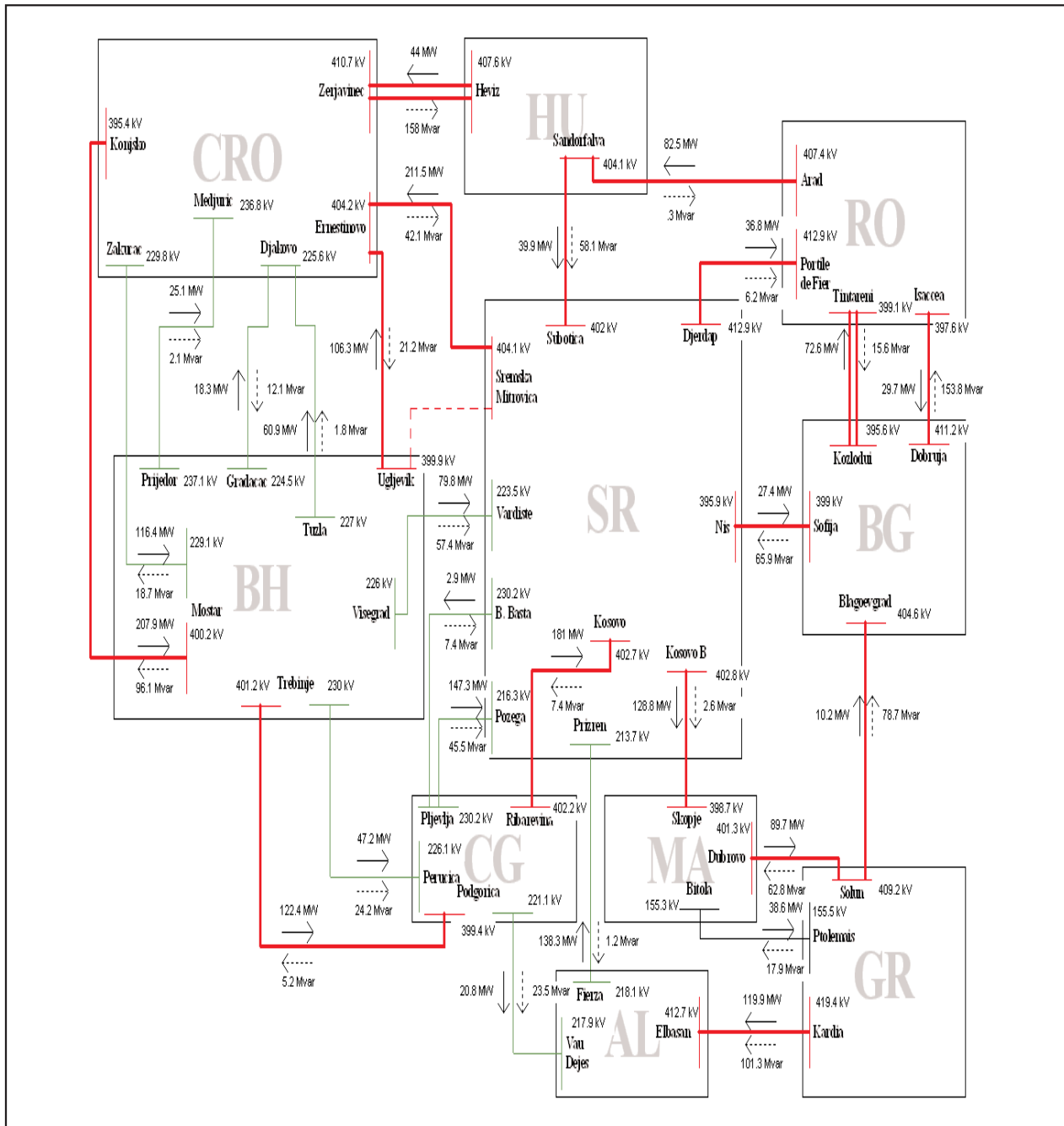
Dakle, za početak praktične primene, sasvim odgovarajuća „dimenzije problema” za potrebe sagledavanja karakteristika i mogućnosti razvijene nove generalizovane metode, odnosno računarskog programa **UTOKARG**. Konkretni praktični primeri su tako birani da u prvom redu dovedu do velikih iskušenja razvijenu novu metodu u pogledu karakteristika konvergencije.

Jedan od takvih primera (*naravno, primer je krajnje hipotetičan*), koji je veoma indikativan u pogledu utvrđivanja karakteristika konvergencije iterativne procedure rešavanja sistema raspregnutih jed-

načina (23) i (24) je *simultano* prisustvo kontrolera tokova aktivnih snaga, zajedno sa upravljanjem toka reaktivne snage na odabranom elementu (prethodno pomenuta opcija 14. primene ovog računarskog programa).

U ovom primeru, SPST je instaliran na početku interkonektivnog dalekovoda 400 kV Subotica (SR) - Šandorfalva (HU), sa zadatkom da automatski podese svoj ugao regulacije ϕ_1 , da bi tok aktivne snage, umesto postojećih -39,9 MW, iznosio -100 MW.

Istovremeno, na početku ovoga dalekovoda želi se ostvarenje faktora snage u iznosu od 0,95 (za novu, zadatu snagu od -100 MW), a potrebna snaga kompenzacije, čiji se iznosi određuju, locira se na TS 110/20 kV Subotica 1, 2, 4 i B 110/35 kV/kV Topola 1, sa faktorima učešća 0,185, 0,330, 0,360 i 0,125, respektivno. Dakle, potrebno je da novi tok reaktivne snage iznosi -32,9 Mvar (koji odgovara faktoru snage 0,95), umesto prethodnih -58,1 Mvar.



Slika 1. Tokovi aktivnih i reaktivnih snaga i naponske prilike na interkonektivnim dalekovodima razmatrane interkonekcije

Dalje, SPST je instaliran na početku interkonektivnog dalekovoda 400 kV Blagoevgrad (BG) - Thessaloniki (GR), sa zadatkom da automatski podese svoj ugao regulacije ϕ_2 , da bi tok aktivne snage, umesto postojećih 6,1 MW, iznosio 200 MW.

Zatim, na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Niš (SR) - Sofija (BG) instalirana je CSC, sa stepenom kompenzacije reaktanse 20 %, a tok aktivne snage, pre uvođenja ove kompenzacije je iznosio 27,4 MW.

Za ovaj primer, Tabela 1 daje kretanje maksimalnog odstupanja snaga ("the maximum power mismatches") tokom iterativne procedure rešavanja sistema jednačina (23) i (24), korekcije uglova regulacije SPST ($\Delta\phi_1$ i $\Delta\phi_2$), korekcije odstupanja jedinstvene učestanosti ($\Delta(\Delta f)$), kao i vrednosti korekcija potrebnih snaga kompenzacije.

Analizirajući pokazatelje iz tabele 1, uočavaju se veoma dobre karakteristike konvergencije iterativne procedure rešavanja sistema raspregnutih jednačina (23) i (24), jer je bilo potrebno svega sedam iteracija za zahtevanu tačnost od 0,1 MW, odnosno Mvar. Pri tome, potrebno je napomenuti da je iterativna procedura startovala od utvrđenog stanja interkonekcije (slika 1), pre ugradnje razmatranih kontrolera (sa nultim vrednostima njihovih uglova regulacije), odnosno pre ugradnje kompenzacionih uređaja. Takođe, uočava se veoma brzo dostizanje uglova regulacije SPST.

To nije bio slučaj sa određivanjem potrebnih snaga kompenzacije, iz veoma prostog razloga, što je na početku proračuna, odnosno u prvoj iteraciji, bilo zahtevano da reaktivna snaga na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Subotica (SR) - Šandorfalva (HU) iznosi - 13,1 Mvar, umesto -58,1 Mvar, saglasno tada aktuelnom toku aktivne snage od -39,9

MW i zadatom faktorom snage od 0,95. Otuda i razlika u iznosu od 45,0 Mvar.

Međutim, to je u narednom toku proračuna uspešno prevaziđeno, jer je aktivna snaga na tom dalekovodu brzo dobila vrednost koja je bliska željenoj, a odmah zatim dobijena je i vrednost za željenu reaktivnu snagu. Naravno, ove promene uslovile su i takvo kretanje potrebne snage kompenzacije, kako je to pokazano u tabeli 1.

U novo dobijenom stanju, dakle, tok aktivne snage na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Subotica (SR) - Šandorfalva (HU) je iznosio željenih - 100 MW, koji je postignut sa vrednošću ugla regulacije SPST ϕ_1 u iznosu od -3,195 °el. Istovremeno, od razvijene metode se zahtevalo da simultano omogućujući da faktor snage, za tu snagu od -100 MW, bude 0,950, a da se to postigne, uz prethodno dati komentar, bilo je potrebno uvođenje kompenzacije u čvorove 110 kV, navedene u Tabeli 2. U njoj se daju faktori učešća navedenih čvorova (formiranih, srazmerno svojim reaktivnim opterećenjima), dobijeni iznosi snaga kompenzacije (Q_c i Q_{cn} - snaga preračunata na nominalni napon) i promene napona u njima (ΔV), nakon izvršene kompenzacije.

Takođe, postignuto je da tok aktivne snage na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Blagoevgrad (BG) - Thessaloniki (GR) iznosi željenih 200 MW, koji je posledica automatski određene vrednosti ugla regulacije SPST u iznosu $\phi_2 = 15,125$ °el.

Na kraju, na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Niš (SR) - Sofija (BG), na kome je instalirana CSC, sa stepenom kompenzacije reaktanse 20 %, novi tok aktivne snage iznosi 176,0 MW, uz podsećanje da je tok aktivne snage, pre uvođenja ove kompenzacije, iznosio 27,4 MW.

Tabela 1.

Maksimalne vrednosti debalansa snaga, vrednosti korekcija uglova regulacije SPST, vrednosti korekcija odstupanja jedinstvene učestanosti i vrednosti korekcija potrebnih snaga kompenzacije tokom iterativne procedure rešavanja sistema jednačina (23) i (24)

Brit,	$\max \Delta P $ (MW)	$\max \Delta Q $ (Mvar)	$\max \Delta P_c $ (MW)	$\Delta\phi_1$ (°el)	$\Delta\phi_2$ (°el)	$\Delta(\Delta\phi)$ (Hz)	$\max(\Delta Q_c)$ (Mvar)	ΔQ_{oc} (Mvar)
1	210,225	11,552	210,200	- 3,24	15,24	- 0,000 14	45,016	135,46
2	34,920	8,506	15,700	0,17	- 0,21	0,000 13	-52,828	-93,34
3	22,683	7,518	2,500	0,14	0,10	0,000 07	0,729	-9,58
4	2,144	0,998	0,100	0,03	0,01	- 0,000 04	-1,294	-3,02
5	0,605	0,425	0,100	- 0,00	0,00	- 0,000 00	0,422	0,52
6	0,171	0,250	0,000	0,00	0,00	0,000 00	-0,024	0,03
7	0,047	0,084	0,000	0,00	0,00	0,000 00	-0,019	-0,01

Tabela 2.
Dobijeni iznosi snaga kompenzacije
i promene napona nakon izvršene kompenzacije

Redni broj	Naziv čvora	Faktor učešća	Qc (Mvar)	Qcn (Mvar)	DV (kV)
1	Subotica 1	0,185	5,6	5,0	0,90
2	Subotica 2	0,330	9,9	9,0	0,99
3	Subotica 4	0,360	10,8	9,9	1,16
4	B. Topola 1	0,125	3,3	3,5	0,87
Ukupno		1,000	30,1	27,4	

Dalja iskušenja za ovu metodu bila su u slučaju ispada agregata 5 i 6 u TE N. Tesla A (ispad 561,2 MW i 272,7 Mvar), za istovetno definisan problem simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga. Za dostizanje postdinamičkog stanja nakon primarne regulacije napona i učestanosti, takođe je bilo potrebno svega sedam iteracija, za zahtevanu tačnost od 0,1 MW, odnosno Mvar, a za stanje nakon sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene, bilo je potrebno još nekoliko dodatnih iteracija.

U ovom stanju, tok aktivne snage na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Subotica (SR) - Šandorfalva (HU) je iznosio i dalje željenih -100 MW, kako je zahtevano, ali koji je sada postignut sa vrednošću ugla regulacije SPST ϕ_1 u iznosu od 3,091 °el. Istovremeno, kako se od razvijene metode zahtevalo da simultano omogući da faktor snage, za tu snagu od -100 MW, bude 0,950, bilo je potrebno uvođenje kompenzacije u čvorove 110 kV, navedene u tabeli 3.

Tabela 3.
Dobijeni iznosi snaga kompenzacije i promene
napona nakon izvršene kompenzacije, u slučaju
ispada agregata 5 i 6 u TE N. Tesla A

Redni broj	Naziv čvora	Faktor učešća	Qc (Mvar)	Qcn (Mvar)	DV (kV)
1	Subotica 1	0,185	12,8	11,5	1,59
2	Subotica 2	0,330	22,9	20,5	1,79
3	Subotica 4	0,360	25,0	22,4	2,18
4	B. Topola 1	0,125	8,7	7,9	1,50
Ukupno		1,000	69,4	62,4	

Dalje, postignuto je da u ovom stanju tok aktivne snage na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Blagoevgrad (BG) - Thessaloniki (GR) iznosi i dalje željenih 200 MW, ali sada za vrednost ugla regulacije SPST u iznosu $\phi_2 = 16,470$ °el.

U ovom stanju, na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Niš (SR) - Sofija (BG), na kome je instalirana CSC, sa stepenom kompenzacije reaktanse 20 %, novi tok aktivne snage iznosi 134,0 MW, uz podsećanje da je tok aktivne snage, pre ovog poremećaja, iznosio 176,0 MW.

Na kraju, potrebno je još jednom da se napomene da su ovo bili hipotetični slučajevi, ali dovoljno indikativni, da razvijenu generalizovanu metodu simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih stanja dovedu u maksimalna iskušenja u pogledu karakteristika konvergencije. Ujedno, pokazane su i glavne njene mogućnosti, koje mogu biti od praktične koristi, ukoliko se u bliskoj budućnosti, u okviru intenzivnijeg funkcionisanja regionalnog tržišta električne energije u jugoistočnoj Evropi i širenja interkonekcije UCTE na Istok, pokaže tehnno-ekonomska opravdanost primene FACTS kontrolera tokova snaga, kao i usled eventualno ukazanih potreba, odnosno zahteva, da se minimiziraju tokovi reaktivnih snaga po interkonektivnim dalekovodima.

7. ZAKLJUČCI

U radu je prikazana jedna nova, generalizovana metoda simultanog upravljanja tokovima aktivnih i reaktivnih aktivnih snaga u normalnim i havarijskim stanjima elektroenergetskih interkonekcija. Upravljanje tokovima aktivnih snaga obavlja se pomoću energetskih transformatora za regulaciju ugla (EPST) i serijskih FACTS kontrolera tokova snaga (statički transformatori za regulaciju ugla (SPST) i upravljana serijska kompenzacija reaktanse dalekovoda (CSC)). Upravljanje tokovima reaktivnih snaga na izabranim elementima, vrši se uvođenjem kompenzacije u odgovarajuće čvorove, koji prirodno gravitiraju tome elementu. Razvijena generalna forma metode omogućuje obuhvatanje niza raznovrsnih kombinacija simultane primene EPST, SPST i CSC, kako u tzv. „aktivnom”, tako u tzv. „pasivnom” modu primene, uz simultano uvođenje kompenzacije reaktivne snage, potrebne da se ostvare zadate vrednosti faktora snage.

Ova metoda je bazirana na nestandardnom modelu tokova snaga, u kome, za razliku od klasičnog modela tokova snaga, svi čvorovi imaju karakter balansnog, odnosno, u uspostavljanju novog stanja kao rezultat efekta uvedenih kontrolera tokova snaga, odnosno uvedene kompenzacije reaktivne snage, učestvuju svi generatorski čvorovi (srazmerno svojim primarnim regulacionim konstantama i statizmima primarne regulacije napona) i svi potrošački čvorovi (u skladu sa svojim zavisnostima od napona i učestanosti). Ova osobina razvijene metode omogućuje tačniju evaluaciju relevantnih tehničkih efe-

kata primene EPST, SPST i CSC i uvedene kompenzacije reaktivne snage.

Karakteristike i mogućnosti razvijenog računarskog programa UTOKARG, baziranog na izloženoj generalizovanoj metodi, utvrđivane su na primeru realne elektroenergetske interkonekcije

8. LITERATURA

- [1] D. P. Popović, GENERALIZOVANI MODEL TRANSFORMATORA I TOKOVI SNAGA, Časopis Elektroprivreda”, br. 1, 2003, str. 3-14.
- [2] D. P. Popović, AN EFFICIENT DECOUPLED POWER FLOW CONTROL METHOD BY USE OF PHASE SHIFTING TRANSFORMERS, FACTA UNIVERSITATIS, Series: Electronics and Energetics, Vol. 17, No. 1, April 2004, pp.111-119.
- [3] D. P. Popović, JEDNA METODA UPRAVLJANJA TOKOVIMA SNAGA POMOĆU TRANSFORMATORA ZA REGULACIJU UGLA, Časopis „Elektroprivreda”, br. 3, 2004, str. 24 - 34
- [4] D. P. Popović, EVALUACIJA RELEVANTNIH TEHNIČKIH EFEKATA PRIMENE STATIČKIH TRANSFORMATORA ZA REGULACIJU UGLA, XLIX Konferencija ETRAN-a, Budva, 5 - 10 jun, 2005.
- [5] D. P. Popović, GENERALIZOVANA METODA UPRAVLJANJA TOKOVIMA AKTIVNIH SNAGA U ELEKTROENERGETSKIM INTERKONEKCIJAMA, Časopis Elektroprivreda, br. 2, 2005, str. 3 - 17
- [6] D. P. Popović, JEDNA METODA UPRAVLJANJA TOKOVIMA REAKTIVNIH SNAGA U NORMALNIM I HAVARIJSKIM STANJIMA ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, Časopis Elektroprivreda, br. 1, 2006, str. 7 - 24
- [7] D. P. Popović, M. Stojković, RAČUNARSKI PROGRAM ZA UTVRĐIVANJE LOKACIJE I SNAGE UREĐAJA ZA KOMPENZACIJU REAKTIVNE SNAGE, Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-Jahorina, 22-24 mart, 2006, referat D-1.
- [8] ANALYSIS OF ELECTRICITY NETWORK CAPACITIES AND IDENTIFICATION OF CONGESTION, IAEW and CONSENTEC, Final Report, Aachen, December, 2001.
- [9] DEFINITIONS OF TRANSFER CAPACITIES IN LIBERALIZED ELECTRICITY MARKETS, Final Report, ETSO, April, 2001
- [10] PROCEDURES FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENTS, ETSO, October, 2001
- [11] EVALUATION OF CONGESTION MANAGEMENT METHODS FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION, ETSO, Florence Regulators Meeting, November, 1999
- [12] M. Marinković, B. Ivanović, D. Balkoski, A. Marinković, N. Mijušković, I. Cvijetić, S. Subotić, REKONSTRUKCIJA I ANALIZA DVA KARAKTERISTIČNA RADNA REŽIMA EES EPS-A SA DEFICITOM REAKTIVNE ENERGIJE OSTVARENA U 2004. GODINI I NJIHOVE POSLEDICE NA RAD SISTEMA EPS-a, 27 savetovanje JUKO CIGRE, Zlatibor, 29 maj-3 juni 2005 godine, referat C2
- [13] D. Tubić, B. Stojković, PONOVRNO POVEZIVANJE SA GLAVNIM DELOM UCTE MREŽE, časopis „Elektroprivreda”, br. 3, 2004, str. 3-8
- [14] UCTE Operation Handbook, Policy 3: Operational Security; B.Voltage Control and Reactive Power Management, final draft,18 june 2004.
- [15] D. P. Popović, STATIČKA SIGURNOST ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, Monografija, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, juni 2004.
- [16] E. S. Lukašov i dr., DUGOTRAJNI PRELAZNI PROCESI U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA (knjiga na ruskom), „Nauka”, Novosibirsk,1985
- [17] W. F. Tinney and C. E. Hart, POWER FLOW SOLUTION BY NEWTON’S METHOD, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-86, No. 11, November 1967, pp. 1449-1467.
- [18] B. Stott and O. Alsac, FAST DECOUPLED LOAD FLOW, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-93, no. 3, May/June 1974, pp. 856-869.
- [19] M. S. Čalović, V. C. Strezoski, CALCULATION OF STEADY-STATE LOAD FLOWS INCORPORATING SYSTEMS CONTROL EFFECTS AND CONSUMER SELF-REGULATION CHARACTERISTICS, International Journal of Electric Power and Energy Systems, Vol. 2, No. 2, April 1981, pp- 65-74.

9. PRILOG : LISTA UVEDENIH OZNAKA

- NG – ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatorskih čvorova;
- NSV – ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatora koji imaju statičku karakteristiku napon – r e a k t i v n a snaga;
- NL – ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih „neproizvodnih” čvorova ($NL=N-NG$);
- g_{km}, b_{km} – konduktansa i susceptansa elementa „ $k-m$ ”;
- θ_{km} – razlika uglova fazora napona na početku V_k i kraju V_m elementa „ $k-m$ ” ;
- ϕ – ugao regulacije EPST, odnosno SPST;
- t – moduo kompleksnog prenosnog odnosa EPST, odnosno SPST;

$\Delta g_{km}, \Delta b_{km}$ – korekcije konduktanse i susceptanse elemenata „ $k-m$ ” usled uvedene serijske kompenzacije;

P_{ci}^{SP} – specificirani tok aktivne snage na početku elementa „ $k-m$ ”;

P_{ckm} – aktuelni tok aktivne snage na početku elementa „ $k-m$ ”;

Q_{ci}^{SP} – specificirani tok reaktivne snage na početku elementa „ $k-m$ ”;

Q_{ckm} – aktuelni tok reaktivne snage na početku elementa „ $k-m$ ”;

$NCU = NESPT + NSPST + NCSC$ – oznaka skupa, odnosno ukupan broj krajnjih čvorova svih elemenata na kojima su instalirani kontroleri, bez obzira da li su u tzv. „aktivnoj” ili „pasivnoj” ulozi;

$NEPST$ – ukupan broj, odnosno skup krajnjih čvorova elemenata na kojima su priključeni EPST;

$NSPST$ – ukupan broj, odnosno skup krajnjih čvorova elemenata na kojima su priključeni SPST;

$NCSC$ – ukupan broj, odnosno skup krajnjih čvorova elemenata na kojima je uvedena CSC;

$NUEPST = NEPSTA + NEPSTP$ – ukupan broj EPST kontrolera;

$NEPSTA$ – ukupan broj „aktivnih” EPST kontrolera;

$NEPSTP$ – ukupan broj „pasivnih” EPST kontrolera;

$NUSPST = NSPSTA + NSPSTP$ – ukupan broj SPST kontrolera;

$NSPSTA$ – ukupan broj „aktivnih” SPST kontrolera;

$NSPSTP$ – ukupan broj „pasivnih” SPST kontrolera;

$NUCSC = NCSCA + NCSCP$ – ukupan broj CSC kontrolera;

$NCSCA$ – ukupan broj „aktivnih” CSC kontrolera;

$NCSCP$ – ukupan broj „pasivnih” CSC kontrolera;

$NLUT = NEPSTA + NSPSTA + NCSCA$ – ukupan broj „aktivnih” kontrolera;

NQU – ukupan broj, odnosno oznaka skupa elemenata na čijem početku se zadaje faktor snage $\cos\phi_{zi}$, odnosno vrši upravljanje tokovima reaktivne snage;

NC – ukupan broj, odnosno oznaka skupa početnog i krajnjeg čvora elemenata na kojima se vrši upravljanje tokovima reaktivne snage;

P_{GO}, Q_{GO} – aktivna i reaktivna snaga generatora u polaznom ustaljenom stanju;

V_{GO} – napon na krajevima generatora u polaznom ustaljenom stanju;

k_p – primarna regulaciona konstanta učestanosti agregata;

s_V – statizam primarne regulacije napona generatora;

$\Delta f = f - f_0$ – odstupanje kvazistacionarne vrednosti jedinstvene učestanosti razmatrane interkonekcije f od svoje vrednosti iz polaznog ustaljenog stanja f_0 ;

$P_L(V, f), Q_L(V, f)$ – aktivna i reaktivna snaga potrošača kao složene nelinearne funkcije od napona i učestanosti;

P, Q – injektirana aktivna i reaktivna snaga;

NSR – ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatora koji učestvuju u sekundarnoj regulaciji učestanosti i snaga razmene;

M – broj, odnosno oznaka skupa regulacionih basena u zajedničkom sinhronom paralelnom radu;

k_{si}^j – koeficijent participacije i -tog generatora u sekundarnoj regulaciji učestanosti i snaga razmene j -tog regulacionog basena;

P_{Rj}, P_{RPj} – stvarni i programirani total razmene snaga j -tog regulacionog basena;

B_j – sekundarna regulaciona energija j -tog basena;

DEB_j – debalans aktivne snage j -tog regulacionog basena u kome je generator i ;

RGS_j – regulaciona greška j -tog basena.

Rad je primljen u uredništvo 23. 05. 2006. 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. Maja meseca 2005. godine izabran je za dopisnog člana Jugoslovenske inženjerske akademije u Odeljenju za elektrotehniku. Kao autor (pretežno) ili koautor do sada je objavio jednu monografiju, preko 180 naučnih i stručnih radova i razvio je veći broj računarskih programa za analizu relevantnih statičkih i dinamičkih stanja elektroenergetskih interkonekcija.

*Jovan Nahman,
Dragoslav Perić, Dragutin Salamon i Ivana Vlajić-Naumovska*

Štete potrošača u gradskim distributivnim mrežama usled prekida napajanja električnom energijom

Originalni naučni rad
UDK: 621.395.74

Rezime:

U radu je prikazana inostrana praksa vezana za vrednovanje, proračun i nadoknadu šteta usled prekida napajanja električnom energijom. Opisana je anketa o troškovima i stepenu neprihvatljivosti prekida napajanja sprovedena kod potrošača na beogradskom području, kao i metodologija obrade ankete. Analizirani su dobijeni rezultati i data njihova opšta ocena.

Ključne reči: *distributivne mreže, prekidi napajanja, troškovi potrošača, stepen neprihvatljivosti, rezultati ankete*

Abstract:

CUSTOMER COSTS IN MUNICIPAL DISTRIBUTION NETWORKS CAUSED BY ELECTRICAL ENERGY SUPPLY INTERRUPTIONS

A review is given of the international practice in evaluation, data collection and processing of customer cost due to power delivery interruption. The data obtained by a pilot-survey of customer outage costs and of the supply interruption unacceptability grades, conducted in the Belgrade area, are presented and discussed. The methodology applied in data processing and evaluation is outlined.

Key words: *distribution networks, supply interruptions, customer outage costs, unacceptability grades, survey results*

1. UVOD

Štete usled prekida napajanja električnom energijom kod potrošača nastaju zbog narušavanja ili ometanja njihovih normalnih aktivnosti i mogućeg stvaranja škarta. Kod distributivnog preduzeća ove štete nastaju zbog neostvarene dobiti na prodaji električne energije i zbog plaćanja penala pojedinim potrošačima ako je to predviđeno ugovorom. U poslednjih nekoliko godina u svetu se intenzivno radi na sakupljanju podataka i pravnoj regulativi u ovoj oblasti, kako je konstatovano u izveštaju radne gru-

pe 38.06.01 CIGRE, 2002. godine [1]. Poznavanje iznosa šteta usled prekida napajanja kod potrošača vrlo je važno i u postojećim uslovima u našoj zemlji.

U prvom delu ovog rada daje se pregled stranih iskustava u odnosu na način proračuna šteta i regulativa u ovoj oblasti, kao i pregled rezultata anketa o štetama kod potrošača sprovedenih u nekim zemljama. U drugom delu izlažu se teorijske osnove metode za obradu rezultata ankete i formiranje karakterističnih grupa potrošača. Prikazuju se rezultati obrade podataka o štetama i stepenu neprihvatljivosti dobijeni anketom sprovedenom u okviru studije [18].

*Prof. dr Jovan Nahman, prof. dr Dragutin Salamon, – Elektrotehnički fakultet, 11 000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73
Prof. dr Dragoslav Perić, mr Ivana Vlajić-Naumovska, – Viša elektrotehnička škola, 11 000 Beograd, Vojvode Stepe 283*

2. INOSTRANA PRAKSA

Do podataka o štetama kod potrošača kod nena-
javljenih prekida napajanja električnom energijom
najčešće se dolazi anketiranjem potrošača. Potrošači
procenjuju svoje štete u zavisnosti od dužine trajanja
prekida. U pojedinim zemljama prekidi isporuke
električne energije izuzetno su retki tako da potroša-
či nemaju prethodno iskustvo. U tim slučajevima
anketari ukazuju na mogući tok događaja i moguća
alternativna rešenja i troškove koje njihova realiza-
cija zahteva (alternativni način osvetljavanja, greja-
nja, priprema/nabavka hrane i dr.). Tako se dolazi do
procene troškova zavisno od trajanja prekida CDF
(*Consumer Damage Function*).

Da bi se mogle porediti štete za potrošače koji
se razlikuju po instaliranoj snazi, troškovi usled pre-
kida napajanja normalizuju se deljenjem sa vršnom
snagom potrošača ili sa njegovom ukupnom godi-
šnjom potrošnjom električne energije. U nekim zem-
ljama štete se normalizuju deljenjem sa neisporu-
čenom energijom ili isključenom snagom. U slučaju
deljenja sa neisporučenom energijom dobijeni poka-
zatelj označava se sa VoLL (*Value of Lost Load*) u
Engleskoj, Velsu i Australiji ili sa IEAR (*Interrupted
Energy Assessment Rate*) u Kanadi.

2.1 Proračun šteta usled prekida napajanja

Troškovi za grupe potrošača iste vrste određuju
se kao srednje aritmetičke vrednosti normalizovanih
troškova potrošača pojedinačno. Tako se dolazi do

funkcije troškova $C(d_i)$ koja daje vrednosti normali-
zovanih troškova za grupu potrošača u zavisnosti od
trajanja prekida napajanja. Ukupni troškovi za po-
smatranu grupu potrošača u toku godine jednaki su

$$ECOST = \sum_{i=1}^N m_i f_i C(d_i) \quad (1)$$

U (1) je sa N označen ukupan broj prekida na-
pajanja različite dužine trajanja u toku godine, f_i je
godišnji broj prekida sa trajanjem d_i , a $C(d_i)$ su nor-
malizovani troškovi. Sa m_i označena je ukupna po-
sledica prekida napajanja u trajanju od d_i vremena.
Ako su troškovi normalizovani po vršnoj snazi, on-
da je m_i ukupna godišnja vršna snaga potrošača is-
ključenih kod odgovarajućeg prekida napajanja.

Troškovi za više različitih grupa potrošača koje
su pogođene kvarom izračunavaju se primenom re-
lacije

$$ECOST = \sum_{k=1}^M ECOST_k \quad (2)$$

gde je M ukupan broj različitih grupa potrošača, a
 $ECOST_k$ su troškovi grupe potrošača k izračunati
prema izrazu (1).

2.2. Podaci o štetama u različitim zemljama

U mnogim zemljama radene su analize šteta
usled prekida napajanja potrošača. Podaci koje je sa-
opštila Radna grupa CIGRE 2002 [1] navedeni su u
tabeli 1. Veliki broj podataka naveden je i u [2]. Oni
se u ovom radu neće ponavljati.

Tabela 1

Sažeti prikaz anketa o troškovima kod prekida napajanja u pojedinim zemljama

Zemlja	Obuhvaćeni sektori potrošnje	Trajanje prekida napajanja	Normalizacija	Period kada je urađena anketa
Australija	P,K,I,V,D	2 s - 48 h	Godišnja energija	1996 - 1997
Kanada	P,K,I,J,D	2 s - 48 h	Godišnja energija Vršna snaga	1985 - 1995
Danska	P,K,I,J,D	2 s - 8 h	Vršna snaga	1993 - 1994
Velika Britanija	K,I,V,D	trenutno - 24 h	Godišnja energija Vršna snaga	1993
Grčka	K,I	trenutno - 24 h	Vršna snaga	1997 - 1998
Iran	K,I,D	2 s - 2 h	Vršna snaga	1995
Nepal	K,I,D	1 min - 48 h	Godišnja energija Vršna snaga	1996
Novi Zeland	K,I,D	< 2 h		1987
Norveška	P,K,I,D	1 min - 8 h	Vršna snaga	1989 - 1991
Portugalija	K,I,D	1 min - 6 h	Godišnja energija	1997 - 1998
Saudijska Arabija	K,I,D	20 min - 8 h	Godišnja energija Vršna snaga	1988 - 1991
Švedska	P,K,I,D	2 min - 8 h	Vršna snaga	1994
SAD	P,K,I,D	trenutno - 4 h	Neisporučena energija	1986 - 1993

Primenjene oznake u tabeli 1. su:

P - poljoprivreda,

K - komercijala,

I - industrija,

V - veliki potrošači (snage veće od 8 MVA),

J - javne zgrade, nadležstva,

D - domaćinstva.

U narednom tekstu u tabelama su prikazani podaci o troškovima za različite vrste potrošača koji su dobijeni anketama u nekoliko zemalja. Troškovi su izraženi u američkim dolarima. Za različite vrste potrošača upotrebljene su iste oznake kao u tabeli 1.

Tabela 2.

Štete po jedinici vršne snage u Kanadi, \$/kW

Trajanje prekida	Sektor potrošnje				
	P	D	K	I	J
2 s	-	-	0,192	0,646	1,187
1 min	-	-	1,349	1,545	-
20 min	0,049	0,020	3,990	2,210	2,337
1 h	0,240	0,116	10,780	4,670	5,173
2 h	-	-	22,613	8,286	-
4 h	2,020	1,297	54,314	17,036	15,288
8 h	5,640	2,863	87,277	31,528	-
24 h	-	13,058	105,116	50,184	-

Tabela 3.

Štete po jedinici vršne snage u Danskoj, \$/kW

Trajanje prekida	Sektor potrošnje				
	P	D	I	K	J
1 h	-	4,050	4,915	4,345	7,242
2 h	3,482	8,105	8,675	8,675	14,484
4 h	13,883	16,225	16,209	20,247	28,968
8 h	57,935	32,357	32,450	46,302	57,935

Tabela 4.

Štete po jedinici vršne snage u Velikoj Britaniji, \$/kW

Trajanje prekida	Sektor potrošnje			
	D	I	K	V
Trenutno	-	9,762	1,571	10,698
1 min	-	10,270	1,619	10,698
20 min	0,238	22,650	6,175	10,889
1 h	0,857	40,095	16,905	13,397
4 h	5,921	114,634	61,968	14,063
8 h	-	190,651	124,841	15,413
24 h	-	238,698	158,698	21,190

Tabela 5.

Štete po jedinici vršne snage u Grčkoj, \$/kW

	Trenutno	3 min.	20 min.	1 h	2 h	4 h	24 h
K	0,592	0,723	1,712	3,729	7,549	12,922	31,465
I	1,971	2,366	6,016	9,523	13,664	18,714	40,950

Tabela 6.

Štete po jedinici vršne snage u Norveškoj, \$/kW

Trajanje prekida	Sektor potrošnje			
	P	D	I	K
1 min	-	-	1,330	0,907
1 h	0,147	0,293	6,787	4,733
4 h	1,973	4,480	21,440	19,787
8 h	8,320	10,670	42,453	45,547

Tabela 7.

Štete po jedinici vršne snage u Švedskoj, \$/kW

Trajanje prekida	Sektor potrošnje				
	P	D	Mala I	Velika I	K
2 min	0,581	0,103	1,201	2,351	1,744
1 h	2,713	0,310	4,702	5,464	7,996
4 h	9,675	1,175	19,247	12,117	29,582
8 h	27,773	3,307	41,337	22,218	88,228

Prema anketama sprovedenim u SAD troškovi kod prekida napajanja normalizovani po vršnoj snazi mogu se, za većinu najvažnijih potrošača, smatrati linearno zavisnim od dužine trajanja prekida. Kod domaćinstava je

$$C(d) = 2 \cdot d \text{ (\$/kW)} \quad (3)$$

gde je d trajanje prekida u časovima.

Za komercijalu približno je

$$C(d) = 11 \cdot d \text{ (\$/kW)} \quad (4)$$

Ako prekid traje duže od 2 h, štete kod industrijskih potrošača takođe rastu linearno sa dužinom trajanja prekida, približno po relaciji

$$C(d) = 14 + 15 \cdot (d - 2) \text{ (\$/kW)} \quad (5)$$

Kod trajanja prekida kraćih od 2 h štete osetno zavise od vrste industrije i nalaze se u intervalu od 4 do 14 \$/kW.

Kako se vidi iz priloženih podataka, postoje razlike, ali i poneke sličnosti u utvrđenim podacima. Razlike su posledica više faktora. Nabrojaćemo neke od njih:

- različite vrste industrije u pojedinim zemljama,
- različit stepen korišćenja drugih energenata, kao što su gas, nafta, prirodne termalne vode, kako za zagrevanje tako i u industrijskim postrojenjima i poljoprivredi,
- različite pretpostavke o godišnjem dobu, danu i času kada dolazi do iznenadnog prekida isporuke električne energije koje su usvojene kod popunjavanja anketnog lista (primeru radi, u Kanadi je kao

reprezentativan usvojen zimski dan u 11 h prepodne dok su podaci za nordijske zemlje usrednjeni za različite vremenske periode u toku godine),

- različite klimatske prilike
- različito formulisana pitanja u anketama

Prethodni podaci su navedeni da bi se dobila slika o tome šta je u razmatranoj oblasti urađeno u pojedinim zemljama i kao ilustracija činjenice da se u analizama šteta od prekida napajanja ne mogu sa sigurnošću koristiti tuđi podaci. Na primer, u anketi sprovedenoj u Švedskoj potrošači u domaćinstvima su pitani koliko bi bili spremni da više plaćaju električnu energiju ako bi se povećala pouzdanost napajanja. Kako se pokazalo, potrošači nisu spremni da dodatno plate ono što smatraju da im i inače sleduje. Ovim se mogu objasniti velike razlike između podataka o štetama u domaćinstvima za Švedsku i za druge nordijske zemlje koje su procene šteta radile na drugi način.

2.3. Nadoknada šteta kod prekida napajanja

Način nadoknade šteta potrošačima zbog iznenadnog ili planskog prekida napajanja električnom energijom u različitim zemljama u najvećoj meri zavisi od načina organizacije i vlasničke strukture njihovih elektroenergetskih sistema [1]. Kod sistema koji su delimično ili potpuno privatizovani štete kod prekida se po pravilu nadoknađuju ili je izrada određenih propisa u tom pogledu u toku. Pouzdanost napajanja smatra se važnom komponentom kvaliteta električne energije i ona se u mnogim zemljama prati, a i sankcioniše kod odobravanja profita i troškova distributivnim kompanijama.

U Australiji se organizacija i vlasnička struktura elektroenergetskog sistema razlikuje od države do države. Propisi specificiraju minimume standarda kvaliteta za distributivne sisteme sa propisanim iznosima novčane kompenzacije koja se isplaćuje potrošačima kod prekida isporuke električne energije. Iznos ovih nadoknada razlikuje se u pojedinim državama. Nadoknada kod planskih isključenja, ako ova nisu data bar dva radna dana unapred, nije manja od 13 \$. Za sada nema striktnih propisa o nadoknadi šteta kod iznenadnih prekida isporuke. Nadoknade kod ovakvih prekida napajanja utvrđuju se od slučaja do slučaja. Očekuje se da će se ova oblast uskoro jednostavnije regulisati. Kao primer dosadašnje prakse navodi se podatak o jednom od snabdevača električnom energijom koji kompenzuje račune za potrošenu električnu energiju domaćinstvima sa 26 \$ ako se kvar koji je doveo do prekida napajanja ne otkloni za vreme kraće od 4 h od momenta prijave.

Odgovornost za snabdevanje električnom energijom u Velikoj Britaniji imaju Public Electricity Suppliers (PES) koji poseduju i vode pogon distributivnih mreža, a pod nadzorom su Generalnog direktorata za snabdevanje električnom energijom koji je ujedno i Regulator sistema. Sve PES (njih je 14 na broju) daju godišnje izveštaje o svom radu u odnosu na standarde propisane uredbom Electricity Act od 1989. godine. Ovi standardi se u delovima GS2 i GS5 odnose i na prekide napajanja električnom energijom.

Standard GS2 obavezuje kompanije da otklone iznenadni kvar u roku do 24 h od trenutka kada su saznale za kvar. U protivnom, potrošači su ovlašćeni da zahtevaju naplatu šteta. Od aprila 2002. godine pomenuti rok je 18 h, a naknade potrošačima isplaćuju se automatski, bez posebnog podnošenja zahteva. U tabeli 8. navodi se koliko su iznosile propisane odštete potrošačima u pojedinim periodima.

Tabela 8.
Priznati troškovi potrošačima prema standardu GS2, \$

Period	Prvih 24 h		Svakih narednih 12 h
	Domaćinstva	Ostali	Svi potrošači
1991/92	31,7	79,4	15,9
1992/93	31,7	79,4	15,9
1993/94	63,5	158,7	31,7
1994/95	63,5	158,7	31,7
1995/96	63,5	158,7	31,7
1996/97	63,5	158,7	31,7
1997/98	63,5	158,7	31,7
1998/99	79,4	158,7	39,7

Prema standardu GS5, plansko isključenje napajanja mora se najaviti potrošačima bar 5 dana unapred. U protivnom, domaćinstvima se plaća odšteta od 31,7 \$, a ostalim potrošačima 63,4 \$.

Na Novom Zelandu električna mreža je, uključujući i distributivnu, privatizovana. Način plaćanja odštete potrošačima kod prekida napajanja razlikuje se od kompanije do kompanije. Obično se domaćinstvima plaća od 13 \$ do 26 \$ po prekidu. Sektoru komercijale pojedine kompanije plaćaju do 100 \$ po prekidu. Gradskim domaćinstvima se ništa ne plaća ako se prekid otkloni za vreme kraće od 1,5 h (kod nekih kompanija 3 h). Za seoska domaćinstva ovo vreme je 3 h (kod nekih kompanija 6 h). Takođe postoje i određene obaveze u vezi sa planskim isključenjima.

U Norveškoj je od 2001. godine uvedeno plaćanje odštete potrošačima. Odštete na nivou distribucije plaćaju se kod prekida dužih od 3 min. One iznose 3,7 \$ po kWh neisporučene energije kod iznenadnih prekida i 2,7 \$ po kWh neisporučene energije kod planskih, prethodno najavljenih prekida. Navedene brojke su dobijene usrednjavanjem procenjenih vrednosti za industriju, komercijalu, poljoprivredu i domaćinstva.

Tržište električne energije u Švedskoj je liberalizovano tako da se trgovina električnom energijom odvija odvojeno od tehničkog vođenja sistema. Ne postoji obaveza za plaćanje odštete potrošačima pri prekidu isporuke električne energije. Ove odštete plaćaju osiguravajuće kompanije. Odštete se plaćaju samo ako su prekidi nenajavljeni i traju duže od 7 h. Odšteta za prosečno domaćinstvo je reda 30 \$ po prekidu.

U Nemačkoj pojedine distribucije uvode dodatnu cenu energije vezanu za željeni nivo pouzdanosti. Potrošačima se nude tri kategorije tarifa sa različitim dodatnim uplatama, kao što je prikazano u tabeli 9. Potrošaču u prvoj kategoriji naplaćuje se isporuka energije samo po osnovnoj ceni, bez doplata za povišenu pouzdanost. Ovim potrošačima, međutim, distribucija ne plaća nikakve nadoknade za prekide napajanja. Potrošačima u drugoj i trećoj kategoriji predviđaju se određene nadoknade za prekinutu snagu i neisporučenu energiju. Ovi potrošači zato pla-

Tabela 9
Nadoknade i godišnje doplate

Tarifa	Cena isključene snage ^/kW	Cena neisporučene energije ^/kWh	Doplata ^ (kW godišnje)
I	0	0	0,00
II	10	5	0,83
III	35	10	2,15

čaju godišnje doplate srazmerne instalisanoj snazi. Iznosi u tabeli 9. odmereni su tako da se u prosečnim uslovima izdaci distribucije za nadoknade poklapaju sa sredstvima od dodatnih uplata.

Prednosti pomenutog pristupa su u tome što tehničko-ekonomske analize koje se rade u distribuciji za potrebe planiranja razvoja dobijaju jasno definisane troškove pouzdanosti i što se uvođenjem tarifa svaki potrošač jednostavno i racionalno određuje za odgovarajuću kategoriju saglasno stvarnim štetama od prekida napajanja kako ih sam procenjuje. Pitanje osnovne cene (I kategorije) ostaje pri tome otvoreno jer se mora zasnivati na nekom usvojenom prihvatljivom nivou pouzdanosti za svakog. Pomenuti prihvatljivi nivo se verovatno procenjuje na osnovu prethodnih iskustava sa kvarovima i reakcijama potrošača.

Ravnoteža između troškova distribucije i uplata potrošača može u nekim slučajevima biti narušena na štetu distribucije. Potrošači koji se nalaze u blizini potrošača koji su uplatili više kategorije mogu da uplaćuju najnižu, I kategoriju, a da pri tome, zbog prethodno pomenutih potrošača, imaju visoki nivo pouzdanosti. Pored navedenog, potrošači mogu da jedno vreme uplaćuju višu tarifu i sačekaju da distribucija poboljša mrežu, a zatim da se vrate u I kategoriju. Ovakvi postupci podrazumevaju dobru obaveštenost potrošača o aktivnostima distribucije, koja je malo verovatna, i mogu se sprečiti odgovarajućim propisima.

3. ANKETA

3.1. Opšte

U okviru studije [18] sprovedena je anketa o troškovima i stepenu neprihvatljivosti prekida napajanja kod potrošača na beogradskom području. U direktnom kontaktu anketirano je 362 potrošača, a putem pisama još 86 potrošača. Obuhvaćeno je 140 domaćinstava sa različitim načinima grejanja i 328 ostalih potrošača. Ukupan broj anketa u potpunosti podesnih za obradu bio je 287. Naknadno, po završetku studije, anketirano je još 49 potrošača iz kategorije malih trgovina. Anketa je potrošače razvrstala u 7 različitih grupa, sa 8 mogućih trajanja prekida napajanja. Za svako pretpostavljeno trajanje prekida napajanja anketirani potrošači su procenjivali stepen neprihvatljivosti na skali od 0 do 10. Ovim pokazateljem se iskazuje subjektivni stepen smetnji i nezadovoljstva koje prekid izaziva kod anketirane osobe, nezavisno od novčano merljivih šteta koje prouzrokuje (prekid rada lifta, centralnog grejanja, hidrofora i dr). Pored navedenog, anketa je obuhvatila i pitanja o potrebnom vremenu prethodnog obaveštava-

nja potrošača kod planskih prekida, procenjenim troškovima u tom slučaju, o radnom vremenu potrošača, o eventualnom postojanju sopstvenog rezervnog napajanja, povoljnim periodima za planske prekide, odgovornim tehničkim licima za kontakte sa EDB i dr. Uz anketni list priložen je i primer popunjavanja ankete i proračuna troškova. Takođe su priloženi i spisak najčešćih pitanja u vezi sa anketom i odgovori na ta pitanja.

3.2. Obrada podataka dobijenih anketom

3.2.1. Teorijske osnovne metode

Za grupe potrošača sličnih karakteristika obrađuju se podaci o ukupnim troškovima kod prekida napajanja umanjnim za uštede zbog neplaćanja neisporučene energije i o stepenu neprihvatljivosti. Podaci se obrađuju za sve dužine trajanja prekida navedene u anketnom listu.

Za oba pokazatelja za sve dužine trajanja prekida određuju se srednja vrednost i verovatne donje i gornje granične vrednosti matematičkog očekivanja ovih pokazatelja (granice intervala poverenja).

Neka je X_k vrednost razmatranog pokazatelja za određeno trajanje prekida napajanja i određenu grupu potrošača. Srednja vrednost X razmatranog pokazatelja X jednaka je

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k \quad (6)$$

gde je n broj podataka obuhvaćenih obradom.

Sa verovatnoćom 0,95 matematičko očekivanje pokazatelja X , označimo ga sa \bar{X} , nalazi se u intervalu

$$\bar{X} - t_{0,95} \frac{\hat{\sigma}_{n-1}}{\sqrt{n}} < X < \bar{X} + t_{0,95} \frac{\hat{\sigma}_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Parametar t u izrazu (2.2) je koeficijent poverenja koji se određuje za Studentovu raspodelu (t raspodelu). Ona se primenjuje umesto normalne raspodele kod malog obima uzorka. Za $n \geq 30$ Studentova raspodela se praktično poklapa sa normalnom raspodelom. Sa σ_{n-1} u izrazu (2.2) označeno je srednje kvadratno odstupanje koje se određuje kao

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\bar{X} - X_k)^2}{n-1}} \quad (8)$$

Parameter σ_{n-1} daje predstavu o mogućem odstupanju pokazatelja od njegove srednje vrednosti. Ako se može smatrati da su anketom prikupljeni podaci o pokazateljima raspodeljeni po normalnoj raspodeli, pomenuto odstupanje nije veće od σ_{n-1} sa verovatnoćom 0,682, a od $2 \cdot \sigma_{n-1}$ sa verovatnoćom 0,954.

3.2.2. Postupak obrade podataka

Postupak obrade odvija se u više koraka :

Potrošači se grupišu prema sličnosti, na osnovu iskustvenih podataka iz prethodnih sopstvenih istraživanja i podataka iz literature.

Primenom relacija (6) do (8) određuju se srednje vrednosti razmatranih pokazatelja, granice mogućih vrednosti matematičkog očekivanja za ove pokazatelje i srednja kvadratna odstupanja pokazatelja od srednjih vrednosti za svaku grupu potrošača, za sva trajanja prekida napajanja električnom energijom.

Na osnovu srednjih kvadratnih odstupanja pokazatelja zaključuje se da li je razmatrana grupa potrošača dovoljno homogena. Grupa je homogena ako σ_{n-1} nije preveliko u poređenju sa srednjom vrednošću. Ako navedeni kriterijum nije ispunjen, grupa se razbija u dve ili više podgrupa prema sličnosti podataka i postupak se vraća na prvi korak.

Poređenjem srednjih vrednosti pokazatelja za različite grupe potrošača procenjuje se da li postoje sličnosti između grupa i da li se one mogu objediniti u zajedničku, veću grupu. Ako se procenjuje da je tako, grupe se objedinjuju i ponovo se prelazi na prvi korak postupka.

3.2.3. Objedinjavanje grupa potrošača

Ako se objedinjuje m grupa potrošača, parametri za zajedničku grupu mogu se odrediti na osnovu odgovarajućih parametara dobijenih u prethodnoj analizi za grupe potrošača pojedinačno. Pokazuje se da se, na osnovu izraza (6) do (8), za zajedničku grupu može pisati

$$n = \sum_{k=1}^m n_k \quad (9)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \bar{X}_k n_k \quad (10)$$

$$\sigma_{n-1} = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \left(\sum_{k=1}^m A_k \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$A_k = (n_k - 1) \sigma_k^2 + n_k (\bar{X} - \bar{X}_k)^2 \quad (12)$$

Ovde su indeksima k označeni odgovarajući parametri grupa koje se objedinjuju, kada su ove analizirane pojedinačno. Izrazi (9) do (12) koriste se i kod ažuriranja postojećih podataka novim.

3.3. Rezultati obrade ankete

Obradom 140 anketnih listova za domaćinstva na beogradskom području i 147 upotrebljivih anketnih listova drugih vrsta potrošača formirane su karakteristične grupe potrošača i za njih određene srednje vrednosti stepena neprihvatljivosti i troškova svedenih na godišnju potrošnju energije za sva razmatrana vremena trajanja prekida. Rezultati dobijeni za domaćinstva u dobrom su skladu sa rezultatima anketa sprovedenih u Novom Sadu, Smederevskoj Palanci i Baru na obimu uzorka od po 100 domaćinstava.

3.3.1. Domaćinstva

Kao najadekvatnija za procenu efekata prekida napajanja električnom energijom za domaćinstva u studiji [2] je predložena kombinovana metoda koja, pored neposrednih šteta koje uzrokuju prekidi, obuhvata i stepen neprihvatljivosti kojim se kvantifikuje mera neprijatnosti i smetnji koje izazivaju prekidi, koja se ne može izraziti novčano. U pilot anketi koja je sprovedena za potrebe pomenute studije obuhvaćeno je 40 domaćinstava delom u Beogradu i delom u Novom Sadu. Po istoj metodologiji urađene su još tri ankete sa po 100 anketiranih domaćinstava u Beogradu, Smederevskoj Palanci i Baru. Dobijeni rezultati se međusobno dobro slažu, kako je pokazano u [2].

Anketom su dobijeni podaci o sledećim parametrima:

a_i – trajanje prekida aktivnosti i koje ne smeta,

b_i – trajanje prekida aktivnosti i počev od koga se ovaj u najvećoj meri smatra neprihvatljivim,

N_i – stepen neprihvatljivosti prekida aktivnosti i kada ovaj traje duže od b_i ,

C_i – troškovi koji se imaju usled prekida aktivnosti i ako se prekorači vreme b_i .

Na osnovu poznatih srednjih vrednosti prethodno navedenih parametara, zavisnost stepena neprihvatljivosti i troškova usled prekida aktivnosti i od trajanja x mogu se opisati sledećim izrazima:

$$n_i(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_i \\ N_i \frac{x - a_i}{b_i - a_i} & a_i < x < b_i \\ N_i & x \geq b_i \end{cases} \quad (13)$$

$$c_i(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_i \\ C_i \frac{x - a_i}{b_i - a_i} & a_i < x < b_i \\ C_i & x \geq b_i \end{cases} \quad (14)$$

Tabela 10.

Vrednosti a_i , b_i , N_i i C_i dobijene anketom za domaćinstva

i	Aktivnost	a_i, h	b_i, h	N_i	$C_i, \hat{}$
1	Svetlo	0,89	2,23	7,90	2,32
2	Pranje veša	1,67	5,01	6,79	2,84
3	Priprema hrane	0,83	1,87	7,97	6,65
4	Daljinsko grejanje	1,87	4,13	7,48	4,14
5	Grejanje sa TA pećima	2,09	4,71	7,07	2,87
6	Direktno grejanje	1,11	1,90	7,82	3,17
7	Priprema vode za kupanje	2,28	5,14	7,21	2,82
8	Frižider	2,18	5,20	7,76	10,00
9	Zamrzivač	10,87	24,08	9,38	129,85
10	Odmor	1,52	3,24	7,05	2,01
11	Održavanje domaćinstva	3,57	8,73	6,13	0,53
12	Snabdevanje vodom	0,30	3	10,0	1,50

Podaci o srednjim vrednostima parametara a_i , b_i , N_i i C_i za beogradska domaćinstva prikazani su u tabeli 10. Podaci su izračunati objedinjavanjem podataka iz ankete prikazane u [2] i podataka dobijenih obradom dodatnih 100 domaćinstava u Beogradu.

Aktivnosti u domaćinstvima ne odvijaju se svih 24 h. Ako se pomenuto želi uzeti u obzir, u razmatranje treba uvesti verovatnoću q_i da će se aktivnost i obavljati u trenutku prekida. U tabeli 11. navode se procene navedenih verovatnoća na osnovu analiza dnevnih dijagrama potrošnje i anketa sprovedenih u okviru analiza mogućnosti upravljanja potrošnjom [2].

Na osnovu podataka iz tabele 10, izraza (13) i (14) i podataka iz tabele 11. određeni su očekivane vrednosti stepena neprihvatljivosti i troškovi uzima-

jući u obzir verovatnoću prekidanja različitih aktivnosti a zavisno od načina grejanja.

Troškovi su svedeni na godišnju potrošnju energije koja za domaćinstva koja su priključena na daljinski sistem grejanja na beogradskom području iznosi 4,6 MWh a za ostala domaćinstva 7,3 MWh.

3.3.2. Poslovnice pošte

Anketirano je ukupno 100 poslovnica pošte. U tabeli 14. navedeni su rezultati obrade podataka dobijenih anketom o stepenima neprihvatljivosti, a u tabeli 15. podaci o troškovima.

Kako se vidi iz tabela 14. i 15, srednja kvadratna odstupanja kod stepena neprihvatljivosti su relativno mala u odnosu na srednje vrednosti. Veća rasipanja rezultata imaju se za troškove kod prekida.

Tabela 11.

Verovatnoće q_i obavljanja aktivnosti u domaćinstvu

Aktivnosti	q_{ri}	q_{vi}	q_{di}	q_{gi}
	Radni dan	Vikend	Srednja dnevna vrednost	Srednja godišnja vednost
1 zima	0,300	0,300	0,300	0,250
1 leto	0,200	0,200	0,200	
2	0,006	0,001	$4,570 \cdot 10^{-3}$	$4,570 \cdot 10^{-3}$
3	0,111	0,164	0,126	0,126
4 zima	1,000	1,000	1,000	0,500
5 zima	0,500	0,500	0,500	0,250
6 zima	0,500	0,500	0,500	0,250
7	0,100	0,150	0,114	0,114
8	1,000	1,000	1,000	1,000
9	1,000	1,000	1,000	1,000
10	0,210	0,300	0,180	0,180
11	0,100	0,080	0,094	0,094
12*	0,500	0,500	0,500	0,500

*procenjeno

Tabela 12.

Očekivane vrednosti stepena neprihvatljivosti $N(x)$ u zavisnosti od trajanja prekida za domaćinstvo

Način grejanja	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Daljinsko	0	0,015	0,26	1,39	4,44	5,76	6,69	8,11
Grejalice	0	0,015	0,26	1,64	4,69	6,00	6,93	8,35
TA peći	0	0,015	0,26	1,39	4,88	6,19	7,12	8,35

Tabela 13.

Očekivani troškovi $C(x)$ svedeni na godišnju potrošnju energije, din./MWh za domaćinstvo

Način grejanja	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Daljinsko	0	0,01	1,74	30	177	256	1138	2504
Grejalice	0	0,01	1,10	27	121	171	725	1571
TA peći	0	0,01	1,10	18	117	169	725	1586

Tabela 14.

Stepeni neprihvatljivosti $N(x)$ za različite dužine trajanja prekida za poslovnice pošte

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	0,13	1,08	3,20	5,44	7,64	9,58	9,80	9,80
σ_{n-1}	0,34	0,31	1,03	1,65	1,34	1,22	1,08	1,08

Tabela 15.

Troškovi $C(x)$ za različite dužine trajanja prekida u din./MWh za poslovnice pošte

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	0,01	0,09	244	483	965	1857	2718	2735
σ_{n-1}	0,04	0,42	280	555	1110	2090	3325	3331

3.3.3. Uslužne delatnosti

Obuhvaćeno je devet objekata. Anketirane su : pekare, picerije, poslastičarnice, restorani, zanatske

radnje, advokatske kancelarije i dr. Rezultati su prikazani u tabelama 16. i 17.

Razmatrana grupa je relativno homogena u odnosu na stepen neprihvatljivosti kod prekida. Veće rasipanje rezultata konstatuje se kod troškova pri prekidima.

Tabela 16.

Stepeni neprihvatljivosti $N(x)$ za različite dužine trajanja prekida za uslužne delatnosti

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	0	0,33	2,67	4,56	6,89	8,11	9,00	9,67
σ_{n-1}	0	0,71	2,12	2,88	3,14	2,52	1,66	0,71

Tabela 17.

Troškovi $C(x)$ za različite dužine trajanja prekida u din./MWh za uslužne delatnosti

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	0	0	81	162	323	671	725	718
σ_{n-1}	0	0	79	159	319	618	636	635

Tabela 18.

Stepeni neprihvatljivosti $N(x)$ za različite dužine trajanja prekida za stočne farme

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	0	0	9,25	10	10	10	10	10
σ_{n-1}	0	0	2,12	0	0	0	0	0

Tabela 19.

Troškovi $C(x)$ za različite dužine trajanja prekida u din./MWh za stočne farme

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	0	0	6,65	27,26	40,51	63,88	120,31	170,56
σ_{n-1}	0	0	2,60	8,26	11,86	16,27	41,36	61,97

3.3.4. Stočna farma – proizvodnja mleka

Anketom je obuhvaćeno 8 različitih objekata Poljoprivrednog kombinata Beograd (PKB). Rezultati obrada prikazani su u tabelama 18 i 19.

Izračunate vrednosti parametra σ_{n-1} ukazuju na malo rasipanje rezultata za posmatranu grupu, kako kod stepena neprihvatljivosti tako i kod troškova. Ovde se izračunate srednje vrednosti za oba pokazatelja mogu smatrati vrlo sigurnim merilom efekata prekida napajanja za posmatranu grupu potrošača.

3.3.5. Trgovine

Obuhvaćeno je 73 objekta. Anketirani su: prodavnice obuće, bele tehnike, računarske opreme, nameštaja, cveća, apoteke, knjižare i dr. Dobijeni rezultati obrada prikazani su u tabelama 20 i 21.

Razmatrana grupa vrlo je homogena u odnosu na stepen neprihvatljivosti kod prekida dužih od 2 h, kao i u odnosu na troškove kod prekida kraćih od 1 h. Rasipanje kod troškova pri dužim prekidima znatno je.

3.3.6. Industrija

Obuhvaćeno je 6 objekata za koje su dobijeni kompletni anketni listovi. Uzorak je obuhvatio fabrike rashladnih uređaja, metalnih proizvoda, keramičkih i sanitarnih uređaja, hladnjaka i grejača, pogone za vadenje šljunka i peska i preradu i konzervaciju voća i povrća. U tabelama 22. i 23. prikazani su rezultati obrade.

Iz rezultata obrade prikazanih u tabeli 22 i tabeli 23 zaključuje se da je razmatrana grupa homogena u odnosu na stepen neprihvatljivosti kod svih prekida koji traju 1 h ili duže. Može se uočiti da je primetno rasipanje troškova, što je posledica različitosti u vrstama obuhvaćenih industrijskih pogona. Izračunate srednje vrednosti troškova se mogu smatrati dobrom merom šteta u globalnim razmatranjima. Međutim, u pojedinačnim slučajevima, ako za to postoji potreba, trebalo bi koristiti podatke iz odgovarajućih anketnih listova.

U tabeli 24 su prikazani podaci o tome šta potrošači u domaćinstvima generalno misle o tome koliko vremena unapred treba da budu obavešteni o prekidima napajanja električnom energijom. U tabeli 25 navedeni

Tabela 20.

Stepeni neprihvatljivosti $N(x)$ za različite dužine trajanja prekida za trgovine

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	0,0132	0,4460	1,22	2,65	5,09	7,67	9,58	9,93
σ_{n-1}	0,11	0,67	1,67	2,27	2,47	2,41	1,38	0,31

Tabela 21.

Troškovi $C(x)$ za različite dužine trajanja prekida u din./MWh za trgovine

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	0	0	76	155	388	821	1 375	1 654
σ_{n-1}	0	0	175	332	645	1 299	2 484	3 911

Tabela 22.

Stepeni neprihvatljivosti $N(x)$ za različite dužine trajanja prekida za industriju

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	1,00	2,00	4,67	5,67	7,33	8,33	8,33	8,33
σ_{n-1}	1,00	2,00	1,53	2,08	2,52	2,89	2,89	2,89

Tabela 23.

Troškovi $C(x)$ za različite dužine trajanja prekida u din./MWh za industriju

Pokazatelj	Trajanje prekida							
	3 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
Srednja vrednost	58	59	922	1 644	3 382	7 438	13 767	18 177
σ_{n-1}	170	170	1520	2 740	5 973	11 318	22 644	33 079

Tabela 24.

Potrebno vreme prethodne najave prekida za domaćinstva

Vreme	< 1 h	(1÷4) h	(5÷16) h	(17÷24) h	(25÷28) h	> 48 h
Procenat (%)	2,27	9,55	25,46	45,45	11,82	5,45

Tabela 25.

Vreme prethodne najave prekida za ostale grupe potrošača

Potrošač	PTT	Trgovina	Usluge	Proizvodnja mleka	Industrija
Vreme, h	12	21	37	78	34
Broj anketiranih	53	22	9	8	7

su podaci o srednjim vrednostima potrebnog vremena prethodne najave prekida za ostale grupe potrošača.

3.4. Analiza rezultata i granične vrednosti stepena neprihvatljivosti

Rezultati koji su dobijeni za sve grupe potrošača, sem za domaćinstva, implicitno pretpostavljaju da će prekidi obustaviti sve aktivnosti i radne procese koji se odvijaju kod potrošača, nezavisno od trenutka kada do prekida napajanja dođe. Pomenuta pretpostavka unosi u proračune rezerve na stranu sigurnosti. Njome se kompenzuju moguća rasipanja

pokazatelja unutar grupa i uzima u obzir da neke smetnje i troškovi postoje kod prekida bilo kada u toku dana, a ne samo u toku radnog vremena.

Za sve grupe potrošača konstatovana je primetna homogenost u odnosu na stepen neprihvatljivosti prekida. Zato se srednje vrednosti ovog pokazatelja mogu, za sve grupe potrošača, smatrati dobrom informacijom o reagovanju potrošača i pouzdanim podatkom za potrebe planiranja razvoja gradskih distributivnih sistema. Izuzetak su samo farme za proizvodnju mleka koje su vrlo osetljive na svaki prekid napajanja. Kod troškova pri prekidima uočavaju se veća rasipanja u okviru istih grupa potrošača. To

Tabela 26.

Prekidi kod kojih se za domaćinstva dostiže granična neprihvatljivost

Prekidi godišnje	Daljinsko grejanje	Direktno grejanje	TA peći
1 x 16 h	6,69	6,93	7,12
1 x 8 h + 1 x 1 h	6,02	6,26	6,45
1 x 4 h + 1 x 2 h + 3 x 1 h	6,61	7,11	7,05
1 x 4 h + 8 x 1 h	6,52	6,77	6,91
5 x 2 h	6,95	8,2*	6,95
26 x 1 h	7,02	7,02	7,02

*Za ovu grupu potrošača granična neprihvatljivost se približno dostiže već kod prekida 4 x 2 h.

Tabela 27.

Prekidi kod kojih se za poslovnice pošte dostiže granična neprihvatljivost

Prekidi godišnje	Neprihvatljivost
1 x 3 h	6,54*
1 x 2 h + 1 x 20 min	6,52
2 x 1 h	6,40
6 x 20 min	6,48

*dobijeno linearnom interpolacijom

Tabela 28.

Prekidi kod kojih se za uslužne delatnosti dostiže granična neprihvatljivost

Prekidi godišnje	Neprihvatljivost
1 x 4 h	6,89
1 x 2 h + 1 x 1 h	7,23
2 x 1 h + 5 x 20 min	6,99

Tabela 29.

Prekidi kod kojih se za trgovine dostiže granična neprihvatljivost

Prekidi godišnje	Neprihvatljivost
1 x 8 h	7,67
1 x 4 h + 4 x 20 min	6,89
2 x 2 h + 4 x 20 min	7,10
5 x 1 h + 2 x 20 min	7,00
1 x 4 h + 1 x 1 h + 1 x 20 min	6,80

Tabela 30.

Prekidi kod kojih se za industriju dostiže granična neprihvatljivost

Prekidi godišnje	Neprihvatljivost
1 x 4 h	7,33
1 x 2 h + 1 x 3 min	6,67
1 x 1 h + 1 x 20 min	6,67
3 x 20 min + 1 x 3 min	7,00

je posledica složenijeg načina proračuna ovih troškova na koje utiču različite specifičnosti potrošača pa i individualne procene samih anketiranih. Dobijene srednje vrednosti troškova mogu ipak poslužiti kao dobra orijentacija kod globalnih tehničko-ekonomskih analiza distributivnih sistema.

U studiji [18] je, na osnovu dosadašnjih iskustava sa reakcijama potrošača na prekide napajanja, zaključeno da se kao generalna gornja granica stepena neprihvatljivosti za potrošače naših mreža može usvojiti vrednost $N=7$ u toku jedne godine.

Kod proizvodnje mleka svi prekidi duži od 20 minuta neprihvatljivi su u najvećoj meri.

4. ZAKLJUČAK

Pitanjima šteta kod prekida isporuke električne energije danas se u svetu posvećuje velika pažnja jer

ovi podaci bitno utiču na planiranje razvoja distributivnog sistema i ugovorne odnose između isporučilaca i korisnika električne energije. Iz pregleda stranih podataka zaključuje se da štete kod pojedinih vrsta potrošača osetno zavise od specifičnih uslova u svakoj zemlji, pa se ovi podaci ne mogu bez velike rezerve koristiti za potrebe naše elektroprivrede. U radu je prikazana metodologija koja je primenjena u pilot-anketama sprovedenim na beogradskom području i dat pregled dobijenih rezultata. Kao poseban pokazatelj kojim se obuhvataju i nenovčani efekti prekida napajanja, uveden je stepen neprihvatljivosti. Ovaj pokazatelj odražava meru nezadovoljstva potrošača pouzdanošću snabdevanja električnom energijom i jasno ukazuje na delove distributivnog sistema koji zahtevaju određena poboljšanja. Rezultati dobijeni obradom ankete za beogradsko područje u dobroj su saglasnosti sa rezulta-

tima anketa sprovedenih u još nekoliko gradova u našoj zemlji i mogu poslužiti kao dobra orijentacija u tehničko-ekonomskim analizama naših gradskih distributivnih sistema.

5. LITERATURA

- [1] METHODS TO CONSIDER CUSTOMER INTERRUPTION COSTS IN POWER SYSTEM ANALYSIS, CIGRE Task Force 38.06.01 report, convener R. Billinton, Paris, 2002.
- [2] J. Nahman sa saradnicima, POUZDANOST DISTRIBUTIVNIH SISTEMA, Studija urađena za EPS, oktobar 1999.
- [3] Warren C.A., R. Ammon, G. Welch, A SURVEY OF DISTRIBUTION RELIABILITY MEASUREMENT PRACTICES IN THE U.S., IEEE Trans. Power Delivery, Vol.14, No 1, 1999, pp. 250-257.
- [4] Billinton R., DISTRIBUTION SYSTEM RELIABILITY PERFORMANCE AND EVALUATION, Electrical Power & Energy Systems, Vol. 10, No 3, 1988, pp.190-200.
- [5] Brown R.E., i dr., DISTRIBUTION SYSTEM RELIABILITY ASSESSMENT: MOMENTARY INTERRUPTIONS AND STORMS, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.12, No 4, 1997, pp. 1569-1575.
- [6] Pearson D. J., Rose V. G., RISK ASSESSMENT MODEL FOR DISTRIBUTION SYSTEM RELIABILITY, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 6.38.1-4.
- [7] Nippert T., IMPROVEMENT OF THE (N-1) CRITERION INTRODUCING A PROBABILISTIC FAILURE RATE RELIABILITY CRITERION, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 6.37.1-6.
- [8] Niechziol R., STRATEGY FOR THE RENEWAL OF 110 kV SUBSTATIONS, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 6.33.1-6.
- [9] Wojczynski E., Billinton R., Wacker G., INTERRUPTION COST METHODOLOGY AND RESULTS - A CANADIAN COMMERCIAL AND SMALL INDUSTRY SURVEY, IEEE Trans. Power App. and Syst., PAS-103, No 2, 1984, pp. 437-444.
- [10] Wacker G., Wojczynski E., Billinton R., INTERRUPTION COST METHODOLOGY AND RESULTS - A CANADIAN RESIDENTAL SURVEY, IEEE Trans. Power App. and Syst., PAS-102, No 10, 1983, pp. 3385-3392.
- [11] Kariuki, K., K., et al., ASSESSMENT OF CUSTOMER OUTAGE COSTS DUE TO ELECTRICITY SERVICE INTERRUPTIONS, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 2.05.1-6.
- [12] Backes, J., Koglin, H., Klein, L., NETWORK PLANNING UNDER ECONOMIC ASPECTS WITH SPECIAL REGARD TO RELIABILITY, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 6.02.1-5.
- [13] Lehtonen M., i dr., ELECTRICITY SUPPLY OUTAGE COSTS IN THE NORDIC COUNTRIES, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 2.06.1-6
- [14] - FAULT MENAGEMENT IN ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS, CIRED Working Group WG-03, final report, CIRED Conf. Nice, 1999.
- [15] Brown R.E., ELECTRIC POWER DISTRIBUTION RELIABILITY, Marcel Dekker Inc., New York, 2002
- [16] J. Nahman, D. Perić, I. Vlajić-Naumovska, ANKETIRANJE DOMAĆINSTAVA O STEPENU NEPRIHVATLJIVOSTI PREKIDA NAPAJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM, ETRAN, Zlatibor, 2001.
- [17] M. R. Spiegel, THEORY AND PROBLEMS OF STATISTICS, McGraw-Hill, New York, 1972.
- [18] G. Upton, I. Cook, OXFORD DICTIONARY OF STATISTICS, University Press, Oxford, 2004.
- [19] J. Nahman sa saradnicima, VREDNOVANJE ŠTETA KOD PREKIDA NAPAJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM KOD PROTROŠAČA ELEKTRODISTRIBUTIVNIH MREŽA JP „ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD”, Studija urađena za JP „Elektrodistribucija Beograd”, april 2005.

Rad je primljen u uredništvo 29. 06. 2006. godine



Jovan Nahman rođen je u Beogradu. Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Energetskom odseku, diplomirao je 1960. godine i doktorirao 1969. godine. Do 2001. godine bio je stalno zaposlen na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu kao redovni profesor. Na diplomskim studijama predavao je predmete Elektrane i razvodna postrojenja i Opšta energetika, a na postdiplomskim studijama predmete Visokonaponska postrojenja i Pouzdanost elektroenergetskih sistema. Drži nastavu iz navedenih predmeta na postdiplomskim studijama. Bavi se problematikom projektovanja, eksploatacije, planiranja i održavanja elektroenergetskih postrojenja i mreža.



Dragoslav M. Perić je rođen 1958. godine u Rači. Diplomirao je 1983. na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, gde je i magistrirao 1989. na smeru Elektroenergetski sistemi i odbranio doktorsku tezu 1997. godine. Radi kao profesor na Višoj elektrotehničkoj školi u Beogradu i kao nastavnik u zvanju docenta na Fakultetu za dizajn. Objavio je više naučnih i stručnih radova i knjiga. Bavi se elektrodistributivnim sistemima i primenom softvetskih alata u projektovanju.



Dragutin D. Salamon rođen je u Vukovaru, Republika Hrvatska, 1949. godine. Na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu diplomirao je 1973. godine, na Energetskom odseku. Na istom fakultetu magistrirao je 1978, a doktorirao 1992. godine. Od 1973. godine stalno je zaposlen na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, trenutno u zvanju vanrednog profesora. Na diplomskim studijama predaje predmete iz oblasti električnih merenja na Energetskom odseku, dok na postdiplomskim studijama drži nastavu iz predmeta Merne sprege i merni transformatori i Merne metode i instrumentacija u elektroenergetici na smeru za Metrologiju. Bavi se problematikom merenja u elektroenergetici i projektovanja, eksploatacije i održavanja elektroenergetskih postrojenja i mreža.



Ivana Vlajić-Naumovska rođena je u Smederevskoj Palanci. Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu diplomirala 1998. godine na Energetskom odseku na smeru za Energetske pretvarače i pogone, a magistrirala 2003. godine na smeru Elektroenergetska postrojenja i oprema. Od 1999. godine radi na Višoj elektrotehničkoj školi u Beogradu kao asistent, a od 2004. godine kao predavač na predmetima Električne instalacije i osvetljenje, Elementi elektroenergetskih sistema i Aplikativni softver. Bavi se pouzdanošću distributivnih sistema i primenom računara u elektroenergetici i obrazovanju.

Procena karakteristika izvedene cevne neregulisane mikro hidroturbine

Stručni rad
UDK: 621.395.74

Rezime:

U radu je izvršena procena područja upotrebe nove cevne neregulisane mikro hidroturbine dobijene geometrijskim skaliranjem 4,95 puta manje ukrajinske, modelske turbine. Za modelsku turbinu bio je na raspolaganju nepotpun set mernih podataka samo jednog režima rada. Da bi se predvidele karakteristike izvedene turbine razvijen je softver HYDRO, koji je verifikovan na poznatim podacima game Litostrojevih cevni neregulisanih mikro hidroturbina.

Ključne reči: mikro hidroturbine, cevna neregulisana mikro hidroturbina

Abstract:

ESTIMATION OF CHARACTERISTICS OF NEW PROPELLER MICRO HYDRO TURBINE

The domain of application of new propeller micro hydro turbine, obtained by geometric scaling of 4,95 times smaller turbine of Ukraine's origin, is estimated in the paper. Incomplete set of measured data for one rating point of Ukraine's turbine was available. Software HYDRO was developed, in order to predict characteristics of the new hydro turbine. The software was verified on the available data from the group of Litostrojs' propeller turbines.

Key words: micro hydro turbine, propeller hydro turbine

1. UVOD

U okviru projekta Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije, oblast Energetska efikasnost (EE) (EE-719-1032B), ukazala se potreba za procenom područja upotrebe horizontalne, osne, cevne neregulisane mikro hidroturbine prečnika $D_1 = 0,99$ m, sa sifonom u obliku slova S. Ova turbina definisana je na osnovu skaliranja geometrije modelske turbine, koja ima obrtno kolo (4 lopatice) prečnika $D_{1,M} = 0,2$ m. Model turbine je ukrajinskog porekla bez prateće tehničke dokumentacije. Geome-

trijski i maseni podaci izvedene turbine dati su u [1] i [2]. Dobijeni su merenjem geometrije radnog kola modelske turbine na numeričkoj koordinatnoj mašini. Od hidrauličnih karakteristika modelske turbine na raspolaganju je deo podataka dobijen merenjem za jedan radni režim.

Da bi se izvršilo predviđanje područja upotrebe izvedene mikroturbine bilo je potrebno razviti odgovarajući softver, kojim bi se direktno dobilo područje upotrebe u obliku dijagrama u (Q, H) sistemu. Upotrebljivost razvijenog softvera treba verifikovati na proračunu područja upotrebe neke poznate cevne

neregulirane mikroturbine. Autor je imao na raspolaganju krive područja upotrebe [3] za gamu cevnih nereguliranih mikroturbina slovenačke firme Litostroj prečnika 0,9 m i 1,12 m. U radu su dati rezultati proračuna područja upotrebe slovenačkih mikroturbina, koji su dobijeni iz razvijenog softvera HYDRO. Proračunom dobijeni rezultati identični su sa podacima u [3] datim za Litostrojove mikroturbine.

Posle verifikacije softvera HYDRO izvršena je procena područja upotrebe skalirane (izvedene) cevine neregulirane mikroturbine. Rezultati procene dati su u radu.

Na kraju treba naglasiti da autor nije učestvovao u izboru turbine. Zadatak autora je da preliminarno proceni karakteristike izrađene i ugrađene turbine, koja još nije ispitana.

2. NUMERIČKI POSTUPAK

Za fizički raspoloživu ukrajinsku, modelsku turbinu na raspolaganju je samo deo podataka dobijen za jedan režim rada. Zato je usvojeno da su polazni podaci u numeričkom razvoju:

- $D_{1,M}$ nominalni prečnik radnog kola turbine u m,
- H_M poznati neto turbinski pad vode u m,
- n_M poznata brzina obrtanja u min^{-1} .

Iz neto turbinskog pada vode sledi jedinični neto rad $Y_M = g H_M$ dimenzija J/kg. Veličina $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ je ubrzanje Zemljine teže.

Generalno, ukupnu snagu P (snagu na spojnicu vratila turbine) i unutrašnju snagu P_i (snagu na izlazu vratila iz turbine) turbine definišu izrazi:

$$\begin{aligned} P &= \eta \rho g Q H = \eta \rho g Q Y; \\ P_i &= \eta_i \rho g Q H = \eta_i \rho g Q Y \end{aligned} \quad (1)$$

U gornjem izrazu η je ukupni, a η_i unutrašnji stepen korisnosti turbine. Veličina Q je protok vode u m^3/s , a $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ je gustina vode. Na osnovu [3], optimalni ukupni stepeni korisnosti mikrohidroturbina obično se nalaze u domenu $\eta = 0,76 \div 0,84$.

Ukupni stepen korisnosti η hidroturbina zavisi od hidrauličnih η_h , volumetrijskih η_Q , bezdimenzijskih gubitaka od trenja na spoljašnjim površinama kola η_R i mehaničkih gubitaka turbine η_m , tj. $\eta = \eta_Q \eta_R \eta_m$. Hidraulični gubici η_h se javljaju zbog sila trenja viskozne tečnosti o čvrste površi u obrtnom kolu turbine. Volumetrijski gubici η_Q nastaju zbog isticanja tečnosti kroz procepe, između obrtnog kola i kućišta turbine, kroz zaptivače itd. Kod cevni turbina ne postoji disk, pa je gubitak $\eta_R = 1$. Mehanički gubici obuhvataju gubitke snage u ležajevima vratila i zaptivačima, kao i mehaničke gubitke do

spojnice turbine sa generatorom (direktno ili preko multiplikatora). Unutrašnji stepen korisnosti cevine hidroturbine je:

$$\eta_i = \eta_h \eta_Q \eta_R = \eta_h \eta_Q$$

Na osnovu dimenzijske analize i teorije sličnosti [4], modelsku (indeks M) i odgovarajuću sličnu (izvedenu) turbinu korelišu relacije:

$$\left(\frac{n D_1}{\sqrt{H \eta_h}} \right)_M = \frac{n D_1}{\sqrt{H \eta_h}} = \text{const};$$

$$\left(\frac{Q \eta_Q}{D_1^2 \sqrt{H \eta_h}} \right)_M = \frac{Q \eta_Q}{D_1^2 \sqrt{H \eta_h}} = \text{const} \quad (2)$$

Ako se zanemare volumetrijski gubici ($\eta_Q = 1$), za poznate $D_{1,M}$, D_1 i $(H, n, Q, \eta_h)_M$, na bazi (2), slede za različite neto padove H izvedene turbine vrednosti (n, Q, η_h) . Na osnovu (1), za poznato (H, Q, η_h) direktno se izračunava unutrašnja $P_i = \eta_i \rho Q Y = \eta_h \rho Q Y$ i ukupna snaga $P = \eta_m P_i$ snaga izvedene turbine, odnosno područje upotrebe izvedene neregulirane mikrohidroturbine za $D_1 = \text{const}$.

Da bi se izbeglo zametno tabelarno preračunavanje karakteristika turbina sa $D_{1,M}$ na D_1 , razvijen je softverski paket HYDRO, kojim se varira H i rezultati daju odgovarajućim krivama u logaritamskom dijagramu u (Q, H) sistemu. Softver je testiran na gami Litostrojovih cevni nereguliranih mikrohidroturbina. Podaci [3] firme Litostroj odnose se na turbine prečnika $D_1 = 0,9 \text{ m}$ i $D_1 = 1,2 \text{ m}$, za režim maksimalnog protoka po neto turbinskom padu. Na osnovu raspoloživog dijagrama [3], odabran je sledeći set podataka turbine, koji se smatraju kao modelski podaci:

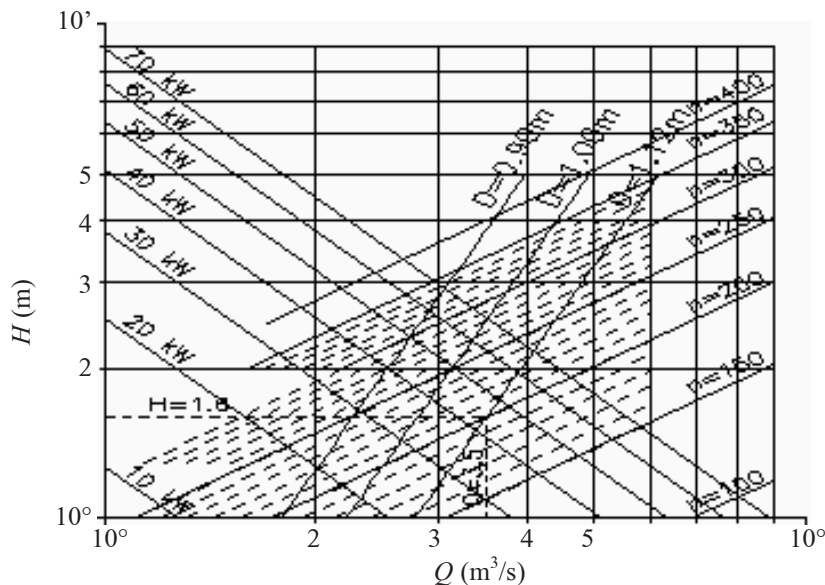
$$D_{1,M} = 1,12 \text{ m};$$

$$(H, n, Q, \eta_h)_M = (1,6 \text{ m}; 200 \text{ min}^{-1}; 3,5 \text{ m}^3/\text{s}; 0,889)$$

Krive ukupne snage u [3] date su za $\eta = \text{const}$. Vrednost η je određena iz uslova za odabranu tačku sa dijagrama područja upotrebe:

$$\eta = \frac{P}{\rho g H Q} = \frac{4400}{1000 \cdot 9,81 \cdot 1,6 \cdot 3,5} = 0,8$$

Ako se pretpostavi da je $\eta_m = 0,9$ i $\eta_Q = 1$, za menom u (1) sledi hidraulički stepen korisnosti $\eta_h = \eta / (\eta_m \eta_Q) = 0,8/0,9 = 0,889$, koji je uvršten u set ulaznih podataka modelske turbine.



Slika 1. Područje upotrebe Litostrojevih cevnih nereguliranih turbina

Na slici 1. dati su rezultati proračuna za razmatranu gamu Litostrojevih turbina. Dobijene zavisnosti u (Q, H) sistemu predstavljene su u logaritamskom koordinatnom sistemu. Na istom dijagramu date su proračunate karakteristike hidroturbine prečnika $D_1 = 1$ m, interpolirane između prečnika od 0,9 m i 1,12 m.

Rezultati predstavljeni na slici 1. u potpunosti se poklapaju sa dostupnim rezultatima iz [3]. Izvršenom analizom potvrđena je upotrebljivost razvijenog softvera HYDRO za skaliranje karakteristika cevni nereguliranih mikro hidroturbina sa $D_{1,M}$ na D_1 .

3. PROCENA KARAKTERISTIKA IZVEDENE CEVNE NEREGULISANE MIKRO HIDROTURBINE

Za modelsku turbinu ukrajinskog porekla, prečnika $D_{1,M} = 0,2$ m, na raspolaganju su samo sledeći izmereni podaci za jedan radni režim:

- $H_M = 5,2$ m $\Rightarrow Y_M = g H_M = 51,012$ J/kg,
- $Q_M = 0,160$ m³/s,
- $(P_M)_m = 5$ kW – izmerena snaga na izlasku iz modelskog generatora.

Investitor nema podatke kojim bi se identifikovao režim rada turbine za prethodno navedene podatke. Pretpostavljeno je da je pitanju režim maksimalnog protoka po datom neto turbinskom padu.

U [5] i [6] je dato da je snaga mikro hidroelektrane (spvodna instalacija vode do turbine + turbina + generator + elektro oprema do stezaljki za vezu sa mrežom) P_{HE} definisana relacijom:

$$P_{HE} = \rho g H Q \eta \eta_g \eta_{tr} \eta_{par}$$

U gornjoj relaciji H je neto turbinski pad vode, η je ukupni stepen korisnosti turbine, η_g je stepen korisnosti generatora, η_{tr} je stepen korisnosti transformatora i η_{par} su parazitni električni gubici. Stepenn korisnosti generatora η_g obuhvata sve mehaničke, ventilacione i električne gubitke generatora. Često se u literaturi η_{tr} i η_{par} uzimaju kao zbirni stepen korisnosti električnog sistema, tj. $\eta_{el} = \eta_{tr} \eta_{par}$. Veličina η_{el} definiše stepen korisnosti kao posledicu ostalih gubitaka u električnom sistemu od generatora do veze sa mrežom. U [7], tabela 3.2 za mikro turbine prosečne vrednosti ovih stepena korisnosti su $\eta_g \approx 0,70 \div 0,95$ i $\eta_{el} \approx 0,90 \div 0,95$.

Kako je u predmetnoj analizi izvršeno merenje na izlasku iz generatora, usvojeno je da je $\eta_{el} = 1$ i $\eta_g = 0,85$.

Na osnovu prethodnih razmatranja, unutrašnji stepen korisnosti η_i i ukupni stepen korisnosti η turbine povezuje relacija $\eta = \eta_m \eta_i$. Prema tome, iz izmerene snage $(P_M)_m$ na izlasku iz modelskog generatora može se, za usvojeno $\eta_m = 0,9$, izračunati unutrašnja i ukupna snaga modelske turbine:

$$- P_{M,i} = (P_M)_m / \eta_g / \eta_m = 5 / 0,85 / 0,9 = 6,536 \text{ kW},$$

$$- P_M = (P_M)_m / \eta_g = 5 / 0,85 = 5,882 \text{ kW},$$

Na modelsku turbinu je bio priključen asinhroni generator sa $p = 2$ para polova. Sinhrona brzina, tj. brzina praznog hoda asinhronog generatora je $n_0 = 60 f / p = 1\,500$ (min⁻¹), gde je $f = 50$ (Hz). Generalno, relativno klizanje brzine obrtanja asinhronne mašine s , koja se obrće brzinom n , je definisano izrazom:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \Rightarrow n = (1 - s) n_0$$

U generatorskom režimu relativno klizanje asinhronne mašine je negativno, tj. $s < 0$. Prema preporukama iz [8] za asinhroni generator veličina relativnog klizanja se nalazi u domenu $0 > s \geq -0,08$. U daljoj analizi je usvojeno da je $s = -0,05$, pa je brzina obrtanja generatora u razmatranom režimu rada $(n_M)_g = 1,05 n_0 = 1\,575$ min⁻¹. Kinematički prenosni odnos između vratila obrtnog kola modelske turbine i generatora je bio 1. Prema tome, podacima dobijenim merenjem jednog režima rada modelske turbine treba dodati i njenu brzinu obrtanja:

$$- n_M = (n_M)_g = 1\,575 \text{ min}^{-1}$$

Bezdimenzijske specifične frekvencije Ω_{SQ} i Ω_{SP} mogu se, na osnovu [9], odrediti iz poznatih podataka za modelsku turbinu:

$$\Omega_{SQ} = f_M \frac{Q_M^{1/2}}{Y_M^{3/4}} = \frac{1575}{60} \frac{0,16^{3/2}}{51,012^{3/4}} = 0,550$$

$$\Omega_{SP} = f_M \frac{(P_{M,i} / \rho)^{1/2}}{Y_M^{5/4}} = \frac{1575}{60} \frac{(6536/1000)^{1/2}}{51,012^{5/4}} = 0,492$$

U gornjem izrazu $f_M = n_M / 60$ je u s^{-1} , Q_M u m^3/s , Y_M u J/kg , $P_{M,i}$ u W i ρ u kg/m^3 . Takođe, na osnovu [9] može se izračunati unutrašnji $\eta_{1,M}$ stepen korisnosti modelske turbine, merodavan za analizu u ovoj tački rada:

$$\eta_{M,i} = \left(\frac{\Omega_{SP}}{\Omega_{SQ}} \right)^2 = \left(\frac{0,492}{0,550} \right)^2 = 0,8008$$

Kako je pretpostavljeno da je $\eta_Q = 1$, a za cevne turbine je $\eta_R = 1$, procenjuje se da je hidraulični stepen korisnosti modelske turbine:

$$\eta_{M,h} = \eta_{M,i} = 0,8008$$

Izvedena tubina ima prečnik $D_1 = 0,99$ m, pa je geometrijski faktor dimenzijskog skaliranja k_G određen izrazom:

$$k_G = \frac{D_1}{D_{1,M}} = \frac{0,99}{0,2} = 4,95$$

Tabela 1.

Izlazni rezultati iz programa HYDRO

*** ULAZNI PODACI ZA MODELSKI AGREGAT ***						
D_1_M	=	.200 [m]	- nominalni precnik modela			
H_M	=	5.200 [m]	- neto turbinski pad			
Q_M	=	.160 [m^3/s]	- protok			
<n_g>_M	=	1500.000 [1/min]	- brz. obrtanja modelskog generatora			
<P_M>_m	=	5.000 [kW]	- izmerena snaga hidroagragata			
P_M	=	5.882 [kW]	- ukupna snaga turbine			
<P_M>_i	=	6.536 [kW]	- unutrasnja snaga turbine			
s	=	-5.000 [%]	- rel. klizanje generatora			
n_M	=	1575.000 [1/min]	- brz. obrtanja modelske turbine			
N_Q	=	.550	- spec.ucest.obrtanja			
N_s	=	.492	- spec.ucest.obrtanja			
eta_el	=	1.000	- step.korisnosti ostatka el.sistema			
eta_g	=	.850	- step.korisnosti generatora			
eta_m	=	.900	- mehanicki step.kor. turbine			
eta_i	=	.8008	- unutr.step.kor. turbine			
eta_h	=	.8008	- hidr.step.kor. turbine (eta_Q=1)			
*** IZLAZNI PODACI ZA IZUEDENU TURBINU ***						
D_1	=	.990 [m]	- nominalni precnik			
Visina [m]	Protok [m^3/s]	Brzina [m/s]	Uk.snaga [kW]	Br.obr. [1/min]	Moment [kN*m]	eta_h
1.00	1.720	4.429	12.18	139.6	.925	.8017
1.25	1.924	4.952	17.02	156.1	1.157	.8019
1.50	2.107	5.425	22.39	171.0	1.389	.8021
1.75	2.276	5.860	28.22	184.8	1.621	.8023
2.00	2.434	6.264	34.49	197.5	1.852	.8025
2.25	2.582	6.644	41.16	209.5	2.084	.8026
2.50	2.722	7.004	48.22	220.9	2.316	.8028
2.75	2.855	7.345	55.65	231.7	2.548	.8029
3.00	2.982	7.672	63.42	242.0	2.781	.8030
3.25	3.104	7.985	71.53	251.9	3.013	.8031
3.50	3.221	8.287	79.96	261.4	3.245	.8033

Hidraulični stepen korisnosti izvedene turbine η_h , će zbog faktora geometrijskog skaliranja, biti veći od modelskog $\eta_{M,h}$. Relativna hrapavost gabaritno 4,95 veće izvedene turbine je manja od relativne hrapavosti modelske turbine. Ovaj zaključak, recimo u [4], naziva se „efektom razmere”. Postoje brojne metode za procenu efekta razmere. Pregled ovih metoda veoma jasno je sistematizovan u [4]. U [7] i [10] takođe je analiziran ovaj efekat za cevne turbine. U predmetnoj analizi efekat razmere proračunat je prema preporuci IEC 60193/1999 dat u [4]. Hidraulični stepen korisnosti modelske $\eta_{M,h}$ i izvedene η_h hidroturbine povezuje relacija (6.121) data u [4]:

$$\eta_h = \eta_{M,h} + 4 \cdot 10^{-10} (Re - Re_M) \quad (3)$$

Naglašava se da korekcija (3) daje dobre rezultate u oblasti najvišeg stepena korisnosti η_h .

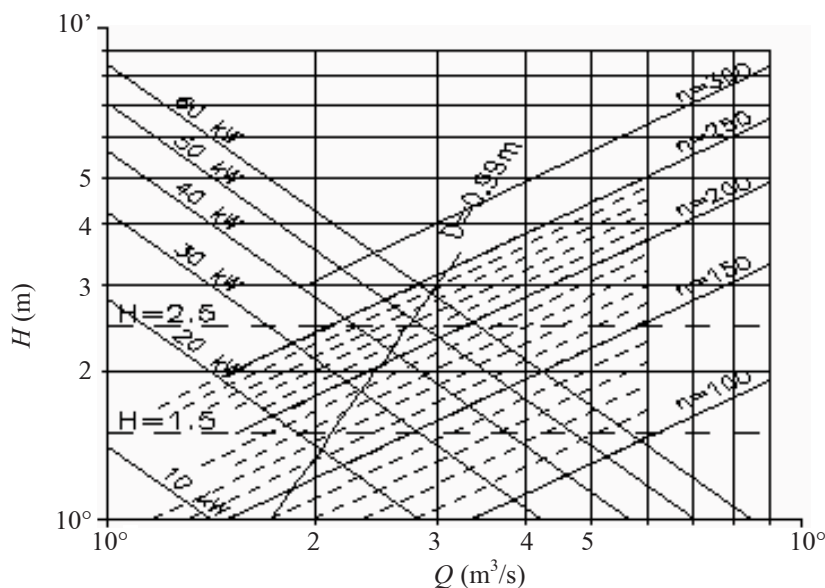
U izrazu (3) za kinematičku viskoznost vode je:

$$Re_M = D_{1,M} \frac{\sqrt{2gH_M}}{v} = 2,02 \cdot 10^6; \quad Re = D_1 \frac{\sqrt{2gH}}{v}$$

Prema [4] i [11], da bi mogla da se primeni relacija (3), mora biti za aksijalne turbine $Re_M > Re_k = 2 \cdot 10^6$. Na osnovu prethodno iznetog, hidraulični stepen korisnosti η_h izvedene turbine određuje relacija:

$$\eta_h = 0,8008 + 4 \cdot 10^{-10} \left(D_1 \frac{\sqrt{2gH}}{v} - 2,02 \cdot 10^6 \right) \quad (4)$$

Na osnovu relacija (2), (1) i (4) za izvedenu turbinu dati su u tabeli 1. rezultati iz programa HYDRO.



Slika 2. Procenjeno područje upotrebe izvedne cevne neregulisane mikro hidroturbine

U gornjem delu tabele 1. definisani su ulazni podaci za modelski agregat. U donjem delu tabele 1. izračunate su za izvedenu turbinu promene protoka, brzine, ukupne snage, brzine obrtanja, obrtnog momenta na vratilu turbine i hidrauličnog stepena korisnosti turbine u funkciji neto turbinskog pada (visine) vode.

U programu HYDRO brzina v je određena relacijom $v = \sqrt{2gH}$, a obrtni moment na vratilu turbine definiše izraz:

$$M = \frac{30 P_i}{\pi n}$$

Na slici 2. dato je, programom HYDRO određeno, područje upotrebe izvedene cevne neregulisane mikro hidroturbine prečnika $D_1 = 0,99$ m.

Na probnom puštanju izvedene turbine izmerena je, za neto pad $H \approx 1,5$ m, snaga na izlasku iz generatora $P_m \approx 18$ kW. Može se pretpostaviti da izmerene vrednosti ne odgovaraju režimu maksimalnog protoka po neto visini. Na osnovu postupka datog u radu ukupna izmerena snaga turbine je $P = P_m / \eta_g = 18/0,85 = 21,18$ kW. U tabeli 1. za neto turbinski pad od $H = 1,5$ m izračunata je ukupna snaga izvedene turbine od $P = 22,39$ kW. Očigledno je obećavajuće slaganje procenjene i izmerene ukupne snage izvedene turbine, iako verovatno režimi rada turbine nisu isti.

4. ZAKLJUČAK

U radu je opisan model na osnovu koga je razvijen i testiran softver HYDRO. Ovaj program upotrebljen je za procenu područja upotrebe izvedene cevne neregulisane mikro hidroturbine prečnika $D_1 = 0,99$ m. Procena je realizovana na osnovu poznatih izmerenih podataka za jedan raspoloživ režim rada 4,95 puta manje modelske, ukrajinske turbine.

Valjanost korišćenog programa HYDRO verifikovana je proračunskom reprodukcijom raspoloživog područja upotrebe za gamu Litostrojevih cevni neregulisanih mikro hidroturbina iz [3].

Kada bude ispitana izvedena cevna neregulisana mikro hidroturbina, merenjem će se utvrditi valjanost izvršene procene.

5. LITERATURA

- [1] Maričić N.: IDENTIFIKACIJA GEOMETRIJE I MASE OBRTNOG KOLA HIDROTURBINE, Zbornik radova sa 12. Simpozijuma termičara SCG, Sokobanja, 2005.
- [2] Maričić N.: IDENTIFIKACIJA GEOMETRIJE I MASENIH KARAKTERISTIKA OBRTNOG KOLA MALE HIDROTURBINE, Tehnika inženjera 2006. god., Savez inženjera i tehničara, Beograd, 2006.
- [3] ZGRADIMO MAJHNO HIDROELEKTRANO, 3. del - Turbine in pomožna oprema, Zveza organizacija za tehničko kulturo Slovenije, Ljubljana, 1983.
- [4] Benišek M.: HIDRAULIČNE MAŠINE, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1998..
- [5] RETScrean International: CLEAN ENERGY PROJECT ANALYSIS - CHAPTER SMALL HYDRO PROJECT ANALYSIS, RETSCREAN ENGINEERING & CASES TEXTBOOK, CANMET Energy technology, 2004.
- [6] Dragu C., Sels T., Belmans R.: Small hydro power - state of art and application, ESAT-ELEN, Energy Institute, Leuven, Belgium, 2004.
- [7] Ristić B., Milenković D.: MALE HIDROELEKTRANE, Naučna knjiga, Beograd, 1996.
- [8] Hatziargyriou N., Donnelly M., Papathanassiou S., Pecos Lopes J., Takasaki M., Chao H., Usaola J., Lasseter R., Efthymaidis A., Karoui K., Arabi S.: MODELING NEW FORMS OF GENERATION AND STORAGE, CIGRE Technical brochure TF 38.01.01, 2000.
- [9] Dixon S.: FLUID MECHANICS, THERMODYNAMICS OF TURBOMACHINERY, Fourth Edition, Butterworth-Heinemann, 1998.
- [10] G. Ciocan, Mombelli H., Avellan F.: TEST ON REDUCED SCALE MODELS FOR REFURBISHMENT PROJECTS OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2002.
- [11] Kjolle A.: HYDROPOWER IN NORWAY - MECHANICAL EQUIPMENT, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2001.

Rad je primljen u uredništvo 7. 02. 2006. godine



stručna rada.

Nikola Maričić (1948. godine) je diplomirao 1974. godine, magistrirao 1980. godine i doktorirao 1989. godine na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu na smeru za aerokosmotehniku. Bio je zaposlen u Vazduhoplovno tehničkom institutu u Žarkovu (1974- 1996. godine) kao istraživač, načelnik odseka, odeljenja i sektora. Godine 1996. izabran je za docenta, a 2001. godine za vanrednog profesora Mašinskog fakulteta Univerziteta u Prištini (sada Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici) na predmetima Mehanika fluida i Hidraulične i pneumatske mašine. Objavio je 1 monografiju, 1 udžbenik, 41 naučnih i 64

*Dorđe Bjegović,
Branko Milosavljević, Čedomir Spaić i Nikola Vučinić*

Korišćenje voda Velike Morave, dalje aktiviranje hidroenergetskog potencijala

Stručni rad
UDK: 621.311.21

Rezime:

Srbija ima dobre prirodne potencijale za korišćenje obnovljivih izvora energije. Korišćenje ovih potencijala doprinelo bi smanjenju uvozne zavisnosti, povećanju energetske efikasnosti, otvarala bi se nova radna mesta i obezbedilo bi lokalni razvoj regiona. Zato povećanje učešća obnovljivih izvora (male hidroelektrane, vetrenjače, elektrane na bio-masu i bio-gas kao i solarne elektrane) u proizvodnji energije treba da je jedan od prioritarnih zadataka energetske i ekonomske politike Srbije. Ovde treba istaći da su hidroelektrane svih tipova, kao objekti koji koriste hidroenergetski potencijal za proizvodnju električne energije, u svim zemljama u kojima postoje uslovi za njihovu gradnju davno izgrađene ili se intenzivno grade (Švajcarska, Austija...).

U ovom radu se obrađuje korišćenje voda Morave. Rad ukazuje da projekat Velike Morave treba pokrenuti, radi dobrobiti domaće industrije i lokalnog stanovništva.

Ključne reči: *Velika Morava, obnovljivi izvori energije, hidroenergetski potencijal, energetska efikasnost.*

Abstract:

**SEXPLORATION OF THE WATERS OF THE VELIKA MORAVA,
FURTHER ACTIVATION OF HYDROENERGETIC POTENTIAL**

Serbia has good national potentials for exploitation of renewable energy resources. Utilization of potentials would contribute to both reducing dependence on importation and increasing the energy efficiency. Also, new job possibilities would be open and local development of the region would be ensured. Therefore, increased participation of renewable resources (small hydroelectric power windmill, biomass -, biogas -, and solar energy power stations) in production of energy, should be priority tasks of energetic and economic policy of Serbia.

One should point out here that hydroelectric power stations of all types in all countries, where it was possible, have been built a long time ago or are being built now (Switzerland, Austria). In this paper, exploitation of the waters of the Morava is studied. It is shown that the project of the Velika Morava should be started for the benefit of both local industry and the population.

Key words: *the river Velika Morava, renewable energy resources, hydroenergetic potential, energy efficiency*

*Inicijativna grupa za pokretanje projekta „Velika Morava“:
Dorđe Bjegović, dipl. ing. el. – 11 000 Beograd, Velizara Kosanovića 51
Branko Milosavljević, dipl. ing. el. – 11 000 Beograd
Čedomir Spaić, dipl. ing. el. – 11 000 Beograd
Nikola Vučinić, dipl. ing. el. – 11 000 Beograd*

1. UVOD

U razvoju jedne zemlje voda kao prirodno bogatstvo i obnovljivi resursi, predstavljaju dobro od opšteg interesa i bitan su činilac ukupnih aktivnosti društva na obezbeđenju razvoja. Tu hidroelektrane predstavljaju važnu komponentu unutar sistema iskorišćenja, gazdovanja i optimalne eksploatacije vodnih resursa, a prihvatljive su za okolinu uz adekvatan izbor lokacije i tehničkog rešenja objekta.

Radi sagledavanja hidroenergetskih potencijala u radu su analizirani slivovi rečnih tokova Južne, Zapadne i Velike Morave i dat je kratak opis rečnih tokova sa posebnim osvrtom na njihov hidroenergetski potencijal. Iz karakteristika pojedinih rečnih tokova i slivova u Srbiji, sagledavaju se veoma male mogućnosti stvaranja velikih sezonskih akumulacija. To proizilazi iz topografije slivova, iz hidroloških pokazatelja i ograničenja u okruženju.

Preostali hidroenergetski potencijal u slivu Morave u hidroelektranama većim od 10 MW instalisane snage iznosi 2 520 GWh/godini. Njeno korišćenje je samo pitanje vremena, tj. obezbeđenje investicija. Ovdje su ta pitanja ukratko obuhvaćena po sledećem redosledu:

- prikaz hidroenergetskog potencijala u Srbiji;
- problematika izgradnje malih hidroelektrana;
- opšte karakteristike rečnih tokova; Južne, Zapadne i Velike Morave sa pritokama;
- energetska vrednost akumulacija i
- mogućnost i realnost kopišćenja preostalog hidroenergetskog potencijala u slivu Velike Morave.

Hidropotencijal reka Južne i Zapadne Morave je delimično iskorišćen izgradnjom hidroelektrana na Visočici, Vlasini, Ibru i Zapadnoj Moravi.

2. PRIKAZ HIDROENERGETSKOG POTENCIJALA U SRBIJI

Voda kao prirodno bogatstvo predstavlja dobro od opšteg interesa i značajan je prirodni potencijal

razvoja Srbije. Hidropotencijal kao obnovljivi ekološki izvor energije je prihvatljiv i relativno jeftin. Stoga je ovaj vid energije značajan za elektroenergetski sistem Srbije. Intenzivnije korišćenje hidropotencijala izgradnjom hidroelektrana većih instalisanih snaga odvijalo se posle Drugog svetskog rata. Pored ovoga, za podmirivanje sve većih zahteva za električnom energijom grade se termoelektrane koje takođe koriste vodu (hlađenje kondenzatora, proizvodnja vodene pare,...).

Najrentabilniji deo hidropotencijala u Srbiji je već iskorišćen izgradnjom hidroelektrana velikih instalisanih snaga. U tabeli 1 dat je, i po kriterijumima razvrstan, hidroenergetski potencijal Srbije ukupno i po vodotocima.

Ukupan bruto potencijal koji protiče vodotocima Srbije iznosi oko 35 300 GWh/godini. Od toga potencijala 8 000 GWh/godini pripada Rumuniji, a ostatak od oko 27 300 GWh/godini, pripada Srbiji.

Zajednički potencijal sa drugim susednim regionima (bivše SFRJ) iznosi oko 6 400 GWh/godini, od čega sa BiH (Drina i Lim) 5 300 GWh/godini, i 1 100 GWh/godini sa Hrvatskom (Dunav).

Od raspoloživog hidroenergetskog potencijala u Srbiji, koji iznosi oko 17 600 GWh/godini, može se, prema dosadašnjim procenama, iskoristiti još oko 7 500 GWh/godini kroz objekte instalisane snage veće od 10 MW, a oko 1 740 GWh/godini u objektima čija je instalisana snaga manja od 10 MW. Objekti koji su interesantni i za lokalne distribucije, čija je instalisana snaga manja od 10 MW, a veća od 2 MW, učestvuju sa oko 450 GWh/godini, koji se mogu relativno jeftino i brzo realizovati kroz lokalne energetske planove.

Ovi objekti imaju ukupno raspoloživi akumulacioni prostor veći od 400 hm³, pa je neophodno kroz više konfiguracija vodoprivrednih sistema u vodoprivrednoj osnovi Srbije definisati režim voda, a njihovo vrednovanje i rangiranje, po više kriterijuma, izračunati radi redosleda i dinamike izgradnje.

Bez predhodno navedenih aktivnosti ne može se ozbiljno prići rezervaciji prostora, i definisati do-

Tabela 1.

Hidroenergetski potencijal Srbije

Red. br.	Reka	Hidroenergetski potencijal (GWg/god)					Tehnički iskoristiv potencijal (GWh/god)				Realizovano do 1991. god	Nerealizovano			
		Bruto sa Rumunijom	Bruto	Neto	Realizovano P>10MW	Nerealizovano P>10MW	P>10MW	Zajedno	2<P<10MW	P<2MW		P>10MW	2<P<10MW	P<2MW	Ukupno
1.	Dunav	19 485,00	11 485,00	7 675,00	6 631,00	1 044,00	1 044,00	1 044,00	69,00	210,00	6 631,00	1 044,00	69,00	210,00	1 323,00
2.	Drina	7 957,00	7 957,00	6 213,00	2 868,00	3 345,00	3 345,00	5 339,00	24,00	227,00	2 868,00	3 345,00	24,00	227,00	3 796,00
3.	Morava	6 352,00	6 352,00	3 117,00	597,00	2 520,00	3 117,00		355,00	779,00	597,00	2 520,00	355,00	779,00	3 654,00
3.1.	Velika Morava		1 240,00			833,00			12,00	37,00		833,00	12,00	37,00	882,00
3.2.	Zapadna Morava		2 668,00		187,00	1 426,00			137,00	320,00	187,00	1 426,00	187,00	320,00	1 933,00
3.3.	Južna Morava		2 444,00		410,00	261,00			156,00	422,00	410,00	261,00	156,00	422,00	839,00
4.	Ostalo	1 528,00	1 528,00	592,00	37,00	555,00	555,00			75,00	37,00	555,00		75,00	630,00
	UKUPNO Srbija (Σ1-4):	35 322,00	27 322,00	17 597,00	10 133,00	7 464,00	8 061,00	6 383,00	448,00	1 291,00	10 133,00	7 464,00	448,00	1 291,00	9 403,00

brobit stanovništva kroz ekonomski i socijalni kriterijum. Tu je važno razgraničiti nadležnosti lokalne samouprave i drugih nadležnih organa pri rešavanju ove problematike. U tom smislu već postoji zakonska regulativa po kojoj neke dozvole za izgradnju izdaje opština, a neke dozvole i sagasnosti izdaju se na nivou državne uprave.

Sva nova hidroenergetska rešenja treba tražiti u okvirima kompleksnih višenamenskih sistema, a prema Prostornom planu i vodoprivrednim osnovama Srbije.

3. PROBLEMATIKA IZGRADNJE MALIH HIDROELEKTRANA

Deo hidropotencijala može se iskoristiti izgradnjom malih hidroelektrana, kao disperzivnih izvora električne energije, koje su po pravilu od interesa za lokalnu samoupravu. Male hidroelektrane mogu se graditi na mestima (profilima) gde svojom pozicijom ne ugrožavaju uslove za realizaciju većih i važnijih vodoprivrednih i elektroenergetskih objekata i na način da ne ugrožavaju vodne i priobalne ekosisteme.

Neophodno je zakonskom regulativom smanjiti teškoće oko pribavljanja potrebne dokumentacije za gradnju malih hidroelektrana i garantovati plasman proizvedene energije u distributivnu mrežu bez diskriminacije i time omogućiti privatnom sektoru da se sa sigurnošću odluči na ulaganje sopstvenog kapitala u njihovu izgradnju.

Korisno je još jednom istaći da je osnovni cilj daljeg razvoja hidroenergetike što potpunije iskorišćenje hidropotencijala, po mogućstvu u okviru kompleksnih višenamenskih sistema. U tom svetlu ističemo slivno područje Velike Morave (sa Zapadnom i Južnom), sa mogućnošću realizovanja plovno-energetskog sistema kojim bi se, shodno Prostornom planu Srbije, uspostavio plovni put duž Velike

Morave i dela Južne Morave do Niša i duž Zapadne Morave do Kraljeva.

Ovaj projekat ima višenamensku svrhu i bio bi od velikog značaja za razvoj ukupne privrede u Srbiji. Pokretanje ovoga projekta treba otpočeti sa sopstvenim znanjem i sredstvima. Realizacija ovog projekta sa kreditima iz svetskih banaka, bio bi veliki teret za buduća pokolenja. Stoga, dobrom organizacijom projekta, po principu BOOT (Built Own Operate Transfer), i brižnim finansijskim menadžmentom mogla bi se stvoriti pristojna akumulacija sredstava iz nacionalnog doprinosa, te obezbediti sukcesivno investiranje i dugoročno razvijati projekat.

Reka Morava je prirodno bogatstvo, zato ovaj projekat treba pokrenuti; on je potreban domaćoj industriji, koju takođe treba pokrenuti, kao i stanovništvu Pomoravlja i šire.

Hidropotencijal reka Velike, Zapadne i Južne Morave je delimično iskorišćen izgradnjom hidroelektrana na Visočici, Vlasini, Ibru i Zapadnoj Moravi. U tabeli 2 dat je, i po kriterijumima razvrstan, hidroenergetski potencijal na Moravi po glavnim vodotocima.

Radi sagledavanja hidroenergetskog potencijala u Srbiji, raspoloživog i tehnički iskoristivog, analizirani su slivovi rečnih tokova Južne, Zapadne i Velike Morave, čiji su osnovni podaci dati u tabeli 1 i 2. U nastavku je dat kratak opis rečnih tokova sa pregledom budućih planiranih hidropostrojenja na njima.

4. OPŠTE KARAKTERISTIKE REČNIH TOKOVA VELIKE, ZAPADNE I JUŽNE MORAVE SA GLAVNIM PRITOKAMA

Velika Morava

Velika Morava sa protokom na ušću od 240 m³/s i visinskom razlikom od 63 m ostvaruje bruto potencijal od 1 140 GWh, odnosno na dužini od 220 km to daje podužni potencijal od 5,2 GWh/km. Ovaj po-

Tabela 2.

Hidroenergetski potencijal na Moravi

	Reka	Hidroenergetski potencijal (GWg/god)				Tehnički iskoristiv potencijal (GWh/god)				Realizovano do 1991. god	Nerealizovano			
		Bruto	Neto	Realizovano	Nerealizovano P>10MW	P>10MW	Zajedno	2<P<10MW	P<2MW		P>10MW	2<P<10MW	P<2MW	UKUPNO
3.1.	Velika Morava	1 240,00	882,00		833,00	833,00		12,00	37,00		833,00	12,00	37,00	882,00
3.2.	Zapadna Morava	2 668,00	2 120,00	187,00	1 426,00	1 613,00		187,00	320,00	187,00	1 426,00	187,00	320,00	1 933,00
	Ibar			73,00							684,00	187,00	168,00	
	Ostalo			114,00							163,00		106,00	
3.3.	Južna Morava	2 444,00	1 251,00	410,00	261,00	671,00		156,00	422,00	410,00	261,00	156,00	422,00	839,00
	Nišava			112,00										
	Vlasina			288,00										
	Ostalo													
	UKUPNO Sliv Morave:	6 352,00	4 253,00	597,00	2 520,00	3 117,00		355,00	779,00	597,00	2 520,00	355,00	779,00	3 654,00

tencijal je uglavnom posledica velikog protoka, jer su podužni padovi mali. Tehničko rešenje korišćenja potencijala vodotoka predviđa višenamensko korišćenje vodotoka: plovidba, uređenje vodotoka, navodnjavanje/poljoprivreda, energetika...

Prostorni planom Srbije i vodoprivrednom osnovom Srbije predviđeno je integralno uređenje doline Velike Morave. Kičmu tog sistema čini kaskada od sedam energetske-plovidbenih stepenica (Ljubičevo, Vlaški do, Velika Plana, Svilajnac, Bagrdan, Čuprija, Paraćin) sa kapsulnim agregatima, tipizacijom građevinskih objekata, hidromehaničke i elektromehaničke opreme i realizacijom obejakata u seriji (građevinska oprema i operativa se prebacuju sa objekta na objekat, na optimalan način sa gledišta organizacije građenja) može se racionalno realizovati taj sistem. Zaštitu priobalja treba čvrsto povezati sa hidrotehničkim melioracijama doline Velike Morave.

I Resava

Pritoka Velike Morave sa potencijalom od 7 MHE do 2 MW i jednom elektranom sa potencijalom do 5 MW instalisane snage. Ova reka ima izvanredan topografski položaj za snabdevanje zdravom vodom Pomoravskih gradova.

Crnica

Crnica je pritoka Velike Morave sa ušćem kod Paraćina. Ova reka raspolaže sa hidroenergetskim potencijalom za izgradnju 2 MHE do 2 MW i jednom elektranom do 5 MW.

Zapadna Morava

Bruto potencijal Zapadne Morave iznosi 770 GWh/godini i ostvaruje se na dužini toka od 211 km sa visinskom razlikom od 168 m i protokom na ušću od 120 m³/s. Prosečni podužni potencijal iznosi 3,5 GWh/km i posledica je značajnog protoka, a manje podužnih padova. Tehnički iskoristiv potencijal lociran je u Ovčarsko-Kablarskoj klisuri (73 GWh/godini) i na donjem toku (375 GWh/godini) i ukupno iznosi 448 GWh/godini. Njegovo realizovanje je počelo izgradnjom objekata „Ovčar Banja” i „Međuvršje”, a predviđa se izgradnja još šest stepenica, u donjem toku, sa ukupnom mogućnošću godišnje proizvodnje od 375 GWh. Sve ove stepenice su sa malim padom i prekično bez akumulacionog prostora, zbog plodne i naseljene doline sa nisko postavljenim komunikacijama, čije bi plavljenje znatno poskupelo ovo rešenje.

Prostornim planom predviđeno je kontinualno kaskadiranje Zapadne Morave sa šest stepenica (Ljutanovac, Stubal, Trstenik, Medleđa i Kuklja I i II) sa hidroelektranama na celim agregatima. Predviđa se mogućnost dogradnje brodskih prevojnica na

za to unapred ostavljenim mestima, što bi omogućilo plovidbu do Kraljeva i izlazak industrije gradova u toj dolini (Kruševac, Trstenik, Kraljevo) na evropsku mrežu plovni puteva. Zaštita priobalja se povezuje sa kompleksnim melioracijama te doline i sa zaštitom voda.

II Rasina

Bruto potencijal Rasine iznosi 135 GWh/godini i ostvaruje se na dužini toka od 93 km sa visinskom razlikom od 540 m i protokom na ušću od 8,40 m³/s. Prosečni podužni potencijal iznosi 1,45 GWh/km. Akumulacija „Čelije” je izgrađena za potrebe vodoprivrede, a projektovana je i dogradnja hidroelektrane ($Q_s/Q_i = 6/30$ m³/s; H=39,7 m; i $P_{inst} = 4$ MW sa proizvodnjom, $W_{pr}=14$ GWh/godini).

Ibar

Na svom toku kroz Srbiju, Ibar na dužini od 244 km, visinskom razlikom od 1 000 m i protokom na ušću od 59 m³/s raspolaže bruto potencijalom od 1 420 GWh/godini. Korišćenje ovoga potencijala je počelo sa izgradnjom HE „Gazivode” ($P_i = 35$ MW, $W_{pr}=114$ GWh/godini) čija je osnovna namena vodosnabdevanje severnog dela Kosova. Zato se nizvodno od „Gazivoda” može računati samo na garantovani protok. Kompletan tehnički iskoristiv potencijal Ibra iznosi 631 GWh/godini, od čega bi se preostali potencijal podelio na devet malih stepenica, sa ukupnom godišnjom proizvodnjom od 448 GWh/godini.

Dolina Ibra u regionu predviđenih elektrana nije naseljena pa nema povećanja troškova na osnovu otkupa i odšteta. Prosečni podužni potencijal iznosi 7,54 GWh/km. U slivu Sitnice, kao pritoke Ibra, može se računati na tehnički potencijal od 142 GWh/godini, u većem broju manjih hidroelektrana ($P < 10$ MW).

Prostornim planom Srbije predviđeno je korišćenje voda Ibra. Ključni objekat je akumulaciona HE Potpeć. Neposredno uzvodno od uspora akumulacije Gazivode (HE Ribarići: oko 40 MW, oko 70 GWh/godini). Nizvodno od akumulacije Gazivode predviđa se izgradnja deset niskih energetske stepenice opremljenih cevnim agregatima. Te niske stepenice se mogu uskladiti sa saobraćajnicama u dolini Ibra. Objekti elektrana i oprema (hidromehanička i elektromašinska) treba da budu tipizirani, kako bi se snizili troškovi izgradnje.

III Studenica

Na svom toku od 50 km sa visinskom razlikom od 730 m i protokom na ušću od 5,2 m³/s raspolaže bruto potencijalom od 152 GWh/godini. Prosečni podužni potencijal iznosi 3,10 GWh/km. Zbog dobrog kvaliteta vode za vodosnabdevanje i pogodnih

uslova za stvaranje akumulacija rešenje se nudi kao višenamensko, kroz dve stepenice i to: HE „Dubočica” ($P_{inst} = 41,5$ MW; $W_{pr} = 64$ GWh/godini) i HE „Maglič” ($P_{inst} = 48,7$ MW; $W_{pr} = 75$ GWh/godini) ukupno 139 GWh/godini.

Jošanica

Bruto potencijal Jošanice iznosi 46 GWh/godini, a ostvaruje se na dužini toka od 21 km sa visinskom razlikom od 540m, i protokom na ušću od 1,9 m³/s. Tehnički iskoristiv potencijal od 46 GWh/godini realizovao bi se u HE „Jošanica” sa ($P_{ins} = 17,7$ MW; $W_{pr} = 28$ GWh/godini).

Moravica (Ivanjička)

Na toku od 78 km sa visinskom razlikom od 500 m i protokom na ušću od 18 m³/s ostvaruje ukupan bruto potencijal od 200 GWh/godini. Tehnički iskoristiv potencijal, u objektima snage veće od 10 MW, omogućuje izgradnju

„Ivanjica-Rokci” ($P_{ins} = 21,6$ MW; $W_{pr} = 20$ GWh/godini), i više od 50 GWh/godini, u više elektrana instalisane snage manje od 10 MW. I ovde akumulacije mogu biti višenamenske, jer je kvalitet vode dobar. Za sada su projektovani objekti HE „Ivanjica”, brana „Kumanica” i brana „Rokci”, samo energetski, ali se uz dopune, koje ne ugrožavaju osnovno rešenje elektrana mogu uvažiti i ostali zahtevi.

Veliki Rzav

Vode Velikog Rzava su takođe dobre za vodosnabdevanje, pa je i na njemu moguće primeniti višenamensko rešenje sa prioriteto za vodosnabdevanje. Na toku od 57 km i ukupnim padom od 580 m, protokom na ušću od 7,4 m³/s ostvaruje se ukupan bruto potencijal od 200 GWh/godini. Tehnički iskoristiv potencijal, na objektima instalisane snage veće od 10 MW, iznosi 94 GWh/godini, i obuhvata tok u dužini od 35km, tj. od kote 346 mnm do 582 mnm. Vodotok je pogodan za gradnju velikih akumulacija (183 hm³), i predviđena je izgradnja tri akumulacije: „Orlovača” (57 hm³), „Roge” (112 hm³) i „Arlje” (14 hm³), sa ukupno instalisanom snagom od 75,1 MW i mogućom godišnjom proizvodnjom od 85,3 GWh/godini.

Detinja

Detinja je takođe interesantan vodotok. Na toku od 71 km, sa padom od 500 m i protokom na ušću od 11,0 m³/s ostvaruje ukupan bruto potencijal od 50 GWh/godini. Predviđena je izgradnja HE „Vrutci” ($P_{ins} = 31$ MW; $W_{pr} = 37$ GWh/godini). Na ovom vodotoku izgrađena je akumulacija za potrebe vodoprivrede a projektovana je i dogradnja hidroelektrane.

Južna Morava

Na dužini od 316 km, sa padom reke od 354 m i protokom na ušću od 102 m³/s Južna Morava daje bruto potencijal od 833 GWh/godini. Prosečni podužni potencijal iznosi 2,6 GWh/km. To je vrednost pogodna za energetske korišćenje, ali zbog nisko postavljenih saobraćajnica uslovljava objekte sa malim padovima. Inače ovaj potencijal nije dovoljno obrađen, nije tehnički dokumentovan, već je samo sagledan za objekte instalisanih snaga manjih od 10 MW.

Nišava

Nišava raspolaže sa bruto potencijalom od 450 GWh/godini koji se ostvaruje sa protokom na ušću od 29,0 m³/s i visinskom razlikom od 300 m na dužini od 151 km. Prosečni podužni potencijal iznosi 2,96 GWh/km. Nisko položene komunikacije (železnička pruga i put) onemogućavaju značajniju koncentraciju padova, pa se rešenja moraju tražiti u manjim stepenicama, objektima instalisane snage manje od 10 MW. Na Nišavi su obrađeni objekti: HE „Crnoklište” ($P_{ins} = 15$ MW; $W_{pr} = 52,0$ GWh/godini) i HE „B. Palanka” ($P_{ins} = 10,0$ MW; $W_{pr} = 32,0$ GWh/godini).

Visočica

Sa protokom od 8,1 m³/s i visinskom razlikom od 510 m raspolaže sa potencijalom od 200 GWh/godini, što na dužini 72 km daje podužni potencijal od 2,78 GWh/km. Korišćenje ovog potencijala je počelo izgradnjom HE „Pirov (Zavoj)” koja omogućava proizvodnju električne energije od 122 GWh/godini. Uvođenjem dela voda Toplodolske reke dobiće se još 38 GWh/godini. Projektovana je, u uzvodnom delu, HE „Pakleštica” ($P_{ins} = 26,0$ MW; $W_{pr} = 57,4$ GWh/godini), i više malih hidroelektrana (P_{ins} do 1MW)

Jerma

Jerma izvire u Srbiji, pa jednim delom teče kroz Bugarsku i ponovo ulazi u Srbiju. Protok na ušću joj je 6,5 m³/s što sa visinskom razlikom od 211m i dužinom od 31 km daje bruto potencijal od 85 GWh/godini, ili podužni potencijal od 2,75 GWh/km. Tehnički iskoristiv potencijal, za objekte instalisane snage veće od 10 MW, može se iskoristiti u objektima: HE „Odorovci” ($P_{ins} = 15,7$ MW; $W_{pr} = 31,0$ GWh/godini), i još 13,0 GWh/godini na nizvodnoj stepenici.

Vodotok Nišave sa pritokama Visočica (Temštica) i Jermom je solidno studiran i predlaže se korišćenje u objektima instalisane snage manje od 10 MW, sa ukupnim tehnički iskoristivim potencijalom većim od 200 GWh/godini.

Hydroenergetski potencijal Zavojskog jezera na Visočici veoma se racionalno može povećati prevođenjem dela vode Toplodolske reke u Zavojsko jezero. Započeti su i radovi na realizaciji (tunel je većim delom probijen), ali su zaustavljeni zbog nesporazuma na navodnom ekološkom planu. Taj projekat samo poboljšava ekološko stanje (smanjuje talase velikih voda, jer se velike vode prevode u Zavojsko jezero), a povećava male vode, te je neophodno što pre nastaviti već započete radove, koji su od eksperata Svetske banke ocenjeni, kao veoma dobar energetsko-ekonomski i ekološki razvojni projekat.

IV Aleksinačka Moravica

Aleksinačka Moravica raspolaže sa bruto potencijalom od 48 GWh/godini koji ostvaruje sa visinskom razlikom od 286 m i protokom od 3,9 m³/s što na dužini od 57 km daje podužni potencijal od 0,85 GWh/km. Na ovom vodotoku izgrađena je akumulacija „Bovan” za potrebe vodoprivrede ($V_{kor} = 32 \text{ hm}^3$). Projektovana je i mala hidroelektrana sa prosečnom godišnjom proizvodnjom od 7 GWh.

Vlasina

Raspolaže bruto potencijalom od 263 GWh/godini koji se ostvaruje sa protokom na ušću od 10 m³/s i visinskom razlikom od 954 m. Na dužini od 59km daje podužni potencijal od 4,46 GWh/km. Tehnički iskoristiv potencijal iznosi 305 GWh/godini, od čega je iskorišćeno na četiri kaskade HE „Vrla 1 - IV” ($P_{ins} = 125,10 \text{ MW}$; $W_{pr} = 288 \text{ GWh/godini}$). Pri tome se 109 GWh/godini dobije od sopstvenog toka, a 179 GWh/godini od dodatnih pumpanih voda preko PAP „Lisina”. Preostali deo potencijala može se koristiti u HE „Svođe” ($P_{ins} = 48,0 \text{ MW}$; $W_{pr} = 65,0 \text{ GWh/godini}$) i u mnogo objekata (MHE) instaliranih snaga manjih od 10 MW.

Predvidivi tehnički iskoristiv potencijal, na vodotocima Vrla i Vlasini sa pritokama, iznosi 165 GWh/godini.

Protok (Južne Morave): Toplica (250 GWh/godini), Lista reka (24GWh/godini), Jablanica (50 GWh/godini) i Veternica (50 GWh/godini) nemaju objekte instalisane snage veće od 10 MW, ali se u malim elektranama može instalirati znatna snaga sa prosečnim godišnjim tehnički iskoristivim potencijalom većim od 80 GWh/god. Treba istaći, da je u fazi realizovanja HE Selova na reci Toplici uz istoimenu branu, a i HE Barje uz branu na reci Veternici.

V. Pčinja

Pčinja se gornjim (severnim) tokom nalazi u Srbiji. Ima vode pogodne za vodosnabdevanje. Višenamensko i jeftinije rešenje, uslovljeno je gornjom

kotom akumulacije (510 mmm). Potencijal ovog dela vodotoka iznosi 29,0 GWh/godini i koristio bi se u HE „Pčinja” ($P_{ins} = 15,3 \text{ MW}$; $W_{pr} = 29,0 \text{ GWh/godini}$), dok se preostali potencijal, kao i potencijal reke Dragovštice može koristiti u objektima instalisane snage manje od 10 MW (MHE). Ove elektrane na Pčinji i na Dragovštici mogu ostvariti godišnju proizvodnju od po 36,0 GWh/godini.

5. ENERGETSKA VREDNOST AKUMULACIJA

Iz karakteristika pojedinih rečnih tokova i slivova u Srbiji sagledavaju se veoma male mogućnosti stvaranja sezonskih akumulacija. To proizilazi, kako iz topografije slivova, tako i iz meteorološko-hidroloških pokazatelja. U nižim (srednjim) delovima slivova, gde su topografski i hidrološki uslovi povoljniji, po pravilu se pojavljuju problemi urbanizovanih rečnih dolina (problemi iseljavanja, otkupa, odšteta, nisko postavljene komunikacije i sl.) koji sa svoje strane diktiraju izgradnju više malih stepenica.

Energetska vrednost akumulacija na sopstvenom padu i padu nizvodnih elektrana data je u tabeli 3.

U datoj tabeli energetska vrednost na nizvodnim elektranama računata je za punu realizaciju tehnički iskoristivog potencijala. U tabeli 3 nije prikazana energetska vrednost HE „Gazivode”, jer se ista tretira kao vodoprivredni objekat.

6. MOGUĆNOST I REALNOST KORIŠĆENJA PREOSTALOG HIDROENERGETSKOG POTENCIJALA NA SLIVU MORAVE

Preostali hidroenergetski potencijal u slivu Morave, koji se može koristiti ubuduće, u slivu Velike Morave, u objektima većim od 10 MW iznosi 2 520,00 GWh/godini. Njegovo korišćenje je praktično samo pitanje vremena, tj. njegove ekonomske evaluacije. U tom cilju potrebno je za konkretne objekte obezbediti očuvanje prostora i usklađivanje sa drugim korisnicima voda. Kako se radi o velikom broju malih objekata, od kojih značajan deo ima višenamenski karakter, očekuje se i finansijska zainteresovanost ostalih korisnika i ulaganje javno-privatnog kapitala što bi znatno doprinelo njihovoj izgradnji i bržem korišćenju potencijala.

Ovde treba istaći da će hidroelektrane, radi specifičnosti goriva u termoelektranama (tehnološke karakteristike lignita), morati preuzeti teret održavanja frekvencije i regulacije snage u energetskim sistemima što znači da će potrebe za regulacionom snagom iz hidroelektrana stalno rasti, i imaće sve veći značaj pa i cenu na tržištu električne energije.

Obzirom na karakter hidroloških pojava (mali sliv, promenljiv dotok), ekonomska analiza i proračun instalisane snage male elektrane vodiče ka većim odnosima instalisanog i prirodnog protoka (dotoka). Veći instalisani protok daje veće instalisane snage, što može omogućiti značajnije učešće tih elektrana u regulaciji snage sistema. Kratki dovodi i veći broj mašina omogućavaju značajnu brzinu promene snage, što se povoljno odražava na regulacione karakteristike sistema i fleksibilniju eksploataciju elektroenergetskog sistema.

Male mogućnosti stokiranja energije i sve veće potrebe za sezonskom regulacijom proticaja i pokrivanja dužih ispada termoagregata, nameću sve više potrebu za gradnjom akumulacionih bazena i hidroelektrana. Zahtevi za zaštitu čovekove okoline i neki neenergetski, a pretežno vodoprivredni faktori (vremensko i prostorno regulisanje voda, zaštita kvaliteta voda, čeoone akumulacije i zaštita od poplava), će dovesti do opredeljenja i brže zajedničke izgradnje vodnih akumulacija i hidroelektrana.

7. KONSTATACIJE, PREPORUKE I MERE U VEZI DALJEG AKTIVIRANJA HIDROENERGETSKOG POTENCIJALA U SLIVU VELIKE MORAVE

Inicijativna grupa za pokretanje projekta „Velika Morava” u toku rada na aktuelizovanju inicijative za izgradnju preostalog hidropotencijala u slivu reke Morave susreće se sa veoma različitim nivoom obrade predhodne dokumentacije. I dalje ostaju problemi nerešenih prostornih planova, vodoprivredne osnove, osnovnih projekata sliva, studije korišćenja vodotoka, elaborata o zaštiti životne sredine i slično. Međutim, postojeća dokumentacija (studije, predprojekti Energoprojekta, HE Đerdapa, EP Jaroslav

Černi i dr..) imaju direktne upotrebne vrednosti sa začajanim izvorom podataka, ideja i tehničkih rešenja. Dalje je neophodno uskladiti i usmeriti projektovanje i istražne radove na viši nivo dokumentacije (idejne projekte, studije izvodljivosti, specijalističke projekte sve do glavnih projekata sistema „Velika Morava”). Kod izrade dokumentacije potrebno je uskladiti zahteve svih potencijalnih korisnika voda i prostora. Sem racionalnog korišćenja neophodno je prostor, u ovoj fazi, sačuvati od nekontrolisanog zauzimanja ili jednostranog korišćenja, koje isključuje druge potencijalne korisnike voda i prostora. Ako pokušamo sumirati preostali hidropotencijal, možemo reći da imamo preko 1 000 MVA instalisane snage sa prosečnom godišnjom proizvodnjom od oko 2,5 TWh koje bi bilo moguće iskoristiti u oko 40 elektrana na sledećim vodnim tokovima:

- izgradnjom hidroelektrana na Velikoj Moravi, Južnoj Moravi i Ibru sa pritokama;
- izgradnjom hidroelektrane u okviru višenamenskih sistema (Arilje, Studenica i dr.), za koje se moraju uskladiti planovi dinamike realizacije, dogovoriti konstrukcija finansiranja i učešća svakog od korisnika višenamenskog sistema i
- dogradnjom hidroelektrana uz već izgrađene vodoprivredne sisteme (Bovan, Čelije, Vrutci, Selova, Barje...).

Ovde treba istaći da, imajući u vidu strateška razvojna dokumenta Srbije i u njima navedena opredeljenja za potrebe celovitog iskorišćenja preostalog hidropotencijala, obnovljivog energetskeg resursa, hidroelektrane su nepravredno zapostavljene od kraja devedesetih godina prošlog veka. Da bi se ovo nadoknadilo, odgovorni Vladini organi i organizacije moraju intenzivirati monitoring na terenu i na višem nivou organizovati proučavanje mernih podataka kako bi se postojeća dokumentacija aktualizirala i

Tabela 3.

Energetska vrednost akumulacija u slivu Velike Moreve

Red. broj	Naziv hidroelektrane	Sliv/Reka	Korisna zapremina x106 m ³	Energetska vrednost (GWh)		UKUPNO	Napomena
				na slobodnom padu	na novoj elektrani		
1.	„Bovan”	J. Morava/Aleksinačka Moravica	32,00	3,00	4,00	7,00	
2.	„Crnoklište”	J. Morava/Nišava	1,00				
3.	„Odorovci”	J. Morava/Jerma	50,00	10,00	12,00	22,00	
4.	„Zavoj”	J. Morava/Visočica	148,30	72,00	36,00	108,00	U eksploataciji
5.	„Pakleštica”	J. Morava/Visočica	22,00	16,00	16,00	32,00	
6.	„Pčinja”	J. Morava/Pčinja	27,00	5,00	0,00	5,00	
7.	„Vrla”	J. Morava/Vlasina	107,00	85,00	136,00	221,00	U eksploataciji
8.	„Čelije”	Z. Morava/Rasina	40,50	4,00	5,00	9,00	
9.	„Ribarići”	Z. Morava/Ibar	45,00	8,00	38,00	46,00	
10.	„Jošanica”	Z. Morava/Jošanica	22,50	7,00	10,00	17,00	
11.	„Studenica”	Z. Morava/Studenica	97,00	32,00	88,00	120,00	
12.	„Orlovača”	Z. Morava/Rzav	57,00	8,00	36,00	44,00	
13.	„Roge”	Z. Morava/Rzav	125,00	27,00	54,00	81,00	
14.	„Vrutci”	Z. Morava/Dečinja	35,70	16,00	12,00	28,00	
15.	„Ivanjica”	Z. Morava/Ivanjička Moravica	100,00	25,00	34,00	59,00	
	UKUPNO:		910,00	318,00	481,00	799,00	

prevela u više kategorije: tehnički u ekonomski, bruto u neto, neto u tehnički, uvećavati aktivnosti do teoretski mogućih granica. Za investitora to konkretno znači da u svako doba mora raspolagati sa pouzdanim podacima i informacijama bitnim za donošenje odluke o investiranju u određeni objekat.

8. ZAKLJUČAK

Analizirajući sve aspekte vodnih potencijala Velike Morave, te Južne i Zapadne Morave, Inicijativna grupa je došla do zaključka da izgradnja ovog kompleksnog sistema ima opravdanost u svakom pogledu. To delom potvrđuje i do sada urađena dokumentacija. Za konačnu potvrdu potrebno je aktualizirati tehničku dokumentaciju u kojoj će se sagledati novi hidrološki i drugi pokazatelji u slivu reka Velike, Zapadne i Južne Morave. U tom smislu, potrebno je intenzivno učešće nadležnih državnih službi i aktivno učešće resornih ministarstava Vlade Srbije. Finansiranje ovako kompleksnog projekta treba tražiti u an-

gažovanju domaćeg preduzetništva i slobodnog kapitala na domaćem i svetskom tržištu novca. To su savremene tendencije za koje treba uraditi veći broj varijanti i scenarija finansiranja, te odabrati optimalni.

9. LITERATURA:

- [1] MOGUĆNOSTI ISKORIŠĆENJA HIDROENERGETSKOG POTENCIJALA VELIKE MORAVE, Branimir Katić, HE Đerdap i grupa, 1993.
- [2] HIDROENERGETSKI POTENCIJAL SRBIJE I NJENO KORIŠĆENJE, Slobodan Milić, Energo-projekt i grupa, 1993.
- [3] RAZVOJ I OSVAJANJE CEVNIH TURBINA ZA POTREBE HIDROELEKTRANA U SRBIJI, Branislav Ignjatović, HE Đerdap i grupa, 1993.
- [4] ZAKON O KONCESIJAMA SRBIJE www.vibilia.co.yu i www.mugrs.sr.gov.zu
- [5] HIDROELEKTRANE NA MORAVI Aneks 29. Energo-projekt 1986.
- [6] PREGLED DOKUMENATA U JUGELU, 2006.

Rad je primljen u uredništvo 20. 07. 2006. godine



Đorđe Bjegović je rođen 1941. godine u Šibeniku – Hrvatska. Elektrotehnički fakultet elektroenergetski smer završio je 1964. godine u Beogradu. Radio je od 1965. godine u elektrodistributivnoj RO „Elektrodalmacija” - pogon Knin, zatim u „Hidroelektranama na Krki i Zrmanji” Knin, na izgradnji, održavanju i eksploataciji distributivnih, prenosnih i proizvodnih postrojenja do 1995. godine. Pored navedenog radio je na brojnim studijama razvoja i izgradnji hidroelektrana. Od 1995 do 2005. godine radio je u „Elektroprivredi Srbije” na poslovima harmonizovanja propisa i standarda sa Međunarodnim (ISO, IEC) i regionalnim (EN) standardima.

Objavljivao je članke po stručnim časopisima, a posebno na savetovanjima i odgovarajućim simpozijumima.

Dobio je više nagrada za rad u elektroprivrednim organizacijama među kojima, nagradu „Zlatna zvezda za kvalitet” u održavanju i 100 godišnjoj eksploataciji HE „Manojlovac”, orden II reda sa srebrnom zvezdom (1986. godine) i nagradu „Nikola Tesla” za vrhunska inženjerska dostignuća (1989. godine).



Branko Milosavljević je rođen 1931. godine u B. Gračcu - Vojvodina. Elektrotehnički fakultet završio je 1957. godine u Beogradu, gde je nastavio da radi kao asistent pri Katedri za postrojenja električne snage. Godine 1962. izabran je za zvanje docenta na ETF-u u Sarajevu, za predmet Prenos električne snage. U saradnji sa Elektroprenosom-Sarajevo zasniva i izgrađuje fizički model EES (mikromrežu), čija je I faza stavljena u pogon 1968. godine. Godine 1967. prelazi na rad u Elektroprenos, a 1968. godine, po završetku mikromreže (I faze), prelazi u ZEPS, Beograd. U ZEPS-u (kasnije ZEP-u i EPS-u) radi na poslovima studija i istraživanja, zatim na energetskim analizama, unapređenju sistema dispečerskog upravljanja, vođenja projekta TSU i na kraju kao savetnik za tehničko-tehnološku problematiku upravljanja EES-om. U penziju odlazi 1997. godine.

Pored navedenog, radio je na brojnim studijama, razvoju softvera za analizu režima rada pri kratkim spojevima, raspodeli snage i naponskih prilika, koji je korišćen više godina za potrebe ZEP-a, a i drugih elektroprivrednih organizacija.

Objavljivao je članke po stručnim časopisima, a posebno na savetovanjima JUKO CIGRE i odgovarajućim simpozijumima.

Dobio je i više nagrada, među kojima i nagradu Nikola Tesla za vrhunska inženjerska dostignuća (1986. godine).



Čedomir Spaić, dipl. inž, rođen 1941. godine. Diplomirao 1965. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, elektroenergetski smer. Radio u Elektroindustriji Obod Cetinje kao rukovodilac elektrolaboratorije, zatim u Elektrodistribuciji Crne Gore kao inženjer za zaštitu i merenje, bio je honorarni asistent na katedri za električne mašine Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici, radio u Elektroistoku Beograd na mestu tehničkog direktora Pogona za izgradnju, radio u MINEL-u Beograd na mestu direktora Elektroopreme i postrojenja, a od 1990. godine radio je u Elektroistoku kao specijalista za transformatorske stanice napona 110-400 kV. Bio je rukovodilac montaže transformatorskih stanica 400/x kV u zemlji i inostranstvu. Rukovodio je montažom prve 400 kV na Balkanu (TS 400/220 kV Beograd 8, 1970. godine). Jedan od autora tipskog projekta - Primena TS 110/x kV za daljinsko vođenje. Objavio više od 40 stručnih radova za savetovanje JUKO CIGRE i druge stručne skupove od kojih je nekoliko proglašeno za najzapaženije. Dobio više priznanja, plaketa, pohvala i zahvalnica. Nosilac Oktobarske nagrade grada Beograd za inovacije 1995. godine.



Nikola Vučinić, dipl. inž, rođen 1936. godine. Diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu, smer jake struje, u Ljubljani 1963. godine. Radio u Energoinvestu 30 godina na raznim radnim mestima; od projektanta za dalekovode do direktora Pogona Energoinvesta u inostranstvu. Učesnik u razvoju i izgradnji 380 kV mreže „Nikola Tesla” u SFRJ za što je dobio Zahvalnicu od JUGEL-a. Aktivan član JUKO CIGRE i CIGRE Pariz za šta je dobio priznanje počasnog člana ove međunarodne organizacije.

*Jordan Radosavljević,
Miroљub Jevtić i Miroslav Ćirić*

Estimacija stanja u radijalnim distributivnim mrežama sa distribuiranim generatorima

Stručni rad
UDK: 621.311; 621.313.

Rezime:

U ovom radu je izložen jednostavan postupak za estimaciju stanja u radijalnim distributivnim mrežama sa distribuiranim generatorima. Kao osnova se koristi metod estimacije preko modula struja. Estimacija stanja se sprovodi korekcijom snage injektiranja čvorova u skladu sa razlikom izmerenih i izračunatih vrednosti struja ili snaga napojnih izvoda. Predloženi postupak je testiran na dve distributivne mreže koje imaju distribuirane generatore.

Ključne reči: *estimacija stanja, distributivna mreža, distribuirani generatori*

Abstract:

STATE ESTIMATION IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATORS

The simple method of state estimation in radial distribution networks with distributed generators is presented. As a basis, the method of estimation by current modules is used. The state estimation is performed by correction of injecting power values in nodes, using the difference of measured and calculated current or power flow values in feed branches. Proposed method was tested on two distribution networks with distributed generators.

Key words: *state estimation, distribution network, distributed generators*

1. UVOD

Estimacija stanja se koristi u procesu upravljanja elektroenergetskim sistemom u proširenom realnom vremenu. Estimator stanja je matematički algoritam, pomoću kog se dobijaju pouzdane i u datom trenutku najbolje procene stanja.

S obzirom na deregulisane uslove rada i sve veću primenu distribuirane proizvodnje, postoji potreba za efikasnijim upravljanjem distributivnim siste-

mima. Estimacija stanja je osnovna funkcija u procesu analize, upravljanja i planiranja distributivnih sistema. Osnovni cilj estimacije stanja je proračun promenljivih stanja, odnosno režima rada mreže u posmatranom trenutku. Specifičnosti distributivnog sistema onemogućavaju direktnu primenu ranije razvijenih estimatora stanja za prenosne mreže. Te specifičnosti su: radijalna struktura, visok odnos r/x , veoma ograničen broj merenja u realnom vremenu. Obično se merenja vrše u napojnim transformator-

Mr Jordan Radosavljević, dipl. ing. el., dr Miroљub Jevtić, dipl. ing. el.

– Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, 38 222 Kosovska Mitrovica, Kneza Miloša 7

Miroslav Ćirić, dipl. ing. el.

– JP „EPS”, PD „Jugoistok” „Elektrotimok”, ED Knjaževac, 19 350 Knjaževac, Spasoja Milkića b.b.

skim stanicama (TS) VN/SN i manjem broju SN/SN. Vrlo retko se merenja vrše u dubini distributivne mreže. Zato je neophodno prilagoditi postojeće estimatore stanja prenosnih mreža ili razviti nove, koji su specijalizovani za distributivne mreže.

U poslednjih desetak godina je razvijeno nekoliko metoda za estimaciju stanja distributivnih mreža. Ove metode se mogu podeliti u dve osnovne grupe.

U prvoj grupi su metode koje se zasnivaju na modifikaciji standardnih metoda estimacije stanja u prenosnim mrežama [1,2,3]. Koriste optimizacioni kriterijum kojim se minimizira suma kvadrata odstupanja merenih od odgovarajućih estimiranih vrednosti promenljivih, odnosno suma kvadrata grešaka. Ovaj metod pretpostavlja da su greške merenja normalno raspodeljene slučajne veličine.

Druga grupa metoda bazira se na modifikaciji algoritma za proračun tokova snaga [4,5,6,7,8].

Praktičan metod za estimaciju stanja u distributivnoj mreži mora da uvaži realne uslove rada te mreže. Zbog nedovoljnog broja merenja u realnom vremenu, neophodno je na neki način dopuniti skup podataka uvođenjem tzv. pseudo merenih veličina. To su podaci o potrošnji u svim čvorovima mreže. U suštini, podaci o potrošnji se dobijaju iz podataka o naplati, modela opterećenja, merenja u realnom vremenu i podataka o mreži [7,9,10]. Postupak određivanja pseudomeranih veličina se naziva kalibracija.

Prisustvo distribuiranih generatora (DG) može da utiče na proces estimacije stanja u zavisnosti da li je prisutno merenje u realnom vremenu ili nije. Očekuje se da DG većih snaga budu opremljeni uređajima za daljinsko očitavanje merenja napona, struje i snage. Na taj način bi se povećala redudansa podataka distributivne mreže, a time i mogućnost za tačniju estimaciju. Nameće se potreba za adekvatnim tretiranjem DG u algoritmima estimacije stanja distributivnih mreža.

2. ESTIMACIJA STANJA KORIGOVANJEM OPTEREĆENJA

U ovom radu se predlaže jedan postupak za estimaciju stanja radijalne distributivne mreže sa DG, koji se zasniva na modifikaciji jednostavnog algoritma koji je izložen u referenci [7]. Ovaj metod zahteva minimalne podatke koji su danas raspoloživi u većini distributivnih sistema, a to su:

- Merene vrednosti modula napona na sabirnicama napojnih VN/SN ili SN/SN TS;
- Merene vrednosti modula struja ili aktivne i reaktivne snage u izvodnim poljima VN/SN ili SN/SN TS;

– Pseudomerene vrednosti snaga opterećenja i proizvodnje DG dobijene postupkom kalibracije; i eventualno:

- Merene vrednosti napona i snaga DG i
- Merene vrednosti modula struje i napona u dubini mreže, (struje grane i napon odgovarajućeg čvora).

U radijalnoj mreži se pri poznatoj vrednosti napona napojnog čvora i vrednosti opterećenja u svim čvorovima, režim rada može u potpunosti rekonstruisati proračunom tokova snaga. Polazeći od ove činjenice, estimacija stanja radijalne distributivne mreže se može svesti na iterativno korigovanje opterećenja kako bi se stanje u sistemu maksimalno približilo onom koje indiciraju merene veličine. S obzirom da se u većini distributivnih mreža daljinska merenja vrše samo u izvodima napojnih trafostanica, korekcija potrošnje se tada može vršiti jedino u odnosu na ta merenja. U slučaju da pored merenja u napojnom izvodu postoje i dodatna daljinska merenja po dubini mreže, tada se ovaj pristup može dopuniti, u zavisnosti od veličina koje se mere i tačke u mreži gde se vrše ta dodatna merenja.

Ovakav način estimacije stanja spada u grupu metoda koje se zasnivaju na modifikaciji osnovnog algoritma za proračun tokova snaga.

Tri su osnovna koraka kod ovakvih metoda:

- A. Kalibracija promenljivih stanja, ili izračunavanje pre-estimiranih (inicijalnih) vrednosti promenljivih stanja;
- B. Proračun tokova snaga i
- C. Korekcija svih promenljivih stanja u skladu sa razlikom izmerenih i izračunatih vrednosti veličina koje se mere.

A. Kalibracija promenljivih stanja

U opštem slučaju, pored snaga potrošnje promenljivim stanjima se mogu smatrati i snage koje daju DG koji nemaju daljinsko očitavanje merenja.

U postupku kalibracije potrošnje koriste se podaci o karakteristikama i podaci o vrednosti potrošnje. Karakteristika potrošnje se opisuje tipom. Tipovi potrošnje se međusobno razlikuju po normalizovanom dnevnom hronološkom dijagramu potrošnje, pri čemu se, najčešće, implicitno podrazumeva par takvih dijagrama: jedan za module struja (ili aktivne snage) i drugi za faktor snage (ili reaktivne snage). Uglavnom se potrošnja može podeliti na sledeće tipove: industrijska, individualna domaćinstva, poslovno-komercijalni objekti i sl. Može se uvesti pretpostavka da se potrošači istog tipa isto ponašaju radnim danima u toku sedmice, a različito u toku vi-

kedna. Tako se sa dva dijagrama (jedan za radni dan i jedan za vikend) može u potpunosti opisati njihova karakteristika. Pomenuti skup od dva dijagrama za svaki tip potrošača se koristi za opis po sezonama u toku godine. Dovoljno dobri rezultati se mogu postići ako se uzmu dve sezone (sezona veće i sezona manje potrošnje). Pretpostavlja se da su svi potrošači jednog čvora istog tipa.

Za vrednosti pokazatelja potrošnje (x) koristi se jedna od sledećih veličina:

1. vrednost nominalnih snaga transformatora SN/NN;
2. mesečne, sezonske ili godišnje maksimalne vrednosti struje potrošnje (maksigrafa) na transformatorima SN/NN i
3. vrednosti mesečnih, sezonskih ili godišnjih protoka energije kroz transformatore SN/NN.

Obično male jedinice distribuirane proizvodnje nisu opremljene uređajima za daljinsko očitavanje merenja. U tom slučaju neophodno je, slično kao kod potrošnje, izvršiti kalibraciju aktivne snage i faktora snage ili aktivne i reaktivne snage DG. U tom cilju je potrebno imati podatke o karakteristikama i vrednosti proizvodnje DG. Karakteristike zavise od tipa distribuiranog generatora, odnosno od tipa primarnog izvora energije. S obzirom da je teško odrediti dnevni hronološki dijagram proizvodnje, obično se može prihvatiti pretpostavka da DG u zavisnosti od tipa (hidro, vetro, solarni...) ima u određenim periodima godine konstantni dnevni dijagram proizvodnje. Na bazi podataka o mesečnoj isporučenoj energiji, može se za svaki DG ili grupu DG priključenih na isti transformator, formirati normalizovani hronološki godišnji dijagram proizvodnje.

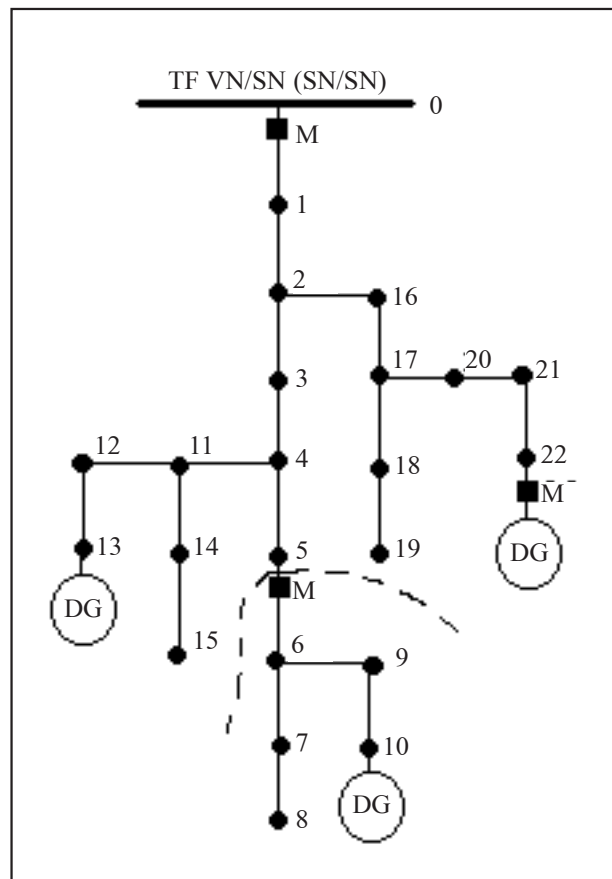
Kao pokazatelj vrednosti proizvodnje DG može se uzeti nominalna snaga ili podaci o isporučenoj energiji u određenom periodu.

Na taj način se DG sa nepoznatom snagom mogu tretirati kao negativna potrošnja. To znači da se u postupku kalibracije uzimaju kao potrošači sa negativnom snagom (slika 1, čvor 13).

Ukoliko u distributivnoj mreži postoje DG kod kojih se vrši daljinsko očitavanje merenja (slika 1, čvor 22), tada se kalibracija promenljivih vrši u odnosu na razliku merenih vrednosti napojnog izvoda (struje ili snage) i merenih vrednosti (struje ili snage) DG koji pripadaju tom izvodu.

Neka je u okviru jednog dana sezone izabran trenutak (T) za kalibraciju. Ako se raspolaže sa parom normalizovanih dnevnih hronoloških dijagrama struja-faktor snage i merenom vrednošću struje, kalibrisane vrednosti struje potrošnje u čvoru i koja se napaja preko izvoda m može se izračunati prema izrazu (1). Ukoliko se ima par normalizovanih dnevnih hronoloških dijagrama aktivna-reaktivna snaga i

merene vrednosti aktivne i reaktivne snage, tada se kalibrisane vrednosti snaga potrošnje u čvoru i koji ili koja se napaja preko izvoda m određuju preko izraza (2).



Slika 1. Radijalna distributivna mreža sa DG

$$I_i^{kal}(T) = \frac{j_i^p(T) \cdot x_i}{\sum_{j \in \alpha_m} j_j^p(T) \cdot x_j} \cdot (J_m^{mer}(T) - \sum_{r \in \beta_m} I_{DG,r}^{mer}(T))$$

$$\cos \varphi_i^{kal}(T) = \cos \varphi_i^p(T) \quad (1)$$

$$P_i^{kal}(T) = \frac{p_i^p(T) \cdot x_i}{\sum_{j \in \alpha_m} p_j^p(T) \cdot x_j} \cdot (P_m^{mer}(T) - \sum_{r \in \beta_m} P_{DG,r}^{mer}(T)) \quad (2)$$

$$Q_i^{kal}(T) = \frac{q_i^p(T) \cdot x_i}{\sum_{j \in \alpha_m} q_j^p(T) \cdot x_j} \cdot (Q_m^{mer}(T) - \sum_{r \in \beta_m} Q_{DG,r}^{mer}(T))$$

gde su:

$J_i^{kal}(T)$, $P_i^{kal}(T)$, $Q_i^{kal}(T)$ – kalibrisana vrednost struje, aktivne i reaktivne snage u čvoru i u trenutku T , respektivno

$j_i^{kal}(T)$, $p_i^{kal}(T)$, $q_i^{kal}(T)$ – vrednost struje, aktivne i reaktivne snage potrošača i u trenutku (T), koja

se očitava sa normalizovanog dnevnog hronološkog dijagrama struje, aktivne i reaktivne snage za tip potrošnje p , respektivno. Za DG to su odgovarajući dijagrami proizvodnje.

x_i – vrednost pokazatelja potrošnje u čvoru i .

$J_m^{mer}(T), P_m^{mer}(T), Q_m^{mer}(T)$ – izmerena vrednost struje, aktivne i reaktivne snage izvoda m u trenutku T ,

$J_{DG,r}^{mer}(T), P_{DG,r}^{mer}(T), Q_{DG,r}^{mer}(T)$ – izmerena vrednost struje, aktivne i reaktivne snage DG u čvoru r , u trenutku T .

α_m – skup indeksa čvorova potrošača koji pripadaju izvodu m .

β_m – skup indeksa čvorova u kojima su priključeni DG sa merenjem, koji pripadaju izvodu m .

Postupak se ponavlja za sve izvode jedne trafostanice u kojoj postoje merenja.

Ukoliko u nekoj tački (grani), u dubini mreže postoji merenje i daljinsko očitavanje napona i struje, tada se kalibracija potrošnje od te tačke prema „dole” (ka krajevima) vrši u odnosu na to merenje, a taj deo mreže isključuje iz kalibracije opterećenja ostatka mreže (slika 1, grana 5-6). Kalibracija se sprovodi samo na početku, i ima za cilj inicijalizaciju postupka estimacije stanja.

B. Proračun tokova snaga

Proračun tokova snaga je motor estimacije stanja. Primenjuje se brz i efikasan „backward/forward sweep” metod za proračun tokova snaga [11,12].

Napon korenog (0) čvora je izmerena vrednost napona sabirnice napojne TS. U početnoj, nultoj iteraciji, pretpostavi se da su naponi u svim čvorovima mreže jednaki nominalnim vrednostima, osim u čvorovima u kojima postoji merenje napona, gde se postavlja izmerena vrednost napona. Inicijalne vrednosti aktivne i reaktivne snaga potrošnje u čvoru i dobijaju se na osnovu kalibrisanih vrednosti:

$$P_{P,i} = P_i^{kal}(\Gamma); \quad Q_{P,i} = Q_i^{kal}(\Gamma); \quad (3)$$

ili

$$P_{P,i} = \sqrt{3} \cdot I_i^{kal}(\Gamma) \cdot |U_i| \cos \varphi_i^{kal}(\Gamma) \\ Q_{P,i} = \sqrt{3} \cdot I_i^{kal}(\Gamma) \cdot |U_i| \sin \varphi_i^{kal}(\Gamma) \quad (4)$$

Korak 1. Kretanje unazad (backward sweep): Aktivna i reaktivna snaga injektiranja u čvoru i je:

$$P_i = P_{P,i} - P_{DG,i}^{mer}(\Gamma) \quad (5)$$

$$Q_i = Q_{P,i} - Q_{DG,i}^{mer}(\Gamma) \quad (6)$$

Struja injektiranja čvora i u iteraciji k je:

$$I_i^{(k)} = \frac{P_i - jQ_i}{\sqrt{3}U_{-i}^{*(k-1)}} + \sum_{i,0} \frac{U_i^{(k-1)}}{\sqrt{3}}; \quad (7)$$

Struja grane i u iteraciji k je:

$$J_i^{(k)} = I_i^{(k)} + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^{\alpha_i} J_l^{(k)}; \quad (8)$$

gde su:

$\sum_{i,0}$ – suma admitansi svih otočnih elemenata u čvoru i

$J_l^{(k)}$ – kompleksna struja na ulazu u l -tu granu koja je incidentna i -tom čvoru, u k -toj iteraciji;

α_i – ukupan broj grana incidentnih čvoru i . $i=N, N-1, \dots, 0$; N -ukupan broj čvorova mreže

Korak 2. Kretanje unapred (forward sweep): Nakon izračunavanja struja grana, sledi zamena unapred, gde se počevši od korenog čvora izračunavaju padovi napona po granama, i konsekvntno, naponi čvorova:

$$U_i^{(k)} = U_j^{(k)} - \sqrt{3} \cdot Z_i \cdot J_i^{(k)} \quad (9)$$

gde je:

Z_i – redna impedansa grane i , (između čvorova j i i).

Ukoliko je u nekom čvoru prisutno merenje napona, tada se umesto izračunate vrednosti modula napona zamenjuje izmerena vrednost napona.

Korak 3. Provera konvergencije

Kao kriterijum konvergencije u proračunu tokova snaga može se koristiti razlika modula napona u dve uzastopne iteracije.

$$|U_i^{(k)} - U_i^{(k-1)}| \leq \varepsilon_v = (10^{-3} \div 10^{-5})$$

C. Korekcija promenljivih stanja

Nakon proračuna tokova snaga određuje se razlika merene i izračunate vrednosti struje ili snage u napojnim izvodima, odnosno ispituje se jedan od uslova:

$$\left| \begin{bmatrix} J \\ P \\ Q \end{bmatrix}_m^{mer} - \begin{bmatrix} J \\ P \\ Q \end{bmatrix}_m^{izr(e)} \right| \leq \varepsilon_e = (10^{-3} \div 10^{-5}) \quad (10)$$

Indeks (e) označava tekuću iteraciju u procesu estimacije stanja.

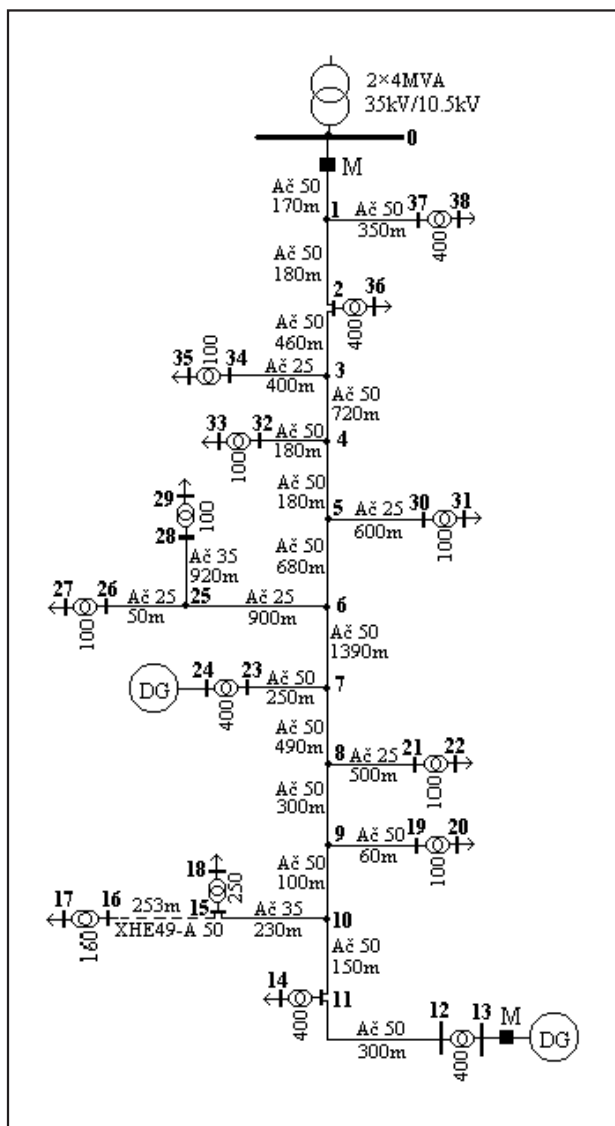
Ako ovaj uslov nije ispunjen, treba izvršiti korekciju promenljivih stanja, tj. aktivne i reaktivne snage potrošnje, na sledeći način:

$$P_{P,i}^{(e)} = \frac{J_m^{mer}}{|J_m^{izr(e)}|} \cdot P_{P,i}^{(e-1)} ; Q_{P,i}^{(e)} = \frac{J_m^{mer}}{|J_m^{izr(e)}|} \cdot Q_{P,i}^{(e-1)}$$

odnosno

$$P_{P,i}^{(e)} = \frac{P_m^{mer}}{P_m^{izr(e)}} \cdot P_{P,i}^{(e-1)} ; Q_{P,i}^{(e)} = \frac{Q_m^{mer}}{Q_m^{izr(e)}} \cdot Q_{P,i}^{(e-1)} \quad (11)$$

Sa novim vrednostima snaga čvorova ponoviti proračun tokova snaga. Proračun po tačkama B i C se ponavlja sve dok se ne ispuni uslov (10). Kada se to dogodi, dobijene vrednosti iz poslednjeg proračuna tokova snaga predstavljaju estimirane vrednosti promenljivih stanja.



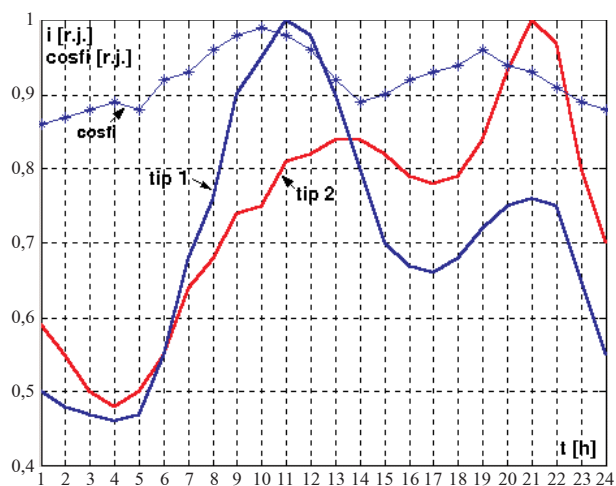
Slika 2. Test sistem

3. TESTIRANJE

Test sistem 1

Opisani postupak je testiran na delu distributivne mreže ED Zaječar u kojoj postoje dva distribuirana generatora. Sistem je prikazan na slici 2. U datoj mreži je prisutno merenje na izvodu napojne SN/SN trafostanice i na priključcima DG u čvoru 13. Pretpostavljeno je da su potrošači transformatora 100 kVA tipa 2 a potrošači ostalih transformatora tipa 1. Dnevni hronološki dijagrami struje i faktora snage za ova dva tipa potrošača su dati na slici 3. Kao pokazatelji potrošnje pri kalibraciji potrošnje uzete su nominalne snage transformatora.

Distribuirani generator u čvoru 24 nema daljinsko očitavanje merenja, tako da se u postupku kalibracije uzima u obzir kao negativan potrošač, čiji je normalizovani dnevni hronološki dijagram konstanta i iznosi 1, $\cos\phi = 0,85$. Pokazatelj proizvodnje („negativne potrošnje”) je nominalna snaga generatora, koja iznosi 30 kW.



Slika 3. Dnevni hronološki dijagram potrošača [7]; normalizovani dijagram struje za dva tipa potrošača i dijagram faktora snage koji je isti za oba tipa

Cilj je dakle, za odabrani trenutak, na osnovu merenja u napojnoj deonici i merenja kod DG u čvoru 13 estimirati stanje u ovoj distributivnoj mreži, tj. estimirati snage potrošača i snagu proizvodnje DG u čvoru 24, a samim tim i napone u svim čvorovima i struje po svim granama ove distributivne mreže.

Estimacija stanja date distributivne mreže izvršena je na osnovu sledećih merenja:

$$T = 9(\text{h});$$

$$U_0^{mer} = 10,2(\text{kV}); I_1^{mer} = 86(\text{A});$$

$$U_{DG13}^{mer} = 6,05(\text{kV})$$

$$P_{DG13}^{mer} = 100(\text{kW}); Q_{DG13}^{mer} = 641(\text{kV});$$

Rezultati:

Tabela 1
Estimirane vrednosti struje, snage i napona

Čvor	$ I_{est} $ (A)	P_{est} (kW)	Q_{est} (kW)	$ U_{est} $ (V)
14	431,4	286,5	58,2	391,3
17	172,7	114,6	23,3	390,9
18	269,7	179	36,4	391,2
20	88,4	58,9	12,0	392,5
22	88,3	58,9	12,0	392,9
24*	35,2	-23,1	7,6	400,2
27	87,8	58,9	12,0	395,4
29	89,8	58,9	12,0	386,6
31	89,3	58,9	12,0	388,5
33	89,2	58,9	12,0	389,1
35	86,9	58,9	12,0	399,1
36	422,6	286,5	58,2	399,4
38	422,3	286,5	58,2	399,7

* U čvoru 24 je asinhroni generator koji predaje aktivnu snagu (znak -) a troši reaktivnu snagu.

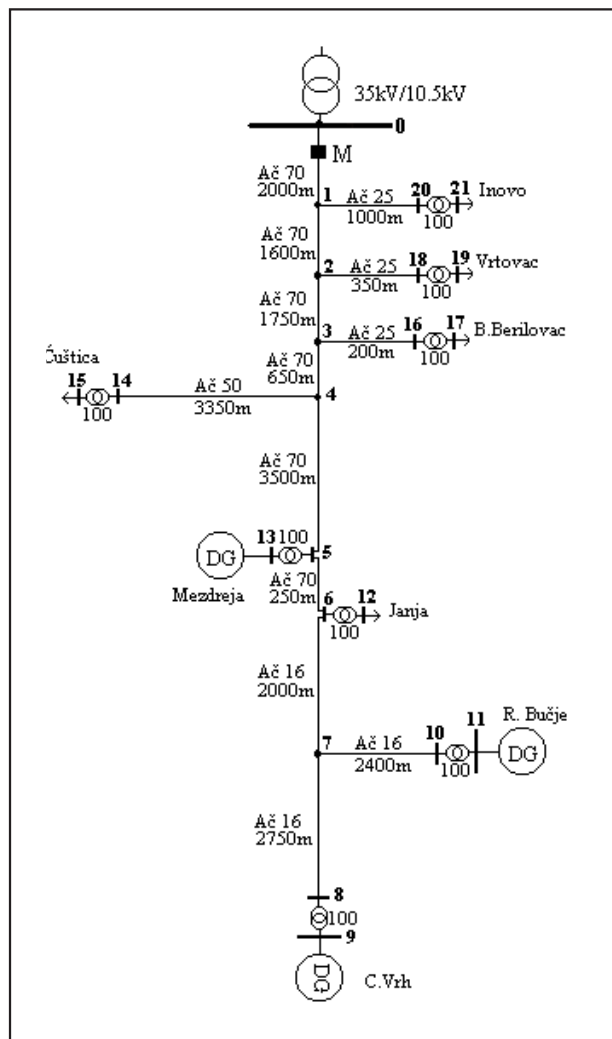
Ukupni gubici snage u mreži su:

$$\Delta P = 41,1 \text{ kW}; \Delta Q = 68,9 \text{ kVar}$$

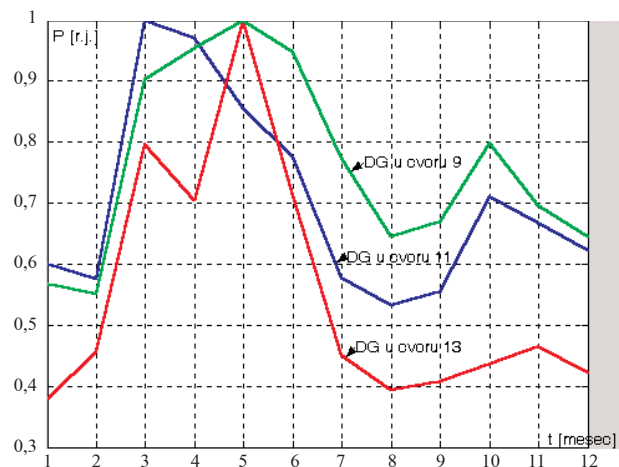
Test sistem 2

Test sistem 2 na slici 4 je deo distributivne mreže na području Elektrodistribucije Knjaževac, u kojoj se probno priključuje veći broj mikro hidroelektrana. Estimacija stanja je jedan od važnih koraka ka optimizaciji i rekonstrukciji ove mreže, kako bi se ove i buduće mikro hidroelektrane trajno priključile na nju.

U čvoru 13 priključena je mikrohidroelektrana (MHE) sa asinhronim generatorom snage 40 kW. U čvoru 9 je priključeno šest mikrohidroelektrana sa asinhronim generatorima od kojih su po dve snage 11 kW i 22 kW i po jedna snage 5 i 18,5 kW. U čvoru 11 je priključeno 4 MHE snage (30+11) kW, 44 kW, 11 kW i 18,5 kW. Na bazi mesečnih proizvodnji energije formirani su normalizovani hronološki godišnji dijagrami proizvodnje MHE, slika 5. Pretpostavljeno je da su svi potrošači tipa 1, čiji je dnevni hronološki dijagram struje i faktora snage dat na slici 3. Kao pokazatelji potrošnje/proizvodnje uzeti su godišnji protoci energije kroz transformatore SN/NN, na osnovu godišnje potrošnje aktivne energije i proizvodnje MHE. Podaci su dobijeni od Elektrodistributivnog preduzeća, tabela 2.



Slika 4. Test sistem 2; deo distributivne mreže na području elektrodistribucije Knjaževac



Slika 5. Normalizovani hronološki godišnji dijagrami proizvodnje DG

Tabela 2.
Podaci o godišnjem protoku energije

Čvor	W_P (kWh)	W_G (kWh)
9	0	295 187
11	0	229 539
12	24 023	0
13	0	164 160
15	117 805	0
17	154 731	0
19	218 724	0
21	120 933	0

Estimacija stanja u test sistemu 2 je izvršena na osnovu izmerenih vrednosti napona i struje napojnog izvoda. Merenje je izvršeno radnog dana meseca Aprila, u 16 časova:

$$T = 16 \text{ h};$$

$$U_0^{mer} = 10 \text{ kV}; I_1^{mer} = 3 \text{ A};$$

U tabeli 3 su date estimirane vrednosti struja, snaga i napona čvorova.

Tabela 3.

Čvor	$ I_{est} $ (A)	P_{est} (kW)	Q_{est} (kVar)	$ U_{est} $ (V)
9	39,4	-26,1	8,6	402,4
11	42,3	-28,0	9,2	402,5
12	3,1	2,0	0,8	400,1
13	29,9	-19,7	6,5	401
15	15,1	9,6	4,1	398,6
17	19,9	12,6	5,4	398,2
19	28,1	17,8	7,6	397,4
21	15,6	9,9	4,2	398,5

Estimirane vrednost struje, snage i napona

Negativna vrednost snage označava proizvodnju distribuiranih generatora.

4 ZAKLJUČAK

Predstavljeni algoritam estimacije stanja je jednostavan i lako se može primeniti. Zahteva minimum podataka, koji su dostupni u većini distributivnih mreža sa distribuiranim generatorima. Može se popravljati i prilagođavati specifičnostima konkretne distributivne mreže, u skladu sa stepenom auto-

matizacije, odnosno broja i lokacija merenja u realnom vremenu. Algoritam je primenjen na konkretnim distributivnim mrežama ED Zaječar i ED Knjaževac koje sadrže veći broj mikro hidroelektrana i dao je podatke o estimiranim vrednostima struja, snaga i napona, koje će se koristiti za optimizaciju i eventualnu rekonstrukciju ovih mreža.

5 LITERATURA

- [1] C. N. Lu, J. H. Teng, W. H. E. Liu: DISTRIBUTION SYSTEM STATE ESTIMATION, IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, No. 1, pp. 229-240, Feb. 1995.
- [2] K. Li: STATE ESTIMATION FOR POWER DISTRIBUTION SYSTEM AND MEASUREMENT IMPACTS, IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, No. 2, pp. 991-916, May 1996.
- [3] H. Wang, N. Schulz: A REVISED BRANCH CURRENT-BASED DISTRIBUTION SYSTEM STATE ESTIMATION ALGORITHM AND METER PLACEMENT IMPACT, IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, No. 1, pp. 207-213, Feb. 2004.
- [4] A. K. Ghosh, D. L. Lubkeman, M. J. Downey, R. H. Jones: DISTRIBUTION CIRCUIT STATE ESTIMATION USING A PROBABILISTIC APPROACH, IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, No. 1, pp. 45-51, Feb. 1997.
- [5] M. K. Celik, W. H. E. Liu: A PRACTICAL DISTRIBUTION STATE CALCULATION ALGORITHM, Proceedings of PES Winter Meeting, 1999.
- [6] D. L. Lubkeman, J. Zhang, A. K. Ghosh, R. H. Jones: FIELD RESULTS FOR A DISTRIBUTION CIRCUIT STATE ESTIMATOR IMPLEMENTATION, Trans. Power Del., vol. 15, No. 1, pp. 399-406, Jan. 2000.
- [7] D. Popović, D. Bekut, V. Treskanica: SPECIJALIZIVANI DMS ALGORITMI, str. 6-12, 102-107, DMS Group, Novi Sad, 2004.
- [8] A. T. Sarić, R. M. Ćirić: INTEGRATED FUZZY STATE ESTIMATION AND LOAD FLOW ANALYSIS IN DISTRIBUTION NETWORKS, Trans. Power Del., vol. 18, No. 2, pp. 571-578, April. 2003.
- [9] H. Wang, N. Schulz: A LOAD MODELING ALGORITHM FOR DISTRIBUTION SYSTEM STATE ESTIMATION, IEEE, 2001.
- [10] A. K. Ghosh, D. L. Lubkeman, R.H.Jones: LOAD MODELING FOR DISTRIBUTION CIRCUIT STATE ESTIMATION, Trans. Power Del., vol. 12, No. 2, pp. 999-1005, April. 1997.
- [11] C. S. Cheng, D. Shirmohammadi: A THREE-PHASE POWER FLOW METHOD FOR REAL-TIME DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS, Trans.

Power Syst., vol. 10, No. 2, pp. 671-679, May, 1995.

[12] J. Radosavljević, M. Jevtić, UTICAJ DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE NA PADOVE NAPONA,

TOKOVE SNAGA I GUBITKE SNAGE U RADIJALNOJ DISTRIBUTIVNOJ MREŽI, Časopis „Elektroprivreda”, br. 1, 2005.

Rad je primljen u uredništvo 29. 08. 2006. godine



Jordan Radosavljević (1973) je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini 1998. godine i magistrirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 2003. godine. Zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici kao asistent. Oblast njegovog interesovanja je analiza prenosnih i distributivnih mreža i distribuirana proizvodnja električne energije.



Miroljub Jevtić (1950) je diplomirao, magistrirao i doktorirao na Elektrotehničkom fakultetu u Skoplju na smeru za Elektroenergetske sisteme. Odbranio je i drugi doktorat, na Elektrotehničkom fakultetu Sankt Peterburškog tehničkog univerziteta, na smeru za električnu izolaciju, kablove i kondenzatore. Bio je zaposlen u Fabrici kablova Zaječar (1981 - 1991) kao rukovodilac razvoja i na drugim rukovodećim mestima, zatim, na Tehničkom fakultetu u Boru (1991 - 1997) kao docent i vanredni profesor i na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini (sada Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica) kao vanredni i redovni profesor na energetsom smeru. Objavio je preko 80 naučnih i stručnih radova, među kojima i veći broj u vodećim međunarodnim časopisima (IEEE, IEE, Electrical Engineering i dr.).



Miroslav Ćirić (1952) je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Energetskom odseku. Zaposlen je u JP „Elektrotimok” Zaječar od 1980. godine. Radio je na poslovima projektovanja, izgradnje i eksploatacije elektroenergetskih objekata i na rukovodećim mestima, a od 2000. godine obavlja funkciju direktora Elektrodistribucije Knjaževac. Oblast posebnog interesovanja su mikro hidroelektrane. Kao konsultant učestvovao je u izgradnji i puštanju u rad 14 mikro hidroelektrana snage 5 do 50 kW. Član je Studijskog komiteta C6 JUKO CIGRE.

Milenko Đurić,
Vladimir Petrešin i Željko Đurišić

Algoritam za merenje snage osnovnog harmonika sa promenljivim brojem odbiraka

Prethodno saopštenje
UDK: 621.317.35; 621.3.08

Rezime:

U radu je prikazan algoritam za digitalno merenje aktivne i reaktivne snage osnovnog harmonika periodičnih signala sa promenljivim brojem odbiraka u izabranom prozoru podataka. Algoritam se zasniva na nerekurzivnoj Fourierovoj metodi za merenje fazora osnovnog harmonika napona i struje. Za izračunavanje učestanosti koristi se metoda prolaska kroz nulu ali tako da se ona primenjuje na jednu od ortogonalnih komponenti signala a ne na originalni signal. Frekvencija se stalno prati i u skladu sa stvarnom frekvencijom vrši se usklađivanje broja odbitaka „m” u Fourierovom algoritmu. U radu su prikazani rezultati testiranja algoritma primenom računarskih simulacija. Prikazani algoritam za merenje snage može se primeniti u relejnoj zaštiti za određivanje smera ali i za merenje snage i frekvencije signala.

Ključne reči: merenje snage, digitalni algoritmi, relejna zaštita

Abstract:

AN ALGORITHM WITH ADAPTIVE SAMPLING FOR THE POWER MEASUREMENT OF THE FIRST HARMONIC OF THE SIGNALS

Abstract - This paper presents an algorithm with adaptive sampling (adaptive number of samples in data window) for power measuring of the first harmonic of periodic signals. The algorithm is based on the Fourier nonrecurring method for the voltage and current signals first harmonic phasors measurement. For frequency measurement zero crossing method is used, but it is applied on one of orthogonal components of voltage signal (not on original signal). Actual frequency is continually measured and the number of samples „m” in data window is adapted. Presented algorithm is tested by using computer simulations and it can be used in protective relaying or for frequency and power measurement of the first harmonic of the voltage and current signals.

Key words: power measurement, digital algorithm, relaying protective

Prof. dr Milenko Đurić, dipl. ing. el., mr Željko Đurišić, dipl. ing. el.
– Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 11 000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73
Vladimir Petrešin, dipl. ing. el. – Elektrotehnički fakultet Banja Luka

1. UVOD

Merenje frekvencije i snage je važno u elektroenergetskom sistemu (EES), pre svega u pogledu upravljanja proizvodnjom i potrošnjom. Precizno merenje frekvencije je od velike važnosti za pravilan rad zaštitnih uređaja u EES koji služe za blagovremeno rasterećenje sistema u režimima koji su blizu tehničkog maksimuma.

Specifičnosti merenja snage u zaštiti podrazumevaju širok merni opseg za napon i struju, dok se frekvencija malo menja u odnosu na nominalnu vrednost. Promena frekvencije je ograničena na opseg od ± 3 Hz u odnosu na nominalnu vrednost uz prisustvo šuma, jer su frekvencijske zaštite na generatorima podešene na 47 Hz i 53 Hz, te je rad sistema van ovog opsega praktično nemoguć. Ovo treba uzeti u obzir pri razvoju algoritma za merenje snage.

2. RAZVOJ ADAPTIVNOG ALGORITMA

Prikazani adaptivni algoritam za merenje snage se zasniva na nerekurzivnoj Fourier-ovoj metodi. Metoda poseduje dobra filtarska svojstva, ali ima i neke bitne nedostatke. Jedan od nedostataka Fourier-ove metode je neophodnost poznavanja tačne frekvencije signala pre njegove obrade. Ako stvarna frekvencija signala odstupa od pretpostavljene u Fourier-ovom algoritmu dolazi do grešaka pri izračunavanje amplituda harmonijskih komponenti signala [1]. Greške su veće što je veće odstupanje stvarne od pretpostavljene frekvencije signala.

Ideja je da se odredi frekvencija procesiranog signala, a zatim primeni nerekurzivna Fourier-ova metoda s tim da se broj odbiraka po periodu „ m ” uskladi sa stvarnom frekvencijom signala. Time se greška određivanja fazora napona i struje smanjuje, pa se smanjuje i greška izračunate snage. Frekvencija se određuje metodom prolaska kroz nulu (zero crossing) [2,3], koja se primenjuje na jednu od ortogonalnih komponenti Furijeovog reda, a ne na originalni signal. Time se rešava problem lažnog prolaska kroz nulu kod izobličjenih signala i dobija visoka robusnost algoritma na izobličjenje signala.

Posmatrajmo signale napona i struje:

$$u(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u), i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i) \quad (1)$$

Parametri signala su:

U, I – efektivna vrednost napona i struje,
 φ_u, φ_i – početna faza napona i struje,
 $\omega = 2\pi f$ – stvarna ugaona frekvencija;
 f – stvarna frekvencija signala.

Ako je tačna vrednost ugaone frekvencije (ω) nepoznata i aproksimirana pretpostavljenom vrednošću (ω_f), primenom diskretizovanog Fourier-ovog reda mogu se odrediti procene parametara $U \approx U_f, I \approx I_f, \varphi_u \approx \varphi_{uf}, \varphi_i \approx \varphi_{if}$ i signal napona i struje predstaviti relacijama [1,4]:

$$\bar{U}_f \approx \frac{\sqrt{2}}{m} \left[\sum_{n=1}^m u_n \cos\left(\frac{\omega_f T_f n}{m}\right) - j \sum_{n=1}^m u_n \sin\left(\frac{\omega_f T_f n}{m}\right) \right] = U_{f\epsilon} + jU_{f\eta} = A + jB \quad (2)$$

$$\bar{I}_f \approx \frac{\sqrt{2}}{m} \left[\sum_{n=1}^m i_n \cos\left(\frac{\omega_f T_f n}{m}\right) - j \sum_{n=1}^m i_n \sin\left(\frac{\omega_f T_f n}{m}\right) \right] = I_{f\epsilon} + jI_{f\eta} \quad (3)$$

gde su:

$$U_{f\epsilon}^2 = U_{rf}^2 + U_{if}^2; I_{f\epsilon}^2 = I_{rf}^2 + I_{if}^2$$

m – broj odbiraka po periodu signala koji se obrađuje,

ω_f – pretpostavljena ugaona frekvencija,

u_n, i_n – n -ti odbirak signala napona i struje,

f_f – pretpostavljena frekvencija signala, $f_{f\epsilon} = \frac{\omega_f}{2\pi}$,

T_f – pretpostavljena perioda signala. $T_{f\epsilon} = \frac{2\pi}{\omega_f}$

Da bi se dobili tačni rezultati u relacijama (2 i 3) potrebno je poznavati tačnu frekvenciju signala f , tj. da je pretpostavljena frekvencija signala f_f jednaka stvarnoj frekvenciji signala ($f_f = f$) i da period odabiranja ispunjava uslov [1]:

$$T_{\text{odab}} = \frac{T_{f\epsilon}}{m} \quad \text{odnosno} \quad f_{\text{odab}} = \frac{m}{T_{f\epsilon}} \quad (4)$$

To znači da je pretpostavljena frekvencija signala f_f određena sa periodom odabiranja T_{odab} i brojem odbiraka „ m ” po periodu signala koji se obrađuje. Pretpostavljena frekvencija signala f_f je određena na osnovu relacije (4) sa periodom odabiranja T_{odab} i brojem odbiraka po periodu „ m ” i ona mora biti jednaka stvarnoj frekvenciji.

$$f_{f\epsilon} = \frac{1}{m T_{\text{odab}}} = f \quad (5)$$

Ako se frekvencija signala f menja, diskretizovani Fourier-ov red daće tačne rezultate u (2 i 3), samo ako je ispunjen uslov (5). Uslov (5) može se zadovoljiti promenom ili broja odbiraka „ m ” ili periode odabiranja T_{odab} . Perioda odabiranja T_{odab} može da se menja, ali je taj pristup hardverski zahtevniji. Lakše je softverski menjati broj odbiraka „ m ” tako da prati promenu frekvencije signala.

Relacije (2 i 3) daju obrtne fazore signala (1) U i I . Kada se obrađuje dugotrajni signal (veći broj odbiraka) nakon obrade svakog „prozora” podataka od (m) odbiraka, dobijaju se vrednosti iz relacija (2 i 3) za kosinusne ($U_{rf} = U_{Rf} \cos \omega t, I_{rf} = I_{Rf} \cos \omega t$) i sinusne ($U_{if} = U_{If} \sin \omega t, I_{if} = I_{If} \sin \omega t$) komponente fazora U_f i

I_f . Ako je pretpostavljena frekvencija signala jednaka stvarnoj frekvenciji ($\omega_f = \omega$), amplitude kosinusnih i sinusnih komponenti su jednake ($U_{yf} = U_{If} = U_f = U$, i $I_{yf} = I_{If} = I_f = I$), vrhovi fazora opisuju krugove u kompleksnoj ravni. Tada su fazori napona i struje tačno određeni, te su i snage tačno izračunate [1,4]. Kompleksna snaga se računa prema relacijama:

$$S_f = P_f + jQ_f = \underline{U}_f \underline{I}_f^* = (U_{xf} + jU_{yf}) (I_{xf} - jI_{yf}) \quad (6)$$

iz (6) sledi:

$$P_f = U_{xf} I_{xf} + U_{yf} I_{yf};$$

$$Q_f = U_{yf} I_{xf} - U_{xf} I_{yf}; \quad S^2 = P^2 + Q^2 \quad (7)$$

2.1. Određivanje frekvencije signala

Za određivanje frekvencije izobličenog signala primenjena je osobina Fourierovog reda da ortogonalne komponente signala A i B, relacija (2), imaju istu frekvenciju kao osnovni harmonik signala. Na sinusnoj ili kosinusnoj komponenti primeni se metoda prolaska kroz nulu. Ovde Fourierov algoritam „filtrira” signal napona i izdvaja komponentu osnovnog harmonika koja je pogodna za primenu metode prolaska kroz nulu, jer ne sadrži visokofrekventne komponente koje stvaraju „lažne” prolaskе kroz nulu. Ako su frekvencija signala i pretpostavljena frekvencija jednake, onda su $A(t)$ i $B(t)$ prostoperiodične ortogonalne funkcije sa frekvencijom f . Ako $f_f \neq f$, A i B komponente su složeno periodične, sa malim sadržajem viših harmonika, sa frekvencijom osnovnog harmonika jednakom f . Za procenu frekvencije originalnog signala može se posmatrati jedna od ortogonalnih komponenti [2,3,4], npr.

$$A(t) = \sum_{n=1}^m u_n \frac{2}{m} \cos\left(\frac{\omega_f T_f}{m} n\right) \quad (8)$$

Na računski signal (A) se primeni metoda prolaska kroz nulu. Broje se odbirci koji mogu stati u periodu (između dva prolaska kroz nulu u istom smeru). Ako je period odabiranja signala poznat i iznosi $T_{odab} = 1$ ms, može se odrediti period signala

$$T: f_f = \frac{1}{m T_{odab}} \text{ i } f = f_f \Rightarrow, \text{ odnosno,}$$

$$f = \frac{1}{m_A T_{odab}} = f_f \frac{m}{m_A}$$

$$T = \frac{m_A}{f_f m} \quad (9)$$

gde je:

m – pretpostavljeni broj odbiraka ($m=20$)

m_A – broj odbiraka koji je stvarno stao u jedan period signala

f_f – pretpostavljena frekvencija 50 Hz

Potrebno je izvršiti korekcija prvog i poslednjeg intervala T_{odab} , jer najčešće u periodu T ne staje ceo broj perioda odabiranja. Uočimo poslednji pozitivni odbirak A_p u prethodnoj periodi i prvi negativni odbirak A_n u narednoj periodi (slika 1). U oblasti prolaska kroz nulu kosinusna funkcija se može aproksimirati pravom linijom. Zato važe relacije [2,3,4], (vidi sliku 1):

$$\frac{A_p}{K} = \frac{A_n}{P} \quad \text{i} \quad K + P = 1$$

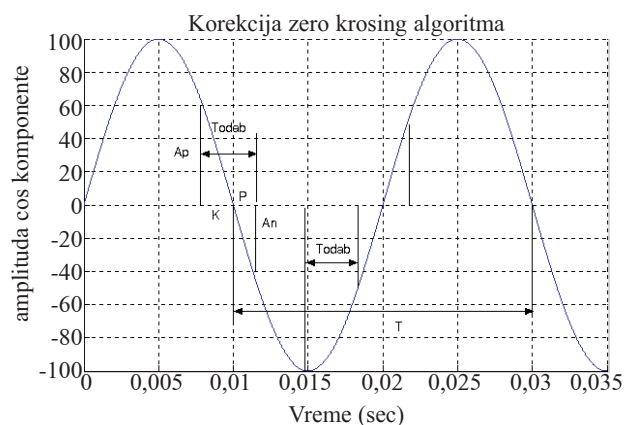
$$P = -\frac{A_n}{A_p - A_n} \quad \text{i} \quad K = \frac{A_p}{A_p - A_n} \quad (10)$$

Kada se prvi put uoči prelaz iz pozitivne u negativnu poluperiodu, broj P se dodeljuje prvom odbirku. Kada se drugi put uoči prelaz iz pozitivne u negativnu poluperiodu, broj K se dodeljuje poslednjem odbirku. Broj intervala T_{odab} koji staje u periodu T je necelobrojan i jednak m_A :

$m_A = P + m_A' + K$, a stvarna frekvencija signala je:

$$f = f_f \frac{m}{m_A} \quad (11)$$

m_A' – broj celih intervala T_{odab} između dve nule.



Slika 1. Linearna korekcija zero crossing algoritma

Nakon određivanja stvarne frekvencije signala f , vrši se adaptivno usklađivanje broja odbiraka po periodu „ m ” prema $f_f = \frac{1}{m T_{odab}} = f$ uslovu i sa

tim usklađenim „ m ” se prema obrascima (2), (3) i (7) određuje snaga signala P , Q i S . Prilikom računanja „ m ” dobija se u nekim slučajevima racionalni broj koji se mora zaokružiti na celobrojnu vrednost (m je celi broj) i to zaokruživanje prouzrokuje grešku pri izračunavanju snaga P i Q . Testiranje algoritma će pokazati da je ta greška prihvatljiva za praktičnu primenu algoritma.

2.2. Praktična realizacija algoritma

Za praktičnu primenu relacija (2, 3 i 7) potrebno je formirati pomoćne vektore kosinusa, sinusa i odbiraka dužine m , a „ m ” se adaptivno usklađuje sa stvarnom frekvencijom. Pomoćni vektori sinusa i kosinusa su:

$$CO = \left[\frac{2}{m} \cos\left(\frac{\omega_f T_f}{m}\right); \frac{2}{m} \cos\left(2 \frac{\omega_f T_f}{m}\right); \frac{2}{m} \cos\left(3 \frac{\omega_f T_f}{m}\right); \dots; \frac{2}{m} \cos\left((m-1) \frac{\omega_f T_f}{m}\right); \frac{2}{m} \right] \quad (12)$$

$$SI = \left[\frac{2}{m} \sin\left(\frac{\omega_f T_f}{m}\right); \frac{2}{m} \sin\left(2 \frac{\omega_f T_f}{m}\right); \frac{2}{m} \sin\left(3 \frac{\omega_f T_f}{m}\right); \dots; \frac{2}{m} \sin\left((m-1) \frac{\omega_f T_f}{m}\right); 0 \right] \quad (13)$$

vektor odbiraka napona i struje je:

$$U_{odb} = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_m],$$

$$\dot{E}_{odb} = [i_1, i_2, i_3, \dots, i_m] \quad (14)$$

Primenom pomoćnih vektora CO i SI izračunavanje relacija (2) i (3) se svodi na sabiranje i množenje bez izračunavanja trigonometrijskih funkcija i deljenja. To smanjuje broj računskih operacija i ubrzava izračunavanja. Nakon uzimanja novih odbiraka u_{novo} i i_{novo} vrši se aktuelizacija vektora (14), tako što se izvrši reindeksiranje članova na sledeći način:

$$\begin{aligned} u_1 &= u_2, u_2 = u_3, \dots, u_m = u_{novo} \\ i_1 &= i_2, i_2 = i_3, \dots, i_m = i_{novo} \end{aligned} \quad (15)$$

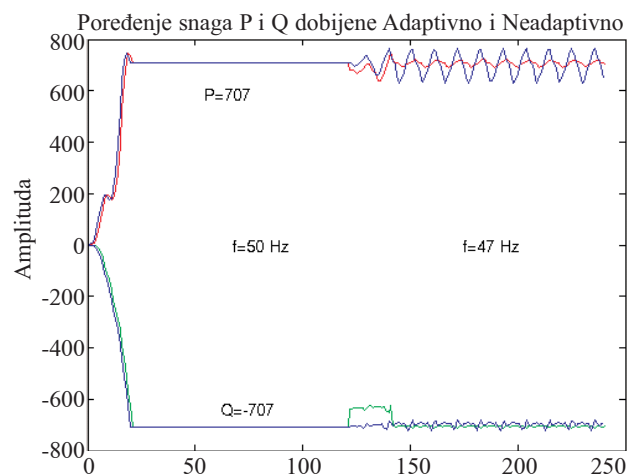
Tako se dobija „klizeći” prozor podataka, a odbirci signala tretiraju se kao skalari. Za svaki prozor podataka relacije (2 i 3) daju vrednosti: U_{rf} , U_{if} , I_{rf} , I_{if} . Zatim se primenom relacija (7) dobijaju vrednosti za aktivnu (P) i reaktivnu (Q) snagu, odnosno prividnu (S) snagu.

3. TESTIRANJE RAZVIJENOG ALGORITMA

Algoritam je realizovan i testiran u MATLAB-u, pomoću računarski generisanog signala, poznate amplitude, frekvencije i poznatog sadržaja viših harmonika. Svi signali napona i struje imaju sledeći procenat viših harmonika (u odnosu na osnovni harmonik): treći harmonik 5 %, peti harmonik 5 %. Signal struje prednjači naponu za 45° , te je $P > 0$, a $Q < 0$, moduli P i Q su jednaki. Amplitude signala su izabrane tako da je pri $f=50$ Hz: $P=707$ i $Q=-707$, a kada se amplituda napona duplo poveća: $P=1414$, $Q=-1414$. Amplituda osnovnog harmonika napona je 100, a struje 10.

Pretpostavljeno je da se frekvencija signala menja u granicama $47 \div 53$ Hz i period odabiranja je $T_{odab}=1$ ms. Za testiranje algoritma generiše se signal sa $T_{odab}=1$ ms, koji menja frekvenciju (za + ili - 3Hz) i amplitudu na polovini prikazane dužine. Na prikazanim graficima vidi se ponašanje algoritma kada signali kojima se meri snaga menjaju frekvenciju, amplitudu ili oba parametra istovremeno. Grafici prikazuju aktivnu P i reaktivnu Q snagu, koje daje prezentirani algoritam i algoritam dat u [5], koji nema adaptaciju broja odbiraka i koji ne vrši usrednjavanje snage na polovini periode, radi poređenja rezultata.

Na slici 2 je prikazan signal koji menja frekvenciju sa $f=50$ Hz, na $f=47$ Hz, a amplitude napona i struje ostaju iste.

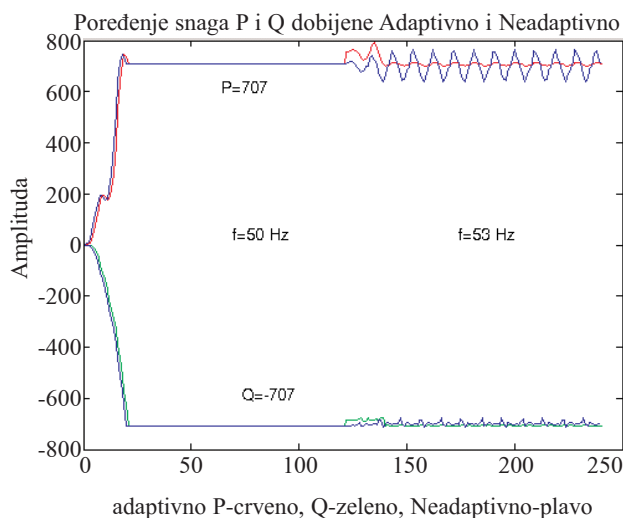


Slika 2. Aktivna i reaktivna snaga signala frekvencije 50 Hz i 47 Hz

Grafik na slici 2 prikazuje ponašanje algoritma pri promeni frekvencije i fiksnoj amplitudi signala. Kada je frekvencija signala $f=50$ Hz, tada je $P=707$ i $Q=-707$ i za adaptivni i za neadaptivni algoritam. Sa slike se vidi da se rezultati potpuno poklapaju i

tačno određuju P i Q , tj. nema greške u merenju snaga osnovnog harmonika. Kada signal promeni frekvenciju na $f=47$ Hz, P i Q počinju da osciluju oko tačne vrednosti. Vidi se da adaptivni algoritam daje snage koje značajno manje osciluju u odnosu na neadaptivni algoritam [5]. Oscilovanje snaga je posledica netačnog izračunavanja fazora struje i napona, zbog zaokruživanja broja odbiraka „ m ” na celobrojnu vrednost. Neadaptivni algoritam koji radi sa $m=20$ daje snage koje znatno osciluju oko tačne vrednosti. Sa slike se vidi da je aktivna snaga P viša od reaktivne snage Q . Maksimalno adaptivno određene aktivne snage je $P=692$, a reaktivne $Q=-713$. Greška pri adaptivnom određivanju aktivne snage P je manja od 2,1 %, a za reaktivnu snagu je manja od 0,8 %. Za neadaptivni algoritam bez usrednjavanja maksimum aktivne snage je $P=630$ i reaktivne $Q=-681$. Greške pri računanju neadaptivnim algoritmom su za P manje od 11 %, a za Q manje od 3,7 %. Može se zaključiti da adaptivni algoritam daje rezultate sa greškom manjom od 2,1 % pri odstupanju frekvencije za -3 Hz. Ako je odstupanje frekvencije manje od 3 Hz greške su još manje.

Na slici 3 prikazani su rezultati za signale frekvencije $f=50$ Hz i frekvencije $f=53$ Hz, uz konstantne amplitude signala.

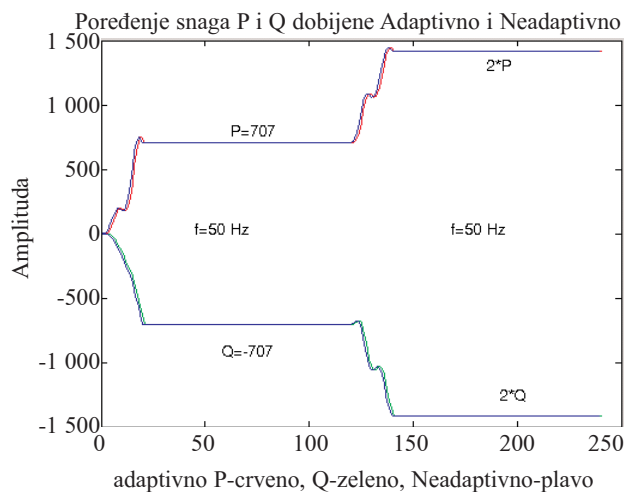


Slika 3. Aktivna i reaktivna snaga signala frekvencije 50 i 53 Hz

Za $f=50$ Hz snage su $P=707$ i $Q=-707$. Snage dobijene adaptivno i neadaptivno su iste i konstantne. Za $f=53$ Hz snage osciluju. Aktivna snaga P više osciluje od reaktivne Q . Neadaptivni algoritam daje veće oscilacije snaga. Adaptivni algoritam daje maksimume snaga $P=715$ i $Q=-707$. Greška pri određivanju P je oko 1,1 %, a za Q je oko 0,4 %. Neadaptivni algoritam istovremeno daje amplitude sna-

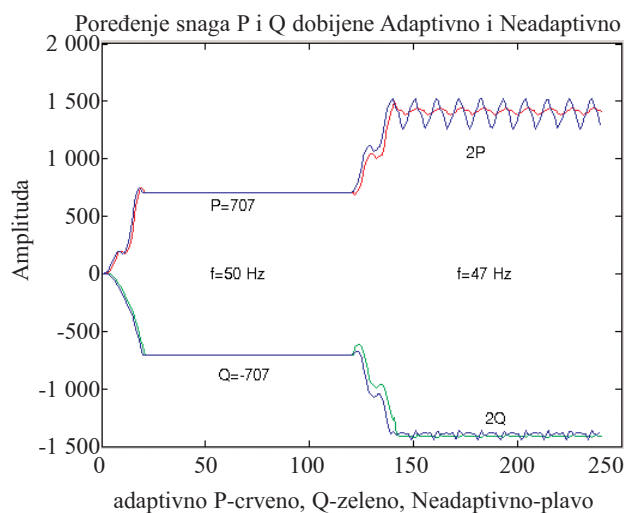
ge $P=634$ i $Q=-639$, uz greške za P od 10,3 % i za Q od oko 2 %.

Na slici 4 prikazani su rezultati za signale koji naglo povećavaju amplitude, tako da se snage P i Q udvostruče a frekvencija signala ostaje $f=50$ Hz. Snage su prvo $P=707$ i $Q=-707$, a zatim $P=1414$ i $Q=-1414$. Snage P i Q su konstantne u vremenu za oba algoritma. Algoritmi pri nagloj promeni amplitude signala brzo i skoro monotono konvergiraju.



Slika 4. Konvergencija algoritma pri nagloj promeni amplituda 50 Hz signala napona i struje

Na slici 5 prikazani su rezultati za signale napona i struje koji menjaju amplitudu tako da se P i Q dupliraju, a učestanost se sa 50 Hz smanjuje na 47 Hz.



Slika 5. Ponašanje algoritma pri nagloj promeni amplituda i frekvencije signala napona i struje

Za prvi deo signala su: $f=50$ Hz, $P=707$ i $Q=-707$. Nema oscilovanja snaga. Za drugi deo signala su: $f=47$ Hz a P i Q su dva puta veći i osciluju

oko $P=1414$ i $Q=-1414$. Konvergencija rezultata je skoro monotona. Adaptivni algoritam nešto bolje konvergira uz manje oscilovanje snage. Tačnost određivanja snaga za $f=47$ Hz je 2,2 % za P i 0,7 % za Q , odnosno tačnost je ista kao i u prethodnim slučajevima, tj. ne zavisi od promene amplitude ulaznih signala. U slučaju kada se snage signala dupliraju, a frekvencija promeni sa 50 Hz na 53 Hz dobijaju se isti rezultati kao u prethodnom slučaju.

4. ZAKLJUČAK

Kompjuterske simulacije, pomoću kojih je predloženi algoritam za merenje frekvencije i snage testiran pokazuju da je greška sa kojom se određuje aktivna snaga signala čija frekvencija leži u opsegu od 47-53 Hz, najviše 2,2 %, ako se koristi relativno niska frekvencija odabiranja od samo 1 kHz. Za testiranje algoritma namerno je korišćena niska frekvencija odabiranja da bi se pokazalo da i tada algoritam ima praktičnu primenljivost. Neadaptivni algoritam bez usrednjavanja pod istim okolnostima daje grešku od 11 %. Kada se primeni frekvencija odabiranja od 10 kHz maksimalna greška adaptivnog algoritma je ispod 0,2 %, što je veoma dobra klasa tačnosti. Algoritam konvergira monotono pri promeni amplitude ulaznih signala. Tačnost algoritma je praktično nezavisna od promene frekvencije ulaznih signala. Kašnjenje algoritma je jedna perioda (20 ms) te je primenljiv u uređajima relejne zaštite.

Navedene osobine i jednostavnost realizacije preporučuju ovaj algoritam za primenu u relejnoj zaštiti i regulaciji, kao i za merenje aktivne, reaktivne, prividne snage i frekvencije signala.

5. LITERATURA

- [1] M. Đurić, MODIFIKOVANI FURIJEVOV ALGORITAM ZA MERENJE OSNOVNOG HARMONIKA SIGNALA, *Elektroprivreda*, No. 2, 2004, pp 51-56.
- [2] M. Đurić, Ž. Đurišić, FREQUENCY MEASUREMENT IN POWER NETWORKS IN THE PRESENCE OF HARMONICS USING FOURIER AND ZERO CROSSING TECHNIQUE, konferencija PSCC-BRIŽ, Belgija, 2005.
- [3] Željko Đurišić, RAZVOJ ALGORITAMA ZA DIGITALNE FREKVENCIJSKE RELEJE U USLOVIMA VELIKIH IZOBLIČENJA ULAZNIH SIGNALA, magistarski rad odbranjen na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu (mentor M. Đurić), maj 2006. godine.
- [4] V. Petrešin, ADAPTIVNI ALGORITAM ZA DIGITALNO MERENJE SNAGE, diplomski rad odbranjen na Elektrotehničkom fakultetu u Banja Luci (mentor M. Đurić), novembar 2005.
- [5] M. Đurić, G. Đukić MODIFIKOVANI FURIJEVOV ALGORITAM ZA MERENJE SNAGE OSNOVNOG HARMONIKA PERIODIČNIH SIGNALA, *Elektroprivreda*, No. 1, 2005.

Rad je primljen u uredništvo 20. 06. 2006. godine



Milenko B. Đurić rođen je 1948. godine u Sarajevu. Srednju elektrotehničku školu „Nikola Tesla“ završio je 1967. godine u Beogradu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1973. godine. Na istom fakultetu magistrirao je 1977. i doktorirao 1985. godine.

Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu prošao je sva zvanja od asistenta pripravnika do redovnog profesora (od 1999. godine). Dve godine je radio u Rudniku bakra Majdanpek (1977. do 1978) i dve godine u „Elektrosrbiji“ iz Kraljeva (1978. do 1980). Do sada je objavio osam knjiga i preko 150 stručnih i naučnih radova iz oblasti elektroenergetike. Uže specijalnosti su mu relejna zaštita, elektroenergetska postrojenja, nadzemni vodovi i električne mašine. Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu je zaposlen od 1973. godine do danas, uz navedeni četvorogodišnji prekid. Drži predavanja iz Relejne zaštite, Elektrana i razvodnih postrojenja, Elemenata EES-a i Stabilnosti elektroenergetskih sistema.

Vladimir Petrešin je diplomirao na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Banjaluci 2005. godine. Živi i radi u Švajcarskoj.



Željko R. Đurišić (djurisic@etf.bg.ac.yu) je rođen 1972. godine u Ivangradu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu (1999), gde je i magistrirao (2006.).

Od 2001. radi na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu kao asistent-pripravnik pri Katedri za EES. Oblasni njegovog interesovanja su: vetroelektrane, kvalitet električne energije, digitalna relejna zaštita, elektroenergetska razvodna postrojenja i plazma tehnologije tankih prevlaka. Iz navedenih oblasti publikovao je preko 50 naučnih i stručnih radova. Učestvuje u više domaćih i međunarodnih projekata.

Aleksandar Ranković i Andrija T. Sarić

Analiza dopunskih mera obezbeđenja mesta rada na nadzemnim vodovima

Stručni rad

UDK: 621.315.17; 331.464.36; 331.438.2; 331.103

Rezime:

U radu je analizirana efikasnost mera obezbeđenja mesta rada na nadzemnim vodovima srednjeg i niskog napona. Date su ekvivalentne šeme i izračunate struje kojima bi bio izložen izvršilac radova u slučaju nepostojanja osnovnih, već samo dopunskih mera obezbeđenja mesta rada. Pokazano je da za realne opsege neizvesnosti pojedinih parametara (koji izazivaju nesimetriju mreže), sadašnja praksa sprovođenja dopunskih mera obezbeđenja mesta rada ne garantuje bezbednost izvršioca radova na sredjenaponskim nadzemnim vodovima. Potreban nivo bezbednosti može se postići predloženom malom modifikacijom sadašnje propisane prakse, a koja podrazumeva postavljanje još jedne prenosne naprave za privremeno uzemljivanje i kratko spajanje na samom stubu na kome se radi*.

Ključne reči: mesto rada, dopunske mere obezbeđenja, nadzemni vod, beznaponsko stanje

Abstract:

*ANALYSIS OF TEMPORARY PROTECTIVE GROUNDING SCHEMES APPLIED
FOR MAINTENANCE OF OVERHEAD DISTRIBUTION LINES*

This paper analyses the efficiency of the basic and additional temporary protective grounding schemes for electrical safety during maintenance work at medium and low-voltage overhead distribution lines. The fault current and current through the worker's body due to an accidental energization are calculated on basis of equivalent circuits and practical parameter ranges (leading to non-symmetric network). The calculation results are summarized to determine the most effective protective grounding scheme. The adequate recommendations for changes in the national standard and maintenance practice are derived. The grounding scheme with working grounds on both sides (poles) of the worksite and additional grounding jumpers installed just at the working pole are suggested.

Keywords: worksite, temporary protective ground, overhead line, de-energized condition

* Rad je nastao kao rezultat projekta „Monitoring, dijagnostika i održavanje elemenata distributivnih transformatorskih stanica”, finansiranog od strane Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije.

Mr Aleksandar Ranković, dipl. ing. el., prof. dr Andrija T. Sarić, dipl. ing. el. e-mail: a.cor@ttc.kg.ac.yu;
– Tehnički fakultet, Svetog Save 65, 32000 Čačak; e-mail: asaric@tfc.kg.ac.yu;

1. UVOD

U slučaju otklanjanja kvara (ili remonta) elektroenergetski objekat (postrojenje, vod...) mora se dovesti u beznaponsko stanje, koje se sprovodi primenom *osnovnih i dopunskih mera obezbeđenja mesta rada*. Obe grupe mera zasnivaju se na primeni „pet zlatnih pravila”, i to [1, 2]:

1. Isključenje.
2. Sprečavanje slučajnog ponovnog uključenja.
3. Utvrđivanje beznaponskog stanja.
4. Privremeno uzemljivanje i kratko spajanje.
5. Ograđivanje od delova pod naponom, kao i označavanje i ograđivanje mesta rada.

Osnovne mere obezbeđenja mesta rada sprovode se na mestima gde je vod na kome se radi odvojen od izvora napajanja, odnosno dela mreže koji ostaje pod naponom (elektroenergetsko postrojenje). Nadzemni vodovi 10 (20) kV se smatraju jednostrano napajani, ukoliko ne postoji mogućnost prodora napona sa niskonaponske strane, odnosno kada ne postoje izvori u distributivnoj mreži. Beznaponsko stanje podrazumeva da objekat nije priključen na napon, odnosno [1]: *napojna strana postrojenja (voda) je u prekinutom stanju (prekidač je isključen, rastavljač otvoren, a zemljospojnik zatvoren), a na sva tri provodnika na prekidaču, koji je iza rastavljača, postavljeno je zaštitno uzemljenje, tako da se potpuno izbegava mogućnost dolaska napona do mesta rada.*

Dopunske mere obezbeđenja mesta rada sprovode se na mestu rada i podrazumevaju [1]: utvrđivanje beznaponskog stanja, privremeno uzemljivanje i kratko spajanje, označavanje i ograđivanje mesta rada, osiguranje stuba od pada, mere saobraćajne zaštite i drugo. Privremeno uzemljivanje i kratko spajanje izvodi se *prenosnom napravom za uzemljivanje i kratko spajanje*, i to tako da se ona prvo jednim krajem vezuje na privremeni uzemljivač, odnosno uzemljivač stuba, a zatim, pomoću izolacione motke, za neutralni provodnik (ako postoji) i za fazne provodnike. Postupak skidanja je obrnut napred navedenom.

Ukoliko se nadzemni vod na kome se radi ukršta sa vodom koji ostaje pod naponom, obezbeđenje mesta rada sprovodi se u okviru dopunskih, a ne osnovnih mera obezbeđenja mesta rada.

Dovođenje isključenog voda pod napon može nastati u različitim situacijama, kao što su na primer [3]:

- Greška u manipulaciji rasklopnom opremom na napojnom kraju voda;
- Dodir sa drugim vodom koji je u pogonu (javljaju se kod dvosistemskih vodova) i
- Direktna ili indirektna atmosferska pražnjenja.

Prva mogućnost nastaje, na primer, pogrešnom manipulacijom zemljospojnika i rastavljača, kada se na krajeve prekidača dovodi visoki napon. U slučaju da su osnovne mere obezbeđenja mesta rada (mesto odvajanja voda na kome se radi od izvora napajanja) sprovedene u skladu sa propisima, fiksna uzemljenja na mestu gde vod ulazi u objekat (ili u objektu na krajevima rastavljača na koji je vod priključen) izazvaće trenutni kratak spoj. Delovanje zaštite isključuje prekidač na napojnoj strani voda i vraća vod u beznaponsko stanje. To znači da osnovne mere obezbeđenja, ukoliko su propisno izvedene, pružaju dovoljnu zaštitu izvršioca radova na stubu dalekovoda, bez obzira na način izvođenja dopunskih mera obezbeđenja sprovedenih na mestu rada.

Međutim, ukoliko usled greške u manipulaciji (koja može biti posledica nesporazuma, nepostojanja dobre komunikacije i sl. između rukovodioca manipulacije i rukovodioca radova, ili rukovodioca manipulacije i izvršioca manipulacije), dođe do uklanjanja obezbeđenja na mestu odvajanja voda od izvora napajanja (ukidanje osnovnih mera obezbeđenja mesta rada), fazni provodnici voda dolaze pod napon. U tom slučaju bezbednost izvršioca radova na vodu zavisi samo od načina sprovođenja dopunskih mera obezbeđenja mesta rada. Ako su impedanse faznih provodnika međusobno jednake, njihovo uzemljivanje i kratko spajanje (prenosnom napravom za uzemljivanje i kratko spajanje) dovešće do simetričnog trolnog kratkog spoja na mestu rada. Samim tim vrednost napona faznih provodnika, na mestu gde su kratko spojeni, jednaka je nuli (potencijal zemlje) pa izvršiocu radova nisu ugroženi. Praktično se ima isti efekat kao u slučaju sprovođenja osnovnih mera obezbeđenja mesta rada. Međutim, imajući u vidu realnu mogućnost postojanja nesimetrije u sistemu (na primer, usled nejednakosti impedansi faznih provodnika) vrednost napona na mestu uzemljivanja i kratkog spajanja je različita od nule što može dovesti u opasnost izvršioca radova. To znači da kvalitet izvođenja dopunskih mera obezbeđenja mesta rada takođe mora garantovati bezbednost radnog osoblja, nezavisno od postojanja osnovnih mera obezbeđenja mesta rada. Takođe, osnovne mere obezbeđenja mesta rada ne štite od napred navedena druga dva uzroka dovođenja isključenog voda pod napon (dodir sa drugim vodom i atmosfersko pražnjenje).

Detalnija (matematička) analiza prethodno opisanih mera obezbeđenja mesta rada motivisana je prvenstveno razlikama u procedurama u pojedinim zemljama, kako bi se utvrdio kvalitet zaštite koja se sprovodi kod nas, u odnosu na savremena rešenja u svetu.

U radu su razmatrane posledice dovođenja pod napon 10 kV i 0,4 kV vazdušnog voda u toku izvođenja radova, sa stanovišta bezbednosti izvršioca, koji je u neposrednom dodiru sa faznim provodnicima. Dat je predlog mera za poboljšanje efikasnosti dopunskih mera obezbeđenja mesta rada.

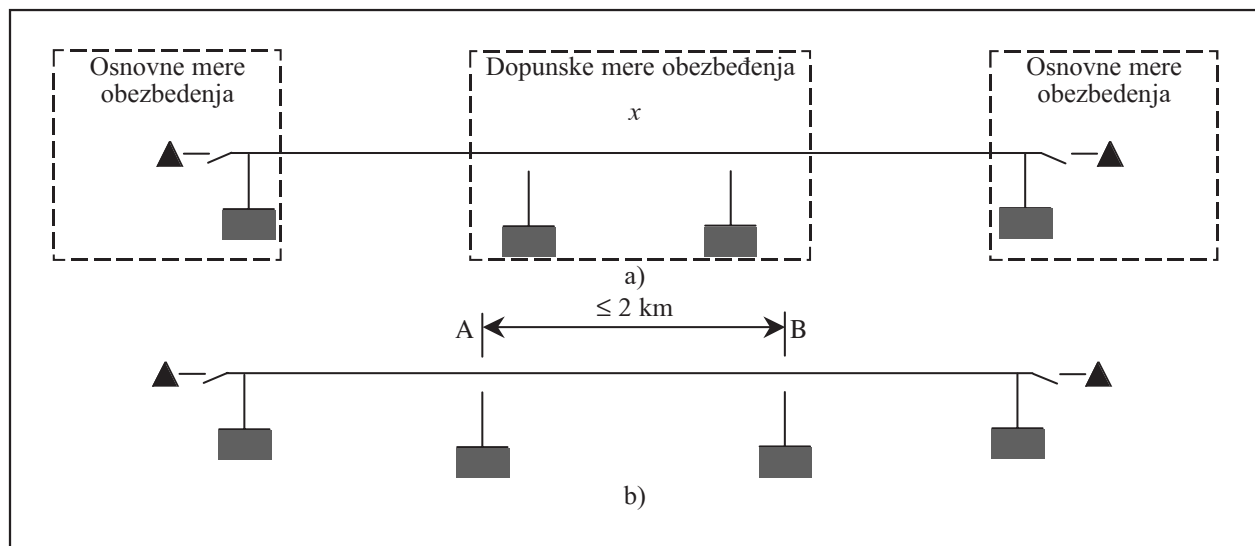
Pokazano je da zbog prirode priključenih potrošača (najviše monofaznih) kao i nejednakih reaktansi faznih provodnika distributivna mreža praktično uvek manje ili više u nesimetričnim uslovima rada. Jedan od postavljenih ciljeva rada je da se pokaže koliko nivo nesimetrije utiče na uslove bezbednosti pri radu na nadzemnim vodovima.

U poglavlju 2 analizirana je aktuelna praksa sprovođenja dopunskih mera obezbeđenja mesta rada. Modifikovani načini sprovođenja dopunskih

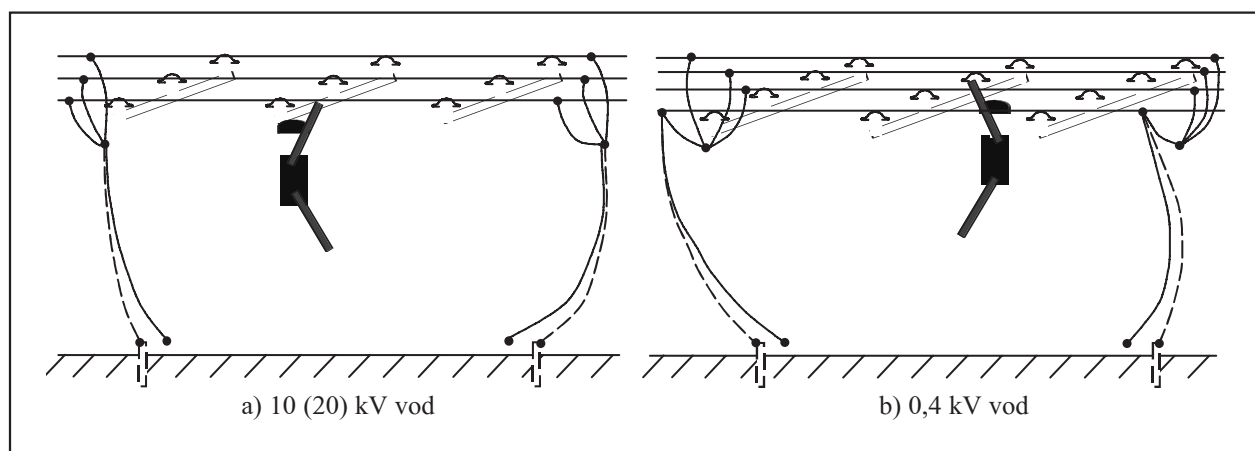
obezbeđenja mesta rada prikazani su u poglavlju 3, dok su u zaključku (poglavlje 4) dati predlozi dopunskih mera obezbeđenja mesta rada koji bi povećali bezbednost radnog osoblja.

2. ANALIZA AKTUELNE PRAKSE SPROVOĐENJA DOPUNSKIH MERA OBEZBEĐENJA MESTA RADA

Propisi za radove na jednosistemskim vodovima (bez uticaja paralelnih vodova pod naponom) definišu da se prenosne naprave za privremeno uzemljivanje i kratko spajanje postavljaju na stubove ispred i iza stuba 'x', na kome se obavljaju radovi, ili na krajnje stubove deonice, pod uslovom da je ta deonica kraća od 2 km (slika 1a, b, respektivno) [1].



Slika 1. Obezbeđenje mesta rada na nadzemnom vodu
a) Na stubu 'x',
b) Na deonici AB



Slika 2. Osnovne šeme privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja dela mreže pri radu na nadzemnom vodu za slučaj sa slike 1a

Na slici 2a, b prikazana je sadašnja praksa dopunskih mera obezbeđenja mesta rada (privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja) u slučaju elektroenergetskih vodova 10 (20) kV i 0,4 kV za slučaj sa slike 1a. Prenosna naprava za uzemljivanje i kratko spajanje prvo se jednim krajem vezuje za uzemljivač stuba, a ako ne postoje tehničke mogućnosti vezivanja za uzemljivač stuba, mora se postaviti dopunski uzemljivač, što je prikazano isprekidanim linijama na slici 2a, b. Zatim se drugi kraj prenosne naprave pomoću izolacione motke vezuje za neutralni provodnik (ako postoji; slučaj mreže 0,4 kV na slici 2b), a zatim i za fazne provodnike.

Kada fazni provodnik nadzemnog voda dođe pod napon u toku izvođenja radova na njemu, napon dodira na mestu rada zavisi od [4]:

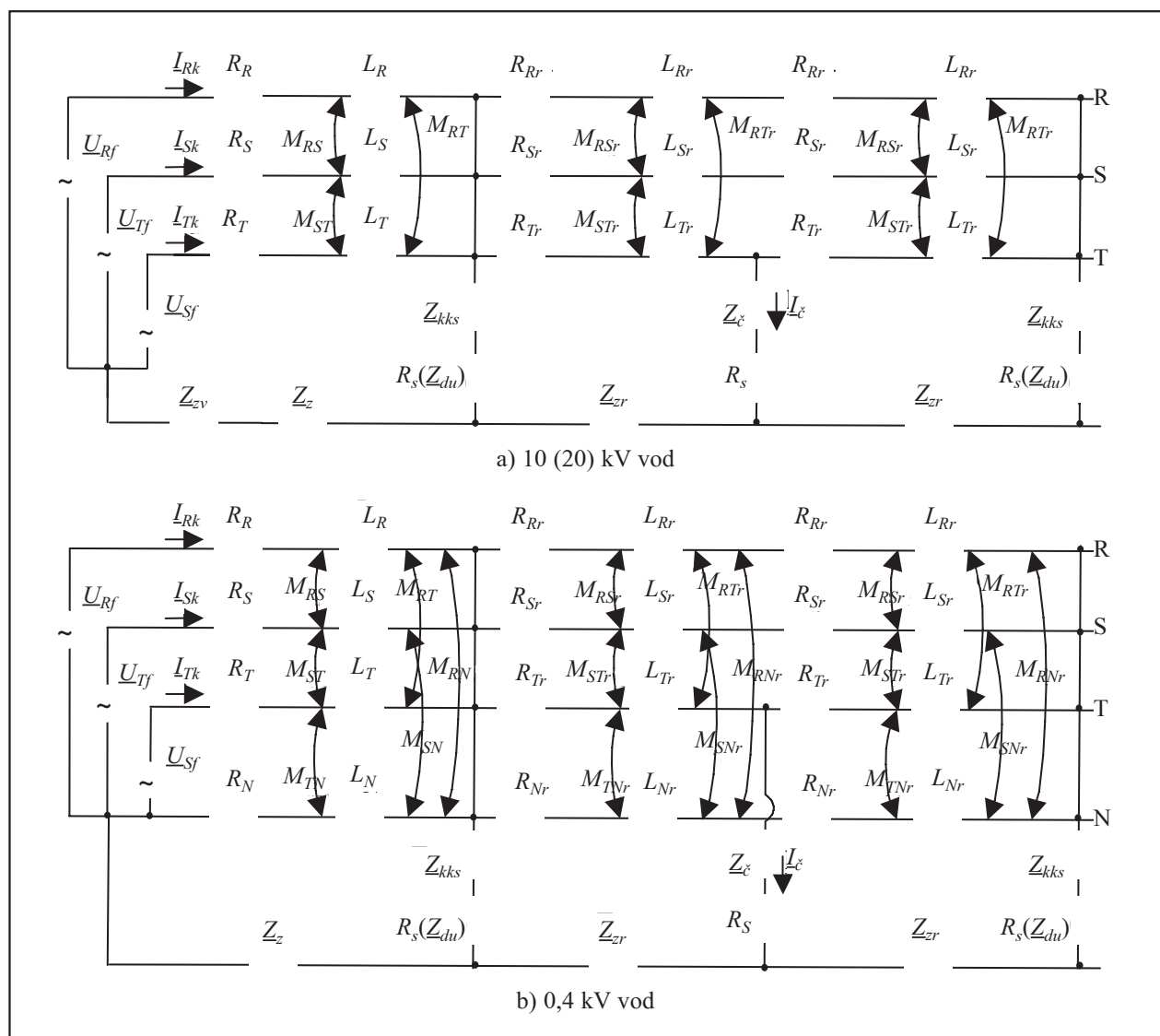
– Struje kvara na posmatranom mestu;

– Mesta postavljanja prenosne naprave za privremeno uzemljivanje i kratko spajanje u odnosu na mesto rada (slika 1a, b), udaljenosti i napona izvora napajanja i

– Načina na koji je ostvarena veza faznih provodnika i uzemljivača prenosnom napravom za privremeno uzemljivanje i kratko spajanje (slike 2a, b).

U cilju detaljnije analize raspodele struje kvara na slici 3a, b date su ekvivalentne zamenske šeme kojima se modeluju slučajevi privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja sa slike 2a, b, gde pojedine oznake (impedanse u (Ω), induktivnosti u (H), struje u (A) i naponi u (kV)) imaju sledeće značenje (oznake za faze su R, S i T):

$R_R, R_S, R_T (R_N)$ – aktivna otpornost faznih provodnika (neutralnog provodnika) od transformatorske stanice do prvog uzemljenog stuba;



Slika 3. Ekvivalentne zamenske šeme za slučajeve privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja sa slike 2a, b

$L_R, L_S, L_T (L_N)$ – induktivnost petlje fazni provodnik (neutralni provodnik) - zemlja od transformatorske stanice do prvog uzemljenog stuba;

$M_{RS}, M_{ST}, M_{RT} (M_{RN}, M_{SN}, M_{TN})$ – međusobna induktivnost petlji fazni provodnik (neutralni provodnik) - zemlja od transformatorske stanice do prvog uzemljenog stuba;

$R_{Rr}, R_{Sr}, R_{Tr} (R_{Nr})$ – aktivna otpornost faznih provodnika (neutralnog provodnika) jednog raspona (između stuba na kome se radi i susednog stuba);

$L_{Rr}, L_{Sr}, L_{Tr} (L_{Nr})$ – induktivnost petlje fazni provodnik (neutralni provodnik) - zemlja jednog raspona (između stuba na kome se radi i susednog stuba);

$M_{RSr}, M_{STr}, M_{RTr} (M_{RNr}, M_{SNr}, M_{TNr})$ – međusobna induktivnost petlji fazni provodnik (neutralni provodnik) - zemlja jednog raspona (između stuba na kome se radi i susednog stuba);

Z_{kks} – impedansa provodnika za kratko spajanje;

R_s – otpor rasprostiranja uzemljivača stuba;

Z_{du} – impedansa dopunskog uzemljivača;

Z_z – impedansa povratnog puta kroz zemlju od tačke napajanja do prvog uzemljenog stuba, koji se nalazi neposredno ispred stuba na kome se izvode radovi;

Z_{zr} – impedansa povratnog puta kroz zemlju jednog raspona (između stuba na kome se radi i susednog stuba);

Z_{zv} – impedansa uzemljenja neutralne tačke transformatora;

Z_{ξ} – impedansa tela izvršioca radova;

I_{Rk}, I_{Sk}, I_{Tk} – struja kvara faznih provodnika;

I_{ξ} – struja kroz telo izvršioca radova;

$\underline{U}_{Rf}, \underline{U}_{Sf}, \underline{U}_{Tf}$ – fazna vrednost napona izvorne tačke napajanja u stacionarnom režimu (pretpostavljeno je da su naponi na sekundaru regulacionog transformatora simetrični i obrazuju direktni redosled).

Raspodela struja u ekvivalentnoj zamenskoj šemi sa slike 3a (10 (20) kV vod) proračunata je za vazdušni vod sa Al-Če užetom, nazivnog poprečnog preseka 50/8 mm², sa netransponovanim provodnicima u jednoj ravni na standardnoj nosećoj konzoli (rastojanje faznih provodnika: $D_{RS} = 1,23$ m, $D_{ST} = 1,47$ m i $D_{RT} = 2,7$ m). Podužna induktivnost petlje fazni provodnik - zemlja jednaka je za sve tri faze [5]:

$$l_R = l_S = l_T = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_e}{r_e} \text{ H/km} \quad (1)$$

Podužne međusobne induktivnosti petlji fazni provodnik - zemlja su:

$$\begin{aligned} m_{RS} &= 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_e}{D_{RS}} \text{ H/km} \quad \} \\ m_{ST} &= 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_e}{D_{ST}} \text{ H/km} \quad \} \end{aligned} \quad (2)$$

$$m_{RT} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_e}{D_{RT}} \text{ H/km} \quad ,$$

$$\begin{aligned} m_{RS} &\approx m_a \\ m_{RT} &\approx 2 m_{RS} \quad 1 m_{RT} \end{aligned}$$

gde je:

$D_e = 660 \cdot \sqrt{\rho/f}$ – dubina ekvivalentnog povratnog provodnika u zemlji u m;

ρ – specifična otpornost zemlje u Ωm ;

f – nazivna učestanost mreže, odnosno $f=50$ Hz;

r_e – ekvivalentni poluprečnik faznog provodnika u m.

Ostale karakteristične vrednosti parametara¹⁾ [6]:

$r_f = 0,594 \text{ } \Omega/\text{km}$;

$z_z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{km}$;

$Z_{kks} = 0,005 \text{ } \Omega$ (presek provodnika za kratko spajanje 35 mm²);

$Z_{du} = R_s = 15 \text{ } \Omega$;

$Z_{\xi} = 1 \text{ } 000 \text{ } \Omega$;

$Z_{zv} = 20 \text{ } \Omega$;

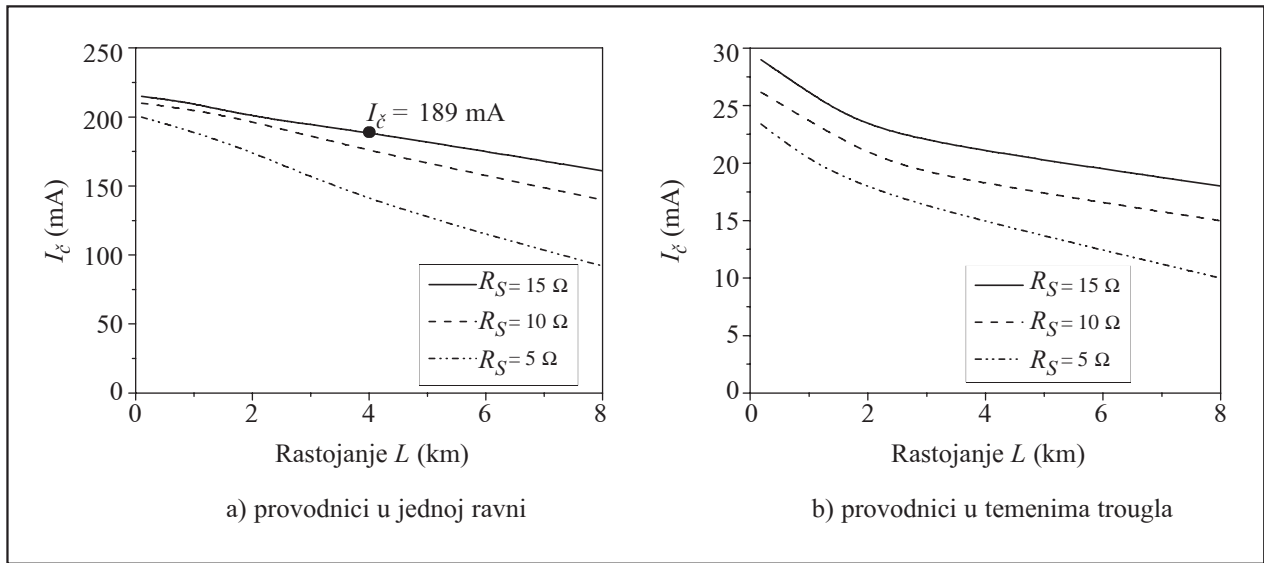
$\underline{U}_f = 10/\sqrt{3} \text{ kV}$ (nazivni napon na sekundaru napojnog regulacionog transformatora $x / 10 \text{ kV}$).

Za vrednost otpora rasprostiranja uzemljivača stuba usvojena je maksimalno dozvoljena vrednost ($R_s = 15 \text{ } \Omega$), koja je propisana sa stanovišta zaštite od atmosferskih prenapona [7]. U zavisnosti da li se prenosna naprava za uzemljivanje i kratko spajanje vezuje za uzemljivač stuba ili dopunski uzemljivač, u zamenskoj šemi na slici 3a, b figurira $R_s (Z_{du})$, respektivno. Usvajanjem da je $Z_{du} = R_s$ rezultati koji se dobijaju za struju kroz telo izvršioca radova su isti za obe varijante privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja, prikazane na slici 2a, b.

Proračun je izveden pod pretpostavkom da je mesto izvođenja radova na rastojanju $L = 4 \text{ km}$ od napojne tačke voda (elektroenergetsko postrojenje), da je privremeno uzemljivanje i kratko spajanje izvršeno na stubovima ispred i iza stuba na kome se obavljaju radovi (slika 1a). Rastojanje od napojne tačke voda određuje parametre faznih provodnika R, L i M (sve tri faze) i povratnog puta kroz zemlju ($Z_z = L \cdot z_z$), a rastojanje između stuba na kome se radi i susednog stuba (jedan raspon) određuje parametre R_r, L_r, M_r i Z_{zr} . Izračunata vrednost struje kroz telo izvršioca radova iznosi $I_{\xi} = 189 \text{ mA}$ (posebno označena na slici 4a).

U slučaju da je privremeno uzemljivanje i kratko spajanje izvršeno na krajnjim stubovima deonice na kojoj se izvode radovi (slika 1b), ekvivalentne zamenske šeme sa slike 3a, b bile bi nešto modifikovane. Parametre koje opisuju jedan raspon (R_r, L_r, M_r i Z_{zr}) zamenjuju parametri koje opisuju n raspona između stuba na kome se radi i stuba na kome je izvršeno privremeno uzemljivanje i kratko spajanje ($n \cdot R_r, n \cdot L_r, n \cdot M_r$ i $n \cdot Z_{zr}$). Ove vrednosti bi deli-

¹⁾ Raspodela struja u ekvivalentnim zamenskim šemama urađena je u Simulinku iz programskog paketa Matlab®



Slika 4. Struja kroz telo izvršioca radova ($I_{\check{c}}$) pri radu na 10 kV nadzemnom vodu za različite vrednosti otpora rasprostiranja stuba (R_s) i različiti raspored provodnika

mično smanjile struje kroz telo izvršioca radova, pa u ovom radu nisu detaljno analizirane, kao manje kritičan slučaj.

U zamenskim šemama sa slike 3a, b ima nekoliko neizvesnih parametara, koji mogu značajno uticati na dobijene rezultate. Na primer, nejednakost impedansi faznih provodnika (nesimetrija mreže), koja predstavlja primarni uzrok pojave napona na mestu rada, a posledica je geometrijskog rasporeda provodnika (nejednakost međusobnih induktivnosti M_{RS} , M_{ST} i M_{RT}).

Zato je urađena analiza osetljivosti na neke od neizvesnih parametara. Njihove vrednosti su uzete u praktično mogućem opsegu, kako bi se u analizi obuhvatili najnepovoljniji slučajevi sa stanovišta bezbednosti pri radu.

Na slici 4a, b prikazana je analiza uticaja rastojanja od napojne tačke mreže L na struju kroz telo izvršioca radova ($I_{\check{c}}$), za različite vrednosti otpora rasprostiranja stuba (R_s) i različiti geometrijski raspored provodnika. Za rastojanja faznih provodnika, raspoređenih u temena trougla, usvojene su standardne vrednosti za 10 kV nadzemni vod: $D_{RS} = 1,8$ m, $D_{RT} = D_{ST} = 1,66$ m, .

Dozvoljene vrednosti napona dodira za elektroenergetska postrojenja iznad 1 kV u zavisnosti od vremena trajanja kratkog spoja (t) iznose [8, 9]:

$$U_{doz} = 1\ 000\ \text{V} - \text{za } t < 0,075\ \text{s};$$

$$U_{doz} = \frac{75}{t}\ \text{V} - \text{za } 0,075 < t < 1,153\ \text{s}; \quad (3)$$

$U_{doz} = 65\ \text{V} - \text{za } t > 1,153\ \text{s}$, odakle se vidi da ovaj napon ne može biti veći od 1 000 V, niti manji od 65 V.

Ako se zanemare prelazni otpori šake i stopala izvršioca radova, ovim dozvoljenim vrednostima napona odgovaraju dozvoljene vrednosti struje kroz telo, koje iznose:

$$I_{doz} = \frac{U_{doz}}{R_{\check{c}}}\ (\text{A}), \quad (4)$$

što znači da se u zavisnosti od vremena trajanja kvara kreću u opsegu od 65 mA do 1 A.

Poznato je da struje veće od 100 mA mogu izazvati fatalne posledice po izvršioca radova [4, 10].

Poredeći rezultate sa slike 4a, b i napred navedene dozvoljene vrednosti, zaključuje se da je vrednost struje kroz telo izvršioca radova (samim tim i napona dodira) u stacionarnom stanju iznad dozvoljenih vrednosti za neke od analiziranih vrednosti neizvesnih parametara (slika 4a). Vrednosti koje se dobijaju za provodnike raspoređene u temenima trougla su znatno manje nego u slučaju rasporeda provodnika u jednoj ravni (slika 4b). Ovo je posledica manje nesimetrije međusobnih induktivnosti za provodnike raspoređene u temenima trougla.

Pokazano je da otpor rasprostiranja stuba (R_s) značajno utiče na dobijene rezultate. Takođe, upotreba ličnih zaštitnih sredstava (zaštitne rukavice, obuća), kao i uvažavanje impedanse samog stuba, povećava impedansu grane u kojoj se nalazi telo izvršioca radova ($Z_{\check{c}} + R_s$) i dodatno smanjuje struju kroz telo izvršioca radova.

Ovim se pokazuje da u slučaju greške u manipulaciji i uklanjanja obezbeđenja na mestu odvajanja voda na kome se radi od izvora napona (osnovne mere obezbeđenja mesta rada), propisane dopunske mere obezbeđenja na mestu rada ne pružaju

uvek dovoljnu zaštitu izvršiocu radova.

Uzimajući u obzir da je razmatrano stacionarno stanje, reagovanje kratkospojne zaštite voda bi smanjilo vreme proticanja struje kroz telo izvršioca radova, što je sa stanovišta bezbednosti pri radu svakako povoljno [11].

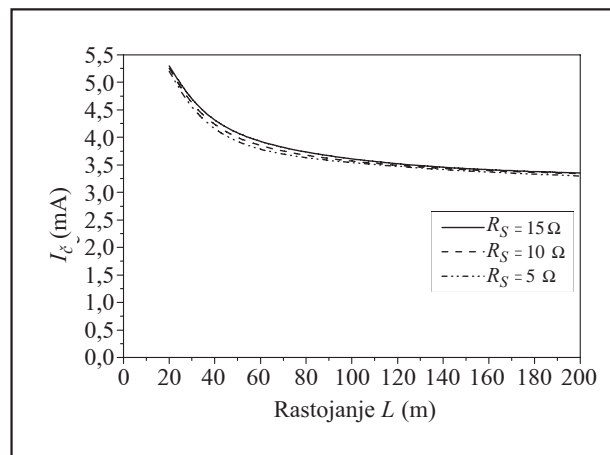
Raspodela struja u ekvivalentnoj zamenskoj šemi sa slike 3b (0,4 kV vod) proračunata je za vazdušni vod sa Al-Če užetom, nazivnog poprečnog preseka 25/4 mm² sa netransponovanim provodnicima u jednoj ravni (najkritičniji slučaj), podužne aktivne otpornosti $r_f = r_n = 1,2028 \Omega/\text{km}$ [6]. Karakteristične vrednosti ostalih parametara (Z_z , Z_{du} i R_s) iste su kao i u slučaju 10 kV nadzemnog voda.

Na slici 5 prikazana je analiza uticaja rastojanja od napojne tačke voda na struju kroz telo izvršioca radova (I_{ξ}), za različite vrednosti otpora rasprostiranja stuba (R_s).

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5, u slučaju greške u manipulaciji i uklanjanja obezbeđenja na mestu odvajanja 0,4 kV nadzemnog voda na kome se radi od izvora napona (osnovne mere obezbeđenja mesta rada), propisane dopunske mere obezbeđenja mesta rada pružaju dovoljnu zaštitu izvršioca radova u svim razmatranim slučajevima ($I_{\xi} \ll 100 \text{ mA}$), što znači da je aktuelna propisana procedura sasvim adekvatna.

3. PREDLOG MODIFIKOVANOG SPROVOĐENJA DOPUNSKOG OBEZBEĐENJA MESTA RADA NA SREDNENAPONSKIM VODOVIMA

Imajući u vidu prethodno dobijene (nepovoljne) rezultate proračuna u slučaju 10 kV vodova za sadašnju praksu sprovođenja dopunskih mera obezbeđenja mesta rada, ispitane su dve varijante povezivanja dodatne prenosne naprave za privremeno uzemljiva-

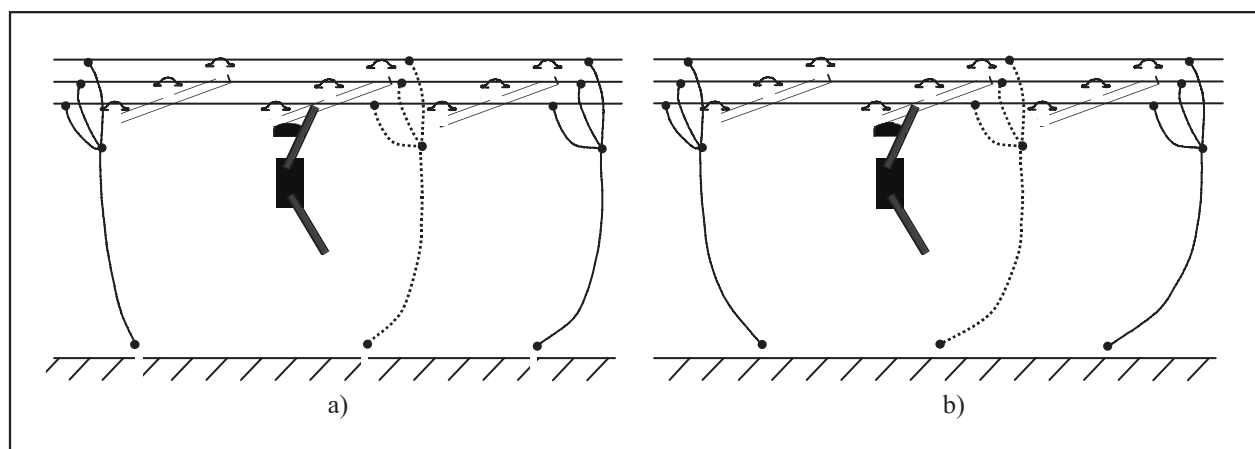


Slika 5. Struja I_{ξ} kroz telo izvršioca radova (I_{ξ}) pri radu na 0,4 kV nadzemnom vodu za različite vrednosti otpora rasprostiranja stuba (R_s)

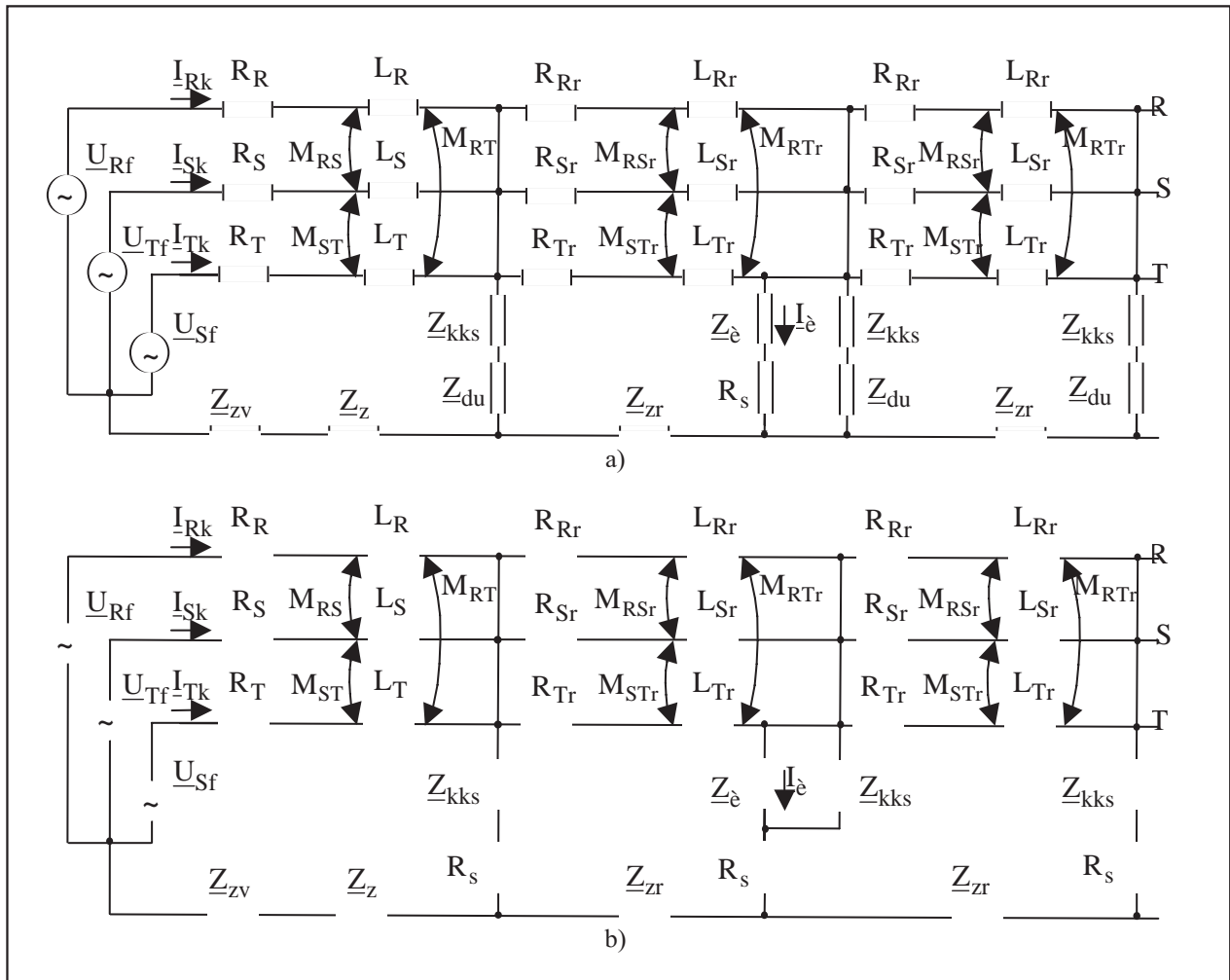
nje i kratko spajanje i na stubu na kome se izvode radovi (ili u njegovoj neposrednoj blizini), označene isprekidanim linijama na slici 6a, b. Obe varijante imaju za cilj smanjenje ekvivalentne impedanse između faznog provodnika i zemlje na mestu izvođenja radova, a samim tim i napona dodira.

Prva varijanta (slika 6a) predviđa da se dodatnom prenosnom napravom za uzemljivanje i kratko spajanje direktno spoje fazni provodnici i privremeni uzemljivač u neposrednoj blizini stuba na kome se izvode radovi. Druga varijanta (slika 6b) predviđa da se dodatna prenosna naprava za privremeno uzemljivanje i kratko spajanje poveže sa stubom na kome se izvode radovi. Ovakva praksa se već primenjuje u nekim elektroprivredama [3, 4]. Na slici 7a, b date su ekvivalentne šeme kojima se modeluju slučajevi privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja sa slike 6a, b.

Kao i u slučaju *standardne šeme* sprovođenja dopunskih mera obezbeđenja mesta rada (objašnje-



Slika 6. Modifikovane šeme privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja 10 kV nadzemnog voda



Slika 7. Ekvivalentne zamenske šeme za slučajeve privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja sa slike 6a, b

ne u poglavlju 2), izvršen je proračun struje kroz telo izvršioca radova (I_{ξ}). Dobijeni rezultati za polaznu tačku u proračunu (netransponovani provodnici u jednoj ravni, vrednost otpora rasprostiranja uzemljivača stuba $R_s = 15 \Omega$ i mesto izvođenja radova na rastojanju $L = 4$ km od napojne tačke voda), za standardnu šemu (slika 2a) i obe modifikovane šeme (slika 6a, b) prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1.

Rezultati proračuna struje kroz telo izvršioca radova (I_{ξ}) za usvojenu baznu vrednost analiziranih parametara

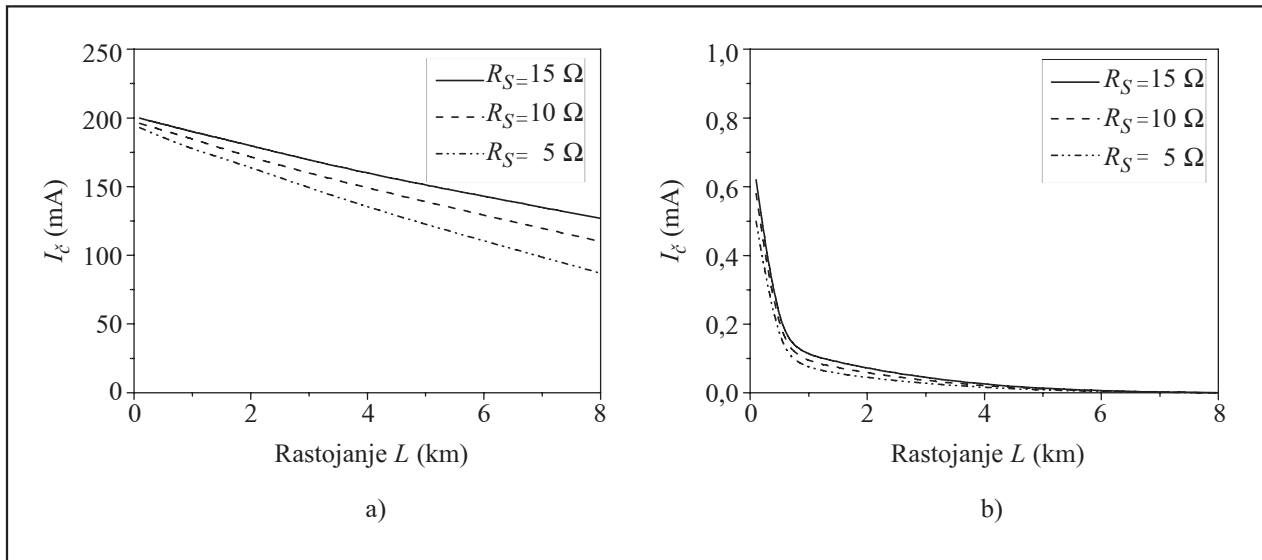
Takođe, za obe modifikovane šeme sa slike 6a, b izvršena je analiza osetljivosti na kritične parametre

	I_{ξ} (mA)
Standardna šema (slika 2a)	189,00
Modifikovana šema (slika 6a)	158,00
Modifikovana šema (slika 6b)	0,06

tre (vrednost otpora rasprostiranja stuba R_s i rastojanje mesta izvođenja radova od izvora napajanja L). Rezultati dobijeni za struju kroz telo izvršioca radova (I_{ξ}) prikazani su na slici 8a, b.

Analiza dobijenih rezultata pokazuje da modifikovana šema gde su direktno spojeni fazni provodnici i uzemljivač u neposrednoj blizini stuba na kome se izvode radovi (prva varijanta, slika 6a), neznatno smanjuje struju kroz telo izvršioca radova u odnosu na standardnu šemu sa slike 2a (uporediti slike 4a i 8a). Izračunate vrednosti struje kroz telo izvršioca radova u stacionarnom stanju i dalje su veće od propisima dozvoljenih vrednosti.

Druga varijanta modifikovane šeme privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja, koja predviđa da se fazni provodnici povežu sa stubom na kome se izvode radovi (slika 6b), daje višestruko manju vrednost struje kroz telo izvršioca radova od propisane. Izračunate vrednosti struje (u stacionarnom stanju) su ispod 1 mA za sve analizirane vrednosti neizvesnih parametara (slika 8b). To je posledica višestruko manje impedan-



Slika 8. Struje kroz telo izvršioca radova (I_z) za ekvivalentne šeme sa slike 7a, b, respektivno i za različite vrednosti otpora rasprostiranja stuba (R_S)

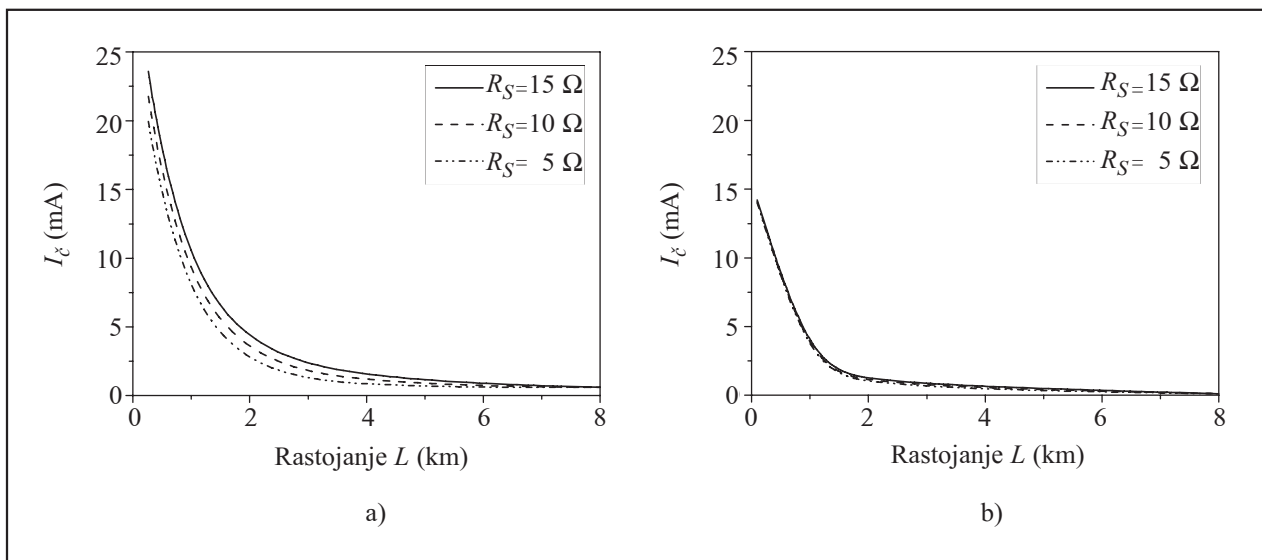
se opreme za uzemljivanje i kratko spajanje (Z_{kks}), u odnosu na impedansu tela izvršioca radova (Z_z), što se zaključuje sa ekvivalentne zamenske šeme sa slike 7b.

Imajući u vidu dobijene rezultate za drugu varijantu privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja, razmatrana je i mogućnost da se privremeno uzemljivanje i kratko spajanje izvrši samo na stubu na kome se izvode radovi, sa jednim (oprema označena isprekidanom linijom na slici 6b) ili dva dopunska uzemljivača levo i desno od mesta na kome se izvode radovi. Dobijeni rezultati (prikazani na slici 9a, b) pokazuju da je struja kroz telo izvršioca radova za

sve analizirane vrednosti neizvesnih parametara ispod 100 mA, ali da je u poređenju sa vrednostima struje kada su dopunski uzemljivači postavljeni i na stubove ispred i iza stuba na kome se obavljaju radovi znatno veća (slika 8b).

4. ZAKLJUČAK

U radu je pokazano da sadašnja praksa sprovođenja dopunskih mera obezbeđenja mesta rada, za praktično realne opsege pojedinih parametara i nesimetrije mreže, ne može uvek garantovati dovoljnu



Slika 9. Struja kroz telo izvršioca radova (I_z) za slučaj privremenog uzemljivanja i kratkog spajanja samo na stubu na kome se izvode radovi sa jednim a) ili dva b) dopunska uzemljivača

bezbednost izvršioca radova na srednjenaponskim nadzemnim vodovima.

Analizirane su dve modifikovane varijante sadašnje prakse za postizanje potrebnog nivoa bezbednosti. One podrazumevaju postavljanje još jednog dopunskog uzemljivača i na stubu na kome se radi. Pri tome, prva varijanta koja predviđa da se dodatnim kompletom za privremeno uzemljivanje i kratko spajanje direktno spoje fazni provodnici i uzemljivač stuba u neposrednoj blizini stuba na kome se izvode radovi, nije dala zadovoljavajuće rezultate, odnosno struja kroz telo izvršioca radova je ostala iznad propisanih vrednosti.

Druga varijanta predviđa da se fazni provodnici povežu i sa stubom na kome se izvode radovi u tački povezivanja stuba sa uzemljivačem, što je u skladu sa nekim međunarodnim standardima i preporukama [3, 4, 8]. U ovoj varijanti izračunate vrednosti struja kroz telo izvršioca radova su znatno manje od propisanih vrednosti. Druga, dodatna prednost ovakvog pristupa je što se izvršilac radova može lično uveriti da su potrebna uzemljenja izvršena na stubu na kome se izvode radovi. Za ovu varijantu sprovođenja dopunskih mera obezbeđenja mesta rada ispitana je mogućnost da se privremeno uzemljivanje i kratko spajanje vrši samo na stubu na kome se izvode radovi. Dobijeni rezultati (za razmatrane slučajeve sa jednim ili dva dopunska uzemljivača) zadovoljavaju propisane vrednosti, ali su nepovoljniji u odnosu na varijantu u kojoj se privremeno uzemljivanje i kratko spajanje izvrši na stubu na kome se radi i na susednim stubovima.

Korišćena metodologija u principu je primenljiva i za prenosne mreže, uvažavajući prvenstveno mogućnost dvostranog dovođenja struje kvara do mesta rada. Međutim, heuristički zaključak je da su uslovi bezopasnosti manje kritični nego u distributivnim mrežama, pošto su po svojoj prirodi daleko bliže idealnoj simetriji.

Dobijeni rezultati i izvedeni zaključci pokazuju da je i u našoj zemlji potrebno izvršiti dodatnu analizu i razmotriti potrebu za usklađivanje propisa za obezbeđivanje mesta rada na srednjenaponskim nadzemnim vodovima u skladu sa savremenim svetskim zahtevima i standardima.

5. LITERATURA

- [1] * * * TEHNIČKI PROPISI O MERAMA BEZBEDNOSTI PRI RADU NA ELEKTROENERGETSKIM OBJEKTIMA, Elektroprivreda Srbije, Beograd, 1997.
- [2] K. Barac, BEZBEDNOST PRI RADU NA ELEKTROENERGETSKIM OBJEKTIMA: UZ KOMENTAR DISTRIBUTIVNIH PROPISA EPS-a, Beograd, 1997.
- [3] C. H. Lee and T. C. Hsu, EVALUATION OF GROUNDING SCHEMES USED FOR MAINTENANCE OF OVERHEAD DISTRIBUTION LINES, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, pp. 2211-2218, Jul. 2005.
- [4] * * * IEEE GUIDE FOR PROTECTIVE GROUNDING OF POWER LINES, IEEE Std. 1048-1990, IEEE, 2000.
- [5] M. Đurić, NADZEMNI VODOVI, ENERGETSKI TRANSFORMATORI I SINHRONI GENERATORI, Nauka, Beograd, 1993.
- [6] AL-ČELIČNA UŽAD ZA NADZEMNE VODOVE - Tehnički uslovi, JUS N.C1.351 (1985).
- [7] * * * IZVOĐENJE UZEMLJENJA STUBOVA ELEKTRODISTRIBUTIVNIH NADZEMNIH VODOVA 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV i 110 kV", Tehnička preporuka br. 9, EPS - Direkcija za distribuciju električne energije, Beograd, 2000.
- [8] * * * IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING, IEEE Std. 80-2000, IEEE, 2000.
- [9] PRAVILNIK O TEHNIČKIM NORMATIVIMA ZA UZEMLJENJE ELEKTROENERGETSKIH POSTROJENJA NAZIVNOG NAPONA IZNAD 1000 V, Službeni list SRJ, br. 61/1995.
- [10] J. Nahman, UZEMLJENJE NEUTRALNE TAČKE DISTRIBUTIVNIH MREŽA, Naučna knjiga, 1980.
- [11] * * * PRIMENA RELEJNE ZAŠTITE I LOKALNE AUTOMATIKE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA 10 kV, 20 kV, 35 kV i 110 kV, Tehnička preporuka br. 4, EPS - Direkcija za distribuciju električne energije, Beograd, 2001.



Aleksandar Ranković (1971) diplomirao je na Tehničkom fakultetu u Čačku, smer Elektroenergetski sistemi, 1994. godine. Magistrirao je na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu 2002. godine. Zaposlen je kao asistent na Katedri za elektroenergetiku Tehničkog fakulteta u Čačku, za predmete Prenosne i distributivne mreže, Elektroenergetski sistemi i Elektrotehnika sa elektronikom.

Učestvovao je na tri projekta finansirana od strane MNTR. Koautor je deset naučnih i stručnih radova.



Andrija T. Sarić (1962) diplomirao je 1988, magistrirao 1992. i doktorirao 1997. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu iz oblasti primene klasičnih i metoda veštačke inteligencije u elektroenergetskim sistemima. Trenutno je redovni profesor na Katedri za elektroenergetiku Tehničkog fakulteta u Čačku, za predmete iz oblasti elektroenergetskih sistema.

Koautor je više od 20 naučnih i stručnih radova u vodećim međunarodnim časopisima (IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE Transactions on Power Systems, IEEE Transactions on Circuits and Systems, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Electrical Power & Energy Systems, Electric Power Systems Research, European Transactions on Electrical Power, Electric Power Components & Systems, Archive for Electrical Engineering) i konferencijama (IEEE PowerTECH, DistribuTECH, Power System Computation Conference, Power System and Automation Conference, Power Systems Conference and Exposition). Koautor je sedam knjiga iz oblasti analize, planiranja i eksploatacije elektroenergetskih sistema. Recenzent je u više međunarodnih časopisa (IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE Transactions on Power Systems, IEEE Transactions on Neural Networks i Electrical Power & Energy Systems).

Tri puta je bio na posledoktorskom usavršavanju na Northeastern University, Boston, USA u trajanju od godinu dana (2001/2002. godine), odnosno šest meseci (2004. godine) i dva meseca (2005. godine), gde je radio na projektima finansiranim od strane National Science Foundation (NSF), USA, na problemima identifikacije dinamičkih ekvivalenata delova velikih elektroenergetskih sistema primenom veštačkih neuralnih mreža (prvi put), kao i problemima sigurnosti deregulisanih elektroenergetskih sistema u prisustvu neizvesnosti parametara mreže (drugi i treći put).

Učestvovao je na više projekata finansiranih od strane Ministarstva nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije.

Žarko Markov

O tranzitnim telefonskim vezama u mreži EPS-a

Pregledni rad
UDK: 621.395.73; 621.395.347; 621.153

Rezime:

Razmatra se problem ostvarivanja tranzitnih telefonskih veza u mešovitoj telefonskoj mreži EPS-a. Ovaj problem je specifičan za telefonsku mrežu EPS-a i zahteva posebno rešenje. Prikazani su načini komutacije telefonskog signala u centralama različitih tehnologija i ukazano je na sve moguće kombinacije tranzitnih veza uključujući analognu, VF, digitalnu i paketsku tehniku. Prikazano je rešenje koje obezbeđuje savršeni rad u svim uslovima.

Ključne reči: korporacijska telefonska mreža, komutacija, govorni signal

Abstract:

ABOUT TRANSIT TELEPHONE CONNECTIONS IN THE EPS NETWORK

The problem of transit connections in the telephone network of EPS telephone network is analyzed. This problem is specific for EPS network and needs special solution. The switching modes used in different technologies are shown in this paper. It is shown that all interfaces may be connected in the transit connections (analog, PLC, digital, IP). Suggested solution offers perfect operation.

Key words: corporate telephone network, switching, speech signal

1. UVOD

Razvoj neke postojeće telefonske mreže zahteva njeno neprekidno usavršavanje i dogradnju. To se sve čini zbog povećanja korisničkih mogućnosti. Kada se posmatra korporacijska telefonska mreža elektroprivrede Srbije (TM EPS-a), razvoj mreže mora da obezbedi i visoku raspoloživost. Najveće promene u mreži su one izazvane promenom osnovne tehnike u kojoj je izvedeno komutiranje telefonskih signala. To su: promena od analogne ka klasičnoj digitalnoj i ISDN telefonskoj tehnici i od klasične digitalne i ISDN tehnike ka tzv. paketskoj (IP)

tehnici. Promena tehnike izaziva ili može izazvati promene sva četiri najvažnija svojstva telefonskih tehnika: oblika komutiranog i prenošenog govornog signala, signalizacije, numeracije i korisničkih mogućnosti. Mada promena telefonske tehnike donosi pozitivne promene, ono što uvek stvara probleme je rad stare i nove tehnike u istoj mreži tj. rad mešovite mreže. O nekim svojstvima mešovite TM EPS-a u pogledu rada signalizacije je bilo reči u [1]. Osnovno pitanje na koje pokušava da odgovori ovaj kratki rad je: u kakvom obliku se komutira govorni signal u mešovitoj telefonskoj mreži EPS-a i kako obezbediti da ta komutacija bude uspešna? Traženje odgo-

Prof. dr Žarko Markov, dipl. ing. el. – Iritel, 11 080 Zemun, Batajnički put 23

vora na ovo pitanje će omogućiti da se sagledaju svi problemi koje nosi komutiranje analognog, digitalnog i paketizovanog govornog signala u istoj mreži. U razmatranju ove teme svi problemi vezani za signalizaciju, numeraciju i korisničke mogućnosti u mešovitoj mreži će biti zanemareni.

2. OBLICI TELEFONSKOG GOVORNOG SIGNALA

Govorni signal čine promene vazdušnog pritiska proizvedene ljudskim govornim organom. Kada se ove promene pritiska pretvaračem tj. mikrofonom prevedu u električni oblik onda je govorni signal promena struje koja odgovara promenama pritiska. Frekvencijske komponente ovog signala se, uglavnom, nalaze u opsegu učestanosti od 50 Hz do 10 000 Hz.

Tri osnovna svojstva govornog signala su: učestanosti govornog signala važne za razumljivost, frekvencijska raspodela snage govornog signala i promena ovih svojstava sa promenom jezika.

Za razumljivost govora su neke učestanosti govornog signala važnije od drugih. Najvažnije komponente koje nose razumljivost se nalaze u opsegu učestanosti od 300 Hz do 3 400 Hz.

Snagu govornog signala ne nose sve komponente podjednako već su komponente iz donjeg dela opsega učestanosti važnije.

Dva prethodna svojstva imaju svi jezici uz vrlo mala odstupanja.

Telefonski signal je govorni signal sastavljen samo od najznačajnijih komponenata tj. onih iz opsega učestanosti od 300 Hz do 3 400 Hz.

Osnovni oblici telefonskog govornog signala su analogni, digitalni i paketski.

Analogni telefonski signal je signal predstavljen kontinualnom promenom struje mikrofona i on se može prenositi kroz mrežu u tom obliku do slušalice sagovornika.

Digitalni (digitalizovani) govorni signal je govorni signal predstavljen u cifarskom obliku. Umesto analogne zavisnosti govorne struje ili napona od vremena, digitalni telefonski signal predstavlja niz diskretnih vrednosti govorne struje ili napona, izraženih u cifarskom obliku. Standardnim digitalnim telefonskim signalom se smatra telefonski govorni signal obrađen koderom po ITU-T preporuci G.711. Ova obrada (*A/D konverzija*) se sastoji od uzorkovanja analognog telefonskog signala 8 000 puta u sekundi i predstavljanja svakog uzorka binarnim brojem koji se sastoji od 8 binarnih cifara tj. bita. Ovaj signal ima bitski protok 64 000 bita u sekundi (64 kb/s). Važno je naglasiti da se ovaj postupak u

telefoniji primenjuje na celokupni signal telefonske komunikacije tj. i na pauze u govoru.

Paketizovani govorni signal je signal predstavljen nizom delova digitalizovanog telefonskog signala, trajanja od 10 ms do 50 ms, od kojih svaki deo čini sadržaj osnovne jedinice za prenos u paketskim telekomunikacijama. Ova osnovna jedinica može se zvati, zavisno od tehnike, paketom, ramom, okvirom, *frejmom*, ćelijom, datagramom ili segmentom. Paketizovani govorni signal može biti u nekomprimovanom, komprimovanom i kvazikomprimovanom obliku.

Nekomprimovani paketizovani govorni signal je onaj čiji delovi imaju protok 64 kb/s a dobijen je standardnim postupkom digitalizacije i deljenjem na pakete.

Komprimovani govorni signal je signal koji, posle digitalne obrade, ima manji bitski protok (na primer: od 6 kb/s do 40 kb/s). Na prijemu se obnavljanjem ne može dobiti izvorni signal. U IP mreži EPS-a se neće koristiti komprimovani govorni signal zbog relativno male vrednosti saobraćaja a velike propusne moći korporacijskog Interneta (intraneta) tj. zbog nepostojanja potrebe da se protok *štedi*.

Kvazikomprimovani govorni paketizovani signal je signal čiji se bitski protok smanjuje odstranjivanjem onih delova koji predstavljaju pauze u govoru. Na prijemu se dodaju veštačke govorne pauze. Za razliku od prave kompresije, gde se izvorni govorni signal ne može više obnoviti, kvazikomprimovani signal zadržava nepromenjene delove govornog signala.

3. MEŠOVITA TELEFONSKA MREŽA

Mešovita telefonska mreža je, u načelu, mreža u čijim se delovima prenos i/ili komutacija vrše različitim tehnikama. Telefonska mreža se uvek sastoji od tri vrste elemenata: korisničkih terminala, sistema prenosa signala i čvorova mreže tj. telefonskih centrala. U najnovijoj, IP, tehnici mrežni čvor je, ustvari, ruter tako da izraz **IP telefonska centrala** treba shvatiti sasvim uslovno. Dakle, u mešovitoj mreži se mogu naći različiti elementi različitih telefonskih tehnika.

Kada govorimo o mešovitoj telefonskoj mreži EPS-a, u skoroj budućnosti u njoj bi se mogli naći sledeći elementi.

U **analognoj** tehnici su to analogni telefonski aparati, analogne korisničke linije, analogne veze prema javnoj mreži, analogne VF veze po dalekovodu (*PLC, Power Line Carrier*) i telefonske centrale sa analognom komutacijom. Posebna svojstva telefonske mreže EPS-a su relativno kratke korisničke linije, prenos signala po VF vezi sa komprimova-

nom dinamikom govornog signala i centrale sa dvo-
 žičnom i četvorožičnom komutacijom. (*Dinamika
 govornog signala je odnos najvećih i najmanjih
 vrednosti govornog signala a kompresija dinamike
 govornog signala u VF vezama po dalekovodima u
 TM EPS-a svodi ovaj odnos na polovinu*).

U **digitalnoj** i ISDN tehnici delovi su ISDN (si-
 stemski) korisnički aparati, digitalizovane korisnič-
 ke linije, digitalizovane linije za vezu sa javnom
 mrežom, digitalni optički prenos po svetlovodu i
 centrale sa digitalnom komutacijom. Tehnika pri-
 menjena u digitalnoj i ISDN mreži se često naziva
 TDM (*Time Division Multiplex*) prema vremenskom
 multipleksu koji je osnova ove tehnike. Za digitalnu
 mrežu EPS-a, kao korporacijsku mrežu, je svojstve-
 no da se zbog kratkoće korisničkih linija mogu kori-
 stiti različite tehnike digitalnog prenosa po korisnič-
 kim linijama, [2]. Sistemi prenosa po svetlovodu su
 oni koji se koriste u javnoj mreži. Posebnost EPS-
 ove mreže je korišćenje manjeg broja digitalnih ka-
 nala od 30, (kodirekcionni interfejsi, [3]). Digitalizo-
 vane VF veze po dalekovodu se ne mogu svrstati u
 strogo digitalnu tehniku zato što neka rešenja ne do-
 zvoljavaju priključivanje na centralu preko digital-
 nih interfejsa.

Elementi **paketskog** dela mreže su IP telefoni
 (IPfon), Eternet korisnička linija, ruteri, prenos pre-
 ko svetlovida, centrale. Savremene korporacijske IP
 centrale se nazivaju komunikacionim sistemima,
 platformama, IP sistemima i omogućavaju rad u
 TDM i IP korisničkom i mrežnom okruženju, [1]. U
 telefonskoj mreži EPS-a još ne postoji IP čvor.

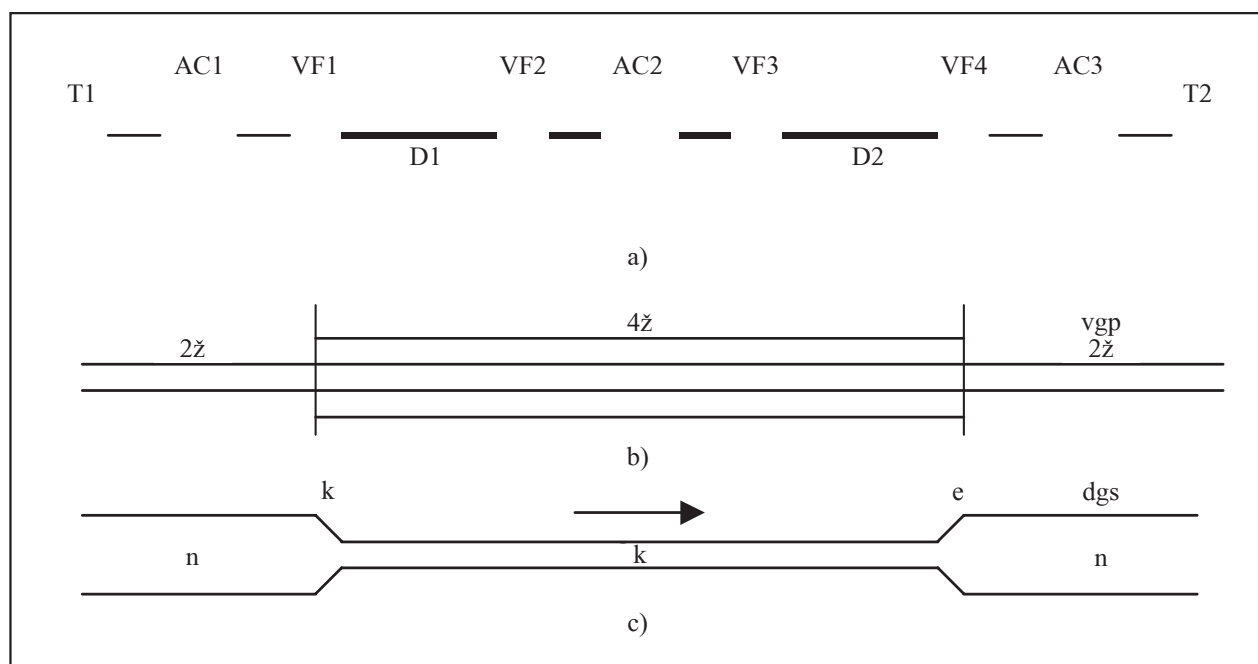
4. KOMUTACIONI ORGANI TELEFONSKIH CENTRALA

Elektronski sklop ili softver mrežnog čvora ko-
 ji omogućava da se govorni signal prosledi (kaže se
 još: prospoji, prespoji) od izvora ka odredištu (od
 ulaza u čvor ka izlazu iz čvora) se naziva komutaci-
 oni organ (*switching unit*). Osnovno svojstvo komu-
 tacionog organa mrežnog čvora je da on može da
 komutira govorni signal samo u istom obliku.

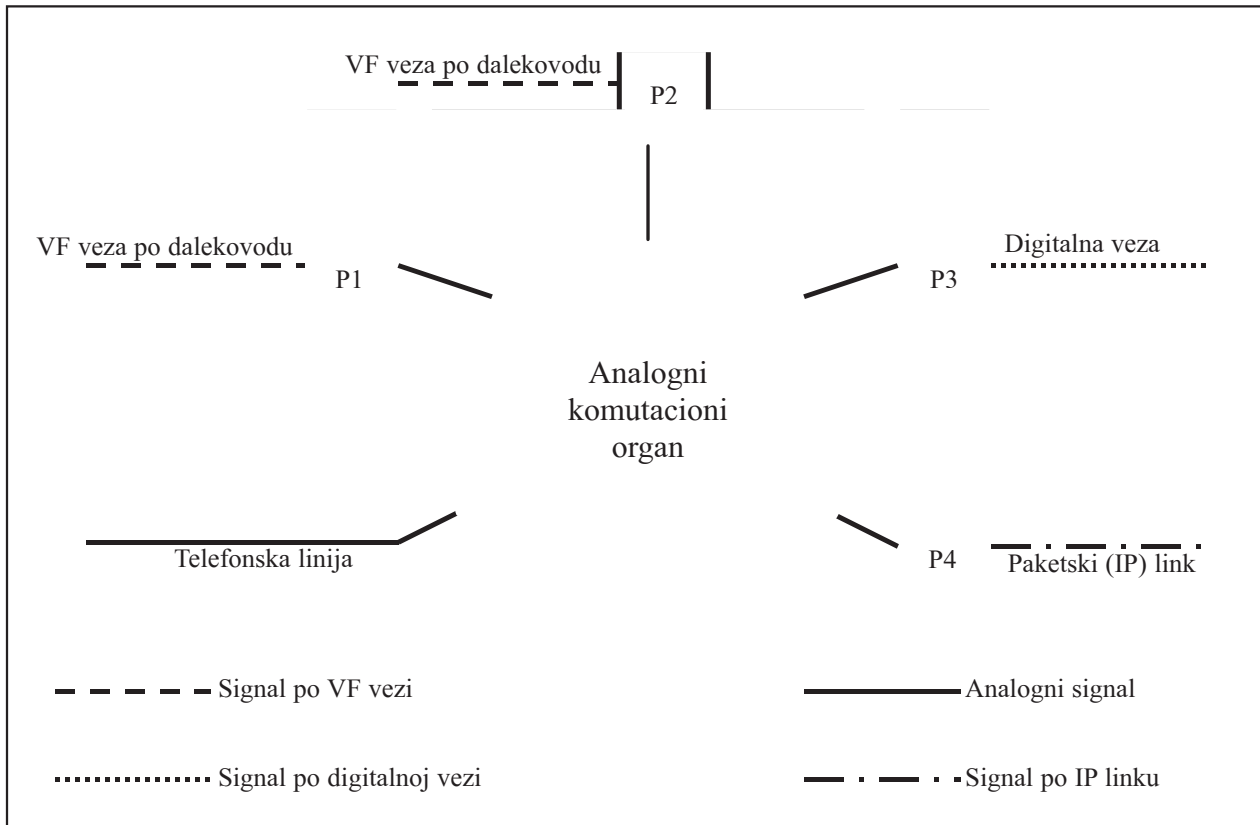
Dvožični komutacioni organ analognih centrala
 komutira telefonske govorne signale u izvornom ob-
 liku. To je dvosmerni analogni signal u izvornom
 obliku, koji dolazi direktno sa korisničkih provodni-
 ka i ka njima se prosleđuje.

Četvorožični komutacioni organ analognih cen-
 trala komutira telefonske govorne signale čija je di-
 namika komprimovana.

Na slici 1.a) je prikazana jedna analogna tele-
 fonska veza u TM EPS-a. Veza je ostvorena između
 telefona T1 i T2 a prolazi kroz komutacioni organ
 analogne polazne (dolazne) centrale AC1, tranzitne
 AC2 i dolazne (polazne) AC3. Prenosni putevi kroz
 mrežu su ostvareni preko dalekovoda D1 i D2 preko
 kojih se ostvaruje analogna VF veza uređajima tj.
 terminalima VF1 i VF2 (D1) i VF3 i VF4 (D2). Sim-
 bolični prikaz vrste govornog puta (*vgp*, dvožični
 (2ž), četvorožični (4ž)) je dat na slici 1.b). Prelaz
 2ž→4ž, i obrnuto, se vrši u račvalicama koje se na-
 laze u terminalima VF veza koji se nalaze uz pola-
 znu i dolaznu centralu. Upravljanje račvalicama tj.
 njihovo uključivanje ili isključenje vrši centrala na ko-



Slika 1. Veza kroz analognu mrežu



Slika 2. Komutacija u analognom čvoru

ju je vezan terminal VF veze. Kao što je poznato, a i može se videti sa slike 1.b), račvalice se uključuju za polaznu i dolaznu vezu a isključuju za tranzitnu vezu.

Radi smanjenja šuma u vezi, prenos analognog govornog signala po VF vezi se obavlja sa smanjenom dinamikom. Smanjena dinamika se ostvaruje kompresorima (k) na strani govornika a vraća se na normalnu ili prirodnu dinamiku ekspandorima (e) na strani slušaoca.

Na slici 1. c) je prikazano kako se menja dinamika govornog signala (*dgs*) duž posmatrane veze kroz mrežu. Kao i račvalice, i kompresor i ekspandor dinamike se nalaze u sastavu terminala VF veze. Upravljanje kompresorima i ekspandorima (popularno ime za par kompresor i ekspandor je kompan-dor) vrši centrala na koju je vezan terminal VF veze. Sa slika 1. b) i 1. c) je jasno da se u komutacionim organima polazne i dolazne centrale AC1 i AC3 govorni put komutira dvožično a u tranzitnoj centrali AC2 četvorožično. S druge strane, u komutacionim organima polazne i dolazne centrale AC1 i AC3 govorni signal se komutira u prirodnoj tj. normalnoj (n) dinamici a u komutacionom organu tranzitne centrale AC2 signal se komutira sa smanjenom tj. komprimovanom dinamikom (k).

Komutacioni organ digitalne centrale uvek radi sa jednosmernim digitalnim signalima protoka 64 kb/s tj. četvorožično. Samo komutiranje govornog signala se svodi na razmenu digitalnog sadržaja dolaznog i odlaznog vremenskog kanala (*time slot*). Pošto između odlaznog i dolaznog vremenskog kanala postoji vremenski *pomeraj*, digitalno komutaciono polje unosi malo, fiksno kašnjenje koje se uvek može zanemariti.

Komutacioni organ u paketskoj tehnici se sastoji od upućivanja (*routing*) ili, preciznije, prosleđivanja (*forwarding*). Naime, svaki IP paket sa govornim sadržajem se upućuje do sledeće mrežne tačke na osnovu svoje IP adrese. Upućivanje IP paketa je uvek jednosmerno tj. rad je četvorožični. U TM EPS-a ne postoji kompresija dinamike govornog signala u IP paketu a takođe ni kompresija veličine protoka. Treba reći da se, zbog promenljivog saobraćajnog opterećenja u IP čvoru, prosleđivanje vrši sa promenljivim kašnjenjem, [4].

5. KOMUTIRANJE U ANALOGNOM, DIGITALNOM I IP ČVORU

Pretpostavimo da se u jednom analognom čvoru TM EPS-a stiču sve vrste veza. Pogledajmo kako

se vrši komutacija u analognom komutacionom organu, slika 2. Posmatrajmo samo dolazne telefonske signale. Zamislimo da se u centrali stiču analogna VF veza po dalekovodu, telefonska linija na koju je vezan analogni telefonski aparat, digitalna veza i paketska veza (IP link).

Komutacioni organ prespaja signale u analognom obliku ali sa prirodnom tj. normalnom dinamikom ako su veze mešovite a sa komprimovanom dinamikom ako su veze tranzitne između dve VF veze. Signali sa VF veze, digitalne i paketske veze moraju da se pretvore u analogni oblik.

Pretvarači P1 i P2 signalima sa VF veza vraćaju prirodnu dinamiku govora za veze sa ostalim priključcima a ostavljaju komprimovanu dinamiku za veze između P1 i P2. Pretvarači P1 i P2 prevode četvorožični govorni put VF veze u dvožični za veze koje se završavaju u posmatranoj centrali a za ostale tranzitne veze govorni put ostaje četvorožični.

Pretvarač P3 vrši digitalno - analogno pretvaranje.

Pretvarač P4 pretvara paketizovani govorni signal najpre u digitalni pa zatim u analogni oblik. Prilikom ovog pretvaranja (*depaketizacije*) se ponekad primenjuju postupci nadoknade izgubljenih paketa (PLC, *Packet Loss Concealment*) i izgladivanje kašnjenja (DJ, *Dejittering*), [4].

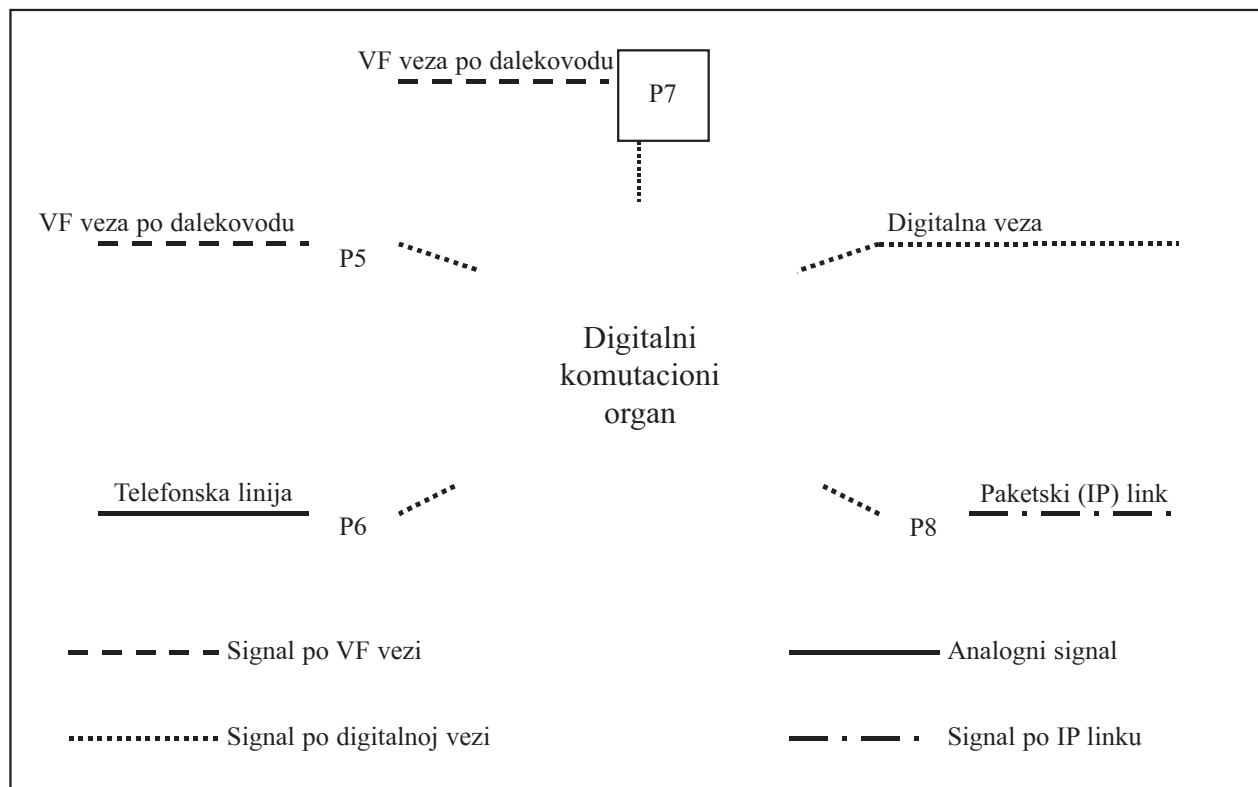
Posmatrajmo sada digitalnu telefonsku centralu u kojoj se prespajanja govornog signala vrše u digitalnom obliku, slika 3. Opet se posmatraju samo dolazni govorni signali. Ovde se signali sa analogne VF veze po dalekovodu, analogne telefonske linije i paketskog linka pretvaračima P5, P6, P7 i P8, respektivno, prevode u standardni digitalni oblik govornog signala sa bitskim protokom 64 kb/s.

Pretvarači P5 i P7 pretvaraju signal sa VF veze u digitalni signal protoka 64 kb/s. Pored toga ovi pretvarači najpre ekspanduju govorne signale sa komprimovanom dinamikom u signale sa normalnom dinamikom u slučaju mešovite telefonske veze između VF veze i nekog drugog priključka (na primer: P5 sa P6 ili P8 ili sa digitalnim linkom). U slučaju tranzitnih veza između VF veza (P5↔P7) govorni signal ostaje komprimovan.

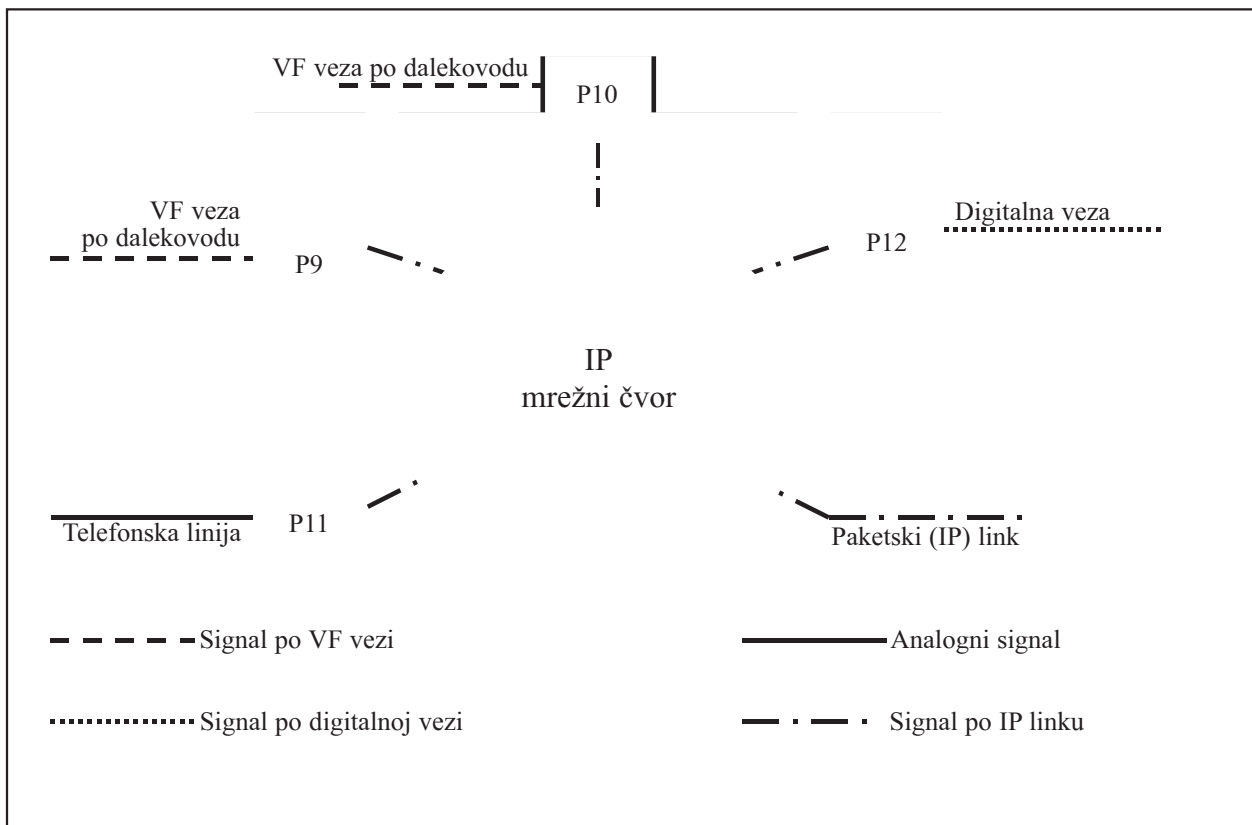
Pretvarač P6 pretvara signal sa telefonske linije u digitalni signal protoka 64 kb/s.

Pretvarač P8 vrši prevođenje paketizovanog govornog signala u standardni digitalni signal protoka 64 kb/s. Pri tome se mogu primeniti postupci PLC i DJ kao u slučaju analogne komutacije.

U hipotetičkom slučaju EPS-ovog komutacionog IP čvora u kome se stiču VF veze po dalekovodu, digitalne veze, paketske veze i korisničke linije situacija bi bila kao na slici 4. Pretvarači P sada imaju sledeće funkcije.



Slika 3. Komutacija u digitalnom čvoru



Slika 4. Komutacija u paketskom čvoru

Pretvarači P9 i P10 pretvaraju analogni signal sa VF veze u digitalni a zatim u paketski oblik. U mešovitim vezama između VF veza i drugih priključaka, na samom početku procesa pretvaranja, govorni signal sa VF veze se ekspanduje da bi dobio prirodnu dinamiku. U slučaju tranzitnih veza između VF veza (P9↔P10) signal ostaje sa komprimovanim dinamikom.

Pretvarač P11 vrši standardno A/D pretvaranje a zatim paketizaciju.

Pretvarač P12 vrši samo paketizaciju.

6. PROBLEM MEŠOVITE EPS-ove MREŽE I REŠENJE

Osnovna i opravdana pretpostavka na osnovu koje se može predvideti nastajanje problema u EPS-ovoj telefonskoj mreži je da će se VF veze po dalekovodu dugo zadržati u eksploataciji i da će u mnogim slučajevima biti vezane na savremene centrale, [3].

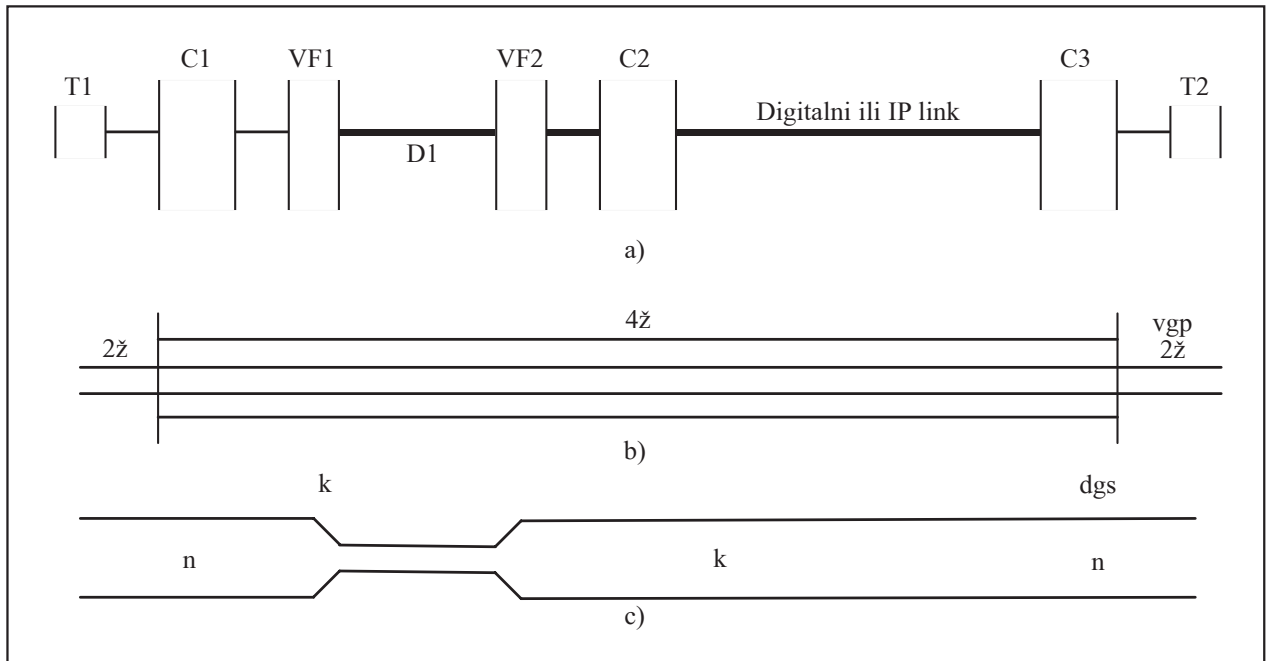
Kao što se iz prethodnih primera vidi, osnovni problem koji se pojavljuje u mešovitoj telefonskoj mreži EPS-a je prenos telefonskog govornog signala sa različitim (komprimovanim i prirodnom) dinamikom. Svi ostali oblici govornog signala postoje u javnoj telefonskoj mreži pa su problemi pretvaranja

iz oblika u oblik već rešeni. Problem se svodi na nemogućnost tranzitiranja svih vrsta veza na isti način.

Rešenje ovog problema se sastoji u tome da telefonska centrala mora da razlikuje mešovite tranzitne veze sa VF vezom po dalekovodu od čistih tranzitnih veza između VF priključaka. U slučaju mešovitih tranzitnih veza u kojima učestvuje VF priključak, centrala mora da uključuje komparator u VF terminalu. U drugom slučaju čistih tranzitnih veza po VF priključcima, komparatori treba da budu isključeni. Ova mogućnost centrale se može nazvati mogućnošću upravljanja komparatorima (*comparator control*).

Problem mešovitog tranzita i njegovo rešenje su prikazani na slikama 5. i 6. Na ovim slikama su prikazane tri savremene centrale (digitalne ili IP) koje koriste, pored ostalih veza, i VF veze po dalekovodima. Na slici 5.a) je prikazana mešovita tranzitna veza u centrali C2 između VF veze po dalekovodu D1 i digitalnog ili IP linka. Vidi se da ova centrala uključuje komparator u VF terminalu VF2. Za čistu tranzitnu VF vezu (slika 6.) centrala C2 neće uključiti kompare.

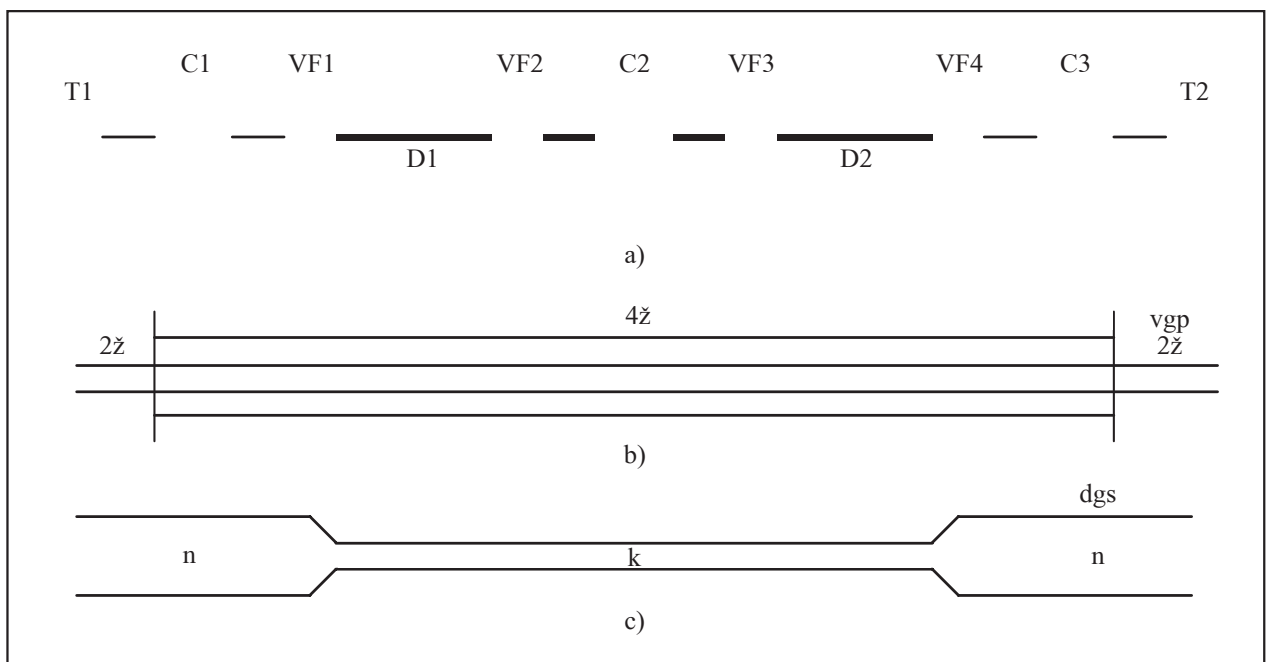
Osnovno pitanje je: može li se problem rešiti centralama opšte namene koje nemaju mogućnost upravljanja komparatorima? Odgovor je: ne na zadovoljavajući način. Naime, postoje samo dva nači-



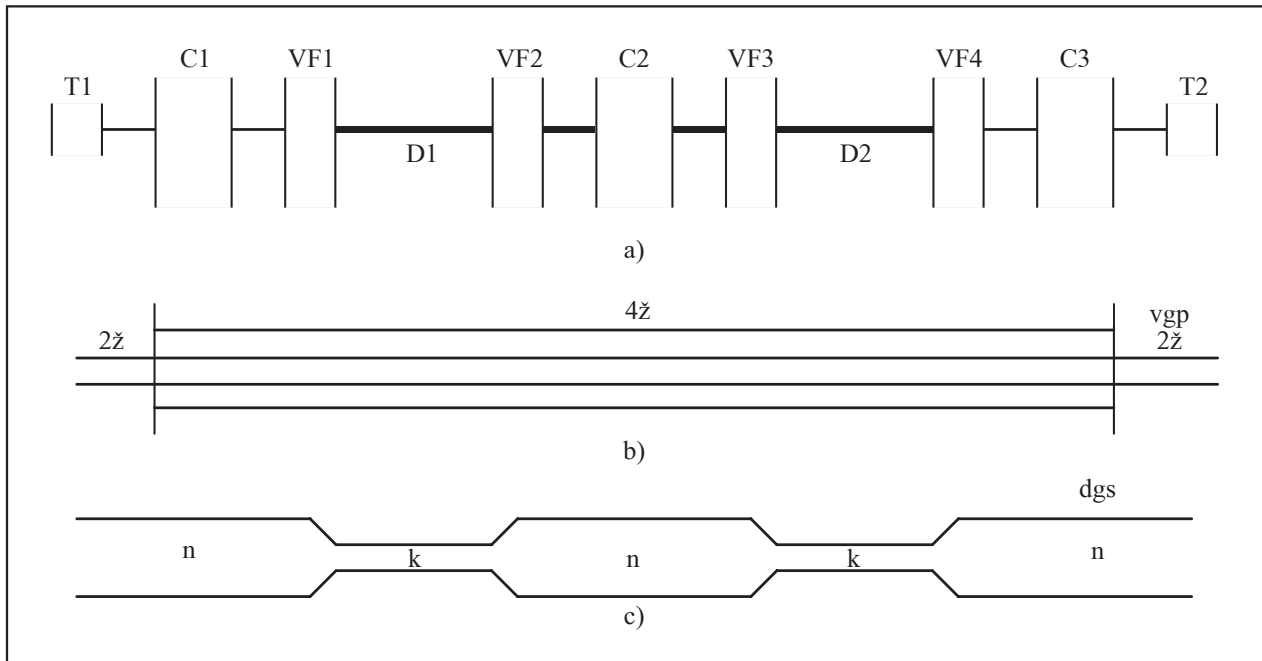
Slika 5. Mešoviti tranzit sa digitalnim linkom

na da se centrale bez mogućnosti upravljanja komandorima iskoriste. Prvi je da se svi komandori u TM EPS-a isključe a drugi je da komandori u svim VF vezama budu uvek uključeni. Prvi način je trivijalan i uveo bi vrlo veliki šum u veze. Drugi način je, takode suprotan tehničkom načelu, zapisanom u tehničkim uslovima, da u jednoj vezi može biti samo jedan par kompresor - ekspandor.

Na slici 7. je prikazano kako se sa uvek uključenim komandorima ostvaruje jedna tranzitna veza. Vidi se da su uključena dva para kompresor - ekspandor. U ovakvom rešenju broj komandora raste sa brojem tranzitnih centrala i deonica veze. Pored ove nepodobnosti pojavljuje se još jedna. Naime, TM EPS-a je mreža sa obilaznim upućivanjem pa bi ovo rešenje moglo da izazove različit broj



Slika 6. Tranzitna veza po VF vezama



Slika 7. Slučaj sa uvek uključenim komparatorima

komparatora u vezi istih sagovornika u različitim razgovorima, što je takođe neprihvatljivo.

7. ZAKLJUČAK

U telefonskoj mreži EPS-a će se još neko vreme koristiti VF veze po dalekovodima. Zbog toga je potrebno pronaći način za ostvarivanje veza savremenim centralama i savremenim sistemima prenosa na takav način da kvalitet prenošenog telefonskog signala bar ne bude lošiji od onoga u postojećoj ili analognoj mreži. To je naročito važno za tzv. mešovite tranzitne veze koje se ostvaruju VF vezama po dalekovodu i digitalnim i paketskim vezama. Rešenja sa isključenim ili stalno uključenim komparatorima u VF vezama bi predstavljala nazadovanje u odnosu na današnje stanje. Telefonske centrale sa mogućnošću upravljanja komparatorima u VF terminalima u potpunosti rešavaju ovaj problem.

8. LITERATURA

- [1] Markov, Ž.: O MEŠOVITOJ KORPORACIJSKOJ TELEFONSKOJ MREŽI, Elektroprivreda, 2/2006.
- [2] Markov, Ž. i Nedić, G.: ŠTA ISDN TEHNIKA MOŽE DA DONESE TELEFONSKOJ MREŽI EPS-a, Elektroprivreda, 4/2005.
- [3] EPS - DIREKCIJA ZA TELEKOMUNIKACIJE: IDEJNI PROJEKAT DIGITALNE TELEFONSKE MREŽE EPS-a, 2004.
- [4] Savović, T., Maksić, D., Banjac, B., Markov, Ž.: PROCENA KVALITETA IP TELEFONSKIH VEZA U BUDUĆOJ TELEFONSKOJ MREŽI EPS-a, Elektroprivreda, 4/2004.

Napomena: Ovaj rad predstavlja rezultate istraživanja na projektu TR6136, koje pomaže Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije.

Rad je primljen u uredništvo 5. 04. 2006. godine



Žarko Markov rođen 1946. godine. Diplomirao 1969, magistrirao 1975. godine i doktorirao 1976. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Radi u Iritelu na razvoju i proizvodnji telefonskih centrala za elektroprivrednu telefonsku mrežu (videti: www.iritel.com/english/products/products.html). Autor nekoliko desetina radova objavljenih u zemlji i inostranstvu, od kojih se petnaestak odnosi na elektroprivrednu telefoniju. Učestvovao u izradi Tehničkih uslova za elektroprivredne telefonske centrale i u projektima digitalne telefonske mreže EPS-a. Objavio nekoliko knjiga i udžbenika. Ima naučno zvanje naučnog sarvetnika i nastavno zvanje vanrednog profesora. Dobitnik nagrade za elektroniku iz fonda „Prof. Branko Raković” za 1997. godinu.

Zajednica jugoslovenske elektroprivrede i Teslini jubileji

The Union of Yugoslav Electric Power Industry and Tesla's Jubilees

Od osnivanja, pre pet decenija, do danas Zajednica jugoslovenske elektroprivrede je ostvarila više raznovrsnih aktivnosti vezanih za negovanje ličnosti i dela Nikole Tesle, koji je dao čovečanstvu epohalne pronalaskе iz oblasti tehničkih nauka, posebno elektrotehnike, koji su ubrzo postali okosnica tehničkotehnološkog napretka i razvoja industrijalizacije u razmerama celog čovečanstva. Posebno su te aktivnosti pojačane donošenjem Statuta Zajednice 1982. godine kojim je utvrđeno da je dan rođenja Nikole Tesle - 10. jul proglašen za Dan elektroprivrede.

Setimo se samo nekih od iniciranih, organizovanih i koordiniranih aktivnosti organa Zajednice povodom Teslinih jubileja.

Povodom obeležavanja 120. godišnjice rođenja Nikole Tesle Izvršni odbor Skupštine Zajednice doneo je preporuku elektroprivrednim organizacijama za proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije da se uključe u ovu proslavu i donesu odluku o materijalnom učešću u izvršenju ovog značajnog programa u iznosu od po 100 dinara po zaposlenom radniku. Program je imao za cilj ne samo da ukaže na naučno-tehničke zasluge Nikole Tesle, već da se, uz revalorizaciju njegove humane i demokratske društvene uloge, ostave trajni materijalni tragovi, koji će poslužiti za sistematsko i organizovano popularisanje stvaralaštva Nikole Tesle i razvijanje njegove pronalazačke misli. U tom programu, pored ostalog, bilo je predviđeno izdavanje neobjavljenih dela Nikole Tesle i smimanje filma o Tesli.

Udruženje elektrotehničkih i elektronskih inženjera iz SAD-a (IEEE), na godišnjoj sesiji, dodeljuje nagradu svetskim eminentnim stručnjacima za

njihove trajne doprinose u teoriji i praksi u oblasti elektrotehnike koji su vezani za pronalazaštvo i realizaciju genijalnih ideja Nikole Tesle. U cilju trajnog popularisanja naučno-istraživačkog i pronalazačkog stvaralaštva Nikole Tesle i van granica naše zemlje, s jedne strane, i mogućnosti korišćenja iskustava i postignutih rezultata naučno-istraživačkog rada stručnjaka ovog Udruženja u jugoslovenskoj elektroprivredi, s druge strane, Izvršni odbor Skupštine Zajednice je, davne 1977. godine, doneo odluku o ustanovljenju saradnje Zajednice sa ovim Udruženjem, pa je u tom smislu odlučeno da se godišnjoj nagradi Udruženja elektrotehničkih i elektronskih inženjera pridružuje i Zajednica, koja nagrađenom dodeljuje plaketu „Nikola Tesla” sa setom zlatnika sa likom Nikole Tesle, koji je izdat povodom 120. godišnjice rođenja Nikole Tesle. Ovu nagradu Zajednica je dodeljivala u periodu od 1978. do 1993. godine i primili su je gospoda:

- *Charles H. Holley (SAD) 1978. godine;*
- *John W. Batchelor (SAD) 1979. godine;*
- *Philip H. Trickey (SAD) 1980. godine;*
- *Dean B. Harington (SAD) 1981. godine;*
- *Sakae Yamamura (Japan) 1982. godine;*
- *Herbert H. Wodson (SAD) 1984. godine;*
- *Eugene C. Whitney (SAD) 1985. godine;*
- *Eric R. Laithwaite (SAD) 1986. godine;*
- *J. Coleman White (SAD) 1987. godine;*
- *Edward I. King (SAD) 1988. godine;*
- *Dietrich R. Lambrecht (Zapadna Nemačka) 1989. godine;*
- *Gordon E. Slemon (Kanada) 1990. godine;*
- *Michel E. Poloujadoffe (Francuska) 1991. godine;*

– **Thomas H. Barton (Kanada) 1992. godine;**
– **Dr Madabushi V. K. Chari (SAD) 1993. godine;**
uz napomenu da 1983. godine nagrada nije dodeljena.

Dana 28. juna 1983. godine u holu poslovne zgrade Zajednice u Beogradu, Balkanska 13 održan je svečani skup gostiju i članova Izvršnog odbora Skupštine Zajednice na kome je o životu i radu Nikole Tesle govorio akademik prof. dr Pavle Savić i tom prilikom otkrio bareljef sa likom Nikole Tesle izrađen u mermeru, čiji je autor Dragoljub Dimitrijević, akademski vajar iz Beograda (slika).

Zajednica sa elektroprivredama republika i autonomnih pokrajina, sagledavajući svoje mesto u elektroenergetskom sistemu Unije za proizvodnju i prenos električne energije (UCPTE), kao i buduće razvojne potrebe naše zemlje u elektroenergetici, pristupila je studijama i realizaciji izgradnje elektro-prenosne mreže naizmeničnog napona 400 kV.

Po završetku izgradnje elektro-prenosne mreže, u toku 1985. godine, Skupština Zajednice je odlučila da taj značajni elektroenergetski objekat nosi ime našeg velikana Nikole Tesle, koji je dao osnove polifaznog (trofaznog) sistema. Izgradnjom prenosne mreže koju su činili 3 631 km elektroprenosne mreže visokog napona i 15 500 MVA snage transformatorskih stanica, stvoren je snažan jedinstven tehničko-tehnološki sistem i omogućena nesmetana i sigurna razmena električne energije kako između područja u našoj zemlji, tako i sa susednim evropskim elektroenergetskim sistemima (UCPTE i OES).

Izgrađena elektroprenosna mreža 400 kV je omogućila da se u jugoslovenski elektroenergetski sistem mogu uključiti savremeni ekonomični elektroenergetski izvori velikih jediničnih snaga. Jedan od takvih objekata su termoelektrane u Obrenovcu sa dva bloka (po 620 MW). TE u Obrenovcu koriste kolubarski lignit i predstavljaju najveće izgrađene jedinice na lignit kao nisko kalorično gorivo, po prvi put, u Evropi. Po izgradnji i puštanju u eksploataciju TE su u čast Nikole Tesle dobile ime Termoe-

lektrane „Nikola Tesla”, na inicijativu „Elektroprivrede Srbije”.

Povodom Dana elektroprivrede, 1984. godine, u Zajednici je ustanovljena plaketa „Nikola Tesla” kao znak posebnog priznanja elektroprivrednim organizacijama i pojedincima za izuzetan doprinos u radu i razvoju jugoslovenske elektroprivrede. Ove plakete su organi Zajednice dodeljivali do 1991. godine.

Takođe je preporučeno elektroprivrednim organizacijama u okviru Zajednice da se uključe u Fond „Nikola Tesla” koji je namenjen za posticanje stvaralaštva u oblasti elektrotehnike.

Povodom 130. godišnjice od rođenja Nikole Tesle Zajednica je otkrila spomen ploču sa likom Nikole Tesle na 85. godišnjem ener-

getskom objektu HE na Đetinji u Užicu. HE naizmenične struje

je izgrađena uz veliko angažovanje naših stručnjaka Vladimira Pećinara,

Aćima Stevovića i Đorđa Stanojevića sa ciljem da snagu Đetine iskoriste za proizvodnju električne energije.

Oprema je kupljena u Beču, prevezena železnicom do Kragujevca, a volovskim kolima sa tri zaprege do Užica.

U zgradi centrale montirane su dve Francisove turbine koje su pokretale dva Simensova trofazna generatora naizmenične struje, učestanosti 50 Hz, svaki snage po 32,5 kW. Ovo je prvo izgrađeno postrojenje ove vrste u Srbiji koje je radilo na istim principima kao i HE na Nijagarinim vodopadima koja je izgrađena samo četiri godine ranije sa tri polifazna generatora. HE na Đetinji je radila nepun vek, a sada je ponovo proradila, pa „još uvek sija viđelo iz rijeke”, kako su govorili stari Užičani.

Povodom 130. godišnjice rođenja Nikole Tesle Sabor SR Hrvatske i Jugoslovenska akademija znanosti i umetnosti iz Zagreba uz učešće Zajednice finansirali su uređenje Spomen područja Nikole Tesle u Smiljanu – obnovu kuće u kojoj je rođen Nikola Tesla i crkve Sv. apostola Petra i Pavla u kojoj je bio sveštenik Milutin Tesla, otac Nikole Tesle, kao i drugih pratećih objekata. Zajednica je bila inicijator da



Zajednica jugoslovenskih PTT izgradi savremenu poštu u Smiljanu. Na ovaj način učinjen je veliki doprinos da se rodni dom i crkva ostave u nasleđe budućim generacijama elektroprivrednika i svim ljubiteljima i poklonicima imena i dela Nikole Tesle.

U toku 1983. godine Muzej Nikole Tesle u Beogradu pokrenuo je inicijativu za izadavanje kapitalnih dela Nikole Tesle na srpskohrvatskom jeziku. Zajednica je među prvima prihvatila ovu inicijativu. Međutim, do realizacije nije došlo, pa je Skupština Zajednice, u toku 1984. godine, preporučila elektroprivredama republika i autonomnih pokrajina da budu sponzori i uzmu učešća u finansiranju prevođenja i izadavanja kapitalnih dela Nikole Tesle. Kako je sa obezbeđenjem finansijskih sredstava bilo problema, to je Skupština Zajednice u toku 1988. godine odobrila sredstva za štampanje samo prve knjige kapitalnih dela Nikole Tesle.

Zajednica je učestvovala u finansiranju i drugih aktivnosti Muzeja Nikole Tesle u Beogradu, radi trajnog očuvanja i korišćenja neprocenljivog blaga Teslinih izuma koji se čuvaju u ovoj ustanovi, učestvovala u realizaciji programa Fonda „Nikola Tesla” u cilju stimulisanja mladih kadrova u stvaralaštvu i primeni ideja velikog naučnika u oblasti energetike, učestvovala u finansiranju i organizovanju simpozijuma „Nikola Tesla juče, danas i sutra” koji je održan 1981. godine, pružila finansijsku podršku aktivnostima Jugoslovenskog saveza društava za širenje naučnih saznanja „Nikola Tesla”, kao i finansirala štampanje knjige „Nikola Tesla - radovi u oblasti energetike” koju su pripremili prof. Radoslav Horvat i Miloš Prodanović, dipl. inženjer, a koju su izdali Muzej Nikole Tesle i Naučna knjiga iz Beograda.

Rad je primljen u uredništvo 20. 07. 2006. godine



***Miloš Prodanović** je rođen 13. januara 1930. godine u selu Pranjani, S.O. Gornji Milanovac. Gimnaziju učio u Gornjem Milanovcu i Čačku. Septembra 1950. godine upisao Elektrotehnički fakultet u Beogradu, diplomirao 18. februara 1956. godine.*

Radio u Zenici (9 godina) i Tuzli (7 godina) na izgradnji i eksploataciji termoelektrana. Kratko vreme radio i u Obrenovcu TENT-A na puštanju u pogon termojedinica 200 MW.

Godine 1972. primljen u Zajednicu jugoslovenske elektroprivrede za pomoćnika generalnog direktora Zajednice, za tehničko-energetska pitanja sistema. Na ovu dužnost je biran još tri puta po četiri godine. U penziju je otišao po ličnoj želji jula 1992. godine. U svom radnom veku, u skladu sa poslovima i zadacima radnog mesta, učestvovao: u stručnim revizijama projekata za izgradnju većeg broja termo blokova; na izradi i reviziji studije o izgradnji i planiranju razvoja elektroenergetskog sistema Jugoslavije (rudnici uglja, elektrane, prenos i distribucija električne energije); u stručnim komisijama ad hoc formiranim na rešavanju i otklanjanju većih kvarova.



***Momčilo Gojić** je rođen 1941. godine u Čačku gde je završio je gimnaziju 1960. godine, a diplomirao je na Pravnom fakultetu u Beogradu 1964. godine. Od 1965. do 1978. godine radio je u „Beogradskim elektranama”, a od 1978. godine i dalje radi u Zajednici jugoslovenske elektroprivrede.*

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**



Elektroprivreda

Elektroprivreda

Ministarstvo elektroprivrede FNRJ

BILTEN

Biro-a za unapredjenje proizvodnje

God. I br. 1

Izdavač: Ministarstvo elektroprivrede FNRJ – Biro za unapredjenje proizvodnje.

Uredjuje redakcioni odbor, odgovorni urednik: **Ing. Herman Mates.**

Uredništvo: Beograd, Bulevar Vojvode MIŠIĆa 41, tel. 50-831, lok. 153.

Oktober 1948 god.

ELEKTROPRIVREDA