



Elektroprivreda

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

Godina LV April-Jun Broj 2
Year LV April-June No. 2

Sadržaj Strana Page Content

	Radimir Naumov		
	UMESTO UVODA	3	EDITORIAL
	Dorđe Stojić, Zoran Čirić i Ilija Stevanović		
DIGITALNI AUTOMATSKI REGULATOR POBUDE SINHRONOG GENERATORA	5		SYNCHRONOUS GENERATOR AUTOMATIC EXCITATION REGULATOR
Radovan Radosavljević, Zoran Radaković, Vladimir Milosavljević, Milorad Damjanović, Petar Nikolić, Aleksandar Popović i Branko Milosavljević			
ISPITIVANJE BLOKA TRANSFORMATORA SNAGE 380 MVA NA HE „ĐERDAP I” U CILJU POVEĆANJA SNAGE	11		TESTING OF 380 MVA BLOCK TRANSFORMER AT HPP 'DJERDAP I' FOR THE PURPOSE OF INCREASING CAPACITY
<i>II deo – merenja pri ispitivanjima u pogonskim uslovima –</i>			<i>PART II -measuring during testing under operating conditions-</i>
Saša Stojković i Mihailo Popović			
UPRAVLJANJE ŽIVOTNIM VEKOM PREKIDAČA	20		CIRCUIT BREAKER LIFE MANAGEMENT
Jasna Dragosavac i Novica Selaković			
AUTOMATSKI REGULATOR POBUDE SINHRONOG GENERATORA SA BUCK IZLAZNIM STEPENOM	27		SYNCHRONOUS GENERATOR AUTOMATIC EXCITATION REGULATOR WITH BUCK CONVERSION
Dragan Manojlović, Olga Cvetković i Snežana Nikolić-Mandić			
DEGRADACIJA TRANSFORMATORSKOG ULJA NA BAZI POLIHLOROVANIH BIFENILA BEZ NARUŠAVANJA POSTOJEĆEG KVALITETA ŽIVOTNE SREDINE	35		DEGRADATION OF TRANSFORMER OIL ON THE BASIS OF POLYCHLORINATED BIFENYLS WITHOUT DEGRADING THE EXISTING QUALITY OF THE ENVIRONMENT
Dragan Tasić i Miodrag Stojanović			
UTICAJ TERMIČKE NEHOMOGENOSTI ZEMLJIŠTA NA STRUJNU OPTERETLJIVOST KABLOVA	41		IMPACT OF THERMAL NON-HOMOGENEITY ON CABLE AMPACITY
Zoran Vučković, Dušanka Jašović i Snežana Stupar			
OBNAVLJANJE ANTIKOROZIJNE ZAŠTITE ČELIČNO-REŠETKASTE KONSTRUKCIJE DALEKOVODNIH STUBOVA	47		REFURBISHMENT OF CORROSION PROTECTION ON TRANSMISSION LINE TOWER STEEL LATTICE STRUCTURE
Zlatan Stojković, Amir Miri i Goran Mitrić			
PRORAČUN PORASTA POTENCIJALA METALNOG OKLOPA GASOM SF₆ IZOLOVANOG POSTROJENJA IZAZVANOG SKOPNIM OPERACIJAMA RASTAVLJAČEM	54		ESTIMATION OF METAL CLAD GAS SF₆ INSULATED FACILITY POTENTIAL PICKUP CAUSED BY SWITCHING DISCONNECTOR OPERATIONS
Desimir Trijić, Gorko Dotlić i Božidar Rener			
PODEŠAVANJE REZISTIVNOG DOSEGA NUMERIČKIH DISTANTNIH ZAŠTITA	60		NUMERIC DISTANCE PROTECTION RESISTIVE RANGE ADJUSTMENT
Miloš Stojić, Goran Jakupović, Jasmina Trhulj i Ninel Čukalevski			
INTEGRACIJA PAKETA ZA ODREĐIVANJE TOPOLOGIJE I ESTIMACIJU STANJA U OKVIRU REAL-TIME SCADA/EMS SISTEMA	68		INTEGRATION OF NT/SE PACKAGE WITHIN THE REAL-TIME SCADA/EMS SYSTEM
Miroslav Vuković, Predrag Mikša i Zoran Nešovanović			
UKLAPANJE HE BUK BIJELA I HE SRBINJE U ELEKTROENERGETSKI SISTEM	76		FITTING HPP BUK BIJELA AND HPP SRBINJE INTO THE ELECTRIC POWER SYSTEM
Emilija Radojičić-Turković i Maja S. Turković			
ELEKTROENERGETSKI SISTEMI 2020. GODINE – POGLED U BUDUĆNOST	83		ELECTRIC POWER SYSTEMS IN 2020 - VISION OF THE FUTURE
Tomislav Sajdl, Goran Jakupović, Ninel Čukalevski, Soyjetka Krstonjivić, Suzana Cvetičanin, Milorad Pavlović i Zoran Nedeljković			
APLIKACIJE ZA PRORAČUN MOGUĆNOSTI OPTEREĆENJA TRANSFORMATORA I DALEKOVODA	92		APPLICATIONS FOR CALCULATIONS OF POSSIBLE TRANSFORMER AND TRANSMISSION LINE LOAD

IZDAVAČ:
PUBLISHER:

ZAJEDNICA JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE
UNION OF YUGOSLAV ELECTRIC POWER INDUSTRY

11 000 Beograd, Balkanska 13

Telefon: 686-633, 643-823, 688-092, 687-199 (centrala)

Telefaks: 686-398

www.eps.co.yu; www.epcg.cg.yu; E-mail: jugel@sezampro.yu

DIREKTOR I GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK
DIRECTOR AND CHIEF EDITOR

Branislav A. Bošković, dipl. ing.

IZDAVAČKI SAVET
PUBLISHING COUNCIL

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

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

Dr Slobodan Ružić, dipl. ing., član, Ministarstvo za energetiku i rudarstvo u Vladi Republike Srbije, Beograd;

Radomir Naumov, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd;

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

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

REDAKCIONI ODBOR

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mr Milan Gavrilović, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

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

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

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

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

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

Aleksandar Vlajčić, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

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

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

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

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

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

TEHNIČKI UREDNIK
TECHNICAL EDITOR

Jovo Todorović dipl. teh.

LEKTOR

LINGUISTIC REVIEW

Lela Lončar, dipl. filolog

TEHNIČKI CRTAČ

MAPS AND GRAPHICS

Milanka Pejović,

teh. crtač

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Časopis „Elektroprivreda” se izdaje u 2002. godini uz finansijsku pomoć Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije

The „Elektroprivreda” journal is published in 2002 with financial support of Ministry for Science, Technology and Development of the Republic of Serbia

Štampa: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

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

Tiraž: 1 000 primeraka

Circulation: 1,000 copies



Poštovane kolege,

Na početku 21. veka, elektroprivredna delatnost se širom sveta suočila sa dramatičnim promenama, uslovljenim, pre svega, prihvatanjem koncepta održivog razvoja energetike, koji podrazumeva korišćenje prirodnih dobara na način koji će omogućiti očuvanje energetske resursa i životne sredine za buduće generacije.

U uslovima porasta potrošnje električne energije i ograničenih resursa za njenu proizvodnju, značajno su potencirani zahtevi za: povećanjem energetske efikasnosti u proizvodnji, potrošnji i distribuciji električne energije; povećanjem pouzdanosti napajanja potrošača; adekvatnom zaštitom čovekove sredine i ukidanjem monopola u ovom sektoru.

Ovi zahtevi su doveli do reformi u elektroenergetskom sektoru, tako da danas nema zemlje u svetu gde nisu u toku procesi restrukturisanja energetske sektora, novog organizovanja energetske kompanija, stvaranja uslova za liberalno tržište električnom energijom, privatizacije, donošenja nove zakonske regulative. Sa sigurnošću se može reći da su ovo najsloženiji reformski procesi za svaku državu, posebno države u tranziciji, s obzirom na potrebno znanje, iskustvo, dužinu trajanja i finansijska sredstva.

Promene se ne događaju spontano, moraju se osmisliti, modelovati, podsticati, kontrolisati. Dakle, da bi se izgradilo organizovano i konkurentno tržište, potreban je veliki intelektualni, stručni i društveni napor.

Na niz otvorenih pitanja, počev od tehničkih (da li će nova rešenja bazirana na uvođenju savremenih tehnologija moći da obezbede zahtevane performanse elektroenergetskih sistema uz prihvatljive troškove), do političkih (da li će međunarodna kontrola u decentralizovanim sistemima biti politički prihvatljiva), još se ne znaju odgovori.

Dear colleagues,

At the beginning of the 21st century, the electric power industry has faced dramatic changes worldwide, primarily resulting from the acceptance of the concept of sustainable energy development, which assumes the utilization of natural resources in a way which would enable preservation of energy resources and environment for the generations to come.

Under conditions of growing electric energy demand and limited resources for its production, there is a significant demand for: increased energy efficiency in production, consumption and distribution of electrical energy, by increased reliability of consumer supply, adequate environmental protection and suppression of monopoly in this sector.

These demands have led to reforms in the electric power sector, so that there is no country in the world today where processes of energy sector restructuring, new organizing of energy companies, providing conditions for a liberal electricity market, privatization and adoption of new legislation are not taking place. It is strongly believed that this reform-oriented process is extremely complex for every country, particularly for countries in transition, with respect to required know-how, experience, duration and financial resources.

Changes do not occur spontaneously; they must be envisaged, modeled, encouraged and controlled. Therefore, in order to develop an organized and competitive market, great intellectual, professional and social efforts are needed.

There are still no answers to numerous open issues, starting from technical issues (e.g. will new solutions based on the introduction of advanced technologies be able to provide required performances of the electric power systems under acceptable expenses), to political issues (will the international control in decentralized system be politically acceptable).

CIGRE- Međunarodna organizacija za velike električne mreže, po tradiciji je i u ovom, za prognozu nezahvalnom momentu, preuzela ulogu lidera. U tu svrhu je na prošlogodišnjem zasjedanju u Parizu došlo do nove organizacije i prenumeracije tehničkih studijskih komiteta, čiji je sadržaj rada prilagođen upravo aktuelnoj problematici u elektroenergetskom sektoru. Osnovani su posebni komiteti iz oblasti tržišta električnom energijom, distributivnih sistema i distribuirane proizvodnje i zaštite životne sredine.

*U Banji Vrućici kraj Teslića (Republika Srpska), u periodu od 25. do 30. maja ove godine je održano 26. **Savetovanje elektroenergetičara iz Srbije, Crne Gore i Republike Srpske**, a u organizaciji **JUKO CIGRE**, jednog od 53 nacionalna komiteta Međunarodnog saveta za velike **električne mreže**, CIGRE.*

Generalni pokrovitelj i domaćin Savetovanja bila je Elektroprivreda Republike Srpske, a veliki sponzori su bili Elektroprivreda Srbije i Elektroprivreda Crne Gore.

*Na **Savetovanju** je razmatrano 184 referata u 15 studijskih grupa, a održan je i okrugli sto o stanju i perspektivama razvoja elektroprivrede Republike Srpske.*

*Uz plodnu razmenu mišljenja, kako na **savetovanjima stručnih grupa**, tako i na sednicama studijskih komiteta, doneti su zaključci, određene su preferencijalne teme za **naredno savetovanje JUKO CIGRE** i izabrani su najzapaženiji referati.*

Ocenjujući postignute rezultate, može da se konstatuje da je nivo Savetovanja bio visok i u sadržajnom i u organizacionom pogledu, i da će doprijeti predstojećoj reformi elektroenergetskog sektora u nas.

*Na redovnoj Skupštini **JUKO CIGRE**, usvojeni su nova organizacija i sadržaj rada studijskih komiteta, a u skladu sa organizacijom i radom studijskih komiteta usvojenim na 39. **savetovanju CIGRE** u Parizu, 2002. godine.*

Nova organizacija studijskih komiteta, sa kratkim pregledom rada, data je u priloženoj tabeli na strani 100.

*Na kraju moram da izrazim zadovoljstvo što je Redakcioni odbor našeg uglednog stručnog časopisa „Elektroprivreda”, i ovom prilikom, odlučio da u posebnom broju štampa sve najzapaženije referate **26. savetovanja JUKO CIGRE**, koji time postaju dostupni većem broju stručnjaka iz elektroprivredne delatnosti. Istovremeno je to znak priznanja autora referata.*

Predsednik JUKO CIGRE
Radomir Naumov

*CIGRE - **International Council on Large Electric Systems**, has taken its traditional role of leader even at this moment of uncertain forecast. For that purpose, a new organization of Technical Study Committees was set up at last year's session in Paris and they were renumbered and their contents were adapted to the current problems in the electric power sector. Special committees were set up in the area of electrical energy markets, distribution systems and distributed generation and environmental protection.*

*The 26th **JUKO CIGRE SESSION** was held at the Vrucica Spa near Teslic (the Republic of Srpska), from 25th to 30th May, inst., under the organization of **JUKO CIGRE**, one of the 53 national committees of the International Council on **Large Electric Systems**, CIGRE.*

The general sponsor and host of the Session was the Electric Power Industry of the Republic of Srpska, and large sponsors were the Electric Power Industry of Serbia and the Electric Power Industry of Montenegro.

*At the **Session**, 184 papers in 15 study groups were presented, and there was a round table on the status and prospects of development of the Electric Power Industry of the Republic of Srpska.*

*After a fruitful exchange of opinion, both at **all the Group Meetings**, as well as at the Study Committee Meetings, conclusions were drawn, preferential topics were chosen for the following **2005 JUKO CIGRE SESSION** and the most prominent papers were selected.*

On the basis of achieved results, it may be concluded that the Session level was high, in terms of the content as well as the organization, and that it will contribute to the forthcoming reform of the electric power sector in our country.

*At the regular **JUKO CIGRE** Assembly, the new organization and contents of work of the study committees were adopted, in accordance with the organization and work of the study committees adopted at the 39th **CIGRE SESSION** in Paris in 2002.*

The new organization of study committees, with a brief review of work is given in the attached table on page 100.

*At the end, I must say that it is a pleasure to note that the Editorial Board of our renowned journal **ELEKTROPRIVREDA** once again decided to publish a special issue dedicated to the most prominent papers from the **26th JUKO CIGRE SESSION**, in order that they should be available to a larger number of experts from the electric power industry, thereby simultaneously giving a tribute to the authors of the papers.*

Chairman of JUKO CIGRE
Radomir Naumo

*Dorđe Stojić,
Zoran Ćirić i Ilija Stevanović*

Digitalni automatski regulator pobude sinhronog generatora

Stručni rad
UDK: 621.3.078; 621.316.7; 621.313.322

Rezime:

U radu je dat prikaz digitalnog regulatora statičke pobude sinhronih generatora u HE "Bistrica" - Limske HE. Opisane su osnovne upravljačke funkcije regulatora zajedno sa odgovarajućom strukturom upravljačke elektronike. U radu su dati i odzivi upravljačkih veličina, snimljeni na sinhronom generatoru - objektu upravljanja.

Ključne reči: statička pobuda, digitalni regulator, prikaz realizacije, snimci odziva

Abstract:

SYNCHRONOUS GENERATOR AUTOMATIC EXCITATION REGULATOR

The paper deals with synchronous generator automatic static excitation regulator at HPP Bistrica - Limske HPPs. Description is given of the basic control functions of the regulator along with the corresponding structure of control electronics. The paper also deals with responses of control values recorded on the synchronous generator - control object.

Key words: static excitation, digital regulator, implementation review, response recordings

1. UVOD

Primena mikroprocesorske tehnologije u realizaciji uređaja za upravljanje i nadzor objekata u elektroprivredi je pojava koja poslednjih godina postaje značajnije primetna. Prve primene procesorske tehnologije desile su se u realizaciji sistema za nadzor i merenje veličina agregata u hidro i termo postrojenjima. Priroda ovih uređaja, koja se sastoji u blažim zahtevima za neprekidnosti rada i raspoloživosti sistema, omogućile su primenu sistema baziranih na evolucijama standardnih računarskih konfiguracija, prilagođenih primeni u industrijskim uslovima eksploatacije. Složeni operativni sistemi, primenom mo-

dernih komunikacionih protokola, omogućavali su realizaciju distribuiranih sistema za praćenje rada postrojenja, ali su, takođe, imali ograničenu brzinu odziva. Složenost stukture (hardverske i softverske) ograničavala je primenu ovih sistema u uređajima primarne regulacije, prevashodno zbog ograničene raspoloživosti sistema i ograničene brzine aritmetičko-logičkih operacija kontrolnih modula.

Realizacija mikroprocesorskih sistema za upravljanje u primarnim krugovima regulacije agregata zahteva razvoj specijalizovanog hardvera, u najvećoj meri realizovanog na platformama bez operativnih sistema. U radu je, upravo i diskutovan problem koncepta hardvera i softvera specijalizovanih siste-

*Mr Dorđe Stojić, dipl. ing. Zoran Ćirić, dipl. ing. mr Ilija Stevanović
– Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a*

ma za upravljanje u primarnim krugovima regulacije agregata, sa posebnim osvrtom na tehničke zahteve koje je neophodno ispuniti. Takođe, naglašene su prednosti koje sa sobom nosi primena mikroprocesorske tehnologije u upravljačkim sistemima, posebno u slučaju primene u elektroprivrednim objektima.

Rad obrazlaže način na koji se prethodno navedeni aspekti projektovanja hardvera specijalizovane namene reflektuju u konkretnom slučaju - projektovanju digitalnog regulatora napona sinhronog generatora. Prikazana je struktura upravljačke elektronike i upravljačkog programa, sa opisom funkcija karakterističnih modula. U poslednjem poglavlju rada, dati su snimci odziva karakterističnih veličina pobudnog sistema.

U radu je opisana struktura naponskog regulatora sinhronih generatora u HE „Bistrica”, Limske HE. Primenjena je statička pobuda agregata, sa upravljačkim delom realizovanim u mikroprocesorskoj tehnologiji.

2. IZBOR KONCEPTA DIGITALNOG REGULATORA NAPONA

Osnovna karakteristika elektronskih regulatora napona sinhronog generatora sastoji se u tome da predstavljaju sintezu energetskog pretvarača, kondicionera mernih signala, brzih regulatorskih funkcija, brzih zaštitnih funkcija i funkcija automata za upravljanje sekvencom rada uređaja.

U dosadašnjoj inženjerskoj praksi sreću se četiri koncepta elektronskih regulatora napona sinhronog generatora:

a) kompletna analogna realizacija,

b) analogno-digitalni hibrid u kome su sve brze upravljačke, merne i zaštitne funkcije realizovane analogno, dok su funkcije sekventnog automata, ručnog i daljinskog komandovanja realizovane korišćenjem mikroprocesorskog modula,

c) realizacija u kojoj su navedene upravljačke funkcije objedinjene u jednom mikroprocesorskom modulu i

d) realizacija u kojoj su svaku od navedenih funkcija (regulator, kondicioner mernih signala, zaštite i limiteri, sekventni automat, komandovanje) realizovani sa zasebnim mikroprocesorskim modulima.

Analogne realizacije elektronskih regulatora napona su najrasprostranjenije u elektranama, i one svojim vrlo visokim kvalitetom rada postavljaju standarde za sve naknadne tehnološke evolucije uređaja. Razvojem tehnologije, pojavila se mogućnost da se sa manjim brojem elektronskih komponenata, primenom mikroprocesorske tehnologije, realizuje regulator napona agregata približnih karakteristika analognoj realizaciji. Drugi stepen u razvoju regula-

tora napona agregata predstavljaju analogno-digitalni hibridi, u kojima je zadržano kompletno analogno jezgro uređaja, dok su pomoćne upravljačke funkcije (sekventni automat, ručno i daljinsko komandovanje, itd.) realizovane u mikroprocesorskoj tehnologiji.

Treći koncept realizacije regulatora napona agregata sastoji se u primeni specijalizovanog mikroprocesorskog modula sa objedinjenim funkcijama regulacije napona, zaštite limitera i upravljanja sekvencom rada uređaja.

Četvrti koncept predstavlja realizaciju uređaja u kojoj je svaka celina realizovana sa zasebnim procesorskim modulom (zasebni modul regulatora, zasebni modul transformatorskih zaštita i zaštita pobude, zasebni modul sekventnog automata, ručnog i daljinskog komandovanja, itd.). Ovakve realizacije karakteristične su za digitalne regulatore napona u serijskoj proizvodnji, u kojoj je koncept uređaja prilagođen modularnoj organizaciji procesa razvoja elektronike, razvoja softvera regulatora i razvoja energetike.

U uređaju koji je predmet ovog rada, primenjena je treća koncepcija projektovanja regulatora napona agregata. U nastavku rada opisane su dodatne prednosti, koje tokom razvoja i eksploatacije uređaja pruža mikroprocesorska tehnologija u odnosu na prethodne analogne realizacije.

3. PREDNOSTI I MANE PRIMENE MIKROPROCESORSKE TEHNOLOGIJE U REGULATORU NAPONA

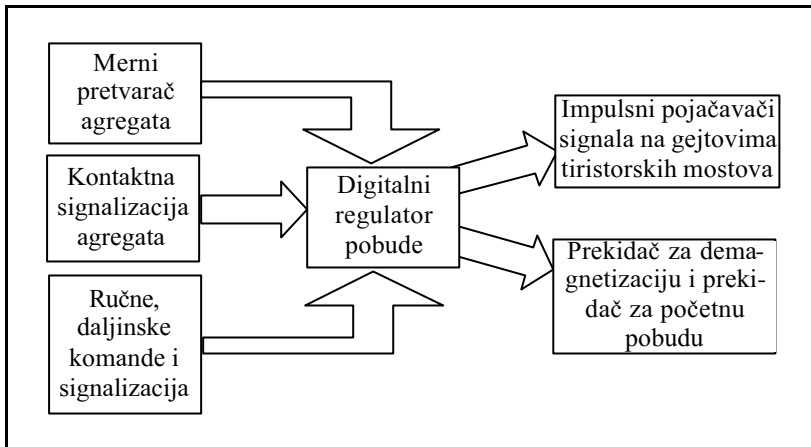
Osnovna prednost mikroprocesorske realizacije u odnosu na analognu sastoji se u mogućnosti objedinjavanja upravljačkih funkcija u jedinstvenu hardversko-softversku celinu. Realizacija upravljačkih funkcija u jedinstvenom mikroprocesorskom modulu omogućava:

a) olakšanu kontrolu rada i praćenje karakterističnih veličina regulatora,

b) olakšane modifikacije strukture upravljačkog algoritma i vrednosti upravljačkih parametara koje ne zahtevaju promene u strukturi elektronike (što u analognoj realizaciji nije bio slučaj - svaka izmena strukture i vrednosti parametara zahtevala je izmenu električne šeme uređaja),

c) smanjivanje broja komponenata neophodnih za realizaciju regulatora (broj kartica digitalnog regulatora manji je u poređenju sa analognim regulatorom), čime je povećana pouzdanost rada uređaja,

d) zbog smanjenog broja komponenata i mogućnosti direktne komunikacije sa uređajem znatno su uprošćene procedure za servis i održavanje (olakšano je detektovanje kvara, olakšana je zamena delova, smanjen je broj rezervnih delova, itd.), i



Slika 1. Okruženje digitalnog regulatora pobude

e) smanjuje se vreme proizvodnje, puštanja u rad i servisa uređaja, što je od posebnog značaja za korisnika.

Pored osnovnih, postoje i dodatne prednosti, koje se prevashodno odnose na dodatni kvalitet u vezi sa komandovanjem i nadzorom rada uređaja. Naime, savremeni komunikacioni protokoli omogućavaju povezivanje digitalnog regulatora sa nadređenim, daljinskim sistemima za upravljanje i nadzor (realizacija udaljenih terminala za praćenje i komandovanje). Takođe, savremene komunikacione tehnologije omogućavaju međusobno povezivanje više regulatora, čime je moguće realizovati i složenije upravljačke algoritme (npr. grupna regulacija, itd.).

Nedostatak mikroprocesorske tehnologije u odnosu na analognu sastoji se u ograničenoj brzini odziva i tačnosti regulacije prve u odnosu na drugu. Primena modernijih mikroprocesorskih komponenata, koje omogućavaju brže numeričke operacije i veću tačnost u merenju signala, sve više smanjuje navedenu prednost analogne tehnologije u odnosu na digitalnu.

4. STRUKTURA DIGITALNOG REGULATORA

U uređaju koji je predmet razmatranja, digitalni regulator napona je deo statičkog sistema pobude sinhronog generatora nominalne aktivne snage od 54 MVA. Na slici 1 prikazana je struktura dela sistema pobude, vezanog za digitalni regulator pobude.

Na slici 1 pokazano je okruženje digitalnog regulatora pobude. Ulazne veličine regulatora podeljene su u dve grupe:

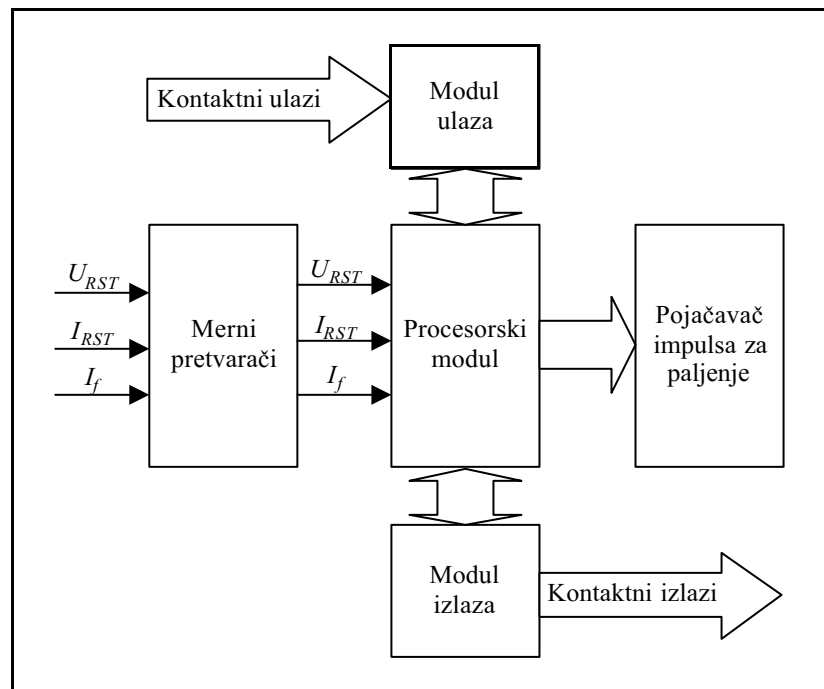
- a) analogni, merni signali i
- b) kontaktne ulazi i izlazi. Od mernih signala regulator koristi:
 - napon statora,
 - struju statora,
 - struju rotora,
 - napon sinhronizacije za upravljanje radom tiristorskih mostova.

Od kontaktnih ulaza, regulator očitava sva uklopna stanja u pogonu neophodna za upravljanje sekvencom rada sistema pobude.

Takođe, regulator očitava i kontakte neophodne za realizaciju zaštitnih funkcija pobudnog sistema. Izlaze regulatora pobude čine:

- signali za upravljanje tiristorskim mostovima,
- kontakt za upravljanje prekidačem za demagnetizaciju,
- kontakt za upravljanje prekidačem za početnu pobudu,
- kontakt za upravljanje generatorskim prekidačem,
- lokalno, daljinsko komandovanje i signalizacija.

Na slici 2 prikazana je struktura upravljačke elektronike regulatora pobude.



Slika 2. Struktura upravljačke elektronike

Elektronika se sastoji iz sledećih celina:

1. Modul za kondicioniranje mernih signala obrađuje naizmernične signale napona statora, napona mreže, napona sinhronizacije, struju statora, i naizmernični signal struje rotora, koji se uzima sa naizmernične strane tiristorskog pretvarača. Naponski naizmernični signali su normirane vrednosti od 100 VAC, a strujni normirane vrednosti 5 A.
2. Modul za očitavanje ulaznih kontaktnih 220 VDC ulaznih signala (stanje prekidača za demagnetizaciju, stanje generatorskog prekidača, stanje prekidača 220 kV, izlazi brzinskog relea, ispravan rad ventilatora tiristorskog pretvarača, osigurači tiristorskog pretvarača, Buholc zaštita ispravljačkog transformatora, zaštita po temperaturi ulja ispravljačkog transformatora, lokalne i daljinske komande za upravljanje uređajem) realizovan je sa ukupno 40 ulaznih signala.
3. Mikroprocesorski modul baziran je na mikrokontroleru Intel 80C196KC20. Program mikrokontrolera nalazi se u EPROM memoriji kapaciteta 32 kV, dok je radna RAM memorija modula kapaciteta 2 kV. Mikrokontroler radi na radnoj učestalosti od 16 MHz. Pobudni sistem može da se veže sa nadređenim računarskim sistemom korišćenjem serijske veze.
4. Modul relejnih izlaza 220 V/5 A (isključenje generatorskog prekidača, uključenje i isključenje prekidača za demagnetizaciju, uključenje i isključenje početne pobude, upravljanje lokalnom i daljinskom signalizacijom) realizovan je sa ukupno 40 izlaznih kontakata.
5. Navedeni moduli se napajaju sa naponom 220 VDC ± 20 %. Snaga bloka napajanja je 60 W.

5. OPIS FUNKCIJA REGULATORA POBUDE

Algoritam regulacije pobude, zaštitne funkcije i funkcije limitera, algoritam sekvencijalnog upravljanja radom uređaja i dodatne upravljačke funkcije realizovane su na mikroprocesorskom modulu.

U cilju postizanja što je moguće veće brzine odziva digitalnog upravljačkog sistema, i ostvarenja što direktnije kontrole upravljačkog programa nad resursima mikroprocesora, realizovan je upravljački sistem bez operativnog sistema.

U okviru upravljačkog programa realizovane su celine:

1. Očitavanje lokalnih i daljinskih komandi, koje procesor očitava korišćenjem ulaznih modula.
2. Upravljanje signalizacijom.
3. Očitavanje kontaktnih ulaza u pogonu.
4. Upravljanje energetskim pretvaračima se vrši preko 12 upravljačkih signala, koji se vode na gejtove tiristora dva ispravljačka tiristorska mosta.

Upravljanje se vrši faznom regulacijom, koja omogućava realizovanje kontrolisane izlazne vrednosti napona tiristorskih mostova u opsegu 0 - 540 VDC.

5. Regulacija statorskog napona sinhronog generatora realizovana je korišćenjem PI(D) regulacionog dejstva, standardizovane strukture opisane u [2]. Regulacija se vrši po signalu DU_g greške napona statora. U uređaju je omogućeno podešavanje parametara regulacije u opsegu standardizovanih parametara $K_p \in [10 - 100]$ pu/pu, $T_i \in [0,1 - 5]$ s i $T_d \in [0,01 - 0,5]$ s (K_p , T_i i T_d su parametri proporcionalnog, integralnog i diferencijalnog dejstva, respektivno). Opseg regulacije napona statora je 80-120 %, sa tačnošću regulacije od 0,5 %.
6. Rezervna regulacija struje rotora agregata realizovana je korišćenjem PI regulacionog dejstva, standardizovane strukture opisane u [2]. Regulacija se vrši po signalu DI_g greške struje rotora. U uređaju je omogućeno podešavanje parametara regulacije u opsegu standardizovanih parametara $K_p \in [10 - 100]$ pu/pu, $T_i \in [0,1 - 5]$ s. Opseg regulacije rotorske struje je 0-200 %, sa tačnošću regulacije od 0,5 %.
7. Realizovane su zaštitne i limiterske funkcije: limiter statorske struje I i II stepen, limiter statorskog napona, limiter maksimalne struje pobude, i limiter minimalne struje pobude. U slučaju prekoračenja maksimalnih vrednosti limitiranih veličina zaustavlja se trenutno aktivna regulacija, a struja pobude se smanjuje dok limitirana veličina ne uđe u zadate granice. U slučaju smanjenja limitiranih veličina ispod zadatih granica struje, zaustavlja se trenutno aktivna regulacija, a struja pobude se povećava dok vrednost limitirane veličine ne uđe u zadati opseg.
8. Realizovan je sekventni automat za upravljanje radom pobudnog sistema.

Sekventni automat pobudnog sistema omogućava sledeće funkcije:

1. Početno pobuđivanje agregata, u kome se vrši početno pobuđivanje generatora sa baterijskog napajanja (nakon porasta napona statora pobuđivanje preuzimaju tiristorski mostovi). Vreme trajanja početnog pobuđivanja vremenski je ograničeno, i ukoliko za to vreme nije dostignuto 80 % referentne vrednosti napona praznog hoda, generiše se signal opomene „neuspelo početno pobuđivanje” uz razbuđivanje sistema. Pored pobuđivanja agregata samopobudom, generator se može pobuditi i sa nezavisnog izvora napajanja (sa mreže, ukoliko je na raspolaganju).
2. Upravljanje naponom agregata u praznom hodu vrši se u fazi sinhronizacije sa mrežom.

Tada pobudni sistem prati napon mreže, čime učestvuje u procesu sinhronizacije agregata u odnosu na mrežu.

3. Radom agregata na mreži upravlja naponska regulacija sa reaktivnom kompenzacijom [2]. Reaktivna kompenzacija je omogućena u opsegu 0 - 20 % nominalne vrednosti napona statora.
4. U radu na mreži, u slučaju pada napona statora ispod vrednosti 80 % od zadate vrednosti, pobudni sistem ulazi u režim forsiranja, sa faktorom 2 po vrednosti struje pobude.
5. Prelazak na rezervnu regulaciju po struji pobude vrši se u uslovima koji ne dozvoljavaju regulaciju po vrednosti statorskog napona. Prelazak na rezervnu regulaciju dešava se u slučaju neuspelog forsiranja, ili u slučaju pada vrednosti statorskog napona ispod vrednosti od 70 % nominalnog napona generatora.
6. Rasterećivanje agregata i odvajanje od mreže.
7. Razbuđivanje agregata.
8. Električno kočenje sinhronog generatora vrši se pobuđivanjem sinhronog generatora sa kratko spojenim statorom. Pobuđivanje ge-

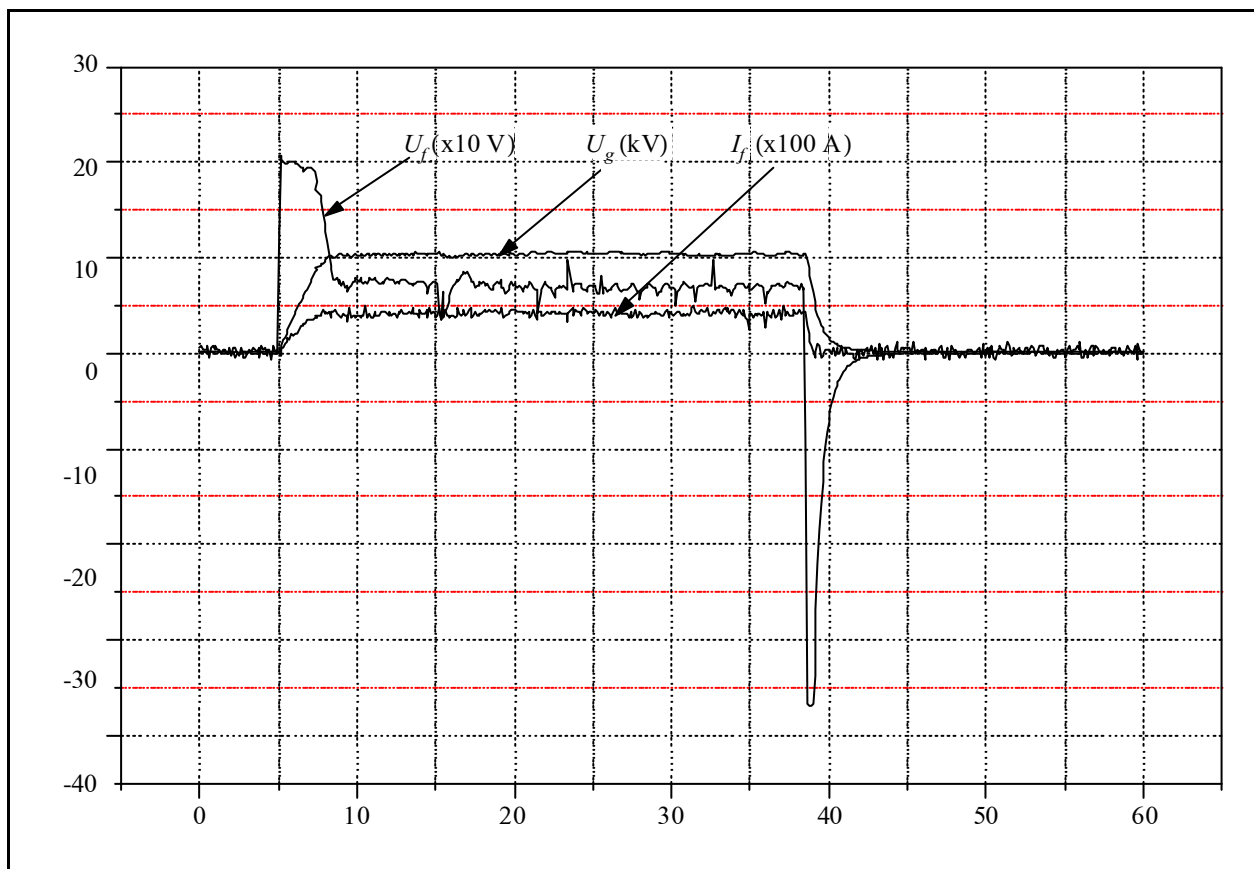
neratora vrši se tako da se u kratko spojenom statoru agregata postigne nominalna vrednost struje. Trajanje procesa električnog kočenja vremenski je ograničeno - ukoliko se u zadanom vremenskom periodu ne dostigne 1 % nominalne brzine agregata, proces električnog kočenja se prekida sa mehaničkim kočenjem agregata do mirovanja.

Na slici 3 dati su snimci generatorskog napona (U_g), napona pobude (U_f), i struje pobude (I_f) prilikom pobuđivanja i razbuđivanja generatora sa nezavisnim napajanjem tiristorskih mostova.

Analizom snimaka može se zaključiti da je digitalnom regulacijom ostvarena dinamika regulacije koja zadovoljava zahteve definisane standardom [2].

6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana koncepcija digitalnog regulatora statičke pobude sinhronog generatora ugrađenog u HE „Bistrica”. Diskutovane su strukture koje se sreću u dosadašnjim rešenjima sličnih uređaja. Prikazana je struktura digitalnog regulatora, realizovana na uređaju. Posebno je naglašena



Slika 3. Snimci generatorskog napona, napona i struje pobude pri pobuđivanju i razbuđivanju agregata sa nezavisnim napajanjem tiristorskih mostova

potreba za objedinjavanjem upravljačkih funkcija u jedinstveni modul. Takođe, diskutovane su sve prednosti koje sa sobom nosi primena mikroprocesorske tehnologije u savremenim pobudnim sistemima. Priказana je struktura upravljačke elektronike, zajedno sa definicijom upravljačkih funkcija realizovanih u programu mikroprocesorskog modula. U poslednjem poglavlju dati su i snimci odziva regulisanih veličina na sinhronom generatoru sa realizovanim digitalnim statičkim sistemom pobude.

7. LITERATURA

- [1] Z. Ćirić, I. Stevanović, Đ. Stojić: TIRISTORSKI SISTEM POBUDE ZA SINHRONE GENERATORE A I B SNAGE 54 MVA U HE „BISTRICA”, Beograd, 2000. godina
- [2] IEC-34-16-3: PART 16, EXCITATION SYSTEMS FOR SYNCHRONOUS MACHINES, Geneve, Suisse, 1996

Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Đorđe Stojić je rođen 1970. godine u Beogradu. Osnovnu, srednju školu i Elektrotehnički fakultet završio je u Beogradu. Magistrirao je 1996. godine na smeru „Upravljački sistemi” na Elektrotehničkom fakultetu, gde je 2002. godine izabran za honorarnog asistenta na smeru „Energetski pretvarači i pogoni”.

Od 1994. godine zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Beogradu u Centru za Automatiku i regulaciju, gde se bavi poslovima projektovanja upravljačkih sistema u elektroenergetskim objektima.



Zoran Ćirić je rođen 1950. godine u Izvoru kod Pirotu. Osnovnu školu i gimnaziju je završio u Pirotu, a Elektrotehnički fakultet u Beogradu. Po završetku studija radio je u IGP „Tigar” Pirot i HE „Đerdap”. Od 1982. godine vrši nadzor, učestvuje u ispitivanjima i puštanju u rad HE „Đerdap II”. Po završetku prve faze izgradnje „Đerdapa II” radi na radnom mestu šefa elektromašinskog održavanja.

Od 1989. godine radi u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Centru za automatiku i regulaciju, gde se bavi: specijalnim merenjima na električnim mašinama, projektovanjem i izradom pobudnih sistema malih, srednjih i velikih generatora, automatizacijom malih hidroelektrana, ispitivanjima i otklanjanjem nedostataka na sistemima pobude u hidro i termoelektranama.



Ilija Stevanović je rođen 1963. godine u Brčkom, BiH. Elektrotehnički fakultet, smer elektroenergetski, završio je 1987. godine u Tuzli. Posle završetka fakulteta, do maja 1992. godine bio je zaposlen na Elektrotehničkom fakultetu u Tuzli, kao asistent na predmetima „Električne mašine” i „Elektromagnetika”. Postdiplomske studije, smer „Električne mašine” na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu završio je 1992. godine. Od 1992. do 1994. godine radio je kao profesor stručnih predmeta u Srednjoj tehničkoj školi u Lajkovcu. U Elektrotehničkom institutu „Nikola Telsa” se zaposlio 1994. godine, u Centru za automatiku i regulaciju. Za honorarnog asistenta na katedri za „Električne mašine” Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, izabran je 1994. godine.

U prethodnom periodu radio je na projektovanju, izradi i puštanju u rad više uređaja koji služe za regulaciju napona, prvenstveno sistema pobude sinhronih generatora, uređaja za automatizaciju malih hidroelektrana, kao i remontnim ispitivanjima sličnih uređaja drugih proizvođača. Pored toga, vršio je električna ispitivanja sinhronih generatora, specifična merenja i otklanjanje smetnji u elektroenergetskom sistemu i dr. Autor je više desetina radova, koji su prezentovani na domaćim i stranim konferencijama i u domaćim časopisima.

*Radovan Radosavljević, Zoran Radaković,
Vladimir Milosavljević, Milorad Damjanović, Petar Nikolić,
Aleksandar Popović i Branko Milosavljević*

Ispitivanja blok transformatora snage 380 MVA na HE „Đerdap I” u cilju povećanja snage

II deo

– merenja pri ispitivanjima u pogonskim uslovima –

Stručni rad
UDK: 621.313.212; 021.3.08

Rezime:

U radu se daju rezultati ispitivanja sprovedenih na prvom blok transformatoru HE Đerdap I proizvođača ASEA koji je najduže bio u pogonu i kod koga se pretpostavljalo da će se upoređivanjem sadašnjih rezultata sa podacima iz ispitnih listova proizvođača, najpre uočiti odstupanja koja su posledica dugogodišnje eksploatacije. Sprovedena merenja imaju za cilj utvrđivanje mogućnosti i mera za rad sa povećanom snagom za 10 %, s obzirom na to da Elektrani predstoji revitalizacija uz povećanje snage svih 6 generatora. Uspešnost izvedenih merenja pokazuje da je moguće da se ogledi koji se po pravilu izvode u laboratorijama proizvođača mogu izvoditi i u pogonskim uslovima, a prvenstveno oni preko kojih se određuju pojedini gubici, temperature i simetričnost magnetskog kola i električnih parametara.

Ključne reči: blok transformator, testiranje, pogon, gubici, temperatura, simetričnost

Abstract:

**TESTING OF 380 MVA BLOCK TRANSFORMER AT HPP 'DJERDAP I'
FOR THE PURPOSE OF INCREASING CAPACITY**

Part II

-measuring during testing under operating conditions-

The paper gives the results of testing carried out on the first block transformer at HPP "Djerdap 1", ASEA manufacture which has been longest in operation and where it was assumed that, by comparing the present results with data from the test sheets, deviations resulting from a long operation period would be first observed. The purpose of performed testing is to determine the possibilities and measures for operation with increased capacity by 10 %, taking into account that the hydro power plant will be revitalized in order to increase the capacity of all 6 generators. The success of performed measuring shows that experiments which are normally performed in labs can also be possibly performed under operating conditions. This primarily refers to those experiments which determine certain losses, temperature and symmetry of magnetic circuit and electrical parametres.

Key words: block transformer, testing, operation, losses, temperature, symmetry

Prof. dr Radovan Radosavljević, dipl. ing; prof. dr Zoran Radaković, dipl. ing.

– Elektrotehnički fakultet, 11 000 Beograd, Bulevar Kralja Aleksandra 73

Vladimir Milosavljević, dipl. ing; Milorad Damjanović, dipl. ing.; Petar Nikolić, dipl. ing.

– „EPS” JP „Đerdap”, 19 320 Kladovo, Trg kralja Petra br. 1

Mr Aleksandar Popović, dipl. ing. – „EPS” JP „Elektroistok”, 11 000 Beograd, Kneza Miloša 11

Branko Milosavljević, dipl. ing. – 11 000 Beograd, Vojvode Bogdana 38

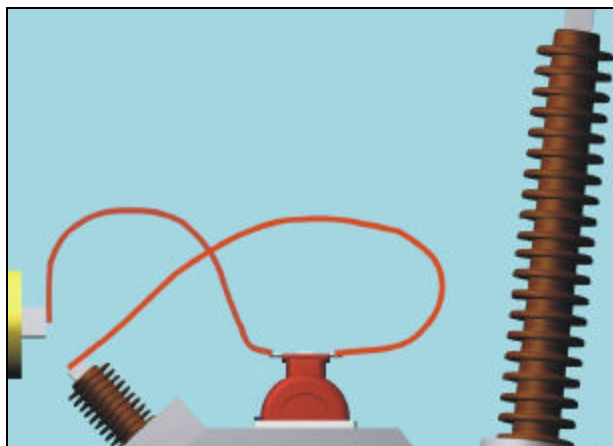
1. UVOD

Svaka revitalizacija blok transformatora, a posebno ona gde se želi i povećanje snage, tesno je vezana za utvrđivanje opšteg stanja transformatora. Da bi se to postiglo, potrebno je izvesti brojna tipska i komadna ispitivanja, u cilju dobijanja kompletne slike o stanju izolacionog sistema, vrednostima električnih i magnetskih parametara, temperaturama itd. Bilo bi najkorisnije da se ova ispitivanja sprovedu u za to specijalizovanim laboratorijama, ali, s obzirom na veličinu ovih transformatora, kako po snazi tako i po naponskim nivoima i gabaritu, ekonomski opravdana ispitivanja mogu da se sprovedu jedino na licu mesta, u pogonskim uslovima. Ovakav pristup donosi ogromne uštede, pre svega vezane za transport transformatora, ali sa druge strane zahteva rešavanje složenih tehničkih problema kojih inače nema u tom obimu pri fabričkim ispitivanjima. Pre svega, to je potreba za raznom specijalizovanom opremom za ispitivanje, a koju elektrane obično ne poseduju.

U ovom radu izložene su primenjene i realizovane metode ispitivanja, zajedno sa rezultatima električnih i termo-kalorimetrijskih merenja sa odgovarajućim zaključcima u vezi sa mogućnošću povećanja snage, kao i način na koji je to moguće ostvariti.

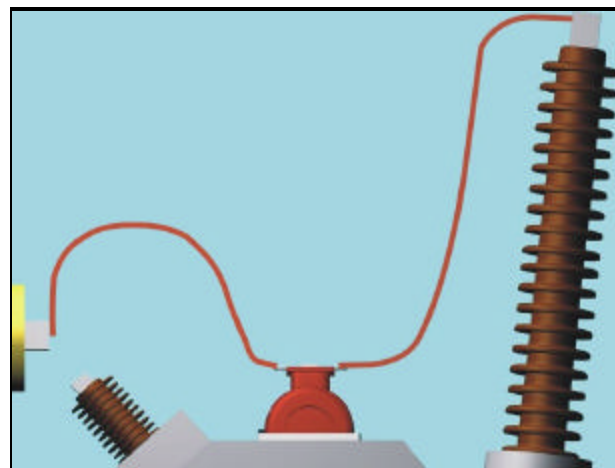
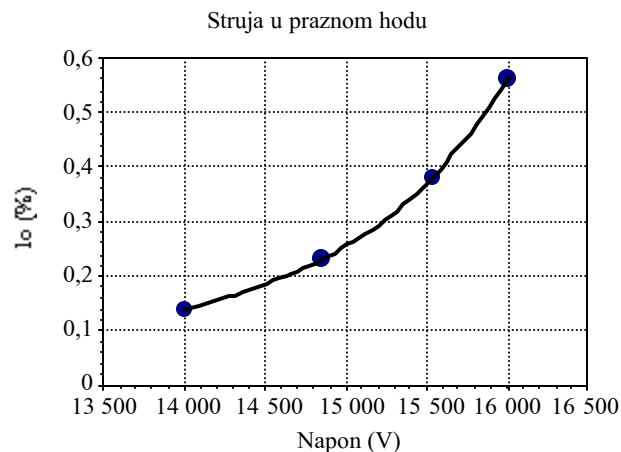
2. MERENJE SNAGA GUBITAKA BLOK TRANSFORMATORA ASEA OGLEDIMA PRAZNOG HODA, KRATKOG SPOJA I KALORIMETRIJSKOM METODOM

Ogledi praznog hoda i kratkog spoja izvedeni su skidanjem elastičnih veza između transformatora i sabirnica niskog napona i umetanjem po 3 odgovarajuća strujna i naponska merna transformatora. Svi merni transformatori bili su postavljeni preko izolacione podloge direktno na poklopac transformatorskog suda, u neposrednoj blizini sabirnica. Za oba



Slika 1. Način napajanja u praznom hodu

ogleda ostvarena je čvrsta galvanska veza kraja „K” strujnih mernih transformatora i sabirnica, preko 3 kablovska provodnika za 35 kV na čije krajeve su postavljeni posebno konstruisani spojni elementi. Preko „L” krajeva strujnih mernih transformatora, ostvareno je napajanje jednog primarnog NN namotaja za ogled PH (slika 1), a VN namotaja za ogled KS (slika 2).



Slika 2. Način napajanja u kratkom spoju

2.1. Ogled praznog hoda

Rezultati merenja u praznom hodu za blok transformator ASEA dati su u tabeli 1, i preko grafika struje i snage gubitaka. Korišćeni su strujni merni transformatori tipa ASK2411, 2x75 A / 5 A (na opsegu 75A) i naponski merni transformatori tipa VSK12.5, 25 kV / 100V.

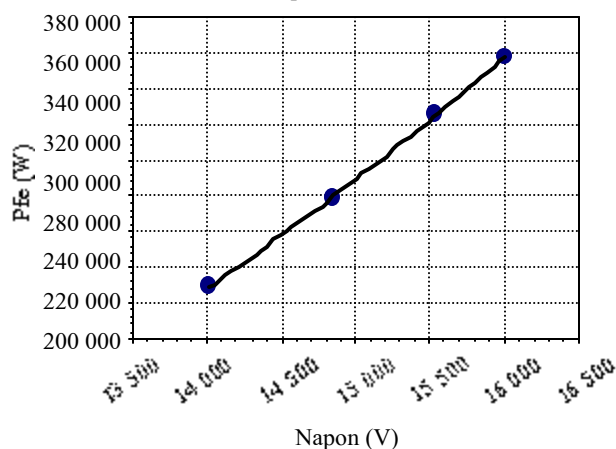
Uporedni pregled parametara dobijenih u fabrici ASEA i preko novih merenja u pogonu dat je u tabeli:

	Mereno 30. 9. 2002.	Fabrička merenja
P_0 (kW)	338,5	318
I_0 (%)	0,46	0,54

Merenja u ogledu praznog hoda blok transformatora ASEA

Merenje gubitaka u praznom hodu								$P_{fe}(U_n)=338,5 \text{ kW}$			
$\frac{U_0}{U_n}$	Napon			Struja				Snaga			
	$K_v(\text{V/pod})$	$a_w(\text{pod})$	$U_0 \text{ sr}(\text{V})$	$K_a(\text{A/pod})$	$a_w(\text{pod})$	$I_0 \text{ sr}(\text{A})$	$I_0(\%)$	$K_w(\text{W/pod})$	$a_w(\text{pod})$	sum a_w	$P_0(\text{W})$
1,02	250	64,1	16 008,3	0,75	118,1	78,13	0,56	1 875	62,6	190,6	35 375,0
		63,9			100,2				15,0		
		64,1			94,2				113,0		
0,98	250	62,2	15 533,3	0,75	80,8	52,28	0,38	1 875	62,0	173,9	326 062,5
		62,1			67,1				15,2		
		62,1			61,2				96,7		
0,94	250	59,6	1 485,0	0,75	51,7	32,08	0,23	1 875	54,3	148,6	278 625,0
		59,2			41,3				14,8		
		59,4			35,3				79,5		
0,89	250	56,2	14 008,3	0,75	33,0	19,68	0,14	1 875	46,1	122,2	229 125,0
		55,8			26,7				12,9		
		56,1			19,0				63,2		

Gubici u praznom hodu



Novoizmerena snaga gubitaka u gvožđu (aktivna snaga praznog hoda) je veća za 20,5 kW, što je delom rezultat greške usled različite merne opreme, a delom usled promena posle 30 godina rada.

Zaključak je da su se gubici praznog hoda malo uvećali ali verovatno unutar garantovane vrednosti (320 kW + 10 % = 352 kW).

2.2. Ogled kratkog spoja

Pre i posle ogleda kratkog spoja merene su sve značajne temperature zbog preračunavanja snage gubitaka u bakru na referentnu temperaturu od 75 °C. Srednja temperatura ulja, merodavna za srednju temperaturu namotaja pri izvođenju ogleda kratkog spoja bila je 14 °C.

Ogled kratkog spoja je izveden kratkim spajanjem na oba NN namotaja primara sa 2x2 kratkospojnika, dok je na VN strani doveden raspoloživi napon od 16 kV sa jednog generatora.

Najveća postignuta struja je bila 30,6 % od nominalne. Rezultati merenja u kratkom spoju, kao i odgovarajuća preračunavanja za transformator ASEA dati su tabelarno.

Merenje gubitaka u kratkom spoju, 14 °C										
Redni broj	Napon			Struja			Snaga			
	kV(V/pod)	$a_w(\text{pod})$	$U_m(\text{V})$	$K_a(\text{A/pod})$	$a_w(\text{pod})$	$I_m(\text{A})$	$K_w(\text{W/pod})$	$a_w(\text{pod})$	sum a_w	$P_{cum}(\text{W})$
1.	250	63,8	15 925,0	1,5	105,8	159,85	3 750	4,70	15,30	573 750
		63,6			105,9			4,90		
		63,7			108,0			5,70		
2.	250	58,5	14 608,3	1,5	97,5	146,30	3 750	4,40	13,85	51 937,50
		58,4			97,5			4,80		
		58,4			97,6			4,65		
3.	250	48,1	12 025,0	1,5	79,1	118,70	3 750	3,40	10,25	38 437,50
		48			79,1			3,90		
		48,2			79,2			2,95		

Proračun gubitaka na 75 °C										
Redni broj	P_{cum} (W)	P_{cujs} (18,8° C)	P_{cujs} (14° C)	I_m/I_n	P_{cu} (14° C)	P_{dod} (14° C)	P_{cujs} (75° C)	P_{dod} (75° C)	P_{cu} (75° C)	U_k (%)
1.	57 375,00	502 378	492 876,8	0,306	611 840,78	109 462,8	613 621,7	87 923,3	701 545,0	12,38
2.	51 937,50	502 378	492 876,8	0,280	661 200,84	158 822,8	613 621,7	127 570,6	741 192,3	12,41
3.	38 437,50	502 378	492 876,8	0,277	743 352,32	240 974,3	613 321,7	193 556,8	807 178,5	12,59

U priloženoj tabeli dati su uporedni podaci izmerenih parametara u kratkom spoju (srednja vrednost za nekoliko napona) i fabričkih merenja izvedenih na transformatoru ASEA. Uočava se da su izmereni gubici kratkog spoja manji za 30 kW od fabrički izmerenih i da pojedinačna merenja odstupaju do 50 kW od srednje vrednosti. Razlog tome je mala vrednost struje (do 30,6 % od nominalne) i veoma mala skretanja vatmetara zbog malog faktora snage od 0,017, kada su greške očitavanja velike, bez obzira na to što su korišćeni vatmetri za faktor snage 0,1 i 0,2. Bez obzira na te greške, može se konstatovati: **gubici kratkog spoja u najgorem slučaju prevazilaze fabrički izmerene gubitke za najviše 20 kW, odnosno oko 2,5%.**

U tabeli 2 dati su uporedni podaci za ukupnu snagu gubitaka transformatora ASEA prema fabričkim i prema novoizvedenim merenjima, a data je i moguća ukupna snaga izmerenih gubitaka za slučaj najveće greške pri izvođenju oglada kratkog spoja:

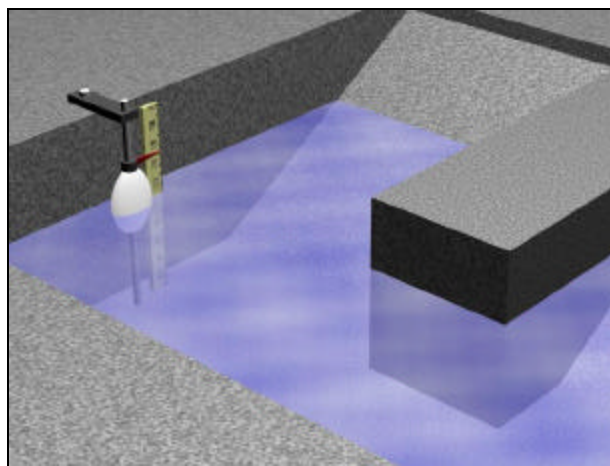
Tabela 2.
Poređenje gubitaka za fabrička i pogonska merenja

	Fabrička merenja	Nova merenja septembar 2002.	Procena mogućih gubitaka
ΣP_g (kW)	1 098	1 088,5	1 145,5

Iz gornje tabele vidi se da su ukupni novoizmereni gubici manji za 9,5 kW od fabrički deklariranih, ali radi sigurnosti zbog mogućih grešaka merenja u razmatranje treba uzeti ukupnu snagu gubitaka od 1 145,5 kW.

2.3. Merenje snage odnošenja toplote preko postojećeg para rashladnih sistema ulje-voda kalorimetrijskom metodom

Kalorimetrijska merenja izvedena su prethodnim baždarenjem bazena za oticanje tople vode iz hladnjaka od kote na nultoj visini



Slika 3. Sistem za merenje količine tople vode

1 440 mm pri kojoj bazen ima konstantnu bazisnu površinu izmerenu uz pomoć teodolita u iznosu od 21,952 m².

Izvedene su dve serije merenja (data tabelarno) u kojima su merene: temperature vode na izlazu iz hladnjaka preko merno-akvizicionog sistema i priraštaj visine Dh tople vode u funkciji vremena, preko kojeg je utvrđivan protok vode q_1 [l/sec] po jednom hladnjaku. Priraštaj Dh meren je uz pomoć specijalno konstruisanog sistema sa plovkom, kao što je prikazano na slici 3.

I serija merenja

Temperature na pojedinim mernim mestima (°C)										
θ-1	θ-2	θ-3	θ-4	θ-5	θ-6	θ-7	θ-8	θ-9	θ-10	θ-11
45,5	50,9	54,7	35,1	35,6	27,4	27,5	17,2	17,1	55,4	13,2

t (sec)	59	108,5	159,5	216
Dh (mm)	60	110	160	210
q_1 (l/sec)	11,162	11,128	11,010	10,670

II serija merenja koja se slivala niz transformatorski sud. Zato je celishodno da se ova merenja ponove i u uslovima bez vetra i kiše;

Temperature na pojedinim mernim mestima (°C)										
θ-1	θ-2	θ-3	θ-4	θ-5	θ-6	θ-7	θ-8	θ-9	θ-10	θ-11
46,3	51,6	54,9	35,4	35,9	27,6	27,9	17,4	17,4	55,7	13,4

t (sec)	60	110	162	214,5	243
Dh (mm)	60	110	160	210	240
q_l (l/sec)	10,976	10,976	10,840	10,746	10,840

Merene su i električne veličine blok transformatora, naponi primara, ukupna struja i snaga 7 h pre kalorimetrijskih merenja u cilju dobijanja srednjih vrednosti:

Snaga (MVA)	Struja (A)	Napon G_1 (kV)	Napon G_2 (kV)
373,4	519,21	15,53	15,61

Ove srednje veličine su merodavne za uspostavljanje korelacije između termičkih i električnih parametara i preračunavanja snage odnošenja toplote preko rashladnog sistema za uslove nominalnog opterećenja. Razlika između ukupne snage gubitaka izmerene ogledima praznog hoda i kratkog spoja i snage odnošenja gubitaka preko rashladnog sistema ulje-voda definiše snagu odnošenja toplote sa površine suda transformatora (oko 160 m²) putem strujanja i zračenja.

Na osnovu datih rezultata merenja izveden je proračun toplotnih snaga koje se odnose preko rashladnog sistema PH i snage koja se odnosi sa površine transformatorskog suda strujanjem i zračenjem P_S :

Srednja razlika temperature tople i hladne vode $DJ = 10,3$ K
Srednji protok vode kroz hladnjake $q_l = 10,84$ l/sec
Snaga odnošenja toplote hladnjacima $P_H = 934,93$ kW
Snaga koja se odnosi preko suda $P_S = 137,9$ kW
Nominalna snaga odnošenja toplote hladnjacima $P_{Hn} = 951,4$ kW
Nominalna snaga koja se odnosi preko suda: $P_{Sn} = 140,3$ kW
Ukupna nominalna snaga hlađenja-snaga gubitaka 1 091,7 kW

Napomene:

1) Snaga odnošenja toplote sa površine suda je izuzetno velika (140,3 kW) jer su kalorimetrijska merenja sprovedena pri nižoj temperaturi okoline (13,3 °C) sa velikim vetrom i izuzetno obilnom kišom

2) Moguće greške pri očitavanjima temperature su 0,1 K, a pri različiti temperature 0,2 K, kojoj odgovara greška u merenju snage od 22 kW. Kada se dodaju greške na merenjima visine izazvane strujanjem vode iz jednog u drugi prihvatni bazen, jasno je da treba kao i kod merenja gubitaka ogledima praznog hoda i kratkog spoja ukupnu snagu gubitaka uzeti sa rezervom, odnosno oko 1 140 kW.

3. MERENJE SIMETRIČNOSTI FAZA OGLEDIMA NAPAJANJA SA MALIM NAPONIMA

Utvrđivanje simetričnosti faza izvedeno je merenjima na terenu prema metodologiji [3], pri monofaznom napajanju sa malim naizmeničnim naponom na temperaturi od oko 20 °C. Izvedene su tri serije merenja:

3.1. Sukcesivno monofazno napajanje između VN faza i zvezdišta i merenje struja P_H faznih i međufaznih napona (tabela 3)

Tabela 3.

Napajana faza	A	B	C
I_m (mA)	4,9	3,5	4,7
U_A	249,5	116,8	49,5
U_B	192,9	252,0	200,8
U_C	55,7	135,1	249,0
U_{AB}	439,0	369,8	148,2
U_{AC}	303,0	17,8	300,0
U_{BC}	133,0	386,5	452,2

3.2. Sukcesivno monofazno napajanje između VN faza i merenja struja praznog hoda i faznih i međufaznih napona (tabela 4)

Tabela 4.

Međufazno napajanje (V)	I_m (mA)	U_A (V)	U_B (V)	U_C (V)
$U_{AB} = 250,4$	1,51	121,2	128,2	8,69
$U_{AC} = 250,4$	2,31	130,6	12,95	119,3
$U_{BC} = 250,4$	1,38	21,1	134,7	114,5

3.3. Monofazno napajanje između kratko spojenih VN krajeva A,B,C i zvezdišta i merenje faznih struja, napona i snaga (tabela 5)

Tabela 5.

A			B			C		
A	V	W	A	V	W	A	V	W
1,00	57,9	1,0	1,00	57,5	1,1	1,00	57,89	1,05
2,00	113,8	4,5	2,00	114,8	4,5	2,00	113,9	4,45
3,00	168,9	9,75	3,00	168,8	10,0	3,00	168,8	9,85
4,00	227,5	15,0	4,00	225,3	15,5	4,00	226,1	15,0
4,82	273,3	22,2	4,75	273,2	23,8	4,81	271,5	21,8

Na osnovu izvedenih merenja mogu se dobiti kvantitativni parametri nesimetrije magnetskog kola: raspodela flukseva po pojedinim stubovima i relativni odnosi reluktansi grana magnetskog kola

3.4. Analiza raspodele flukseva po magnetskom kolu

Na osnovu podataka merenja iz tabele 3, mogu se ustanoviti udeli, odnosno odnosi fluksa kroz pobuđivani stub i flukseva kroz ostale stubove kao odnosi napona U_b/U_a :

$$j_{ab} = f_b/f_a @ U_b/U_a \quad a,b = A,B,C$$

pri čemu se za fluks pobuđivanog stuba uzima relativna vrednost 1,000 (tabela 6).

Tabela 6.

Relativni odnosi flukseva po stubovima namotaja

	A	B	C
A	1,000	0,463	0,199
B	0,773	1,000	0,802
C	0,226	0,536	1,000

Uočava se umerena neravnomernost raspodele (delenja) flukseva. U slučaju idealne simetričnosti, fluks pri pobudi srednjeg stuba bi se podelio na dva jednaka dela (sa odnosom delenja 0,500, a ovde je 0,463 i 0,536).

3.5. Utvrđivanje relativnih odnosa magnetnih reduktansi grana magnetskog kola

Magnetsko kolo možemo predstaviti kao složeno kolo, sačinjeno od tri grane spojene u krajnje

čvorove. Svakoj grani pripada po jedan stub, i odgovarajući delovi gornjeg i donjeg jarma. Po svakom stubu deluje odgovarajuća magnetomotorna sila, m_α ($\alpha = A,B,C$). Svaku granu magnetskog kola karakteriše odgovarajuća reluktansa r_α . Delovanjem skupa magnetskih sila u ovom magnetskom kolu uspostaviće se fluksevi f_α . Na osnovu ovoga se može napisati sledeći skup jednačina za konture magnetskog kola:

$$\begin{aligned} f_A + f_B + f_C &= 0 \\ r_A f_A - r_B f_B &= m_A - m_B \\ r_B f_B - r_C f_C &= m_B - m_C \end{aligned}$$

odakle su:

$$\begin{aligned} f_A &= (m_A(r_B + r_C) - m_B r_C - m_C r_B) / d \\ f_B &= (-m_A r_C + m_B(r_A + r_C) - m_C r_A) / d \\ f_C &= (-m_A r_B - m_B r_A + m_C(r_A + r_B)) / d \\ d &= r_A r_B + r_A r_C + r_B r_C \end{aligned}$$

Pobuđivanjem samo po jednog jezgra, dobijaju se izrazi za udele flukseva po granama pri pojedinačnoj pobudi grana kao članovi sledeće matrice:

		A	B	C
f_{ab}	A	$m_A(r_B+r_C)/d$	$-m_B r_C/d$	$-m_C r_B/d$
	B	$-m_A r_C/d$	$m_B(r_B+r_C)/d$	$-m_C r_A/d$
	C	$-m_A r_B/d$	$-m_B r_A/d$	$m_C(r_B+r_C)/d$

odakle su:

$$\begin{aligned} r_C/r_B &= f_{AB}/f_{AC}; \quad r_A/r_B = f_{CB}/f_{CA} \\ m_A/m_B &= f_{AB}/f_{BA}; \quad m_C/m_B = f_{CB}/f_{BC} \end{aligned}$$

Usvajajući m_B i r_B kao bazne vrednosti u relativnom iznosu 1,000, uz korišćenje rezultata merenja, određuju se numeričke vrednosti reluktansi r_A , r_B i r_C kao i relativne vrednosti magnetomotornih sila:

$$\begin{aligned} m_A &= 1,670; & m_B &= 1,000; & m_C &= 1,504 \\ r_A &= 4,050; & r_B &= 1,000; & r_C &= 3,466 \end{aligned}$$

Iz ovih rezultata se uočava da se reduktanse krajnjih grana međusobno relativno umereno razlikuju, što ukazuje na zadovoljavajuću simetričnost ovog magnetskog kola. Relativno visoke vrednosti reluktansi bočnih grana u odnosu na srednju granu, mogu ukazati na njihovu manju pritegnutost.

3.6. Utvrđivanje stepena nesimetričnosti po podužnoj osi

Prema metodologiji utvrđivanja stepena nesimetrije [3] i podataka iz tabele 1, sledi:

$$\begin{aligned}e_A &= U_{BC}/U_A = 0,533 \\e_B &= U_{AC}/U_B = 0,071 \\e_C &= U_{AB}/U_C = 0,596\end{aligned}$$

U slučaju idealne simetričnosti e_B je jednako nuli, a ostale vrednosti međusobno jednake.

Lako se zaključuje da su fazni i međufazni naponi međusobno praktički kolinearni, pošto su aritmetički zbrovi faznih napona nenapajanih faza praktički jednaki faznim naponima napajanih faza. Iz ovoga sledi da su svi fluksevi praktično jednovremeni, što ukazuje na dobru homogenost magnetskih limova ovog magnetskog kola.

3.7. Utvrđivanje stepena nesimetričnosti po podužnoj osi

Prema metodologiji [3] i podataka iz tabele 3:

$$\begin{aligned}e_{A2} &= U_A/(U_B + U_C) = 0,084 \\e_{B2} &= U_B/(U_A + U_C) = 0,052 \\e_{C2} &= U_C/(U_A + U_B) = 0,035\end{aligned}$$

Ove vrednosti ne ukazuju na izraženu nesimetriju magnetnog kola po ovoj osi. Na povoljnost nalaza utiče i to, što je indukcija u poprečnoj osi pri ovom ispitivanju veoma niska (ispod 0,1 mT), pri čemu reduktansa u ovoj osi primetnije raste.

3.8. Utvrđivanje faznih impedansi

Kod transformatora sprege dY , odnosno ddY , zbog odsustva zvezdišta na primarima, mogu se utvrditi samo dijagonalni elementi matrice faznih impedansi i to na osnovu rezultata merenja pri monofaznom napajanju.

Na osnovu podataka dobijenih merenjima pri monofaznom napajanju utvrđene su sledeće srednje vrednosti faznih impedansi:

$$\begin{aligned}Z_A &= 1,020 + j56,91 \Omega; \\Z_B &= 1,065 + j57,01 \Omega; \\Z_C &= 1,065 + j57,01 \Omega.\end{aligned}$$

Srednja vrednost impedanse kratkog spoja iznosi $Z = 1,040 + j 56,89 \Omega$, čemu odgovara napon kratkog spoja $u_k = 12,26 \%$, što je ista vrednost kao i ona iz ASEA - protokola: $u_k = 12,3 \%$.

Elementi matrice se inače određuju prema relacijama:

$$Z_{ab} = U_b/I_a; R_{ab} = P_{ab}/I_a^2; X_{ab} = \dot{O} (Z_{ab}^2 - R_{ab}^2)$$

Merenje aktivne snage je izvršeno sa smanjenom izvesnošću, pošto su merenja vršena pri vrlo malom faktoru snage ($<0,1$), ali i pored toga su nađene vrednosti faznih impedansi međusobno približno jednake, u granicama tačnosti merenja. Ovako utvrđeni omski otpori imaju nešto veće vrednosti od stvarnih vrednosti ovih otpora, pa bi gubici u bakru, pri nominalnoj struji transformatora, za ovu vrednost otpora iznosili 850 kW.

3.9. Zaključna razmatranja u vezi simetričnosti magnetskog kola

Analizom merenja u terenskim uslovima i izračunatih relativnih vrednosti magnetskih i električnih parametara utvrđeni su umereni stepeni nesimetrije magnetskog kola u podužnoj osi. Na osnovu izražene sinfaznosti odnosno jednovremenosti flukseva po magnetskom kolu, procenjuje se da nije došlo do oštećenja limova magnetskog kola. Pored ovoga, uočljiva je snižena kompaktnost ovog magnetnog kola, ali i zadovoljavajuća međusobna približnost reduktansi bočnih grana magnetskog kola.

Stepen nesimetričnosti električnih parametara namotaja se nalazi u opsegu uobičajene greške merenja (ispod 1 %), te se može oceniti da su namotaji zadržali svoju početnu geometriju, a i svoje početne električne parametre.

Uopšte uzev, može se oceniti da je magnetsko kolo u relativno dobrom stanju i da je ispitivani blok transformator zadržao svoje početne magnetske i električne parametre.

4. ZAKLJUČAK

Sprovedena opsežna ispitivanja pokazala su da je, i posle 30 godina rada, blok transformatora ASEA očuvana solidna simetrija magnetskog kola i električnih parametara.

Izmereni gubici neznatno odstupaju od onih fabrički izmerenih na novom blok transformatoru i kao takvi ukazuju na solidno opšte sadašnje stanje. Izmereni parametri, uz činjenicu da je ovaj transformator za 30 godina rada značajno uštedeo svoj radni vek (oko 10 godina po izvedenim proračunima), predstavljaju osnovu za definisanje novih hladnjaka za nameravano povećanje snage za 10 %.

5. LITERATURA

- [1] JUS - IEC 76-1: ENERGETSKI TRANSFORMATORI, Deo 1: Opšte, 1995.

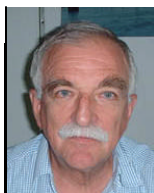
Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Radovan Lj. Radosavljević je rođen u Kraljevu, Srbija, 13. januara 1949. godine. Diplomirao je 1972, magistrirao 1987. i doktorirao 1994. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Od 1972. godine radio je na ETF u Beogradu kao asistent, od 1994. kao docent, a 2002. godine izabran je za vanrednog profesora. Glavni pravci naučnog i istraživačkog rada obuhvataju energetske transformatore, električne mašine i primenu savremenih digitalnih metoda za ispitivanje transformatora i električnih mašina u stacionarnim i dinamičkim režimima rada. R. Radosavljević je predsednik više stručnih tela na nacionalnom nivou. Autor je većeg broja radova objavljenih u eminentnim međunarodnim i domaćim časopisima ili konferencijama.



Zoran Radaković je rođen u Beogradu, 27. maja 1965. godine. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao 1989, 1992. i 1997. godine respektivno, na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Radi kao vanredni profesor na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu i kao istraživač u okviru Alexander von Humboldt Return Fellowship programa. Dosadašnje oblasti naučnog i stručnog rada: opterećivanje energetskih uljnih transformatora (termičko modelovanje, algoritmi termičke zaštite, planiranje i podešenje relejne zaštite, monitoring sistemi, konstrukcija), regulacija temperature, harmonijska izobličenja u mrežama, korišćenje bentonita u uzemljivačkim sistemima. Autor je jedne zbirke zadataka i oko 60 naučnih radova, od kojih je 13 objavljeno u inostranim časopisima.



Vladimir Milosavljević je rođen 1942. godine u Beogradu. Diplomirao je na Elektrotehničkom Fakultetu u Beogradu 1967. godine. Od 1967. godine do danas zaposlen je u JP „Đerdap”. Učestvovao je na montaži, puštanju u pogon i eksploataciji na HE „Đerdap I”, a na HE „Đerdap II” vodio radove na projektovanju, ugovaranju, isporuci i montaži elektro-mašinske opreme i eksploataciji HE „Đerdap II.



Milorad Damjanović je rođen 1948. godine u Šljukama, Pljevlja. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici 1972. godine. U periodu 1974-1979. godine radio je u Fabrici kablova u Jagodini, a od 1979. do danas, radi u HE „Đerdap I” u Kladovu. Najveći deo radnog staža proveo je na poslovima održavanja elektroenergetskog postrojenja.



Petar Nikolić je rođen 1970. godine u Kladovu. Diplomirao je na Tehničkom fakultetu u Čačku 1995. godine, smer - elektroenergetski sistemi. Od 1997. godine radi na HE „Đerdap I” u Kladovu, kao inženjer za razvodno postrojenje i zaštite.



Aleksandar A. Popović je rođen 18. marta 1966. godine u Beogradu. Završio je Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Osek – energetika. Bio je zaposlen u Minel Transformatori – Laboratorija visokog napona i Institutu „Nikola Tesla” u Centru za elektromerenja. Sada je zaposlen u „EPS-u” JP „Elektroistok” – odeljenje merenja na visokonaponskoj opremi. Oženjen je i otac dvoje dece.



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 energetske 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).

Upravljanje životnim vekom prekidača

Stručni rad
UDK: 621.316.542

Rezime:

U radu su prikazani stavovi svetske stručne javnosti u vezi upravljanja životnim vekom visokonaponskih prekidača. Opisani su faktori koji određuju životni vek i njegovo produženje. U celom svetu postoji problem „stare” opreme za čiju bi zamenu bila neophodna ogromna finansijska sredstva. Takođe postoji tendencija smanjenja novčanih sredstava za održavanje, što je dovelo do razvoja metoda za održavanje prekidača. On je ukratko opisan u radu.

Na kraju je dat osvrt na ovaj problem u „Elektrodistribuciji Beograd”.

Ključne reči: prekidač, održavanje, upravljanje životnim vekom, upravljanje profitom

Abstract:

CIRCUIT BREAKER LIFE MANAGEMENT

The paper presents ideas of international experts regarding life management of high voltage circuit breakers. Factors determining circuit breaker life and its extension are described in the paper. The problem of „obsolete” equipment, and its replacement, which requires tremendous financial resources, is common throughout the world. There is also a tendency to reduce the financial resources for maintenance, which brought about the development of the method for circuit breaker maintenance, which is briefly described in the paper.

This problem is finally reviewed as it occurs in Elektrodistribution Beograd.

Key words: circuit breaker, life management, profit management

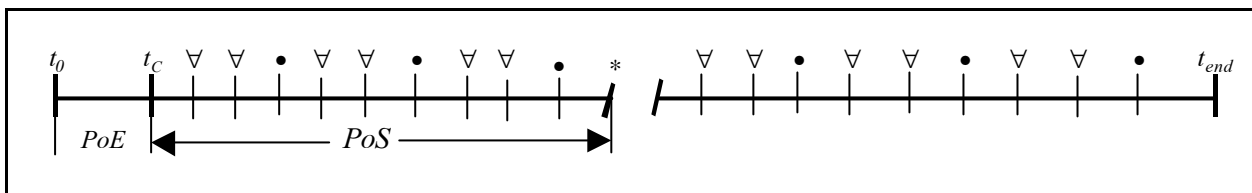
1. UVOD

Upravljanje životnim vekom bavi se svim periodima rada nekog tipa prekidača. To su specifikacija, razvoj, ispitivanje, montaža, ispitivanje na mestu ugradnje, pregled, održavanje, dijagnostička ispitivanja, nadgledanje stanja, obnavljanje, demontaža i odlaganje prekidača. Međutim, češće se pod ovim terminom smatra proces donošenja odluka o preo-

stalom životnom veku prekidača. Definicija životnog veka prekidača prikazana je na slici 1.

Na slici 1 je:

t_o - početak probnog rada prekidača praćen rutinskim ispitivanjem,
 t_c - završetak probnog rada i puštanje u pogon,
 t_{end} - kraj životnog veka - demontaža i odlaganje nekih delova koji se čuvaju kao rezervni delovi, dok se ostatak odnosi na otpad.



Slika 1. Životni vek prekidača

- ∇ - nivo održavanja A - prekidač je u pogonu,
- - nivo B - prekidač mora biti isključen, ali se ne otvara,
- * - nivo C - remont, prekidač se otvara i van pogona je,
- PoE - period montaže, i
- PoS - period ispravnog rada.

Svetsko iskustvo je da je očekivani životni vek između 25 i 40 godina. Mogu se pronaći retki primeri sa kraćim i dužim vekom. Prekidač koji je dobro održavan i koji je u relativno dobrim uslovima pogona, može dostići vek od 40 godina sa jednim ili više remonata. Posle toga, prekidači se uglavnom zamenjuju. Obnavljanje prekidača, sa ciljem da on bude u pogonu duže od predviđenog veka od 25 do 40 godina, zove se produženje životnog veka.

2. PREOSTALI ŽIVOTNI VEK

2.1. Parametri koji određuju životni vek

Preostali životni vek prekidača zavisi, s' jedne strane, od procesa starenja i habanja, i s' druge strane, od kvarova izazvanih lošom konstrukcijom, proizvodnjom, montažom, upotrebom ili održavanjem. Procesi starenja i habanja zavise od proteklog vremena u pogonu i broja operacija, pa su predvidivi. Mogu se uporediti sa dozvoljenim vrednostima, koje je na osnovu ispitivanja definisao proizvođač. Kvarovi mogu da dovedu do manjih ili većih otkaza, smanjujući pouzdanost i sigurnost prekidača. Primeri kumulativnih naprezanja su starost, period protekao od poslednje operacije održavanja, broj sklopnih operacija, prekinute struje kratkih spojeva, broj prekidanja kapacitivne ili induktivne struje i uticaji okoline. Kvarovi se otkrivaju pregledom, dijagnostičkim ispitivanjem, nadgledanjem stanja ili u toku remonta.

Na određivanje životnog veka prekidača mogu da utiču i uticaji koji nisu vezani za stanje prekidača. To su npr. povećane pogonske struje ili struje kratkih spojeva u mreži, sklopna svojstva, dielektrična svojstva, funkcionalnost i pogonska vremena. Tu su i ekološki razlozi kod ulja i, u poslednje vreme, SF₆ gasa. Nedostatak prostora za montažu i održavanje opreme u slučaju zamene opreme jednog naponskog nivoa drugim (višim) pri rekonstrukcija-

ma takođe mogu da dovedu do brže zamene nekog prekidača stare tehnologije (ulje, vazduh). Tehnička zastarelost prekidača takođe može doći do izražaja.

Ukoliko nema problema sa stanjem prekidača i svim već pomenutim razlozima, produženje životnog veka je razumno rešenje. Omogućava se da prekidač bude duže u pogonu nego što je to bilo predviđeno prilikom ugradnje prekidača u postrojenje. To dovodi do uštede finansijskih sredstava. Niko ne zamenjuje opremu koja ispravno funkcioniše, iako je stara.

2.2. Naprezanje prekidača

Za nove konstrukcije prekidača očekuje se da dostignu 25 godina rada (ili više) bez otvaranja prekidnog elementa (remonta). Zahtevi za električnom i mehaničkom trajnošću novih konstrukcija zbog toga su bazirani na 25 ili 40 godina rada. Oni koji se baziraju na 25 godina rada označeni su kao „maintenance free” (bez održavanja). To znači da u toku tog životnog veka najverovatnije neće biti potrebe za remontom u uobičajenim uslovima upotrebe.

Radna grupa CIGRE 13-06, koja se bavi pouzdanošću prekidača, sprovela je anketu o naprezanju prekidača [1]. Pokazalo se da 90 % prekidača godišnje izvrši oko 80 sklopnih operacija (prekidanje ili uključanje struje do naznačene). To je dovelo do 2 000 operacija za 25 godina. U retkim slučajevima broj operacija je veći, npr. dve operacije dnevno.

Radna grupa 13-08, koja se bavi životnim vekom, sprovela je anketu o električnim naprezanjima prekidača. Odgovorilo je 18 kompanija iz 13 zemalja sa 4 kontinenta, uz populaciju od 70 000 prekidača.

Rezultati su:

1. više od 90 % svih kvarova dešava se na nadzemnim vodovima,
2. na jednomvodu prosečno ima 1,7 kratak spoj godišnje. Medijana je 1,2, a 90 % -na vrednost je 3,3 kvara godišnje,
3. kod nižih prenosnih napona, 70 % su jednofazni kratki spojevi, a kod viših prenosnih napona taj procenat je 90 %,
4. 80 % kvarova nestaje posle prvog isključenja u ciklusu automatskog ponovnog uključanja, a 5 % u drugom,

5. očekivana struja na mestu ugradnje prekidača je oko 50 %, a 90 % -na vrednost je 75 % naznačene struje prekidača,
6. srednja struja kratkog spoja koju prekidaču prekidači je 20 %, a 90 % -na vrednost je 35 % naznačene vrednosti.

Za moderne prekidače se smatra da struje ispod 50 % naznačene vrednosti struje kratkog spoja imaju mali (zanemarljiv) uticaj na naprezanje kontakata i mlaznika. Može se zaključiti da su u realnoj mreži prekidači u znatno povoljnijoj situaciji nego što je to predviđeno tipskim ispitivanjima. Ta činjenica bitno utiče na životni vek prekidača. Poznavanje broja kratkih spojeva u sopstvenoj mreži može dovesti do znatno smanjenog naprezanja prekidača, a samim tim i do odlaganja ili produženja životnog veka prekidača.

Ista anketa pokazala je da meteorološki uslovi uglavnom nisu odgovorni za otkaze prekidača, jer se nepovoljni uslovi dešavaju ređe nego što je predviđeno ispitivanjem.

2.3. Ekonomska razmatranja

Elektroprivredne organizacije u poslednje vreme pridaju sve veći značaj upravljanju prihodima, zahvaljujući prelasku na tržišni način rada sa nekada monopolističkog. Prihodima se daje veći značaj od opreme. Zbog toga stručnjaci traže nova rešenja, kako bi smanjili investicione i eksploatacione troškove. Sve više se uvode cost/benefit analize, tj. traži se balans između rizika i troškova. Analiza koja se najčešće koristi je dobro poznati metod aktualizacije - svi troškovi iz različitih vremenskih perioda svode se na sadašnji trenutak i sabiraju se.

Troškovi koji se odnose na prekidače su:

1. cena opreme, uključujući rezervne delove, alate, obuku,
2. troškovi montaže, uključujući dodatne građevinske i infrastrukturne radove,
3. troškovi pogona (pomoćna energija, vizuelni pregledi),
4. troškovi održavanja (preventivno i korektivno),
5. troškovi adaptacije, novih tehnika nadgledanja i slično,
6. troškovi usled neisporučene energije zbog neraspoloživosti prekidača,
7. troškovi demontaže i odlaganja prekidača na kraju životnog veka ili preostala vrednost (koja nije trošak, već prihod).

Neki od ovih troškova su više, a neki manje poznati. Trendovi su, ipak, jasni:

1. cena novih prekidača opada,
2. troškovi montaže su manji nego za starije tehnologije (manje građevinskih radova, manji prostor,

manje pomoćnih postrojenja (kompresori, ulje), jednostavnije povezivanje sekundarne opreme, jednostavnija montaža i ispitivanje pri puštanju u pogon,

3. troškovi za održavanje novih prekidača su manji,
4. uvođenje nadgledanja kod starih tipova prekidača veoma je skupo,
5. cena rezervnih delova starih prekidača naglo raste,
6. cena transfera znanja opada, i
7. troškovi adaptacije stare tehnologije su previsoki.

Svi ovi troškovi suštinski utiču na određivanje životnog veka prekidača, zbog sve većeg pritiska (npr. Regulacionog tela) da se oni smanje zbog nedostatka ili uštede finansijskih sredstava. Odlaganje održavanja prekidača direktno smanjuje troškove. Međutim, na produženje životnog veka najviše utiču investicioni troškovi. Projektovan (predviđen) životni vek prekidača u svetu iznosi 25 do 40 godina. Za kupovinu novog prekidača obično se pozajmljuju novčana sredstva, koja se kasnije vraćaju u izvešnim, obično jednakim, iznosima, sa kamatom. Period vraćanja obično je nešto kraći ili jednak predviđenom životnom veku. Međutim, ukoliko se životni vek prekidača procenom stanja produži, izvestan niz godina posle otplate prekidača neće biti investicionih troškova, već jedino troškova za održavanje. To kompaniji donosi profit, jer je cena električne energije određena za slučaj da je period otplate anuiteta jednak životnom veku prekidača. Prekidač, iako amortizovan, donosi profit sve dok troškovi za njegovo održavanje ne postanu previsoki.

Optimalno održavanje i produženje životnog veka donose velike uštede. U poslednje vreme, to ima sve veći značaj zbog prelaska sa upravljanja opremom na upravljanje prihodima.

2.4. Upravljanje životnim vekom prekidača RCM metodom

Srećući se sa uvođenjem konkurencije u proizvodnju i prenos električne energije, kompanije su prinuđene da preurede strategiju održavanja. Ekonomske analize ističu potrebu za postupcima koji omogućavaju produženje životnog veka opreme i omogućavaju upravljanje životnim vekom. Osnovni zadaci su:

1. odabrati opremu na kojoj treba izvesti neki od postupaka održavanja, i
2. rangirati opremu u pogledu redosleda održavanja.

Rangiranje opreme daje priliku da se odredi ona oprema koja će se prva održavati. RCM (Reliability Centered Maintenance) metod omogućava rangiranje opreme na optimalan način, pri čemu se može doći do zaključka da je oprema dostigla kraj životnog veka i da je treba zameniti novom.

U svetu se uglavnom koriste četiri strategije održavanja:

1. korektivno,
2. bazirano na fiksnim vremenskim intervalima,
3. na osnovu stanja, i
4. održavanje zasnovano na pouzdanosti.

Korektivno održavanje se primenjuje kada se kvar već dogodio. Najčešće nije predviđeno kao strategija, već se primenjuje prinudno. Postoje kvarovi prekidača koji se ne mogu predvideti (npr. pucanje pogonske poluge usled zamora materijala).

Održavanje na osnovu prethodno definisanih vremenskih intervala praktikovano je kao uobičajen postupak održavanja u mnogim kompanijama širom sveta u toku dugog niza godina. Ovaj način održavanja može dati zadovoljavajuće rezultate, mada nije finansijski efikasan iz više razloga. Često su postupci održavanja obavljani nepotrebno, ponekad uz smanjenje pouzdanosti (loše obavljene radovi), pa ubrzo posle remonta nastaje kvar. Prekidači su zamenjivani novim, prema definisanom vremenu, iako je njihov životni vek mogao biti duži.

U toku poslednjih desetak godina postoji evidentan pomak sa vremenski definisanog ka održavanju određenom stanjem prekidača. Osnovni cilj je da se prekidači ne otvaraju nepotrebno ukoliko im je stanje zadovoljavajuće. Razlog su velika finansijska sredstva, koja su sve više ograničena i u najrazvijenijim zemljama, zbog uvođenja konkurentnosti u poslovanje elektroprivrednih kompanija. Veliki su i organizacioni problemi (rezervni delovi, alati i stručna ekipa). Prema ovom metodu, stanje prekidača treba odrediti neinvazivno, bez otvaranja prekidača. To se postiže dijagnostičkim ispitivanjima ili nadgledanjem stanja.

Četvrta, najnovija strategija uključuje analizu pouzdanosti u proces održavanja. U velikim svetskim kompanijama već se uspešno primenjuje [1,5,6]. Cilj ovog pristupa je da se istovremeno uzmu u obzir stanje prekidača i posledice kvara. Razlog je nedostatak novčanih sredstava za održavanje, zbog čega se zahteva da se najpre remontuju prekidači sa lošim stanjem, čiji bi kvar izazvao najteže finansijske posledice u sistemu. Dakle, za rangiranje prekidača na listi redosleda održavanja nije važan samo tehnički, već i finansijski aspekt. Pouzdanost napajanja električnom energijom zavisi od strategije održavanja i raste redosledom kojim su strategije navedene u ovom radu. Najveća pouzdanost napajanja postiže se RCM strategijom. To je prirodno, jer je osnova RCM metoda upravo pouzdanost napajanja potrošača.

2.5. RCM strategija održavanja

RCM strategija održavanja sastoji se u sledećem:

1. odrediti stanje prekidača,
2. odrediti značaj prekidača za deo mreže kao celinu, tj. uticaj kvara prekidača na pouzdanost napajanja električnom energijom,
3. kombinovati obe informacije radi određivanja optimalne liste redosleda prekidača za održavanje.

Drugim rečima, nije važno jedino stanje prekidača, niti samo posledice kvara, već i jedno i drugo istovremeno. Na primer, prekidač može biti u lošem stanju, ali njegov otkaz neće dovesti do velike štete. Njegov remont može biti odložen, uz remont najpre prekidača sa lošim stanjem i teškim finansijskim posledicama, usled neisporučene energije.

Kriterijumi za određivanje stanja prekidača su [6]:

1. starost,
2. tip prekidača (malouljni, vazdušni, SF₆),
3. broj prekidanja struja kratkog spoja,
4. broj sklopnih operacija,
5. iskustvo sa tim tipom prekidača,
6. rezultati dijagnostičkih ispitivanja ili nadgledanje stanja,
7. logistika (osoblje, rezervni delovi, specijalni alati).

Ovim kriterijumima pripisuju se određeni težinski faktori, kako bi se uzelo u obzir uticaj svih faktora na ukupnu vrednost veličine koja se može nazvati „stanje prekidača”.

Prema [6], značaj prekidača i procena posledica kvara predstavljaju drugu važnu veličinu za definisanje liste prekidača za održavanje. Ovu veličinu određuju:

1. neraspoloživost transformatorske stanice,
2. intenzitet kvara prekidača,
3. konfiguracija transformatorske stanice,
4. neisporučena aktivna snaga,
5. vrsta potrošača,
6. socijalni efekti, i
7. finansijski troškovi usled neisporučene energije (za proizvođača i za potrošača uključujući i penale, gde su oni uvedeni).

Prema [5], težina posledica otkaza prekidača određena je:

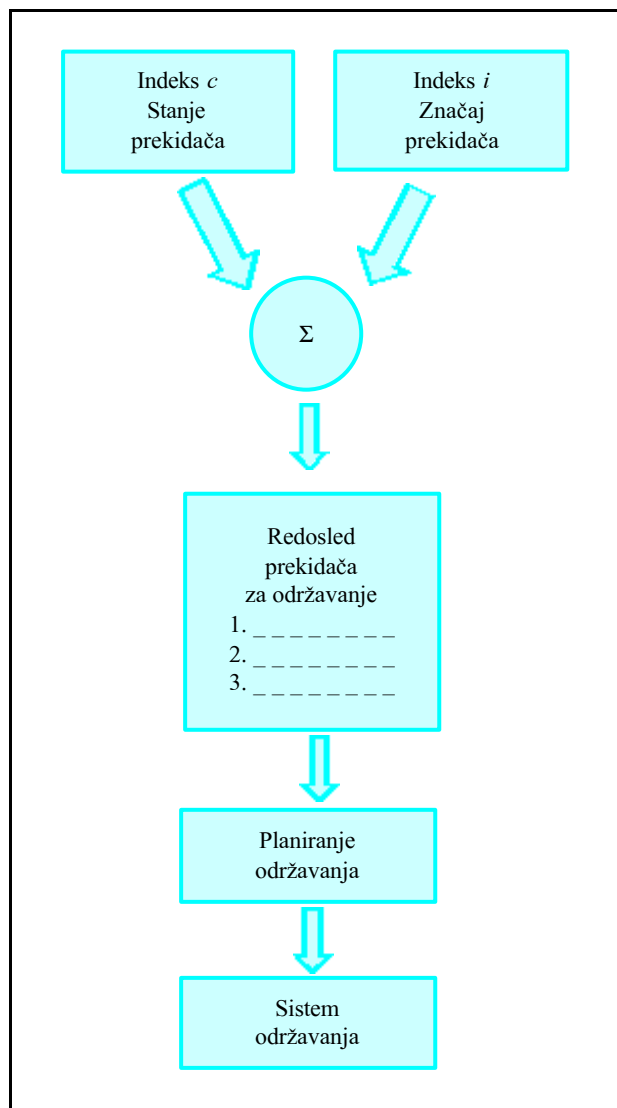
1. efektom kvara prekidača na rad sistema,
2. komercijalnim efektom - neisporučena energija, penali za proizvođača, kao i gubici i povećani troškovi kod potrošača,
3. brojem susednih prekidača koji prekidaju struje kvara umesto prekidača koji je otkazao, kao i brojem prekidača koje treba isključiti da bi se prišlo prekidaču u kvaru, i

4. posledica isključenja susednih prekidača umesto prekidača u kvaru (neselektivno isključenje - nepotrebno isključeni potrošači).

Najteže posledice otkaza su kod generatorskih prekidača, zatim prekidača u radijalnim mrežama, pa tek onda u prenosnim. Težinski faktori pripisuju se i ovim uticajima vezanim za posledice. Faktor „stanje”, prema [6], iznosi najviše 100, isto kao i faktor „značaj prekidača”. Oba kriterijuma kombinuju se kao na slici 2.

Na slici 3 prikazan je dijagram čija je apscisa „značaj prekidača” (od 0 do 100), a ordinata „stanje” (od 0 do 100). Prikazane su proizvoljne vrednosti faktora za četiri prekidača. Rastojanja d određuju redosled prekidača za održavanje ($d_3 > d_2 > d_4 > d_1$), pa bi redosled bio 3, 2, 4, 1.

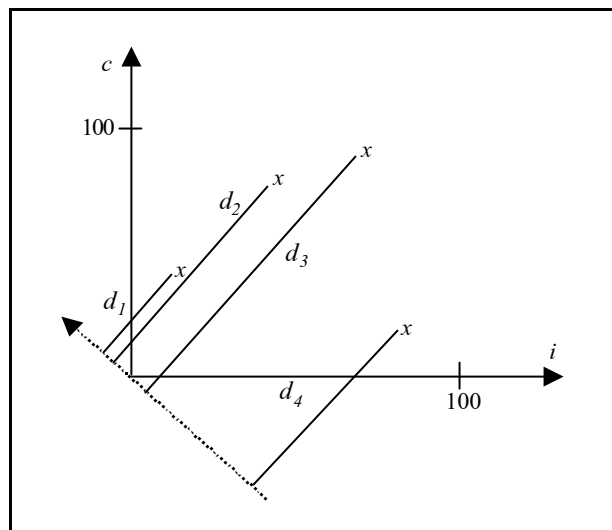
Prekidač 1 ima mali značaj, a prekidač 4 veliki. Kod prekidača 2 i 3 oba faktora su velika. Najve-



Slika 2. Algoritam za RCM metod

ći faktori su za prekidač 3, pa prvo njega treba remontovati.

U pogledu određivanja stanja prekidača RCM metod se ne razlikuje od održavanja na osnovu stanja prekidača, jer se određivanje stanja obavlja kod oba metoda. Međutim, kod primene RCM metoda dodatno treba odrediti značaj prekidača primenom teorije pouzdanosti. RCM metod je teži za primenu i u razvoju je. Prednost koju donosi su finansijske uštede.



Slika 3. RCM metod

3. PREKIDAČI U „ELEKTRODISTRIBUCIJI BEOGRAD”

U ovom delu rada analiziran je značaj informacionog sistema za upravljanje životnim vekom 110 kV-nih SF₆ prekidača ugrađenih u gasom izolovana, metalom oklopljena postrojenja 110/10 kV/kV. Slična analiza mogla bi se izvršiti i za ostale tipove prekidača. U „Elektrodistribuciji Beograd” ima šest ovakvih transformatorskih stanica (TS) u pogonu, dok sedma još uvek nije puštena pod napon. To su TS „Filmski grad”, puštena u pogon 1979. godine, TS „Slavija” (1980), TS „Kalemegdan” (1981), TS „Mirijevo” (1984), TS „Pionir” (1989) i TS „Blok 20” (1995) godine. U tabeli 1 prikazan je broj prekidača:

Tabela 1. Broj prekidača u „Elektrodistribuciji Beograd”

	Malouljni	SF ₆	Vakuum
110 kV	37	24	-
35 kV	373	-	-
10 kV	1 124	-	344

Iz dosadašnjeg teksta jasno je da je najdelikatnija odluka u procesu održavanja jednog prekidača ona koja se odnosi na njegov remont. Remont zahteva dosta finansijskih sredstava, veoma obučeno osoblje, rezervne delove (kontakti, mlaznik, zaptivači) i specijalne alate. Osim toga, ukoliko radovi pri remontu nisu obavljani kako treba, postoji izvestan rizik od smanjenja pouzdanosti (nepotreban kvar). Isto tako, treba znati da postoje kvarovi koji su iznenađujući i nepredvidivi (pucanje poluga usled zamora materijala), pa i odlaganje remonta predstavlja rizik. Međutim, remontom se ionako ne mogu detektovati poluge koje bi stradale usled zamora materijala, ali se mogu videti očigledna oštećenja, ako ih ima. Odluka o odlaganju ili izvođenju remonta zbog toga predstavlja balans između dva rizika. Kada se doneše odluka da se remont ipak izvrši, razumno je remontovati samo jedan pol prekidača, jer se na osnovu njega može zaključiti o celoj populaciji zbog toga što prekidači rade u sličnim uslovima.

Informacije o naprezanju prekidača mogu mnogo doprineti ispravnoj odluci. Prekidači su u dobrim klimatskim uslovima, jer su u zatvorenoj prostoriji (zgradi). Nema vetra, snega, leda, životinja, vlage i niskih temperatura. Prema slobodnoj proceni, ovi prekidači obave oko 50 sklopnih operacija godišnje. Nažalost, na pogonskim mehanizmima uglavnom nema brojača operacija, koji bi dali tačan podatak o broju operacija. Međutim, ukoliko bi se smatralo da prekidač ima 50 sklopnih operacija, od 1979. godine (TS „Filmski grad”) najstariji prekidač mogao je da obavi $50 \times 24 = 1\ 200$ sklopnih operacija, za koje se inače smatra da ne mogu bitno da oštete kontakte i mlaznik. Pogonski mehanizam je tipski ispitan za 10 000 operacija, pa je jasno da do habanja mehanizma nije moglo doći u meri da se zahteva remont pogona. Međutim, u uputstvu o održavanju pogona napominje se da remont pogonskog mehanizma treba izvesti posle 12 godina rada, ili 10 000 operacija. Očigledno je kriterijum od 12 godina rada primenljiv uz preteranu obzirnost. Verovatno je taj kriterijum prikladniji za upotrebu u zemljama gde prekidači imaju više sklopnih operacija nego kod nas. Inače, ni na jednom od ovih prekidača nisu primećene teškoće u radu prekidača. Naravno, kada postoje pogonski problemi, prekidač treba tretirati na adekvatan način.

Uputstvo za održavanje prekidača ugrađenog u svim TS osim na „Blok 20”, gde je prekidač novijeg tipa, nalaže remont u sledećim uslovima:

1. posle 8-12 godina rada,
2. kada je kumulativna struja kratkog spoja čije su vrednosti do naznačene struje 500 kA,
3. prekidanje struja do vrednosti naznačenog (normalnog) opterećenja: 2 000 prekidanja, i
4. mehaničke sklopne operacije: 5 000 operacija.

Kada bi se raspolagalo podacima o broju i vrednostima struja kratkih spojeva, dobila bi se dobra predstava o naprezanju prekidača. U „Elektro distribuciji Beograd” postoji evidencija o broju ispada, ali ne i o vrednostima struja kvara. Za ispravnu odluku o remontu potrebno je orijentaciono znati koliko je kratkih spojeva prekidač prekinuo i kolike su bile struje. Svetsko iskustvo je da su struje kratkih spojeva znatno manje od naznačenih kratkospojnih struja, pa su prekidači u znatno boljim uslovima nego što se nekada smatralo.

Period vraćanja investicionih sredstava bio je promenljiva kategorija i menjao se od slučaja do slučaja. Međutim, predviđen životni vek prekidača (i ostale opreme u transformatorskoj stanici) je 20 godina. Jasno je da je to previše kratak životni vek za ovu vrstu opreme. U svetu životni vek prekidača iznosi 25-40 godina. TS „Filmski grad” je u pogonu već 24 godine. Njen prvobitno određen životni vek praktično je istekao a da na prekidačima nije izvršen nijedan remont, što je dobro, jer za remontom prekidača nije ni bilo potrebe.

Može se zaključiti da je značaj informacija o broju operacija, prekinutim strujama kratkih spojeva, ranije izvršenim pregledima i dijagnostičkim ispitivanjima i sl. veoma veliki. Ovaj rad treba da podstakne stvaranje baze podataka sa svim relevantnim podacima o svakom prekidaču, što bi mnogo olakšalo donošenje odluka u pogledu održavanja. Sa sadašnjim stanjem razvoja računarske tehnike i softvera to ne bi moglo da predstavlja problem. Mikroprocesorska zaštita i upravljanje takođe mogu da pruže važne informacije o događajima u mreži (registracija događaja, lokacija kvara, folt-rikorderi, akvizicija podataka i slično). U poslednje vreme su se pojavili i komercijalno dostupni uređaji za nadgledanje stanja prekidača.

U ovom radu analizirani su SF₆ prekidači, koji pripadaju novijoj tehnologiji. Za analizu životnog veka veoma su važni i maloluljni prekidači, koji se na kraju životnog veka zamenjuju novim tehnologijama.

4. ZAKLJUČAK

U svetu se sa upravljanja opremom sve više prelazi na upravljanje profitom. Zbog toga su sredstva za održavanje prekidača (kao i ostale opreme) sve manja. Određivanje životnog veka prekidača i produženje tog životnog veka su zbog toga od velike važnosti, jer donose uštede finansijskih sredstava.

Produženje životnog veka omogućavaju savremena metodologija održavanja prekidača (dijagnostička ispitivanja, nadgledanje stanja, akvizicija i obrada podataka). Ta metodologija omogućava procenu stanja prekidača bez otvaranja prekidnog ele-

menta. Prekidači su često u povoljnijim uslovima nego što se to nekada verovalo.

Sa vremenski programiranog prelazi se na održavanje određeno stanjem prekidača. U poslednjih nekoliko godina napravljen je novi skok - u nekim velikim kompanijama razvijen je RCM metod. On uzima u obzir ne samo stanje, već i posledice kvara. Rezultat je rangiranje prekidača prema potrebi za održavanjem.

5. LITERATURA

- [1] Working Group 13.08: LIFE MANAGEMENT OF CIRCUIT-BREAKERS, CIGRE Technical brochure
- [2] A. L. J. Janssen, W. Lanz, D. F. Peelo, G. De Radigues, D. Makareinis: LIFE MANAGEMENT OF CIRCUIT-BREAKERS, Paper 13-104, CIGRE Session 2000.
- [3] A. L. J. Janssen, Y. Yamagata, W. Lanz, G. Aldrovandi, W. Degen: STUDIES ON LIFE MANAGEMENT OF CIRCUIT-BREAKERS, Paper 13-204, CIGRE Session 1998.
- [4] A. L. J. Janssen, G. De Radigues, Y. Yamagata, A. Giboulet, A. Girard, R. A. Sarkinen: ADVANCED MAINTENANCE MANAGEMENT TECHNIQUES FOR HV CIRCUIT-BREAKERS, Paper 500-06, CIGRE London Symposium 1999.
- [5] J. Corbett, A. Higgins, C. Kelleher: A PROCEDURE FOR ALLOCATING LIMITED RESOURCES TO CIRCUIT BREAKER PLANNED MAINTENANCE, Paper 13-303, CIGRE Session 2002.
- [6] T. Orłowska, G. Balzer, M. Halfmann, C. Neumann, A. Strand: LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CIRCUIT-BREAKERS BY APPLICATION OF RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE, Paper 13-103, CIGRE Session 2000.

Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Saša Stojković je rođen 1958. godine u Prizrenu. Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu je diplomirao 1982. godine, a magistrirao 1989. godine. Doktorirao je 1997. godine na Tehničkom fakultetu u Čačku.

Devet godina je radio kao konstruktor niskonaponske i visokonaponske rasklopne opreme u RO „Minel Elip” i DP „Minel Elektrooprema i postrojenja”. Od 1992. godine radi na Tehničkom fakultetu u Čačku, najpre kao asistent, a zatim kao docent.



Mihailo Popović je rođen 1942. godine u Podgorici. Na Elektrotehničkom fakultetu je diplomirao 1965. godine. Od 1966. godine radi u „Minel Ripanj – ispitna stanica”, a od 1990. godine radi u JP „Elektro distribucija – Beograd”. Bio je 7 godina rukovodilac investicija. Sada radi na održavanju trafostanica.

Automatski regulator pobude sinhronog generatora sa BUCK izlaznim stepenom

Stručni rad
UDK: 621.3.078; 621.316.7; 621.313.322

Rezime:

Sistem za regulaciju pobude sinhronog generatora u HE „Potpeć” je rekonstruisan zamenom starog regulatora napona tipa „KC” novim automatskim regulatorom pobude tipa ARP. Uređaj za automatsku regulaciju pobude tipa ARP predstavlja modifikovanu i unapređenu verziju svojih prethodnika tipa ARP 95 i ARRP prilagođenu strukturi postojećeg sistema za regulaciju pobude.

Ranija rešenja bila su realizovana korišćenjem redukovanog BUCK konvertora u bipolarnoj tranzistorskoj tehnologiji. U radu je predstavljeno unapređeno rešenje kod koga je izvršni organ ARP realizovan primenom celovite BUCK strukture u IGBT tehnologiji. Prednosti ovakve realizacije su sledeće: primena IGBT tranzistora omogućava rad sa višim izlaznim naponima, čime je omogućena primena istog uređaja u pobudnim sistemima sinhronih generatora u širem opsegu izlaznih snaga. Primenom celovite Buck strukture potpuno su otklonjene elektromagnetne smetnje koje su u ranijim realizacijama bile izrazite. U radu je pokazano da i izmenjena struktura izlaznog stepena ne utiče na promene dinamičkih karakteristika sistema za regulaciju pobude.

Ključne reči: *sinhroni generator, automatski regulator pobude, IGBT, BUCK konvertor*

Abstract:

SYNCHRONOUS GENERATOR AUTOMATIC EXCITATION REGULATOR WITH BUCK CONVERTER

The synchronous generator excitation system at HPP „Potpec” has been reconstructed by replacement of the old voltage regulator type „KC” by a new automatic excitation regulator type ARP. The automatic excitation regulator type ARP represents a modified and advanced version of the previous type ARP 95 and ARRP adapted to the structure of the existing excitation system.

The previous solutions were realized by utilization of the reduced BUCK converter in the bipolar transistor technology. The paper deals with an advanced solution, where the power converter of ARP was realized by application of the whole BUCK structure in IGBT technology. The advantages of such realization were as follows: application of IGBT enables operation with higher output voltages, thereby enabling the vast range of applications; by application of the complete buck structure, significant electromagnetic disturbances from the previous realizations were completely suppressed. The paper shows that the changed structure of converter does not affect, dynamic performances of the excitation system.

Key words: *synchronous generator, automatic excitation regulator, IGBT, BUCK converter*

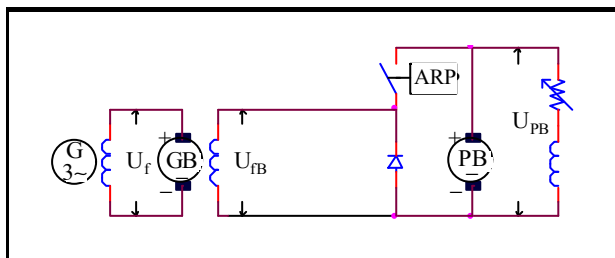
1. UVOD

Prema [1] sistem za regulaciju pobude sinhronog generatora obuhvata sinhroni generator (objekt upravljanja) i sistem pobude. Sinhroni generator (SG) i pobudni sistem vezani su negativnom povratnom spregom radi obezbeđenja automatske regulacije napona na krajevima generatora. Regulacija napona na krajevima SG realizuje se posrednim putem, preko regulacije indukovane elektromotorne sile (EMS) statora, promenom struje pobude. Sistem pobude SG predstavlja izvor struje pobude potrebne za održavanje napona na krajevima generatora i uključuje elemente za proizvodnju struje pobude (pobudnica), regulaciju pobude (ručni i/ili automatski regulator pobude) i uređaje za upravljanje, merenje i zaštitu u pobudnom kolu sinhronne mašine. Regulator pobude SG povezuje izlazne promenljive SG sa ulazom u pobudnicu (upravljački signal) u cilju regulisanja izlaznih promenljivih sinhronog generatora.

U HE „Potpeć” realizovan je jednosmerni (DC) sistem za regulaciju pobude SG (slika 1). Struja pobude SG ovde se proizvodi pomoću jednosmernog generatora sa nezavisnom pobudom (GB). Jednosmerni generator se pobuđuje pomoćnom pobudnicom (jednosmerni generator sa sopstvenom pobudom - PB). Regulacija pobudne struje SG vrši se regulacijom struje pobude glavne budilice ručno, pomoću otpornika za ručnu regulaciju ili automatski, pomoću automatskog regulatora pobude.

U okviru rekonstrukcije sistema pobude, na tri hidrogeneratora u HE „Potpeć” stari regulatori tipa KC zamenjeni su novim tipa ARP. Ostale komponente sistema pobude, uključujući i otpornik za ručnu regulaciju su zadržane. Nominalni podaci za SG i glavnu i pomoćnu budilicu dati su u prilogu 1.

U odnosu na prethodne verzije ARP 95 i ARRP [2], [3], koncepcija regulacije je ostala neizmenjena.



Slika 1. Rekonstruisani sistem za regulaciju pobude sa ARP

Realizovane su dve dodatne funkcije: Soft-start, koja obezbeđuje postepen porast napona SG pri pobuđivanju, čime se eliminiše preskok u odzivu;

funkcija brzinskog relea, koja obezbeđuje automatsko pobuđivanje generatora pri brzini 88 % nominalne brzine obrtanja u toku start-stop procedure.

Ugrađeni regulator projektovan je tako da se lako može uključiti u proces automatizacije elektrane i kompatibilan je sa mikroprocesorskim sinhronizatorom koji je predviđen za ugradnju, pri čemu regulator zadržava funkciju izjednačenja, po vrednosti amplitude, napona na izvodima blok transformatora i napona mreže.

Osnovna razlika uređaja ARP u odnosu na prethodne konstrukcije tipa ARP 95 i ARRP sastojala se u potrebi za povećanjem snage izlaznog stepena tj. izvršnog organa.

2. REALIZACIJA ARP SA IZLAZNIM STEPENOM U IGBT TEHNOLOGIJI

Sistem pobude u HE „Potpeć” odlikuje se višim nominalnim vrednostima napona i struje pobude glavne budilice u odnosu na prethodne sisteme kod kojih je uređaj ovakve vrste ugrađivan. Ranija rešenja bila su realizovana sa tranzistorskim izlaznim stepenom i ugrađivana su u pobudne sisteme sa nominalnim naponima pobude budilice do 100 V i struje pobude budilice do 10 A. Kao izvršni organ (prekidač) u ARRP korišćen je bipolarni tranzistor tipa BUV 98 A.

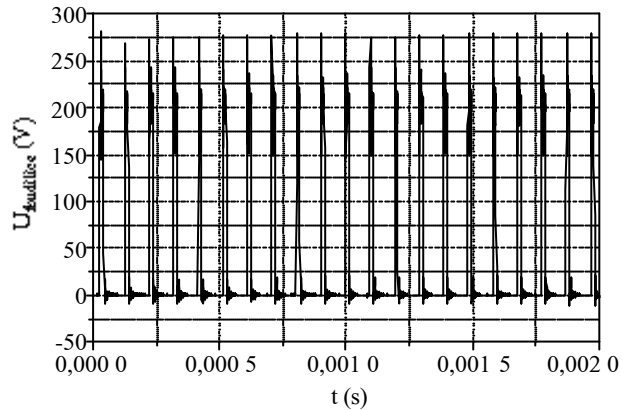
Karakteristike sistema pobude u HE „Potpeć” zahtevale su povećanje nominalnih vrednosti napona i struje tj. ukupne snage izlaznog stepena ARP-a. Radna vrednost napona pomoćne budilice, u čije kolo se ARP vezuje, iznosi 300 V. Pri pobegu od 36,5 % nominalne brzine obrtanja (granica odrade centrifugalnog klatna) napon pomoćne budilice raste na 500 V. Pri tome udarna struja pomoćne budilice iznosi 35 A. Ove, znatno više vrednosti radnih napona i struja u kolima pobude budilice pokazuju da se ranije korišćeni tranzistor tipa BUV 98 A ovde ne može primenjivati.

2.1. Struktura izlaznog stepena

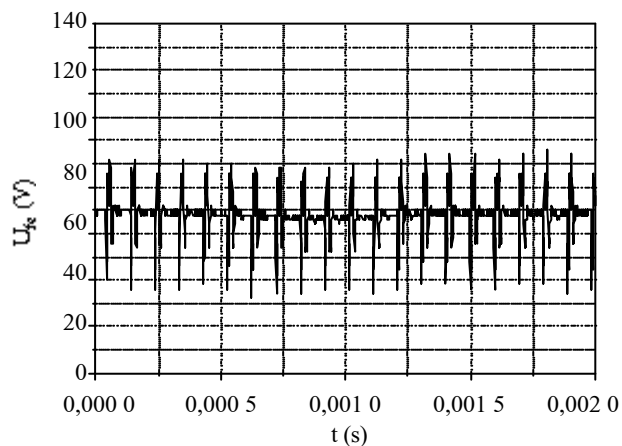
Izlazni stepen ARPa, izveden kao dc-dc spuštač napona, vezuje se u pobudno kolo glavne budilice (slika 1). Koncepcija izlaznog stepena (nepotpuna BUCK struktura) preuzeta je iz prethodnih realizacija [4].

U ovakvoj konfiguraciji pretvarača, napon na otvorenom prekidaču jednak je naponu pomoćne budilice. Pri izboru prekidača, mora se voditi računa da pri gašenju tranzistora napon u jednosmernom razvodu raste iznad nominalnih vrednosti (komutacioni prenaponi) kao posledica induktivnosti opterećenja i/ili induktivnosti samih veza ($L_{stray} * di/dt$). U ovom konkretnom slučaju to znači da u jednosmer-

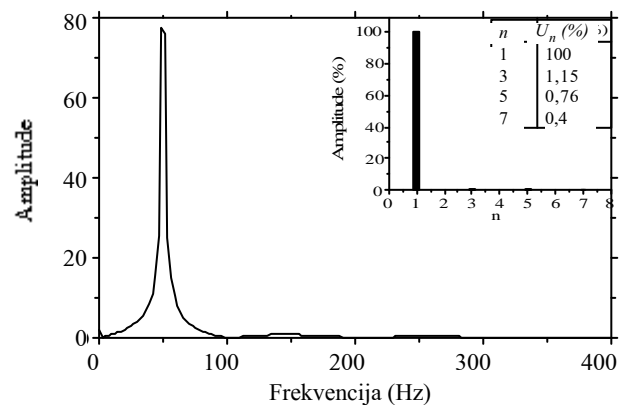
nom kolu prekidača naponi dostižu vrednosti iznad 500 V. Ovako visoke vrednosti napona uz odgovarajuću struju uslovile su prelazak sa bipolarnu na IGBT tehnologiju. Kao prekidač u izlaznom stepenu izabran je IGBT SKM 75GAL ($V_{CES}=1\ 200\ V$, $I_{CM}=75\ A$). Izabrani IGBT sa stanovišta podnosivog napona u potpunosti zadovoljava radne uslove. Sa



Slika 2. Napon pobude budilice u režimu automatske regulacije sa ARP bez LC filtera

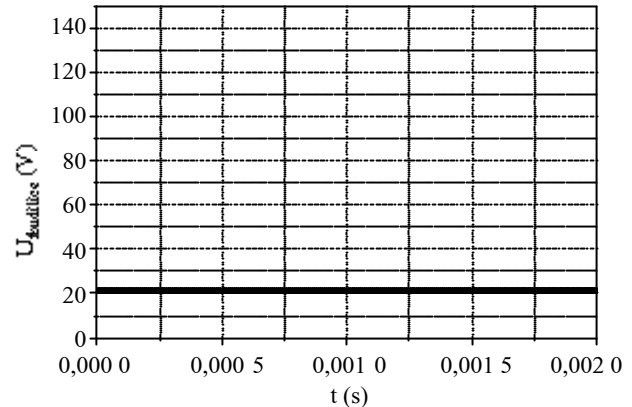


Slika 3. Napon pobude generatora u režimu automatske regulacije sa ARP bez LC filtera

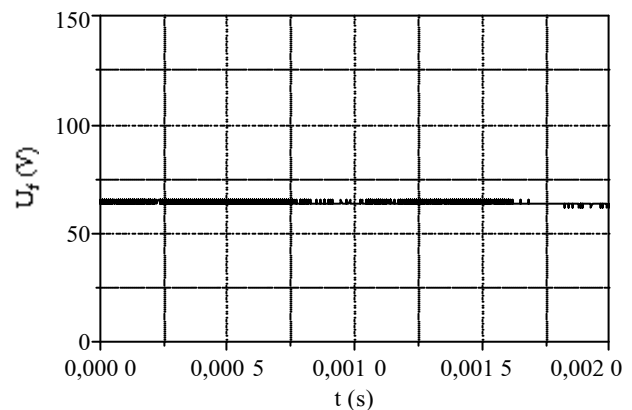


Slika 4. Napon generatora u praznom hodu u režimu ručne regulacije - harmonijska analiza

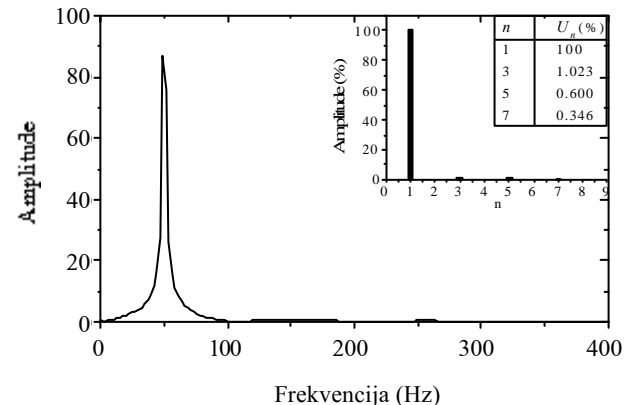
stanovišta strujnog opterećenja, bilo je neophodno proveriti da li se odgovarajućim hladnjakom bez ventilatora može obezbediti efikasno hlađenje. Poznato je da sa stanovišta dozvoljenog strujnog opterećenja IGBT-a osnovni ograničavajući faktor je, kao i kod većine poluprovodničkih elemenata, maksimalna dozvoljena temperatura spoja. Problem vi-



Slika 5. Napon pobude budilice u režimu ručne regulacije



Slika 6. Napon pobude generatora u režimu ručne regulacije



Slika 7. Napon generatora u praznom hodu u režimu automatske regulacije - harmonijska analiza

soke disipacije, nastao povećanjem snage izlaznog stepena, rešen je jednostavno bez ugradnje dodatnih ventilatora, snižavanjem izlazne frekvencije sa 20 kHz na 10 kHz.

Dalje povećanje snage izlaznog stepena može se postići snižavanjem nivoa komutacionih prenapona. Na taj način se omogućava primena iste prekidačke komponente u jednosmernim razvodima viših napona i smanjuju gubici tokom komutacije. Sniženje komutacionih prenapona ostvaruje se na dva načina: pravilnim izborom prenaponske zaštite IGBT-a i pravilnim izborom karakteristika upaljača za IGBT.

2.2. Karakteristike upaljača SKHI 10

S obzirom na to da je kontrolni parametar za IGBT ulazni napon gej-t-emiter, upaljač iz prethodne verzije zamenjen je upaljačem za IGBT tipa SKHI 10. Upaljač SKHI 10 u sebi ima objedinjene sledeće funkcije:

- dc-dc pretvarač kojim je izbegnuta upotreba dodatnog posebnog napajanja za izlazni stepen, čime se ujedno obezbeđuje i izolovanost istog;
- Na samom modulu je obezbeđena detekcija poremećaja napona napajanja,
- Izolacija izlaznog stepena realizovana je korišćenjem feritnih transformatora umesto ranije korišćenih optokaplera.
- Zaštita od kratkog spoja vrši se merenjem napona kolektor emiter pomoću kola za V_{CE} monitoring
- Detekcijom kratkog spoja ili poremećaja u napajanju aktivira se signal greške koji blokira paljenje IGBT.

Ovaj upaljač karakteriše i dodatna funkcija u kolu zaštite od kratkog spoja IGBT tranzistora, soft turn-off. Prilikom detekcije kratkog spoja automatski se produžava vreme gašenja IGBT-a smanjenjem vrednosti di/dt (povećanjem R_{goff}) i smanjuje veličina prenapona. Time je omogućena upotreba istih IGBT-a u kolima sa višim jednosmernim naponom što rezultuje u povećanju ukupne izlazne snage. Na ovaj način se smanjuje preskok napona pri gašenju IGBT-a u kritičnim situacijama (prevelika struja) i sa druge strane omogućava brzo gašenje u normalnom radu.

2.3. Rezultati ispitivanja

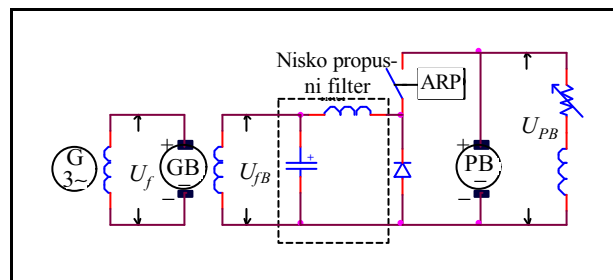
Nakon ugradnje regulatora, puštanja u rad i podešavanja parametara regulatora izvršena su prijemna ispitivanja. Ova ispitivanja su izvršena u cilju utvrđivanja kvaliteta regulacije i stepena zadovoljenosti zahteva specificiranih od strane naručioca.

Snimanjem dinamičkih karakteristika sistema za regulaciju pobude ustanovljen je dovoljno brz, aperiodičan odziv bez preskoka (slika 14, 15 i 16). Sama brzina odziva elektromašinskih sistema pobude dominantno je određena vremenskim konstantama budilice i samog generatora tako da se brzim statičkim regulatorom može samo delimično kompenzovati električna tromost budilice.

Međutim, tokom prijemnih ispitivanja, konstatovano je postojanje systemske greške u pokazivanju mernih instrumenata u elektrani kada je ARP u radu. Utvrđeno je da su greške u pokazivanju mernih instrumenata prouzrokovane visokim nivoom elektromagnetnih smetnji koje su posledica oblika napona u kolima sistema pobude. Ovakvu situaciju dodatno otežava činjenica da se energetske kablovi na pojedinim deonicama vode paralelno sa mernim kablovima.

U cilju detekcije i otklanjanja uočenih smetnji prvo su osciloskopom snimljeni oblici napona pobude glavne budilice i napona pobude generatora u režimima ručne i automatske regulacije (slika 2, 3, 4 i 5). Na slikama se jasno uočava kako se prekidački rad izlaznog stepena (slika 2) preslikavao i na napon pobude SG (slika 3). Fluktuacije napona pobude budilice u automatskoj regulaciji kretale su se u granicama od 0 do 250 V (slika 2). Vrednost ovog napona u režimu ručne regulacije, za nominalni radni režim generatora, je konstantna i iznosi 22 V (slika 4). Snimljene fluktuacije napona osim izrazitih elektromagnetnih smetnji imaju za posledicu i dodatno naprezanje izolacije pobudnog namotaja, što drastično utiče na njeno brže starenje. S obzirom na nepovoljan oblik napona pobude, izvršena je i analiza sadržaja harmonika u naponu generatora. Rezultati harmonijske analize za režime ručne i automatske regulacije prikazani su na slikama 6 i 7, na kojima je i tabelarno dat procentualni saržaj harmonika, od prvog do sedmog. Rezultati pokazuju da nije bilo značajnijeg uticaja oblika pobudnog napona na sadržaj harmonika u izlaznom naponu generatora.

S obzirom na to da ovakav oblik napona pobude generatora i budilice nije poželjan, neophodno je



Slika 8. Rekonstruisani sistem za regulaciju pobude sa ARP sa ugrađenim filterom

bilo preduzeti mere za njegovu korekciju. Fluktuacije izlaznog napona mogu se znatno ublažiti ugradnjom niskopropusnog LC filtera [5] (slika 8).

3. REALIZACIJA ARP SA BUCK IZLAZNIM STEPENOM

U cilju korigovanja nastalih smetnji, na izlazu dc-dc spuštača napona ugrađen je nisko propusni LC filter, čime je ostvarena celovita BUCK struktura [5]. Mali filter u izlaznom delu dc-dc pretvarača ima ulogu integralnog člana. S obzirom na to da LC kola unose par konjugovano kompleksnih polova u prenosnu funkciju sistema, bilo je neophodno simulacijom proveriti odziv sistema za regulaciju pobude.

Na slici 9 je dat blok dijagram sistema za regulaciju pobude SG. U simulaciji su parametri regulatora izabrani prema stvarno podešenim vrednostima. Pošto parametri budilice i generatora nisu bili dostupni, korišćeni su parametri za hidrogenerator prema [6]. Filter je projektovan prema učestanosti PWM, tako da nivo oscilacija napona na njegovom izlazu bude u okviru dozvoljenih granica. Granična učestanost filtera je za više redova veličina pomeren u odnosu na propusni opseg sistema za regulaciju pobude, tako da filter nema uticaja na dinamiku sistema. Prenosna funkcija filtera data je u bloku koji je prikazan isprekidanom linijom.

Simulacija odziva na step pobudni signal izvršena je za dva slučaja, sa i bez filtera, a rezultati su dati na slikama 10 i 11. Rezultati simulacije pokazuju da nema promena u dinamici sistema.

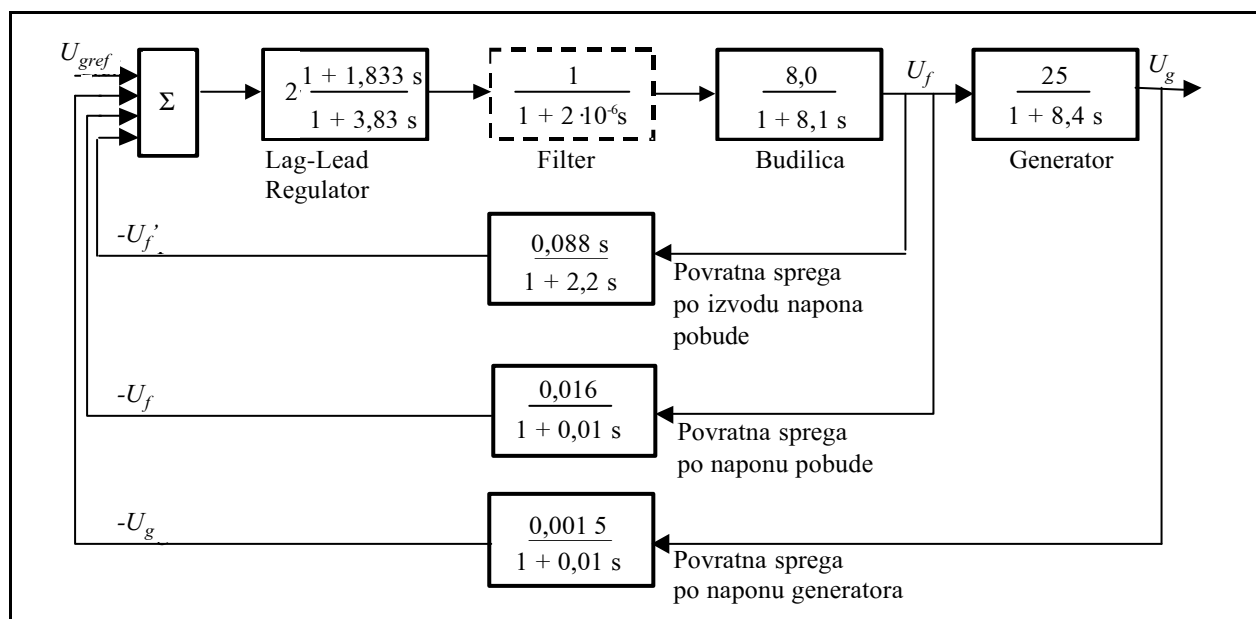
Prema zahtevu da talasnost napona pobude ne prelazi vrednost 2 % za pobudni sistem u HE „Potpeć” izabrani su sledeći parametri filtera: $C=2\ 000\ \mu F$, $L=1\ mH$, pri čemu granična učestanost iznosi $f_c=112\ Hz$. Zbog diskretnih vrednosti pasivnih komponenti koje su korišćene u izradi filtera projektovan je filter koji na 10 kHz unosi slabljenje 0,016.

3.1. Rezultati ispitivanja

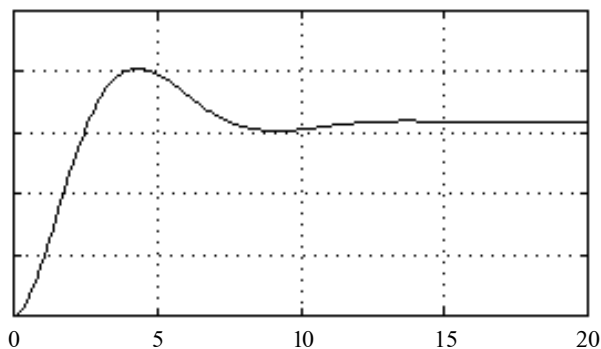
Nakon izvršene modifikacije, osciloskopom su snimljeni naponi pobude generatora i budilice kada je generator radio u automatskom režimu (slika 12 i 13). Na slikama se vidi da je željeni efekat, otklanjanje fluktuacija napona pobude, postignut. Praktično, oblik napona pobude budilice i generatora identičan je u režimu ručne i automatske regulacije (slika 5 i 6).

Otklanjanjem fluktuacija napona, smanjen je i nivo smetnji, kako izvan uređaja tako i u samom uređaju.

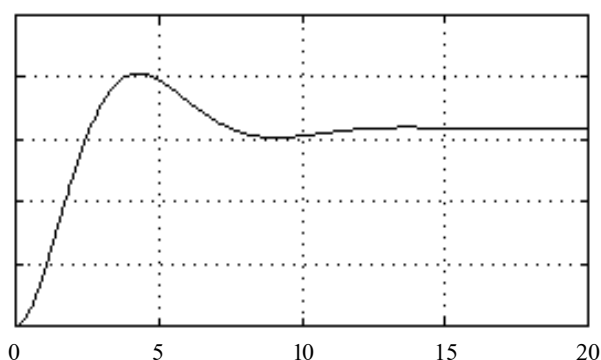
Tokom prijemnih ispitivanja ARP, izvedeno je više eksperimenata u cilju određivanja kvaliteta ponašanja sistema za regulaciju pobude pri raznim radnim režimima, kao što su prazan hod i rad generatora na mreži. S obzirom na to da je SG spregnut paralelno sa povezanim elektroenergetskim sistemom, njegov radni režim i parametri spoljnog sistema znatno utiču na performanse sistema za regulaciju pobude. Zbog toga su snimljeni odzivi pri različitim opterećenjima. Slike 14, 15 i 16 predstavljaju odziv sistema za regulaciju pobude kada u ARP nije ugrađen filter, a slike 17, 18 i 19 odziv sistema nakon ugradnje filtera. Na slikama 14 i 17 je prikazan od-



Slika 9. Blok dijagram jednosmernog sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora korišćene u izradi filtera; projektovan je filter koji na 10 kHz unosi slabljenje 0,016



Slika 10. Simulacija odziva sistema za regulaciju pobude na step signal sa ARP sa LC



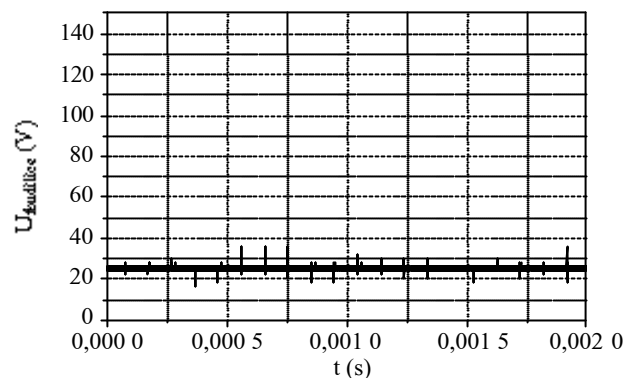
Slika 11. Simulacija odziva sistema za regulaciju pobude na step signal sa ARP bez LC

ziv SG na step pobudni poremećaj u iznosu $\pm 10\%$ i $\pm 7\%$ respektivno, kada mašina radi u praznom hodu. Na slikama 15 i 18 je prikazan odziv SG na step pobudni poremećaj $\pm 10\%$ pri radu generatora na mreži sa snagama $P=5\text{ MW}$ i $Q=5\text{ MVar}$, što odgovara tehničkom minimumu agregata. Slike 16 i 19 odgovaraju step pobudnom poremećaju $+5\%$ u režimima bliskim nominalnom režimu ($P=15,5\text{ MW}$ i $Q=6,5\text{ MVar}$ i $P=15\text{ MW}$ i $Q=17\text{ MVar}$ respektivno). Smanjenje pobudnog napona koje se na ovim slikama uočava, posledica je svođenja kritičnih veličina mašine u granice njihovih nominalnih vrednosti odradom limitera „Ograničenje maksimalne struje statora (OSS)”, a ne negativnog step poremećaja.

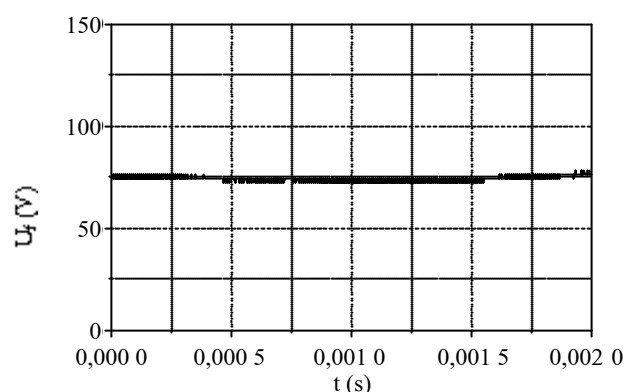
Cilj ovih poređenja je utvrđivanje eventualnih pogoršanja u dinamici odziva sistema nakon ugradnje LC filtera. Odzivi su pokazali očekivani rezultat tj. dinamika sistema za regulaciju pobude je ostala u potpunosti očuvana.

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan statički automatski regulator pobude SG realizovan primenom celovite BUCK strukture u IGBT tehnologiji.



Slika 12. Napon pobude budilice u režimu automatske regulacije sa ARP sa LC filterom



Slika 13. Napon pobude generatora u režimu automatske regulacije sa ARP sa LC filterom

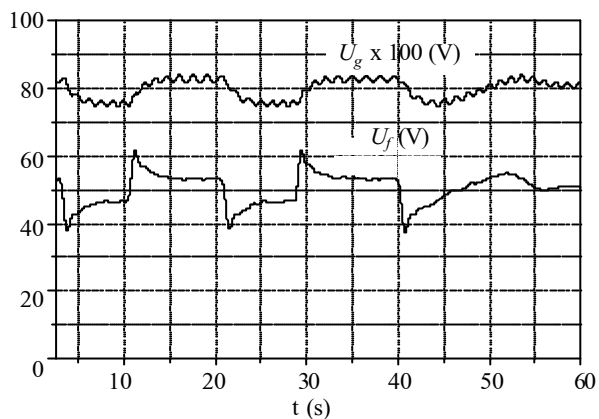
Korišćenjem IGBT tranzistora i odgovarajućeg upaljača, povećan je opseg izlaznih napona i snaga ARP-a, a samim tim i opseg snaga pobudnih sistema kod kojih se ovakav uređaj može koristiti.

Visok nivo elektromagnetnih smetnji zahtevao je i izmene u strukturi izlaznog stepena. Ugradnjom niskopropusnog pasivnog LC filtera, realizovana je celovita BUCK struktura. Primenom BUCK konvertora, potpuno su smanjene elektromagnetne smetnje izvan uređaja. Talasnost napona je svedena u granice 2% , čime je u potpunosti izbegnuto nepotrebno naprezanje izolacije pobudnog namotaja budilice.

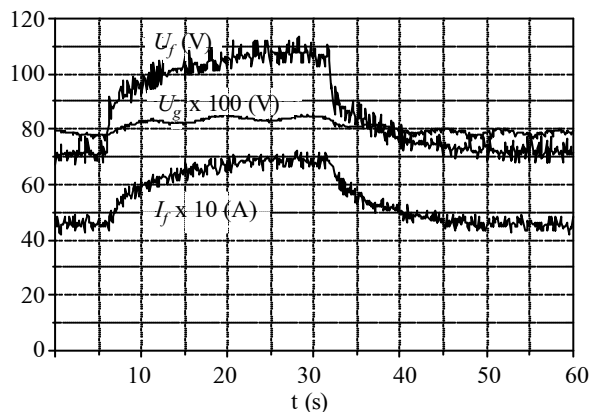
U radu je pokazano da se pravilnim izborom parametara LC filtera može izbeći svaki uticaj na dinamiku i kvalitet odziva sistema za regulaciju pobude SG.

Na osnovu dobijenih rezultata, možemo zaključiti da je izmenjena struktura izlaznog stepena ARP apsolutno poželjna prilikom realizacije jednosmernih sistema za regulaciju pobude SG, kao i kod generatora malih snaga kod kojih se celokupna struja pobude može obezbediti pomoću ARP.

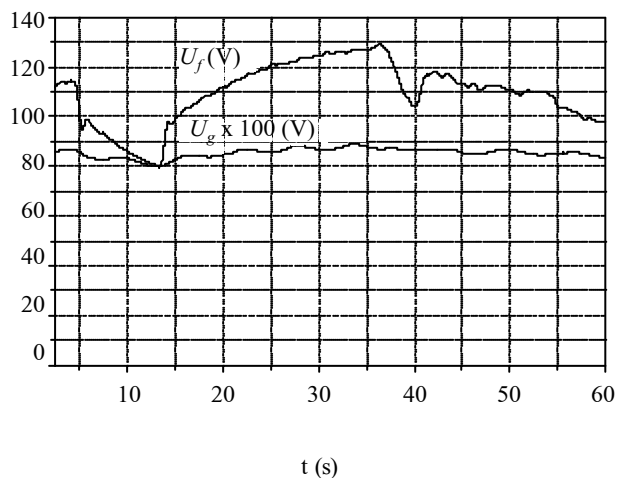
5. PRILOG 1



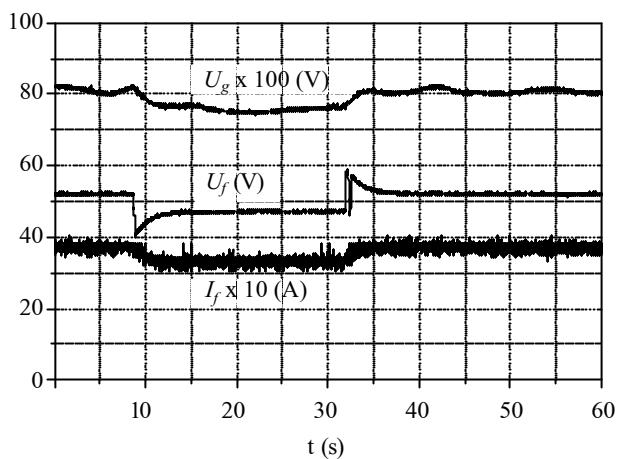
Slika 14. Odstziv generatora na step poremećaj +10 %, -10 % sa ARP bez LC filtera u praznom hodu



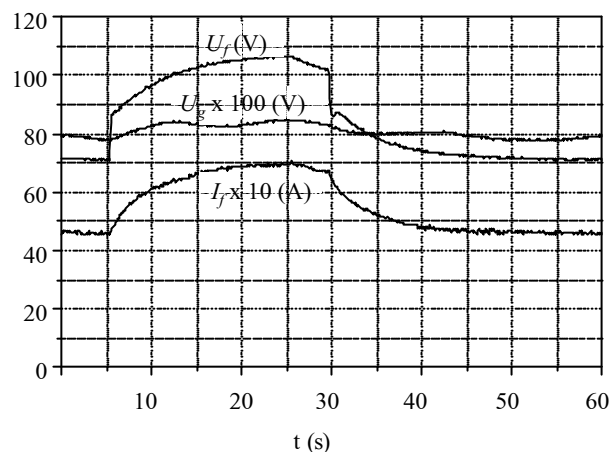
Slika 15. Odstziv generatora na step poremećaj +10 %, -10 % sa ARP bez LC filtera pri $P=5 \text{ MW}$ i $Q=5 \text{ MVar}$



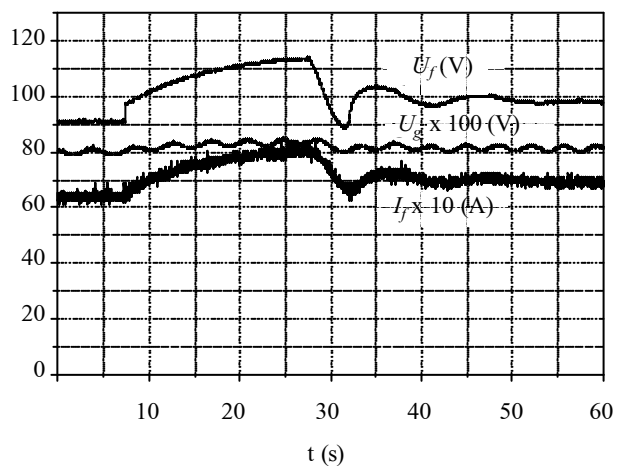
Slika 16. Odstziv generatora na step poremećaj +5 % uz odradu OSS sa ARP bez LC filtera pri $P=15 \text{ MW}$ i $Q=7 \text{ MVar}$



Slika 17. Odstziv generatora na step poremećaj +7 %, -7 % sa ARP sa LC filterom u praznom hodu



Slika 18. Odstziv generatora na step poremećaj +10 %, -10 % sa ARP sa LC filtera pri $P=5 \text{ MW}$ i $Q=5 \text{ MVar}$



Slika 19. Odstziv generatora na step poremećaj +5 % uz odradu OSS sa ARP sa LC filterom pri $P=15,5 \text{ MW}$ i $Q=6,5 \text{ MVar}$

Tabela 1.
Sinhroni generator

Snaga	20 000 kVA
Napon	8 800 V
Struja	1 310 A
cosφ	0,9

Tabela 2.
Glavna i pomoćna budilica

	Glavna budilica	Pomoćna budilica
Trajna snaga	120 kW	3,9 kW
Trajni napon	150 V	230 V
Trajna struja	790 A	17 A
Udarna snaga	330 kW	8,0 kW
Udarni napon	250 V	230 V
Udarna struja	1 320 A	35 A

6. LITERATURA

- [1] IEEE STANDARD DEFINITIONS FOR EXCITATION SYSTEMS FOR SYNCHRONOUS MACHINES, IEEE Std 421, 1986.
- [2] AUTOMATSKI REGULATOR POBUDE TIP A ARP 95, Čirić Z, Stevanović I, Dragosavac J, Arnautović D, Elektroprivreda, br. 4, Beograd, 1998.
- [3] REKONSTRUKCIJA SISTEMA POBUDE U VLASINSKIM HE, Stevanović I, Čirić Z, Dragosavac J, Arnautović D, Elektroprivreda, br. 1, Beograd, 2000.
- [4] TRANSISTOR-SPANNUNGSREGLER REG V 921-5, 22'2, Siemens.
- [5] POWER ELECTRONICS, Mohan N., John Wiley&Sons, 1995.
- [6] DINAMIČKE KARAKTERISTIKE AUTOMATSKOG REGULATORA POBUDE SA TRANZISTORSKIM IZLAZNIM STEPENOM, Stevanović I, Čirić Z, Dragosavac J, JUKO CIGRE, Herceg Novi, 1997.

Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Jasna Dragosavac rođena je 1970. godine u Beogradu. Diplomirala je 1994. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer elektroenergetski sistemi. Magistrsku tezu je odbranila 2002. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer elektroenergetski objekti i oprema.

Od 1995. godine zaposlena je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla“. Centar za automatiku i regulaciju, gde radi na poslovima projektovanja, konstrukcije i izrade, fabričkih ispitivanja, ugradnje, puštanja u rad, ispitivanja tokom eksploatacije i održavanja uređaja za regulaciju pobude sinhronih generatora, automatike elektrofiltera, zaštite sinhronog generatora. Pored toga, učestvovala je u projektima automatizacije malih hidroelektrana i merenja aktivnih i reaktivnih snaga u trafostanicama. Posebna oblast interesovanja je primena fuzzy logike u upravljanju hidroagregatom. Trenutno je angažovana na poslovima garancijskih ispitivanja turbinskog regulatora.

Autor je više radova prezentovanih na domaćim i stranim konferencijama i publikovanih u domaćim časopisima.



Novica Selaković je rođen 1952. godine u selu Draglica kod Nove Varoši. Osnovnu školu pohađao je u rodnom mestu i u Novoj Varoši.

Srednju elektrotehničku školu završio je u Užicu, a Elektrotehnički fakultet, energetski smer u Podgorici.

Zaposlen je u Limskim hidroelektranama od 1982. godine. Nepunih godinu dana radio je u HE „Bistrica“, a od 1983. godine je u HE „Potpeć“, na poslovima održavanja.

U periodu od 1991. do 2001. godine obavljao je poslove upravnika elektrane.

Oženjen je, otac dvoje dece i živi sa porodicom u Novoj Varoši.

Dragan Manojlović,
Olga Cvetković i Snežana Nikolić-Mandić

Degradacija transformatorskog ulja na bazi polihlorovanih bifenila bez narušavanja postojećeg kvaliteta životne sredine

Stručni rad
UDK: 665.7; 665.7.03.8

Rezime:

U ovom radu su prikazani rezultati eksperimenata hemijske degradacije transformatorskog ulja na bazi PCB, postignuti u laboratorijskim uslovima, rezultati ispiranja izolacionog materijala transformatora, kao i primena „domaćeg” sorbenta za odstranjivanje polihlorovanih bifenila iz životne sredine. Degradacije su izvedene sa dva različita degradaciona sredstva i nekoliko različitih degradacionih postupaka. Analizom dobijenih degradacionih proizvoda iz svih primenjenih postupaka, ustanovljeno je da degradacioni proizvodi predstavljaju ekološki bezopasne proizvode.

Ključne reči: transformatorska ulja, polihlorovani bifenili, hemijska degradacija, sorbent, zaštita životne sredine

Abstract:

DEGRADATION OF TRANSFORMER OIL ON THE BASIS OF POLYCHLORINATED BIFENYLS WITHOUT DEGRADING THE EXISTING QUALITY OF THE ENVIRONMENT

This paper deals with results of laboratory experiments referring to transformer oil chemical degradation on the basis of polychlorinated biphenyls, results referring to rinsing of transformer insulation material, as well as application of „domestic” sorbent for removal of PCB from the environment. The degradations were performed by means of two different degradation devices and several different degradation procedures. Analysis of obtained degradation products from all applied procedures proved that degradation products are environmentally harmless products.

Key words: transformer oils, PCB, chemical degradation, sorbent, environmental protection

1. UVOD

Polihlorovani bifenili (PCB) su klasa hlorovanih aromatičnih jedinjenja koja ulaze u sastav transformatorskih ulja. Broj kongenera do kojih se došlo zahvaljujući savremenoj instrumentalnoj tehnici i zvanično potvrđenih od IUPAC je 209. Fizičke i hemijske karakteristike svih kongenera nisu određene, pa samim tim i njihovo dejstvo u različitim segmentima životne

sredine. Svi oni ne predstavljaju opasne supstance, kao npr. kongener 180 (oznaka po IUPAC), molekulske mase 395 (2,2',3,4,4',5,5'-heptahlorobifenil). Najtoksičniji su oni koji su stereo-izomeri sa 2,3,7,8-tetrahaloro dibenzo-*p*-dioksinom tj. koplanarni PCB, kod kojih je supstitucija izvršena na meta- i para- položajima (kongeneri 77,126,169), a ne na orto-položajima.

Početak masovne upotrebe ovih jedinjenja datira još iz 1929. godine. Komercijalni nazivi formula-

Mr Dragan Manojlović, dipl. hem.; dr Snežana Nikolić-Mandić –Hemijski fakultet, 11 000 Beograd, Akademski trg 12-16
Dr Olga Cvetković, dipl. hem. – Centar za hemiju – IHTM, 11 000 Beograd, Njegoševa 12

cija pod kojima ih susrećemo su Aroclor (SAD), Clorophens, Phenclors, Delor (Nemačka), Kanoclor (Japan). Upotrebljavaju ih korisnici elektronske industrije, sistemi za proizvodnju i distribuciju električne energije gde se tehničke mešavine koriste kao kondenzatorske i transformatorske tečnosti, a kao zamena za klasična mineralna ulja. Ovako široka primena je posledica izuzetnih karakteristika transformatorskih ulja na bazi PCB: imaju visoke dielektrične konstante, pa samim tim slabu električnu provodljivost, velike su oksidativne stabilnosti, niske zapaljivosti. Iz tih razloga upotrebljavaju se kao plastifikatori površina u sloju mikronskog fluida, u proizvodnji mastila, kao vodootporni rastvarač za boje samokopirajućeg papira, u hidrauličnim pumpama i u izmenjivačima toplote, a u malim količinama kao ulje za podmazivanje u sistemima gde je potrebno postići uslove visokog vakuuma.

Primena pomenutih ulja je imala svoju ekspanziju sve do 1968. godine, „Yusho” incidenta, ili možda dve godine ranije, kada je u mesu riba iz Baltičkog mora pronađen PCB. Od tih događaja PCB je proglašen izuzetno rasprostranjenim zagađivačem visoke perzistencije u prirodnim uslovima, sporog mehanizma razgradnje, koji se deponuje u masnom tkivu, jetri i na koži. Ništa manje opasnim se ne smatraju ni proizvodi sagorevanja PCB, polihlorovani dibenzo-furani i polihlorovani dibenzo-*p*-doksini, koji neminovno prate nekontrolisano spaljivanje transformatorskog ulja, a u životnu sredinu pristižu pri najrazličitijim kvarovima transformatora [1].

Iz tih razloga se na globalnom planu otpočelo sa rešavanjem ovog ozbiljnog ekološkog problema.

Na teritoriji Jugoslavije smo, takođe, suočeni sa znatnim količinama transformatorskog ulja na bazi PCB. Polazeći od literaturnih podataka o degradaciji [2,3,4,5] poštujući propise iz oblasti zaštite životne sredine ekomonški razvijenih zemalja, npr. EPA standarde [6] i angažujući stručni i naučni kadar institucija u kojima smo zaposleni, napravili smo poslovni aranžman sa delom naftne industrije Srbije i osvojili postupke degradacije transformatorskog ulja na bazi PCB, u laboratorijskim uslovima. Osvojili smo postupke ispiranja izolacionog materijala transformatora, da bi transformator mogao da se vrati u upotrebu. Baveći se ovim problemom došli smo i do jednog novog postupka, i prijavili ga kao patent.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

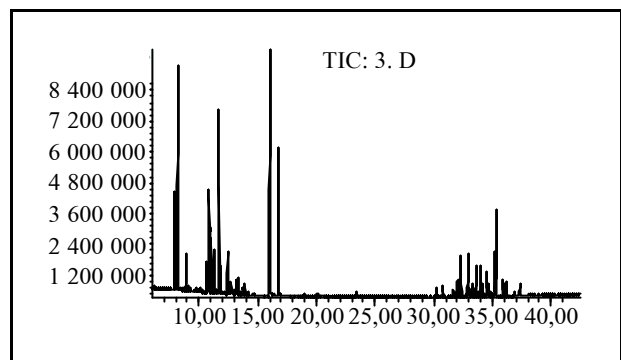
2.1. Uzimanje uzorka

Uzorci su uzeti u staklene flaše sa zatvaračem (zaštićenim Al-folijom), čuvani u laboratoriji na me-

stu, strogo namenski pripremljenom za ovu vrstu uzoraka, zaštićeni od ma kakvih fizičkih i hemijskih dejstava.

Od svakog ulja pripremljena su po tri uzorka različite koncentracije. Uzorci su za analizu rastvarani u *n*-heksanu. Analize su radene GC-MS metodom na aparatu HP 6890. Rezultati GC-MS analize su pokazali da transformatorsko ulje sadrži 52,65 % PCB i 47,35 % rastvarača (izomeri tri-hlor benzena).

Poređenjem rezultata GC-MS analize standarda i ispitivanih ulja, sastav ispitivanih ulja najpribližniji je Arochlor-u 1 260. Transformatorska ulja, kao što se vidi sa hromatograma (slika 1), pored poliflorovanih bifenila, sadrže najmanje dva izomera tri-hlorbenzena, kao rastvarač.



Slika 1. Hromatogram uzorka transformatorskog ulja - uzorak 1

3. EKSPERIMENTI DEGRADACIJE TRANSFORMATORSKOG ULJA OLEUMOM

Eksperimenti degradacije izvođeni su oleumom „Merck” p.a. kvaliteta, sa 30 % sumpor (VI)-oksida. U zavisnosti od eksperimenta menjan je odnos oleuma i uzorka, a pošto je svaki eksperiment ponavljan više puta, to se kod opisa eksperimenata neće navoditi tačno odmerena masa uzorka, već će biti navedena kao približna vrednost. Svi eksperimenti su izvođeni u troglom balonu (različite zapremine u zavisnosti od mase reaktanata) sa termometrom, refluks kondenzatorom i kapalicom. Reakcije su izvođene uglavnom na sobnoj temperaturi (naznačeno je kada su se odvijale na povišenoj temperaturi) uz konstantno mešanje magnetnom mešalicom.

3.1. Degradacija u kiseloj sredini

3.1.1. Eksperimenti degradacije u prisustvu Fe^{2+} -jona sa vodonik-peroksidom

Eksperimenti su izvođeni tako što je na odmerenu masu gvožđe (II)-sulfata, dodavana prvo odre-

dena masa uzorka ulja, a zatim masa oleuma, uz mešanje koje je trajalo još 90 minuta. Prvih desetak minuta reakcija je blago egzotermna (temperatura raste do 40° C), a reakciona smeša ima izgled paste. Posle završene reakcije reakciona smeša se prebacuje u vodu, neutrališe dodavanjem čvrstog natrijum-hidroksida (do pH=3,5) i tretira vodonik-peroksidom. Na površini reakcionog rastvora uočavao se sloj zelenkasto-žute boje koji je, pre dalje analize, odvojen. Rastvor je ekstrahovan, ekstrakt osušen anhidrovanim natrijum-sulfatom i analiziran GC-MS metodom. Izdvojeni sloj je na isti način pripremljen za analizu.

3.1.2. Eksperimenti degradacije u prisustvu Fe²⁺-jona uz primenu kalcijum-hidroksida

Rezultati eksperimenata 3.1.1. koji pokazuju da u degradacionom rastvoru zaostaje izvesna količina polihlorovanih bifenila i da je za njihovo uklanjanje neophodno upotrebiti veću količinu oleuma. Da bi se izbegli dodatni troškovi zbog povećane količine oleuma izvedeni su eksperimenti u kojima je reakciona smeša neposredno posle tretiranja oleumom prebačena u kalcijum-hidroksid i dobro homogenizovana. Reakciona smeša je dodavana u porcijama, polako i temperatura nije prelazila 90° C. Ovako pripremljena smeša ostavljena je u staklenom zatvorenom sudu 24 sata, a zatim ekstrahovana *n*-heksanom, ekstrakt analiziran GC-MS metodom. Rezultati su prikazani na slici 2 (oznaka uzorka na hromatogramu je K-3).

4. DEGRADACIJA U PRISUSTVU FE²⁺-JONA SA VODONIK-PEROKSIDOM U BAZNOJ SREDINI (FENTONOV REAGENS)

Eksperimenti su izvođeni tako što se na odmerenu masu gvožđe (II)-sulfata, prvo doda određena masa uzorka ulja, a zatim oleum, uz mešanje koje se nastavlja još 90 minuta. Prvih desetak minuta reakcija je blago egzotermna (temperatura raste do 40° C), reakciona smeša ima izgled paste, koja je po završenoj reakciji prebačena u vodu, pa je dodavanjem čvrstog natrijum-hidroksida doteran do pH=12. Uz mešanje je dalje tretirana vodonik-peroksidom na povišenoj temperaturi (do 90° C).

U toku reakcije izdvaja se želatinozni talog hidratisanog gvožđe (III)-oksida. Talog i rastvor su ekstrahovani *n*-heksanom, uobičajenom procedurom.

Rezultati analize GC-MS metodom prikazani su na slici 3 (oznaka uzorka na hromatogramu je O-2).

5. EKSPERIMENTI DEGRADACIJE TRANSFORMATORSKOG ULJA ALKALNIM METALOM

Eksperimenti degradacije su izvođeni u istoj aparaturi kao i eksperimenti sa oleumom, i to u dve faze: prvoj, koja je obuhvatala pripremanje suspenzije natrijuma u rastvaraču, pri čemu se, uz intenzivno mešanje, temperatura suspenzije povećava do temperature refluktovanja rastvarača i drugoj, u kojoj se suspenziji dodaje odgovarajuća masa transformatorskog ulja na bazi PCB. Sve vreme se reakciona smeša intenzivno meša. Na kraju reakcije dobija se alkalni rastvor, zbog viška natrijuma, sa sadržajem PCB ispod 1ppm, ali sa ekološkog aspekta sasvim bezopasan.

6. VRAĆANJE TRANSFORMATORA U „ŽIVOT”

U laboratorijskim uslovima je simulirano ispiranje izolacionog materijala uzetog iz transformatora iz koga je istočeno ulje. Obezbeđivanjem konstantnog protoka rastvarača kroz izolacioni materijal ispirano je ulje, sve dok koncentracija PCB nije smanjena ispod vrednosti 50 ppm. Nakon ispiranja rastvarač je destilacijom odvojen, a destilacioni ostatak je hemijski degradovan.

7. UPOTREBA NOVOG SORBENTA „DOMAĆE” PROIZVODNJE

U toku navedenih ispitivanja uvideli smo potrebu razvoja adekvatnog tipa sorbenta koji je moguće primeniti u akcidentnim situacijama (curenje trafoa, cisterni u toku transporta, rezervoara itd). Na osnovu literaturnih podataka [7] u našim laboratorijama je razvijen novi tip sorbenta na bazi modifikovanog silikatnog materijala „domaće” proizvodnje. Prilikom zamešavanja transformatorskog ulja sa ovim sorbentom (10 % w/w) dolazi do njegove potpune adsorpcije. Transformatorsko ulje prelazi u čvrstu fazu sorbenta, a kao konačni proizvod se dobija beli prah. U laboratorijskim eksperimentima je simulirano curenje piralena po betonskim, drvenim i metalnim površinama. Odmah posle izlivanja ulja, površine su tretirane sorbentom. Posle ovakvog tretmana, PCB je detektovan samo na betonu i to u koncentracijama nižim od 1 ppm. Preventivnom primenom sorbenta (pre izlivanja ulja) na istim površinama u betonu je PCB detektovan u koncentracijama nižim od 0,1 ppb.

Pored fizičkog sakupljanja PCB sorbentom, verovatno, dolazi i do njegove degradacije na aktivnim mestima sorbenta, tako da se posle 20 dana registru-

je samo polovina početne koncentracije, a posle šest meseci je samo 20 ppm, sa daljom tendencijom opadanja (eksperimenti sa sorbentom „natopljenim” PCB su u toku). Na osnovu literaturnih podataka o primeni sorbenata sličnog tipa, nakon dve godine je degradacija potpuna.

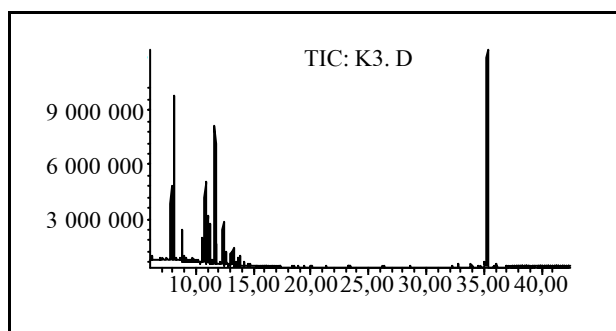
Kao degradacioni proizvodi pri primeni „domaćeg” sorbenta nastaju dva ekološki prihvatljiva proizvoda: kalcijum-hlorid i kalcijum-karbonat, što je potvrđeno rendgenskom analizom. U nekim zemljama [7], posle potpune degradacije PCB, sorbent sa nastalim solima se koristi kao građevinski materijal.

8. REZULTATI I DISKUSIJA

Sva tumačenja dobijenih rezultata eksperimenata degradacije transformatorskog ulja data su na osnovu hromatograma dobijenih GC-MS analizama. Kvalitativna analiza svih hromatograma izvršena je na osnovu poređenja sa podacima iz datoteke odgovarajućih instrumenata.

Na hromatogramu se na osnovu retencionih vremena za kongenere polihlorovanih bifenila, jasno vidi da se u rastvoru dobijenom degradacijom ne nalaze polihlorovani bifenili i da dobijeni rastvor ne predstavlja ekološku opasnost, ali da je za njegovo zbrinjavanje, zbog niske pH vrednosti (degradacija oleumom), potrebna neutralizacija.

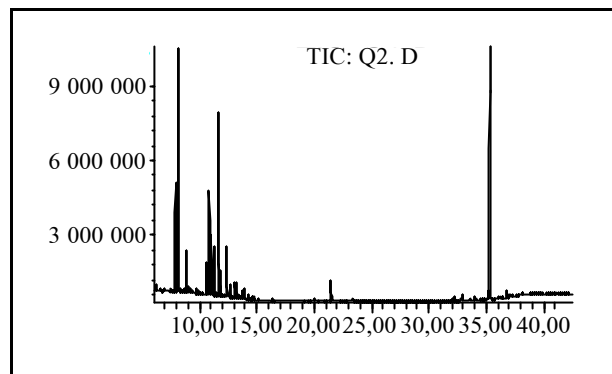
Rezultati eksperimenata izvedenih u prisustvu gvožđe (II)-sulfata pokazuju da se koncentracija polihlorovanih bifenila snižava na 0,29 ppm, i to u svim slučajevima, bez obzira na različite odnose transformatorskog ulja i oleuma u prvoj fazi (odnos je 1 : 40) (slika 2 - hromatogram uzorka označen kao K-3).



Slika 2. Hromatogram degradacionih proizvoda uzorka K-3

Na osnovu podataka iz datoteke, uzetih po programu koji je primenjen kod analize svih ostalih uzoraka, kako polaznog ulja, tako i svih degradacionih proizvoda, rezultati pokazuju da uzorak ne sadrži polihlorovane bifenile. Signal na retencionom vremenu 35,31 potiče od jona ftalata.

Rezultat GC-MS analize degradacionih proizvoda polihlorovanih bifenila iz transformatorskih ulja oleumom u prisustvu gvožđe (II)-sulfata vodonik-peroksidom (Fentonov reagens) prikazan je na slici 3. Među degradacionim proizvodima, polihlorovani bifenili prisutni su u koncentraciji oko 1 ppm.



Slika 3. Hromatogram uzorka O-2

9. ZAKLJUČCI I KOMENTARI

Izvedeni laboratorijski eksperimenti pokazali su:

1. Efikasnost degradacije transformatorskog ulja oleumom u kiselj sredini u prisustvu gvožđe (II)-sulfata uz upotrebu kalcijum-hidroksida od 99,99%.

Količina polihlorovanih bifenila koja ostaje posle degradacije ovim postupkom je u granici koja je dozvoljena trenutno važećim propisima u svetu (EPA standard), tako da odlaganje proizvoda degradacije nije problematično.

Prednost ovog postupka je što se reakcija odvija na sobnoj temperaturi, pa je potrošnja električne energije minimalna (troši se pri mešanju).

2. Degradacija oleumom u baznoj sredini u prisustvu Fentonovog reagensa, takođe, daje prihvatljive rezultate sa aspekta zaštite životne sredine. Međutim, sa aspekta potrošnje energije i hemijskih reagenasa, ovaj postupak je ekonomski manje isplativ od prethodnog.

Postupak degradacije transformatorskog ulja oleumom u prisustvu gvožđe (II)-sulfata, uz upotrebu kalcijum-hidroksida, smatramo sasvim prihvatljivim, kako sa aspekta potrošnje reagenasa i energije, tako i sa aspekta jednostavnosti izvođenja reakcije, a pre svega zbog ispunjavanja uslova propisanih važećim zakonima o zaštiti životne sredine.

3. Odnos komponenata u reakciji degradacije transformatorskog ulja alkalnim metalom, određuje vrstu transformatorskog ulja, tj. količinu hlora kao supstituenta, kako u PCB, tako i u njegovom rastvaraču. Iz tih razloga je neophodno tačno definisati prirodu transformatorskog ulja. Najpogodniji ras-

tvarač za pripremanje suspenzije natrijuma je parafinsko ulje.

Pri upotrebi alkalnih metala, vrlo jednostavnim postupkom, u uslovima neznatno različitim od ambijentalnih, stepen degradacije je 99,995 %. Sličan, nešto komplikovaniji postupak, već se primenjuje u svetu (8).

4. Proizvodnja i upotreba „domaćeg” sorbenta je neophodna kao zaštita postojećih trafoa ispunjenih transformatorskim uljem na bazi PCB, rezervoara i cisterni u toku transporta. Izuzetne osobine ovog sorbenta su, osim niske cene koja nije zanemarljiva u ukupnoj ceni postupka degradacije, njegova jednostavna proizvodnja i bezbedna upotreba. Sorbent sa PCB može da se pakuje u otvorene najlonske džakove i na taj način bezbedno skladišti. U prostorijama za skladištenje ovih „otvorenih” džakova u vazduhu nije detektovan PCB.

5. Pri zameni transformatorskog ulja na bazi PCB mineralnim uljem, u našoj zemlji se ne primenjuje ispiranje izolacionog materijala (celuloze). Zbog toga je sadržaj PCB u novom ulju izuzetno vi-

sok, pa se takvi transformatori i dalje smatraju piralenskim [1]. Iz ovih razloga je neophodno primeniti sukcesivno ispiranje trafoa smesom polarnih i ume-reno polarnih rastvarača. Nakon ovakvih višestrukih ispiranja, u laboratorijskim uslovima, pri simuliranoj zameni ulja u trafou, koncentracija PCB je niža od 10 ppm.

10. LITERATURA

- [1] EPA/600/P96/001F, septembar 1996.
- [2] I. WLASSICS ET AL., US 5 430 231, jul, 1995.
- [3] F. TANIMOTO ET AL., US 6 018 051, januar, 2000.
- [4] J. A. HAWARI ET AL., US 5 185 488, februar, 1993.
- [5] F. BLSING AND D. SRASSE, US 5 108 647, april, 1992.
- [6] EPA/542-B-94-008, septembar 1994.
- [7] O. D. Jordan, US 4 340 471, jul, 1982.
- [8] ONTARIO HYDRO TECHNOLOGIES, 800 Kipling Avenue, Toronto, Ontario, Canada M8Z 5S4.

Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Dragan Manojlović rođen je 11. juna 1961. godine u Bijeljini. Osnovnu školu je završio u Brocu, a gimnaziju u Bijeljini. Na studijsku grupu Hemija, Prirodno-matematičkog fakulteta u Beogradu, upisao se školske 1981/1982. godine.

Diplomirao je 13. juna 1989. godine sa srednjom ocenom 8,14, odbranivši diplomski rad sa ocenom 10.

Od novembra 1986. godine do marta 1990. godine radio je u Istraživačkoj stanici Petnica, na radnom mestu rukovodioca Odeljenja za hemiju i geologiju.

Školske 1989/1990. godine upisao je postdiplomske studije na smeru, Analitička hemija. Magistarsku tezu odbranio je 28. aprila 1995. godine.

Odlukom Saveta Hemijskog fakulteta u Beogradu, izabran je za asistenta pripravnika za predmet Kvantitativna hemijska analiza za studente hemije i te poslove obavlja od 13. marta 1990. godine.

Za asistenta, na već pomenutom predmetu izabran je 20. oktobra 1995. godine.

Objavio je 13 radova u domaćim i inostranim časopisima i prezentovao više od 50 saopštenja na domaćim i međunarodnim skupovima. U završnoj je fazi pisanja doktorske disertacije.



Olga Cvetković je rođena 28. 08. 1954. godine u Smederevu. Na grupi za hemiju Odseka za hemijske i fizičko-hemijske nauke Prirodno-matematičkog fakulteta Univerzitetu u Beogradu diplomirala je juna 1979. godine. Magistrirala je 1991. godine (naslov teze „Proučavanje stepena promenjenosti kerogena pri bakterijskoj depiritizaciji”), a 1997. godine doktorirala (naslov teze: „Proučavanje uticaja hemijske i bakterijske demineralizacije sedimenta na sastav i strukturu kerogena”) na istom Univerzitetu.

Od 1980. godine pa do danas radi u Centru za hemiju Instituta za hemiju, tehnologiju i metalurgiju u Beogradu i ima naučno zvanje viši naučni saradnik.

Olga Cvetković se u okviru naučnog rada bavila ispitivanjem sastava i strukture kerogena, sedimenta, ispitivanjem organske supstance izolovane iz mladih sedimenta, starih sedimenta, kao i sastava i prirode organske supstance domaćih ugljeva različitih lokaliteta.

Kao asistent Analitičke hemije (kvalitativne i kvantitativne) radila je (honorarno) nekoliko školskih godina na Rudarsko-geološkom i Poljoprivrednom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Za profesora (honorarnog) u Višoj tehničko tekstilnoj školi Univerziteta u Beogradu, za predmete Hemija i Opšta hemija, izabrana je 1997. godine. U nastavi učestvuje još i kao konsultant pri izradi diplomskih radova studenata ko-

ji diplomiraju na Katedri za Primenjenu hemiju Hemijskog fakulteta, kao i izradi magistarskih i doktorskih teza (do sada su odbranjene tri magistarske teze)

Aktivno učestvuje u radu Srpskog hemijskog društva, naročito pri organizovanju simpozijuma zaštite životne sredine, od kojih su neki bili međunarodnog karaktera. Član je B.EN.A. (Balcan Environment Association) od 2000. godine. Član je Komisije za otpad Saveznog zavoda za standardizaciju (prevela standardnu metodu za određivanje sadržaja organskog ugljenika u otpadu, mulju i sedimentima). Angažovana je kao tehnički ekspert u JUAT-u od 2002. godine.

Objavila je 32 rada u međunarodnim časopisima (4 rada u vodećim), 25 saopštenja na međunarodnim skupovima, 11 radova u nacionalnim časopisima i 11 saopštenja na domaćim skupovima.



Snežana Nikolić-Mandić je rođena 27. 03. 1953. godine u Varvarinu, Srbija. Osnovnu i srednju školu završila je u Beogradu. Na Hemijsku grupu Prirodno-matematičkog fakulteta u Beogradu se upisala 1972. godine, a diplomirala 1977. godine na Katedri za analitičku hemiju. Decembra 1980. godine izabrana je u zvanje asistenta-pripravnik na istoj katedri. Magistarsku tezu pod naslovom „Titracije u atomsko-apsorpcionoj i emisionoj plamenoj fotometriji” odbranila je 1989. godine. Doktorsku disertaciju pod naslovom „Određivanje nekih jona (hlorida, bromida, tetrahydroborata i cijanida) metodama protočno-injekcione analize sa amperometrijskom detekcijom” odbranila je 1995. godine. U zvanje docenta za predmete Analitička hemija za studente fizičke hemije i Instrumentalna analiza II - neorganski deo za studente hemije, izabrana je januara 1998. godine.

Bavi se naučno-istraživačkim radom iz oblasti analitičke hemije i zaštite životne sredine, razradom i primenom metoda protočne-injekcione analize, kao i metoda atomsko-apsorpcione spektrofotometrije. Deo svog naučnog rada izvodi u okviru projekta „Hemodinamika zagađujućih supstanci akvatičnih sistema i vodenih resursa (površinske i podzemne vode) u funkciji zaštite”. Rezultate svojih istraživanja kandidat je objavila u okviru magistarske teze i doktorske disertacije, dvanaest naučnih radova od čega su pet u vodećim časopisima međunarodnog značaja (po kategorizaciji Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj) i 25 saopštenja na konferencijama.

Dragan Tasić
i Miodrag Stojanović

Uticaj termičke nehomogenosti zemljišta na strujnu opteretljivost kablova

Stručni rad
UDK: 621.315.23

Rezime:

Kod određivanja intenziteta termički trajno dozvoljene struje kablova položenih u zemlji obično se polazi od činjenice da je zemljište homogeno sa termičkog aspekta. Međutim, kablovski vod veće dužine može da prolazi kroz zemljište različitih termičkih karakteristika, kao i da se na pojedinim delovima provlači kroz cevi ili kablovice. Zbog toga se u radu analiziraju dva karakteristična slučaja na koje se mogu svesti razni slučajevi u praksi. Određeni su izrazi za raspodelu temperature duž provodnika kabla koji omogućavaju analizu uticaja termičke nehomogenosti na strujnu opteretljivost kabla. Analizom strujne opteretljivosti tri jednožilna kabla XHE 48-A 1x100/95 mm² 110 kV postavljena u snopu, pokazano je da termička nehomogenost zemljišta ima veliki uticaj na vrednost termički trajno dozvoljene struje.

Ključne reči: kabl, zemljište, nehomogenost, temperatura, strujna opteretljivost

Abstract:

IMPACT OF SOIL THERMAL NON-HOMOGENEITY ON CABLE AMPACITY

In ampacity calculation, for the cables laid in the ground the fact is usually taken into account that the soil is homogeneous from the thermal aspect. However, long cable line can pass through the grounds of different thermal characteristics, or some parts of the cable may pass through the pipes or the ducts. Therefore, this paper analyzes two characteristic cases that represent different practical cases. The equations for temperature distribution along the cable conductor are derived, which enables analyzing the impact of thermal non-homogeneity on the cable ampacity. The cable ampacity analysis of three single-core cables XHE 48-A 1x100/95 mm² 110 kV in three-phase system bunched, shows that soil thermal non-homogeneity has a great impact on the value of rated ampacity.

Key words: cable, soil, non-homogeneous, temperature, ampacity

1. UVOD

Pri određivanju intenziteta termički trajno dozvoljene struje kablova položenih u zemlju obično se polazi od činjenice da je zemljište homogeno sa aspekta provođenja toplote. Međutim, trasa kablovskog voda veće dužine može da prolazi kroz zemlji-

šte različitog sastava, a samim tim i različitih termičkih karakteristika. Pored toga, postoje slučajevi da se na određenom delu trase kablovi provlače kroz cevi ili kablovice. U tim slučajevima se, čak i kada je zemljište homogeno javlja termička nehomogenost duž trase voda, tj. menjaju se uslovi prenosa toplote sa spoljne površine kabla.

Prof. dr Dragan Tasić, mr Miodrag Stojanović, dipl. ing. – Elektronski fakultet, 18 000 Niš, Beogradska 14

Pitanje koje se u ovim slučajevima nameće je kako ova nehomogenost utiče na granicu strujne opteretljivosti kablova [1]. Od interesa je znati da li je termička nehomogenost na kratkom delu trase kablovskog voda (npr. prolaz ispod ulice) značajna pri određivanju termički trajno dozvoljene struje ili se može zanemariti.

Zbog toga su u ovom radu analizirane dve karakteristične mogućnosti, na koje se mogu svesti razni slučajevi koji se sreću u praksi. Polazeći od analize zagrevanja elementarnog dela provodnika izvedeni su izrazi za raspodelu temperature duž provodnika kablova. Pomoću ovih izraza određen je i uticaj termičke nehomogenosti na strujnu opteretljivost kablova.

2. MATEMATIČKI MODEL

2.1. Raspodela temperature duž provodnika kablova

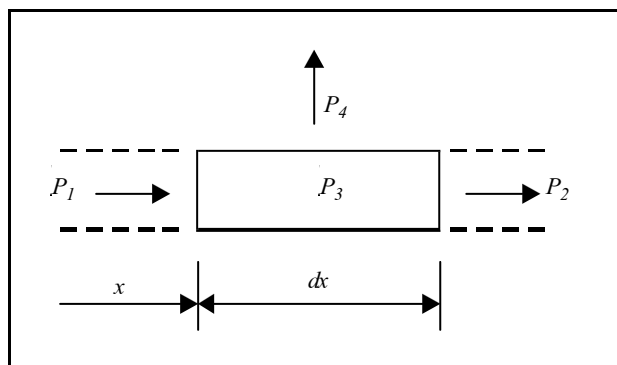
Da bi se analizirao uticaj termičke nehomogenosti duž trase kablovskog voda na strujnu opteretljivost kablova potrebno je doći do izraza za raspodelu temperature duž provodnika kablova. U tom cilju posmatraće se jedan elementarni deo provodnika kablova dužine dx , kao što je prikazano na slici 1.

Imajući u vidu oznake na slici 1 za snage toplotnog provođenja P_1 i P_2 može se pisati [2]:

$$P_1 = S \frac{dq_z}{dx}, \quad (1)$$

$$P_2 = S \frac{dq_z}{dx} - \frac{P_3}{dx}, \quad (2)$$

gde je l koeficijent provođenja toplote materijala provodnika, S površina poprečnog preseka provodnika kablova i q_z temperatura provodnika kablova.



Slika 1. Elementarni deo provodnika kablova

Sa P_3 na slici 1 je obeležena snaga zagrevanja elementarnog dela provodnika usled struje uspostavljene u provodniku. S obzirom na to da se uspostavljanjem struje javljaju pored gubitaka u provodniku i gubici u metalnim omotačima kablova, to će se snaga gubitaka u elementarnom delu računati pomoću fiktivne električne otpornosti [3,4,5]. Ako je poznata podužna fiktivna električna otpornost provodnika kablova na 20°C R'_{20} , kao i temperaturni koeficijent promene električne otpornosti materijala provodnika a za snagu gubitaka P_3 ima se:

$$P_3 = R'_{20} I^2 dx. \quad (3)$$

Snaga koja se sa površine elementarnog dela provodnika odvodi provođenjem kroz izolaciju kablova i sredine koja okružuje kabl obeležena je sa P_4 na slici 1. U slučaju kada se ne uvažava efekat isušivanja zemljišta ova snaga je:

$$P_4 = \frac{q_z - q_z + P_d(R_{Tkd} + R_{Tz})}{R_{Tki} + R_{Tz}} dx = \frac{q_z - (q_z + Dq_d)}{R_{Tki} + R_{Tz}} dx, \quad (4)$$

gde je:

q_z - temperatura referentne zemlje,

P_d - snaga dielektričnih gubitaka,

R_{Tkd} - termička otpornost kablova za dielektrične gubitke,

R_{Tki} - fiktivna termička otpornost kablova za gubitke uslovljene strujom,

R_{Tz} - termička otpornost zemljišta u koje je položen kabl.

U relaciji (4) snaga dielektričnih gubitaka i sve termičke otpornosti su po jedinici dužine. Postupak za određivanje termičkih otpornosti detaljno je izložen u [3,4]. Pri pisanju relacije (4) imalo se u vidu da dielektrični gubici ne zavise od opterećenja (zanemaruju se eventualne male promene napona), pa je samim tim i pad temperature uslovljen njima konstantan. Kod sredjenaponskih kablova snaga dielektričnih gubitaka može se zanemariti.

U slučajevima kada se mora uvažiti efekat isušivanja zemljišta [3,5] relacija za P_4 dobija oblik:

$$P_4 = \frac{q_z - (q_z + Dq_d) + \frac{r_{Tzi} - r_{Tz}}{r_{Tz}} Dq_{xz}}{R_{Tki} + R_{Tzi}} dx, \quad (5)$$

gde je r_{Tz} specifična termička otpornost neisušene a r_{Tzi} isušene zemlje, dok Dq_{xz} predstavlja pad temperature u neisušenom delu zemljišta [3,5]. Sa R_{Tzi} u relaciji (5) je obeležena termička otpornost zemljišta kada je ono svo isušeno.

Pošto u stacionarnom stanju postoji ravnoteža između snaga zagrevanja i snaga odvođenja toplote, to je za posmatrani elementarni deo:

$$P_1 + P_3 = P_2 + P_4. \quad (6)$$

Zamenom odgovarajućih izraza za snage P_1, P_4 u (6) kada se ne uvažava efekat isušivanja zemljišta, dolazi se do sledeće diferencijalne jednačine:

$$\frac{d^2}{dx^2} \frac{1}{l S} \frac{R_{Tki}}{R_{Tz}} \frac{R_{Tz}}{R_{Tz}} \frac{R_{20} I^2}{R_{Tz}} = \frac{R_{Tki}}{l S} \frac{R_{Tz}}{R_{Tz}} \frac{R_{20} I^2}{R_{Tz}} \frac{z}{d}. \quad (7)$$

Opšte rešenje ove diferencijalne jednačine je:

$$T_{st} = A e^{ax} + B e^{-ax}, \quad (8)$$

gde je:

$$a = \sqrt{\frac{R_{Tki}}{l S} \frac{R_{Tz}}{R_{Tz}} \frac{R_{20} I^2}{R_{Tz}} \frac{z}{d}}, \quad (9)$$

$$a = \sqrt{\frac{1}{l S} \frac{R_{Tki}}{R_{Tz}} \frac{R_{20} I^2}{R_{Tz}} \frac{z}{d}}, \quad (10)$$

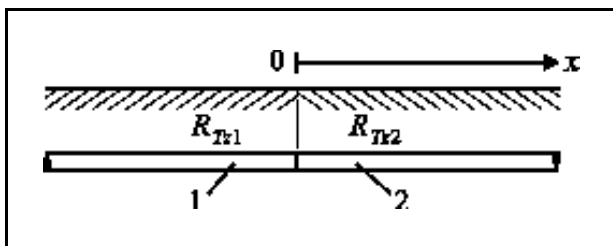
dok su sa A i B obeležene odgovarajuće konstante.

U slučaju kada se uvažava efekat isušivanja zemljišta stacionarna temperatura q_{st} je:

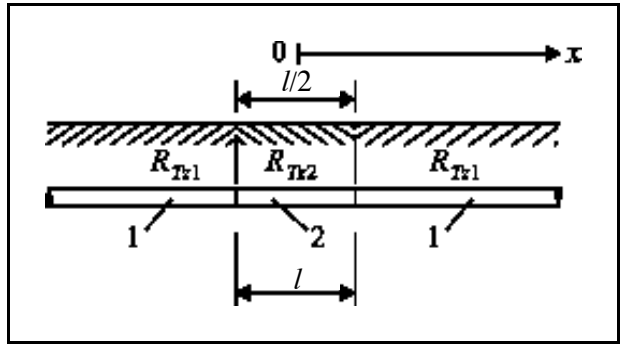
$$T_{st} = \frac{1}{l S} \frac{R_{Tki}}{R_{Tz}} \frac{R_{20} I^2}{R_{Tz}} \frac{z}{d} \left(\frac{R_{Tki}}{R_{Tz}} \frac{R_{20} I^2}{R_{Tz}} \frac{1}{l S} \frac{z}{d} \frac{e^{-ax}}{a} + \frac{R_{Tz}}{R_{Tz}} \frac{R_{20} I^2}{R_{Tz}} \frac{z}{d} \frac{e^{ax}}{a} \right), \quad (11)$$

dok relacija za koeficijent a ima isti oblik kao relacija (10), samo umesto termičke otpornosti R_{Tz} treba koristiti R_{Tzi} .

Konstante A i B u relaciji (8) određuju se iz odgovarajućih graničnih uslova za svaki konkretan slučaj. Ovde će se posmatrati dva karakteristična slučaja prikazana na slikama 2 i 3.



Slika 2. Slučaj kada duž trase kabla postoje dva različita sastava zemljišta



Slika 3. Termička nehomogenost zemljišta na jednom delu duž kablovskog voda

U slučaju prikazanom na slici 2 mogu se na osnovu opšte relacije (8) napisati sledeći opšti izrazi za raspodelu temperature duž delova 1 i 2:

$$T_{st1} = A_1 e^{a_1 x} + B_1 e^{-a_1 x}, \quad x \in [0, l/2], \quad (12)$$

$$T_{st2} = A_2 e^{a_2 x} + B_2 e^{-a_2 x}, \quad x \in [l/2, l]. \quad (13)$$

Iz relacija za q_1 i q_2 sledi da bi udaljavanjem od mesta diskontinuiteta ($x \rightarrow \infty$) temperatura neograničeno rasla. Pošto je ovo nemoguće očigledno je da konstante B_1 i A_2 moraju biti jednake nuli. Konstante A_1 i B_2 određuju se iz uslova da je za $x=0$:

$$\begin{aligned} T_{st1}(0) &= T_{st2}(0), \\ -\frac{1}{a_1} \left. \frac{dT_{st1}}{dx} \right|_{x=0} &= -\frac{1}{a_2} \left. \frac{dT_{st2}}{dx} \right|_{x=0}, \end{aligned}$$

odakle se dobija

$$A_1 = \frac{a_2}{a_1} B_2, \quad (14)$$

$$B_2 = \frac{a_1}{a_2} A_1. \quad (15)$$

Prema tome, raspodela temperature duž provodnika kabla za slučaj prikazan na slici 2 je:

$$T_{st1} = \frac{a_2}{a_1} \frac{R_{20} I^2}{l S} \frac{z}{d} e^{a_1 x}, \quad x \in [0, l/2], \quad (16)$$

$$T_{st2} = \frac{a_1}{a_2} \frac{R_{20} I^2}{l S} \frac{z}{d} e^{-a_2 x}, \quad x \in [l/2, l]. \quad (17)$$

Za slučaj prikazan na slici 3 dolazi se do sledećih izraza za raspodelu temperature:

$$T_{st1} = \frac{a_2}{a_1} \frac{R_{20} I^2}{l S} \frac{z}{d} \frac{sh \frac{a_2 l}{2}}{ch \frac{a_2 l}{2}} e^{a_1 x}, \quad (18)$$

kada je $x \approx l/2$, odnosno

$$I_{1(2)} = \frac{ch a_2 \frac{l}{2} \frac{st2}{a_1} \frac{st1}{a_2} \frac{l}{2}}{ch a_2 \frac{l}{2} \frac{st2}{a_1} \frac{st1}{a_2} \frac{l}{2}} \quad (19)$$

kada je $0 \leq x \leq l/2$.

2.2. Faktor strujne opteretljivosti usled termičke nehomogenosti

Intenzitet termički trajno dozvoljene struje kabla određuje se iz uslova da stacionarna temperatura na bilo kom delu provodnika ne pređe vrednost trajno dozvoljene temperature provodnika q_p .

Imajući u vidu relaciju za stacionarnu temperaturu (9) i stavljajući da je $q_{st} = q_p$ za trajno dozvoljene struje duž delova 1 i 2 provodnika kabla, u slučaju prikazanom na slici 2 dobija se:

$$I_{1(2)} = \sqrt{\frac{p \quad z1(2) \quad d1(2)}{R_{Tki} \quad R_{Tz1(2)} \quad R_{20} \quad 1 \quad p \quad 20}} \quad (20)$$

Jasno je da za trajno dozvoljenu struju kabla treba usvojiti manju vrednost, što znači da jedan deo kabla neće biti u potpunosti iskorišćen sa aspekta strujne opteretljivosti. Odnos ove dve struje daje faktor strujne opteretljivosti usled termičke nehomogenosti duž trase kablovskog voda i ukazuje praktično na to kolika je strujna iskorišćenost kabla na delu gde vladaju povoljniji termički uslovi:

$$f_i = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{p \quad z2 \quad d2 \quad R_{Tki} \quad R_{Tz1}}{p \quad z1 \quad d1 \quad R_{Tki} \quad R_{Tz2}}} \quad (21)$$

Polazeći od relacija (18) i (19) za faktor strujne opteretljivosti u slučaju prikazanom na slici 3 dobija se:

$$f_i = \sqrt{\frac{b \quad \sqrt{b^2 \quad ac}}{p \quad z1 \quad d1 \quad R_{Tki} \quad R_{Tz2}}} \quad (22)$$

gde je:

$$a = l \quad p \quad 20 \quad R_{Tki} \quad R_{Tz1} \quad R_{Tki} \quad R_{Tz2} \quad ,$$

$$b = \frac{l}{2} \quad p \quad z2 \quad d2 \quad R_{Tki} \quad R_{Tz1}$$

$$l \quad p \quad 20 \quad R_{Tki} \quad R_{Tz2}$$

$$p \quad l \quad z1 \quad d1 \quad 20 \quad R_{Tki} \quad R_{Tz2}$$

$$p \quad l \quad z2 \quad d2 \quad 20 \quad R_{Tki} \quad R_{Tz1} \quad ,$$

$$c = \frac{p \quad z2 \quad d2 \quad p \quad z2 \quad d2 \quad z1 \quad d1}{p \quad \frac{1}{ch a_2 \frac{l}{2} \frac{a_2}{a_1} sh a_2 \frac{l}{2}}}$$

3. TEST PRIMER

Za sagledavanje uticaja termičke nehomogenosti analizirana je strujna opteretljivost tri jednožilna kabla XHE 48-A 1x1 000/95 mm² 110 kV postavljena u snopu. Prema [6] intenzitet termički trajno dozvoljene struje ovih kablova, kada je specifična termička otpornost zemljišta $r_{z1} = 1,2 \text{ Km/W}$ i temperatura referentne zemlje $q_z = 20^\circ \text{ C}$, iznosi $I=785 \text{ A}$. Pretpostaviće se da su kablovi dosta dugi (prema [6] dužina ovakvog kablovskog voda u Beogradu je oko 9 km) i da na jednom delu trase dužine $l=10 \text{ m}$ koji je približno jednako udaljen od oba kraja kablovskog voda specifična termička otpornost zemljišta iznosi $r_{z2} = 2 \text{ Km/W}$. Ovakvo stanje odgovara slučaju prikazanom na slici 3.

Prema dostupnim podacima o kابلu [6] relativno jednostavno se određuju podaci potrebni za ovu analizu:

$$\begin{aligned} R_{20} &= 39,2 \quad /m \quad , & R_{Tki} &= 0,344 \text{ Km/W} , \\ R_{Tkd} &= 0,25 \text{ Km/W} , & P_d &= 0,23 \text{ W/m} , \\ R_{Tz1} &= 1,9 \text{ Km/W} , & R_{Tz2} &= 2 \text{ Km/W} , \end{aligned}$$

Pored ovih podataka uzeto je da temperaturni koeficijent promene električne otpornosti aluminijuma na 20° C iznosi $\alpha=0,004 \text{ 03 K}^{-1}$, dok je za koeficijent provođenja toplote uzeta vrednost $l=230 \text{ W/Km}$. Za temperaturu referentnog zemljišta pretpostavljeno je da je ista u oba dela zemljišta $q_{z1} = q_{z2} = 20^\circ \text{ C}$.

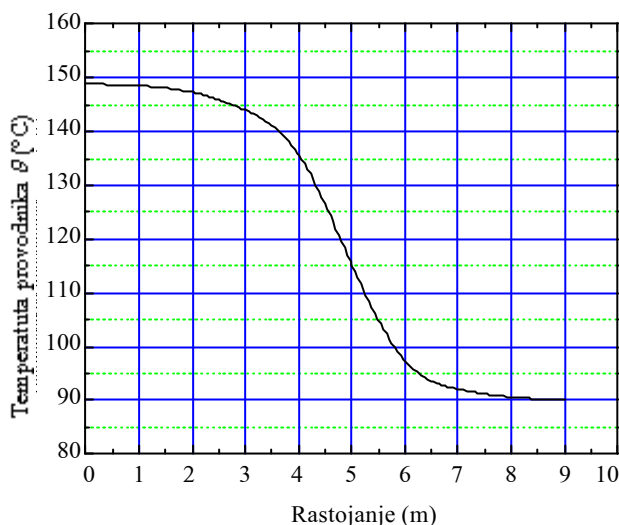
Ako se pri ovim uslovima u kablovima uspostavi struja od 785 A za stacionarne temperature se dobijaju vrednosti $q_{st1} = 90^\circ \text{ C}$ i $q_{st2} = 149,6^\circ \text{ C}$, dok su za koeficijent a dobijene vrednosti $a_1=1,23 \text{ m}^{-1}$ i $a_2=0,903 \text{ m}^{-1}$. Sa ovim vrednostima za raspodelu temperature duž provodnika kabla, imajući u vidu položaj koordinatnog sistema na slici 3 dobija se:

$$1 \quad 90 \quad 25,23 e^{1,23 x} \quad , \quad x \quad 5 \text{ m} \quad ,$$

$$2 \quad 149,6 \quad 0,752 ch(0,903 x) \quad , \quad 0 \quad x \quad 5 \text{ m} \quad ,$$

pri čemu je x u metrima a temperatura u $^\circ \text{ C}$.

Pomoću ovih relacija na slici 4 prikazana je raspodela temperature na delu provodnika. Sa ove slike se primećuje da aksijalno provođenje toplote praktično ne dovodi do smanjenja temperature termički ugroženih mesta, kao i da se temperature q_{st1} i q_{st2}



Slika 4. Raspedela temperature duž provodnika kabla dobijena pomoću relacija (18) i (19)

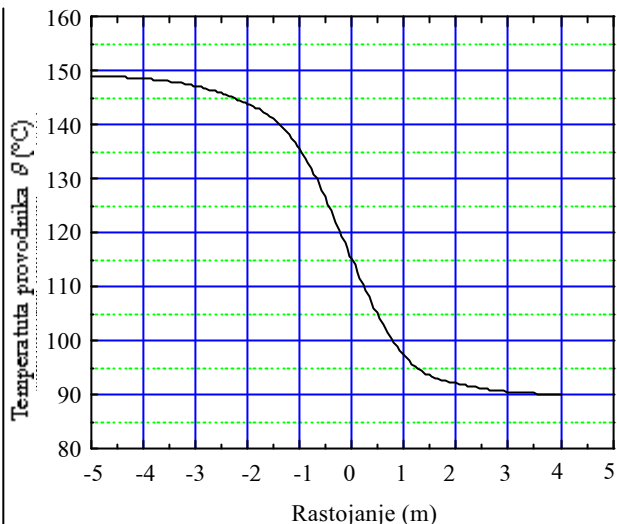
dostižu na udaljenosti od oko 2÷3 m od mesta diskontinuiteta. Analize pokazuju da su ova rastojanja manja za srednjenaponske kablove. Iz ovoga sledi zaključak da ako su termički uslovi pogoršani na delu trase voda u dužini od nekoliko metara, onda se granica strujne opteretljivosti kabla određuje prema njima, bez obzira na dužinu kablovskog voda.

Činjenica da se efekat diskontinuiteta oseća na dužini od svega nekoliko metara, daje mogućnost da se umesto relacija (18) i (19) koriste relacije (16) i (17) koje su jednostavnije za analizu. Naime, imajući u vidu ove relacije i stavljajući položaj koordinatnog početka na mesto diskontinuiteta (koje je za $l/2=5$ m pomereno u smeru x ose na slici 3) za raspodelu temperature duž delova provodnika 1 i 2 (smatrajući da je pozitivni deo x ose duž dela provodnika obeleženog brojem 1) dobijaju se sledeće relacije:

$$\begin{aligned} 1 \quad & 90 - 25,23e^{-1,23x}, \quad x \geq 0, \\ 2 \quad & 149,6 - 34,37e^{-0,903x}, \quad x \geq 0. \end{aligned}$$

Raspodela temperature za ovaj slučaj prikazana je na slici 5. Upoređivanjem grafika sa slikom 4 i 5 lako se konstatuje da se radi o jednoj istoj krivoj sa pomerenim koordinatnim počecima. Ovo ukazuje i na to da se u slučaju kada duž trase kablovskog voda postoji više mesta diskontinuiteta, raspodela temperature provodnika može dobiti korišćenjem relacija (16) i (17). Pri tome, jedino treba voditi računa o položaju koordinatnog sistema, odnosno njegov početak locirati u mesto diskontinuiteta.

Iz prethodne konstatacije sledi da je za faktor strujne opteretljivosti dovoljno koristiti relaciju (21), koja je znatno jednostavnija od relacije (22). Za razmatrani slučaj korišćenjem relacije (21) dobi-



Slika 5. Raspedela temperature duž provodnika kabla dobijena pomoću relacija (16) i (17)

ja se da je faktor strujne opteretljivosti $f_i = 0,797$, dok se primenom relacije (22) dobija $f_i = 0,796$. Vidi se da je razlika beznačajna, što ide u prilog upotrebi relacije (21), a samim tim i relacija (16) i (17).

Međutim, indikativno je da za razmatrani slučaj, postojanje jedne veoma kratke deonice gde je specifična termička otpornost povećana sa $1,2 \text{ Km/W}$ na $2, \text{ Km/W}$ dovodi do smanjenja trajno dozvoljene struje koja bi se imala bez te deonice za više od 20 %. To znači da je umesto 785 A trajno dozvoljena struja 625 A, i da kabl na velikom delu svoje dužine nije dovoljno iskorišćen. Na osnovu ovih podataka, može se sagledati uloga i značaj specijalne kablovske posteljice koju u ovakvim slučajevima treba koristiti pri postavljanju kablova.

4. ZAKLJUČAK

U radu je razvijen matematički model za analizu uticaja termičke nehomogenosti zemljišta na strujnu opteretljivost kablova. Pokazano je da od dva karakteristična slučaja na koje se mogu svesti razni slučajevi iz prakse u analizi treba koristiti jednostavniji, jer skoro uvek daje zadovoljavajuće rezultate. Matematički model razvijen na osnovu jednostavnijeg slučaja je veoma pogodan za primenu kada duž trase kablovskog voda postoji veći broj mesta sa termičkim diskontinuitetom.

Na osnovu izvršene analize pokazano je da termička nehomogenost zemljišta duž trase kablovskog voda ima veliki uticaj na strujnu opteretljivost kabla. Indikativno je da postojanje deonice od nekoliko metara, gde je povećana specifična termička otpornost zemljišta dominantno utiče na granicu strujne opteretljivosti kabla. To može da uslovi to da

kabl duž većeg dela trase ne bude dovoljno strujno iskorišćen. Zbog toga je potrebno, pre polaganja kabla, znati termičke karakteristike zemljišta duž trase kablovskog voda. Da bi se povećala strujna iskorišćenost kabla potrebno je, na mestima koja se u termičkom smislu javljaju kao kritična koristiti specijalnu posteljicu pri polaganju kabla.

5. LITERATURA

- [1] H. Brakelmann, G. Anders, AMPACITY REDUCTION FACTORS FOR CABLES CROSSING THERMALLY UNFAVORABLE REGIONS, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, October 2001, pp. 444-448.
- [2] D. Tasić, TERMIČKI ASPEKTI STRUJNE OPTRETLJIVOSTI PROVODNIKA NADZEMNIH ELEKTROENERGETSKIH VODOVA, Elektronski fakultet, Niš, 2002.
- [3] D. Tasić, OSNOVI ELEKTROENERGETSKE KABLOVSKE TEHNIKE, Elektronski fakultet, Niš, 2001.
- [4] ***, CALCULATION OF THERMAL RESISTANCES, IEC Standard 287, Part 2-1, 1994.
- [5] L. Heinhold, POWER CABLES AND THEIR APPLICATION, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, 1990.
- [6] B. Lalević, STRUJA KROZ ELEKTRIČNU ZAŠTITU 110 kV KABLA, Elektrodistribucija, broj 2, 2000, str. 122-130.

Rad je primljen u uredništvo 13. 06. 2003. godine



Dragan Tasić (1961) je diplomirao (1986) i magistrirao (1991) na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, a doktorirao 1997. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu. Zaposlen je na Elektronskom fakultetu u Nišu u zvanju vanredni profesor. Oblasti njegovog interesovanja su analiza prenosnih i distributivnih mreža i kablovska tehnika.



Miodrag Stojanović (1972) je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1996. godine, a magistrirao na Elektronskom fakultetu u Nišu, januara 2003. godine. Zaposlen je na Elektronskom fakultetu u Nišu u zvanju asistent. Oblast njegovog interesovanja je analiza i zaštita prenosnih i distributivnih sistema.

Zoran Vučković,
Dušanka Jašović i Snežana Stupar

Obnavljanje antikorozijske zaštite čelično-rešetkaste konstrukcije dalekovodnih stubova

Stručni rad
UDK: 621.315.66; 546.47

Rezime:

Stubovi dalekovoda prenosne mreže Srbije, građeni su kao čelično-rešetkasta konstrukcija. Starost prvih stubova napona 110 kV već prelazi 50 godina, dok je starost stubova dalekovoda napona 220 kV preko 40 godina, a napona 400 kV preko 30 godina.

Zavisno od vremena izgradnje dalekovoda, primenjena je i različita tehnologija antikorozijske zaštite čelično-rešetkaste konstrukcije stubova (toplo cinkovanje, metalizacija ili organski premazi na različitim vezivnim osnovama).

S obzirom na period od preko deset godina, u kojem nije ništa rađeno na obnavljanju antikorozijske zaštite, obavljeno je snimanje radi utvrđivanja postojećeg stanja, na većem broju dalekovoda.

Na osnovu snimljenog stanja, predlažu se tehnička rešenja za obnavljanje postojeće antikorozijske zaštite, kako bi se trajnost iste produžila. Na taj način, omogućila bi se racionalna revitalizacija ostalih elemenata dalekovoda, čime bi se i njihov vek povećao bar za sledećih 20 - 30 godina.

Ključne reči: sistem zaštite, premaz, čelično - rešetkasta konstrukcija, trajnost zaštite, standard

Abstract:

REFURBISHMENT OF CORROSION PROTECTION ON TRANSMISSION LINE TOWER STEEL LATTICE STRUCTURE

Transmission line towers in Serbia are mostly steel-lattice structures. The first 110 kV towers are over 50 years old, 220 kV transmission line towers are over 40 years old, while 400 kV towers are over 30 years old.

Depending on the transmission construction period, various technologies of corrosion protection of steel-lattice tower structure have been applied (hot dip galvanization, metalization/bonding, organic coating on different bonding basis).

Since no kind of corrosion protection refurbishment has been performed during a ten-year period, a significant number of transmission lines have been recorded in order to determine their actual state.

Based on recorded on-site state, technical solutions for refurbishment of existing corrosion protection are suggested due to the extension thereof. This would enable a rational revitalization of other transmission line elements, thereby extending the life thereof by at least 20 - 30 years.

Key words: protection system, coating, steel-lattice structure, protection durability, standard

Rad objavljen na Međunarodnom kolokvijumu o Revitalizaciji nadzemnih voda, 6-10. maja 2003. godine Beograd

Zoran Vučković, dipl. ing. – JUKO CIGRE, 11 000 Beograd, Vojvode Stepe 412
Mr Dušanka Jašović, dipl. ing; Snežana Stupar, dipl. ing. – Institut „Kirilo Savić”, 11 000 Beograd, Vojvode Stepe 51

1. UVOD

Izgradnja prenosne mreže napona 110 kV u Srbiji počela je neposredno posle završetka drugog svetskog rata. U prvim godinama stubovi dalekovoda su građeni kao drveni, armirano-betonski i čelično-rešetkasti, da bi se kasnije u potpunosti prešlo na čelično-rešetkaste konstrukcije. Prvi dalekovodi sa čelično-rešetkastim stubovima, stari su već više od 50 godina. Sa razvojem industrije, rasle su i potrebe za električnom energijom, tako da su već krajem 60-tih godina prošlog veka počeli da se grade dalekovodi napona 220 kV, a krajem 70-tih i dalekovodi 400 kV. Svi ovi dalekovodi su građeni sa čelično-rešetkastim stubovima tipa „jela“, „bure“, portal ili „Y“. To znači da i starost 220 kV dalekovoda prelazi 40 godina, a starost dalekovoda 400 kV prelazi 30 godina.

2. PREGLED PRIMENJIVANIH SREDSTAVA ANTIKOROZIJNE ZAŠTITE

Jedan od bitnih faktora kod izrade i montaže stubova treba da bude i njihova zaštita od korozije. Zaštita od korozije direktno utiče na ukupan vek trajanja stubova, pa samim tim i na ukupan vek dalekovoda. Do skora se vek dalekovoda računao na 40 godina, ali se u zadnje vreme on sve više produžava i sve se više teži da se približi veku od 80 godina! Da bi ovako dug vek mogao da se omogući, neophodno je da se pored ostalih elemenata koji se ugrađuju u dalekovod, odabere i odgovarajući sistem premaza za zaštitu konstrukcije stubova od korozije. Za veliki broj elemenata koji se ugrađuju u dalekovode postoji realna mogućnost da se u toku eksploatacije izvrši i njihova kompletna zamena. Međutim, stubovi dalekovoda moraju da omoguće puni životni vek dalekovoda. To je moguće jedino ako se redovno obavljaju radovi na obnavljanju antikorozivne zaštite. Sistem odabrane zaštite od korozije, mora da zadovolji više uslova, a osnovni je da ima visoku trajnost, kako u normalnim, tako i u otežanim uslovima eksploatacije. Sa razvojem industrije, rasla je i potreba za električnom energijom, pa samim tim i za izgradnjom novih dalekovoda, ali je istovremeno raslo i industrijsko zagađenje, koje negativno utiče na trajnost zaštite i ubrzava njeno starenje.

Da bi se omogućio eksploatacioni vek stubova od oko 80 godina, neophodno je da se odabere odgovarajući sistem prvobitne zaštitne konstrukcije, da se prati stanje zaštite tokom eksploatacije i da se blagovremeno vrši njeno obnavljanje. Ukoliko se zaštititi od korozije ne posveti odgovarajuća pažnja, često dolazi do pojave kako površinske, tako i do dubinske korozije, koja dovodi do smanjenja poprečnog

preseka profila, a to neminovno ugrožava sigurnost i stabilnost čelično-rešetkaste konstrukcije stubova.

Antikorozivna zaštita čelično-rešetkastih konstrukcija, funkcionalno je povezana sa mnogim parametrima koji direktno utiču na izbor tehnologije zaštite.

2.1. Zaštita premaznim sredstvima

Najrasprostranjenija metoda zaštite čelično-rešetkastih konstrukcija stubova je zaštita premazima. Za efikasnu zaštitu premazima, osim primene kvalitetnih premaza, uslov je i besprekorna priprema površine. Na pripremljenu površinu nanosi se, po završenoj izradi konstrukcije, radionički premaz „Shop primer“, u sloju debljine 20 - 25 mm, koji ima ulogu da zaštiti konstrukciju do ugradnje, a zatim se zaštita vrši odgovarajućim premaznim sredstvima.

Kod prvih stubova zaštita je vršena sa premaznim sredstvima na bazi sušivih ulja, koja su pigmentirana sa olovnom minijumom. Ovi premazi su imali dosta dobra svojstva, kada je u pitanju trajnost zaštite. Nedostaci ove vrste premaznih sredstava su sporo sušenje i niska otpornost prema hemijskim uticajima. Pored toga, kod ovih premaznih sredstava postoje i ekološki problemi s obzirom na sadržaj olovnog minijuma, odnosno olovo-plumbata.

Kasnije se prešlo na premazna sredstva na bazi alkidnih smola, koja su dosta postojana na atmosferske uticaje, ali imaju nisku otpornost prema hemijskim uticajima.

Za zaštitu od korozije, korišćeni su i premazi na bazi epoksi smola. Ovi premazi imaju visoku otpornost prema hemijskim uticajima, ali pokazuju sklonost ka „kredanju“, odnosno nisu dovoljno postojani na dejstvo sunčeve svetlosti. Iz tih razloga, premazi na bazi epoksi smola nisu pogodni za završne premaze.

Kao premazna sredstva, u kasnijem periodu korišćena su i sredstva na bazi kopolimera vinilhlorida, Ova premazna sredstva imaju visoku postojanost prema hemijski agresivnim i vlažnim sredinama.

Za pojedinačne slučajeve, u hemijski jako agresivnim sredinama, upotrebljavani su i premazi na bazi hlorkaučuka. Ovi premazi su dosta postojani, kako u atmosferskim uslovima, tako i na jake agense kiseline, baza i drugih neorganskih jedinjenja, ali su nepostojani na „UV“ zračenja, pa su nepogodni za završne premaze. Pored toga nisu preporučljivi ni sa aspekta ekologije.

2.2. Zaštita metalnim prevlakama

Za zaštitu od korozije čelično-rešetkastih konstrukcija najčešće se primenjuju prevlake metalnog cinka.

Kod zaštite metalnim prevlakama, do sada su primenjivani sledeći postupci:

- postupak toplog cinkovanja potapanjem čelične konstrukcije u kade sa rastopljenim cinkom,
- postupak metalizacije, kod koga se nanošenje rastopljenog cinka na čeličnu konstrukciju vrši pomoću specijalnog uređaja.

Nedostaci primene zaštite toplim cinkovanjem su nedovoljna postojanost u agresivnoj sredini, čak i kod debljine cinkane prevlake od 120 μm .

Kod postupka metalizacije, nedostatak postupka se manifestuje u maloj gustini i visokoj poroznosti prevlake. Iz tih razloga, kod postupka metalizacije treba naneti veću debljinu prevlake i do 200 μm .

3. STANJE ANTIKOROZIVNE ZAŠTITE ČELIČNO - REŠETKASTIH STUBOVA

Stanje antikorozivne zaštite na stubovima dalekovoda na terenu (snimanje stanja obavljeno je u poslednje tri godine) je dosta različito. Pri ovome, treba uzeti u obzir podatak da je do 1986. godine obnavljanje antikorozivne zaštite vršeno dosta redovno i na svakih 5-10 godina, zavisno od vrste i stanja same zaštite, kao i lokacije objekta. Posle ovog perioda, iz poznatih razloga (nedostatka sredstava), prestalo se sa radovima na obnavljanju zaštite, pa je sasvim logično da danas na terenu imamo dosta različito stanje antikorozivne zaštite. Pored propadanja zaštite na pojedinim delovima čelično-rešetkaste konstrukcije, uočena je pojava naslaga korozije, do pojave „kratera”. Ovo stanje je naročito izraženo na onim stubovima kod kojih je zaštita vršena prema znim sredstvima na bazi sušivih ulja ili alkaldnih smola. Stanje čelično - rešetkaste konstrukcije na objektima koji su zaštićeni sa epoksidnim ili vinilnim premazima, je za nijansu bolje, ali je i tu potrebno izvršiti obnavljanje zaštite, obzirom da su debljine postojećih premaza svedene na 30 - 60 μm .

Ovakvo stanje antikorozivne zaštite na velikom broju stubova sada predstavlja problem za korektno obnavljanje, jer je skoro nemoguće konstrukciju dobro pripremiti - očistiti za nanošenje novih premaza. Na pojedinim mestima biće neophodno da se izvrši i kompletna zamena određenog broja profila, kako se nebi narušila projektovana stabilnost stubova.

Kod konstrukcija koje su zaštićene postupkom toplog cinkovanja ili metalizacijom takođe je došlo do drastičnog smanjenja debljine nanetih prevlaka metalnog cinka. Ove konstrukcije, nezavisno od vremena izgradnje, nisu imale nikakvo obnavljanje antikorozivne zaštite za sve vreme eksploatacije.

Kod dalekovoda koji su građeni pre 20 godina došlo je do značajnog smanjenja prevlaka cinka i one sada iznose 25-30 μm ! Svako dalje odlaganje obnavljanja zaštite može da dovede do početka procesa korozije na čeličnim površinama. Kod dalekovoda koji su građeni pre 35-40 godina, registrovana je pojava znatne korozije. Spoljašnje površine profila imaju obojenje karakteristično za koroziju (oksidnocrvena boja, koja se otire). Na ovoj konstrukciji registrovana je i pojava „kratera”, neravnina i ljuškanja prevlake. Proces korozije je počeo na ivicama i širi se ka sredini profila.

Hemijski sastav gornjih slojeva prevlake ukazuje na visok sadržaj gvožđa (više od 80 %), a debljina korozivnih produkata iznosi 20-40 μm .

Ovakvo stanje antikorozivne zaštite konstrukcije zahteva hitno obnavljanje, kako nebi došlo do dalje degradacije zaštite, do pojave korozije koja može vremenom da dovede i do smanjenja stabilnosti stubova. Većina analiziranih stubova se nalazi u normalnim atmosferskim uslovima, bez industrijskih zagađivača! Na osnovu toga može se s pravom zaključiti da je u sredinama sa nešto izraženijim zagađenjem stanje još gore.

4. POSTUPAK REVITALIZACIJE - OBNAVLJANJA ANTIKOROZIVNE ZAŠTITE

Da bi se obezbedila efikasna zaštita čelično-rešetkaste konstrukcije stubova u procesu revitalizacije, odnosno optimizacija postupka obnavljanja zaštite, potrebno je da se ispoštuju svi kriterijumi standarda JUS ISO 12944/1-8.

4.1. Klasifikacija sredine

Prema JUS ISO 12944/2 standardu izvršena je klasifikacija sredina u šest kategorija atmosferske korozivnosti:

C1 - vrlo niska (čista atmosfera u zatvorenom prostoru)

C2 - niska (atmosfera sa niskim nivoom zagađenja - seoska oblast)

C3 - srednja (gradska i industrijska atmosfera sa umerenom koncentracijom SO₂ i primorske oblasti sa niskim salinitetom)

C4 - visoka (industrijska atmosfera sa visokom koncentracijom hemijskih agenasa i primorske oblasti sa umerenim salinitetom)

C5-I - vrlo visoka (industrijska oblast sa visokom vlažnošću i agresivnom sredinom)

C5-M - vrlo visoka (područja na obali i na vodi sa visokim salinitetom)

4.2. Tip površine i priprema površine

Pre pristupanja obnavljanju antikorozijske zaštite čeličnih konstrukcija, neophodno je utvrditi stanje postojeće antikorozijske zaštite. Nakon vizuelnog pregleda, vrši se ocenjivanje degradacije postojećih premaza prema ISO standardu 4628 - 1 do 5. Ovim standardom, usvojena je jednoobrazna konvencija označavanja intenziteta nedostatka, procenom prema bročanoj skali sa podelom od R_i0 do R_i5 , gde R_i0 označava zaštitu bez nedostataka, a R_i5 da su nedostaci na zaštiti tako ozbiljni da dalje rangiranje više nema praktičnog smisla. Standard ISO 4628 - 3 pokazuje vizuelni pregled (etalone) stepena zardalosti čeličnih površina prethodno zaštićenih prevlakom u gradaciji od R_i1 do R_i5 . Ovi stepeni predviđa-

ju određeni procenat zahvaćenosti čeličnih površina korozijom, uočenom ispod prevlake i onom koja je izbila kroz prevlaku.

Na osnovu procene stepena oštećenja određuje se postupak pripreme površine. JUS ISO standard 12944/4 detaljno opisuje sve postupke pripreme - čišćenja površina u zavisnosti od vrste i stanja prethodne zaštite. Izbor postupka pripreme površine zavisi i od drugih faktora, kao što su oblik konstrukcije kao i sama pristupačnost istoj. Tako se u nekim slučajevima ne primenjuje najefikasniji postupak čišćenja peskarenjem (švedski standard SIS 55900), već se pribegava ručnom mehaničkom čišćenju, iz napred navedenih razloga (ovo je jedini način na koji se vrši čišćenje kod obnavljanja antikorozijske zaštite na dalekovodnim stubovima).

Tabela 1.

Primena zaštitnih sistema premaznih sredstava za kategoriju korozivnosti od C2 do C5-I i C5-M na površine vruće pocinkovane na kojima je izvršena priprema mehaničkim čišćenjem

Osnovni premaz			Završni premaz			Sistem		Očekivana trajnost zaštite za kategorije korozivnosti				
Osnova	Broj premaza	Ukupna debljina <i>m</i>	Osnova	Broj premaza	Ukupna debljina <i>m</i>	Broj premaza	Ukupna debljina <i>m</i>	C2	C3	C4	C5-I	C5-M
								L M H	L M H	L M H	L M H	L M H
PVC	-	-	PVC	1	80	1	80	+	+	+		
	1	40		1	80	2	120	+	+	+		
	1	80		1	80	2	160		+	+	+	+
	1	80		2	160	3	240			+	+	+
AY	-	-	AY	1	80	1	80	+	+	+		
	1	40		1	80	2	120	+	+	+		
	1	80		1	80	2	160		+	+	+	+
	1	80		2	160	3	240			+	+	+
EP ili PUR	-	-	EP ili PUR	1	80	1	80	+	+	+		
	1	40		1	80	2	120		+	+	+	+
	1	80		1	80	2	160			+	+	+
	1	80		2	160	3	240			+	+	+
	1	80		2-3	240	2-3	320			+	+	+
Premazi			Premazi			Premazi		Premazi				
Baza za osnovni premaz	Broj komponenti		Moguće vodorastvorni	Baza za završni premaz	Broj komponenti		Moguće vodorastvorni					
PVC - polivinil	1 komponenta			PVC - polivinil	1 komponenta							
AY - akril	1 komponenta		#	AY - akril	1 komponenta		#					
EP - epoksi	2 komponente		#	EP - epoksi	2 komponente		#					
PUR- poliuretan	2 komponente			PUR- poliuretan	2 komponente							

4.3. Tip zaštitnog sistema premaznih sredstava

Standard JUS ISO 12944/5 definiše sve tipove zaštitnih sistema premaznih sredstava sa različitim hemijskim sastavom i tip procesa nastajanja filma. U zavisnosti od napred određene kategorije atmosfere korozivnosti za datu konstrukciju, vrši se izbor odgovarajućeg sistema, prema standardu JUS ISO 12944/5, kojim je definisana priprema površine, broj premaza osnovnog i završnog premaza, njihove pojedinačne debljine filma, kao i debljina sistema u mikrometrima (*mm*).

Ovaj standard daje primere različitih zaštitnih sistema boja, koji su se pokazali pogodnim za konstrukcije izložene korozivnim naprezanjima sa različitim kategorijama korozivnosti.

4.4. Trajnost zaštite odabranog sistema premaznih sredstava

Pod pojmom „trajnost zaštite” podrazumeva se očekivani vek trajanja zaštitnog sistema premaznih sredstava do prvog ponovnog nanošenja premaza u cilju održavanja date konstrukcije.

Standard JUS ISO 12944/1 izražava tri kategorije trajnosti:

- niska (L) od 2 do 5 godina,
- srednja (M) od 5 do 15 godina
- visoka (H) više od 15 godina.

Trajnost zaštite je tehnički uslov koji omogućava vlasniku konstrukcije da odredi program održavanja, a „vreme garancije” je zakonski uslov (ugovorena stavka) i obično je kraće od opsega trajnosti (ova dva pojma ne treba mešati).

4.5. Laboratorijske metode ispitivanja zaštitnih sistema premaznih sredstava

JUS ISO standard 12944/6 utvrđuje laboratorijske metode ispitivanja, koje se primenjuju kada se procenjuje učinak sistema premaznih sredstava. Posebno je namenjen za sisteme premaza za koje još nema dovoljno praktičnog iskustva.

Predmetni standard se odnosi na ispitivanja premaznih sredstava namenjenih za nanošenje:

- na čelik pripremljen čišćenjem mlazom abraziva,
- na čelik na koji je naneta prevlaka cinka toplim postupkom,
- na čelik na koji je naneta metalna prevlaka termičkim postupkom

5. ZAKLJUČAK

Kod postupka revitalizacije antikorozione zaštite čeličnih konstrukcija stubova dalekovoda, da bi se obezbedila efikasna zaštita nanošenjem sistema

Tabela 2.

Test procedura za ispitivanje premaznih sredstava za zaštitu čeličnih površina od korozije

Korozivna kategorija JUS ISO 12944-2	Trajnost zaštite JUS ISO 12944-1 (godina)	ISO 2812-1 Hemijska otpornost (h)	ISO 2812-2 Metoda potapanja u vodu (h)	ISO 6270 Kontinualna kondenzacija 100 % RV (h)	ISO 7253 Neutralni sprej 5 % NaCl (h)
C2	L	–	–	48	–
	M	–	–	48	–
	H	–	–	120	–
C3	L	–	–	48	120
	H	–	–	120	240
	M	–	–	240	480
C4	L	–	–	120	240
	H	–	–	240	480
	M	–	–	480	720
C5 - I	L	158	–	240	480
	H	168	–	480	720
	M	168	–	720	1 440
C5 - M	L	–	–	240	480
	H	–	–	480	720
	M	–	–	720	1 440

premaznih sredstava, potrebno je u skladu sa standardom JUS ISO 12944/1-8, izvršiti sledeće:

- Dati analizu odnosno procenu korozivnosti sredine na mestu gde je konstrukcija postavljena,
- Utvrditi da li postoje bilo kakvi posebni uslovi, koji mogu da utiču na izbor sistema premaznih sredstava, koja se primenjuju,
- Izvršiti procenu stanja površine i stepen oštećenja postojeće zaštite,
- Odrediti sistem i odgovarajući postupak pripreme površine u zavisnosti od izbora sistema,
- Odrediti sistem premaznih sredstava prema zahtevanoj vremenskoj trajnosti među onima koji su navedeni kao pogodni za napred određenu sredinu, ili na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja njihovih karakteristika,
- Izabrati takav sistem koji sa ekološkog aspekta, prouzrokuje minimum štete po okolinu, kao i minimum rizika po zdravlje i bezbednost, kako ljudi tako i životinja.
- Nakon izbora postupka antikorozijske zaštite pristupa se izradi plana rada i utvrđivanju programa nadzora za vreme izvođenja radova.

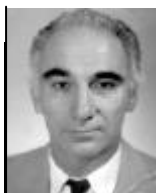
Na osnovu svih napred utvrđenih parametara, moguće je da se napravi takav program radova na

antikorozijskoj zaštiti čelično-rešetkaste konstrukcije, koji bi garantovao sigurnost konstrukcije za puni radni vek dalekovoda.

6. LITERATURA

- [1] S. Mladenović, M. Petrović, T. Rikovski, KOROZIJA I ZAŠTITA MATERIJALA, „Rad”, Beograd 1975,
- [2] Dr. A. Šuman, METALOGRAFIJA, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd 1981,
- [3] S. Stupar, ZAŠTITA OD KOROZIJE ELEMENATA SPOJNE OPREME DALEKOVODA POSTUPKOM TOPLOG CINKOVANJA 22 Savetovanje JUKO CIGRE, Brnjačka Banja, 1995
- [4] S. Stupar, Mr. D. Jašović, B. Tomašević, PROCENA STEPENA OŠTEĆENJA ANTIKOROZIJSKE ZAŠTITE ČELIČNIH KONSTRUKCIJA, 24 Savetovanje JUKO CIGRE, Vrnjačka Banja, 1999
- [5] S. Stupar, D. Jašović, B. Tomašević, Z. Vučković, UTVRĐIVANJE STANJA ANTIKOROZIJSKE ZAŠTITE POCINKOVANIH ČELIČNIH KONSTRUKCIJA ELEKTROENERGETSKIH POSTROJENJA, 25 Savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi, 2001
- [6] JUS ISO STANDARDI 12944/1-8, 1998

Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Zoran Vučković je rođen u Kraljevu 06. 03. 1937. godine. Diplomirao je na elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 1963. godine na odseku za energetiku. U elektroprivredi je od 1967. godine, a radio je kao projektant u nadzoru, a od 1984. godine je bio na radnom mestu Rukovodioca službe za dalekovode u sektoru Tehnika. Od 2000. godine je bio na radnom mestu stručnog saradnika.

Radio je na izgradnji dalekovoda svih naponskih nivoa, na prijemu opreme, aktivno je učestvovao u radu Stručnih saveta EPS-a i Elektroistoka, bio je član više Komisija JUS-a za izradu standarda, a i autor je mnogih tehničkih preporuka.

Od 1971. godine je član Studijskog komiteta 22, nadzorni vodovi JUKO CIGRE, gde je bio i predsednik više radnih grupa. Bio je i prvi predsednik Radne grupe za dalekovode JUGEL-a. Od 1991. godine je Predsednik STK 22 (sada B2) nadzemni vodovi i vodi ga i danas. Od 1986. godine uključuje se u rad IWAIŠ-a (međunarodne stručne organizacije za borbu protiv zaleđivanja konstrukcija), a i danas je član advizori komisije te međunarodne asocijacije. Na savetovanjima IWAIŠ-a imao je pet objavljenih radova, od kojih je naročito bio zapažen rad o preskocima na zaleđenim i zagađenim izolatorskim lancima na DV 400 kV.

Na savetovanjima domaće CIGRE i CIRED-a imao je preko 20 objavljenih radova, za koje je dobio više diploma za najzapaženiji referat.

Član je Izvršnog odbora JUKO CIGRE od 1991. godine.

Od Skupštine CIGRE dobio je i Plaketu CIGRE za zapažen doprinos u njenom radu (1990).

Za posebne zasluge u održavanju mreže za vreme NATO bombardovanja odlikovan je od strane Predsednika Republike Ordenom rada, a od Elektroistoka je, pored niza pohvala i diploma, nagrađen i posebnom Poveljom.



Dušanka M. Jašović je rođena 1951. godine u Beogradu. Diplomirala je 1977. godine na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu. Postdiplomske studije završila je u Centru za multidisciplinarnu studiju u Beogradu na odseku Nauka o materijalima. Od 1985. godine ima istraživačko zvanje istraživač-saradnik.

Od 1978. do 1995. godine bila je zaposlena u Institutu za ispitivanje materijala Srbije. U Institutu „Kirilo Savić” u Beogradu radi od 1995. godine. U toku svog dugogodišnjeg iskustva, bavila se i istraživanjima u oblasti različitih materijala, a posebno antikorozijskom zaštitom čeličnih konstrukcija.

U radu JUKO CIGRE aktivno učestvuje deset godina. Na dosadašnjim savetovanjima JUKO CIGRE imala je pet referata, a na savetovanjima CIRED dva iz oblasti antikorozijske zaštite. Aktivno učestvuje u radnoj grupi za antikorozijsku zaštitu STK B2 JUKO CIGRE.

Redovno prati domaća i strana dostignuća iz oblasti zaštite od korozije, a u okviru laboratorije Instituta „Kirilo Savić” verifikuje ispitivanja iz ove oblasti.



Snežana Stupar je rođena 25. 01. 1947. godine u Beogradu. Diplomirala je 1972. godine na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Zaposlena je u Institutu „Kirilo Savić” u Beogradu na radnom mestu rukovodioca sektora za antikorozijsku zaštitu objekata u oblasti građevinarstva, železnice, elektroenergetskih postrojenja, procesne industrije i drugih.

Bavi se naučno istraživačkim radom, aktivno učestvuje u pisanju stručnih radova na simpozijumima iz oblasti zaštite konstrukcije od korozije.

Član je Studijskog komiteta B2 JUKO CIGRE od 1992. godine, gde stručno vodi radnu grupu za antikorozijsku zaštitu. Na svim savetovanjima, od kada je član CIGRE imala je referate iz oblasti antikorozijske zaštite. Pored toga, pisala je i radove za savetovanja CIRED, kao i neke iz oblasti građevinarstva.

Redovno prati domaća i strana dostignuća iz oblasti zaštite od korozije, a u okviru laboratorije Instituta „Kirilo Savić” verifikuje ispitivanja iz ove oblasti.

Vrši konsultantske usluge, daje tehnologije za antikorozijsku zaštitu, obavlja nadzor i tehnički prijem radova iz oblasti antikorozijske zaštite.

Zlatan Stojković,
Amir Miri i Goran Mitrić

Proračun porasta potencijala metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja izazvanog skopnim operacijama rastavljačem

Stručni rad
UDK: 621.316.545; 621.316.93

Rezime:

U radu je prikazano numeričko određivanje porasta potencijala metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja, izazvanog skopnim operacijama rastavljačem. Dat je kratak teoretski osvrt na pojavu prenapona karakterističnih za gasom SF₆ izolovano postrojenje. Elementi postrojenja su modelovani odgovarajućim ekvivalentnim šemama koje su inkorporirane u programski paket. Numeričke simulacije su izvršene na primeru 420 kV gasom SF₆ izolovanog postrojenja. Analiziran je uticaj broja i dužine veze između metalnog oklopa i uzemljivača gasom SF₆ izolovanog postrojenja na visinu potencijala. Navedene su mere za efikasno sniženje razmatranog potencijala koje treba preduzeti u fazi projektovanja, montaže i eksploatacije ovih postrojenja.

Cljučne reči: gasom SF₆ izolovano postrojenje, rastavljač, vrlo brzi prenapon

Abstract:

ESTIMATION OF METAL CLAD GAS SF₆ INSULATED FACILITY POTENTIAL PICKUP CAUSED BY SWITCHING DISCONNECTOR OPERATIONS

The paper deals with numeric determinations of metal clad SF₆ insulated facility potential pickup caused by switching disconnecter operations. A brief theoretical description of very fast transients is given. Facility elements are modelled by corresponding equivalent diagrams which are incorporated into the Alternative Transients Program. Numerical simulations were performed on the example of 420 kV Very Fast Transients. The impact of the number and length of connection between the metal shield and Very Fast Transients grounding are analyzed. Measures for efficient reduction of considered potential which should be taken in the design, erection and operation phases of this facility are given.

Key words: gas SF₆ insulated facility, disconnecter, very fast transients

1. UVOD

Visokonaponska postrojenja radnog napona do 800 kV se koriste za prenos i distribuciju električne energije u gradovima, regijama i industrijskim cen-

trima. Glavne prednosti ovih postrojenja su visoka pouzdanost, niski troškovi životnog ciklusa i mali zahtevani prostor, što omogućava nalaženje lokacije blizu potrošačkih centara 1. Iz ovih razloga gasom SF₆ izolovana postrojenja imaju prednost kod snab-

Dr Zlatan Stojković, V. prof. – Elektrotehnički fakultet Beograd, 11 120 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73
Prof. dr Amir Miri, dipl. ing. – Institute of Electric Energy Systems and High-voltage Technology, Karlsruhe, Germany
Goran Mitrić, dipl. ing. – Urbanistički zavod Republike Srpske, Banja Luka

devanja potrošača u gradovima i industrijskim kompleksima.

Prenaponi izazvani sklopnim operacijama rastavljačem u gasom SF₆ izolovanom postrojenju se odlikuju izrazito kratkim vremenom uspona od 5 ns do 20 ns. Zbog ovog svojstva, ovi prenaponi su nazvani vrlo brzi prenaponi (VFT), i mogu izazvati znatno naprezanje izolacije elemenata SF₆ postrojenja. Ujedno, ovi prenaponi predstavljaju potencijalan izvor smetnji koje mogu uticati na ispravnost rada sistema za upravljanje i zaštitu [25]. Porast potencijala metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja je jedan od fenomena uočenih pri sklopnim operacijama rastavljačem [6,7]. Ovaj fenomen, u literaturi poznat pod nazivom Transient Ground Potential Rise (TGPR), može oštetiti pojedine komponente sistema za upravljanje i zaštitu i ugroziti pogonsko osoblje gasom SF₆ izolovanog postrojenja.

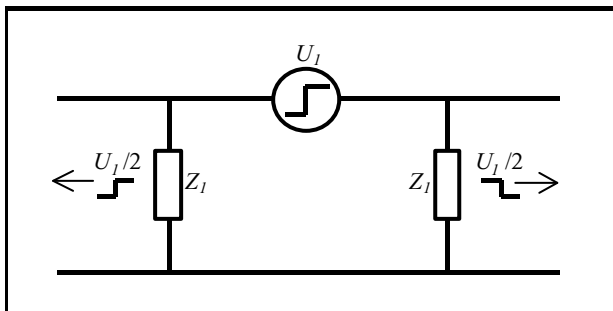
U radu je prikazan postupak numeričkog određivanja ovog potencijala u 420 kV gasom SF₆ izolovanom postrojenju. Proračuni su izvršeni primenom programskog alata EMTP / ATP [8,9]. U cilju sagledavanja mera za sniženje potencijala metalnog oklopa, izvršena je analiza uticaja broja i dužine spusta do uzemljivača gasom SF₆ izolovanog postrojenja na visinu razmatranog potencijala.

2. UZROCI PORASTA POTENCIJALA METALNOG OKLOPA SF₆ POSTROJENJA

Mogući uzroci porasta potencijala metalnog oklopa su:

- Sklopne operacije rastavljačem u gasom SF₆ izolovanom postrojenju.
- Kvarovi, kao što su kratki spojevi unutar gasom SF₆ izolovanog postrojenja.
- Kvarovi izvan gasom SF₆ izolovanog postrojenja, kao što su kratki spojevi ili atmosferska pražnjenja.

Prva dva uzroka dovode do brzog sloma dielektrične čvrstoće gasa SF₆. Kao posledica ovog slo-



Slika 1. Ekvivalentna šema za ilustrovanje nastanka vrlo brzih prenapona usled uključivanja rastavljača u SF₆ postrojenju

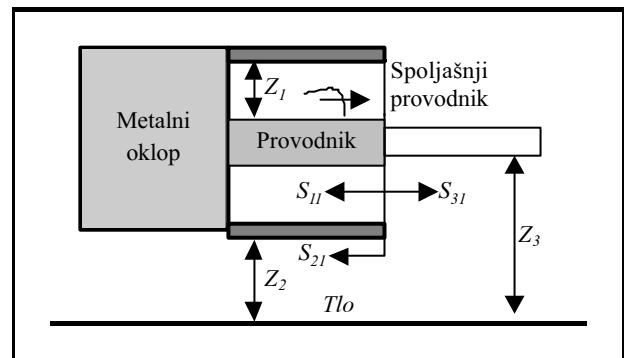
ma, generiše se putujući talas izrazito kratkog vremena uspona (U_1). Za slučaj sklopne operacije rastavljačem, ovaj putujući talas se deli na dve komponente koje putuju od rastavljača (slika 1).

Oznaka Z_1 predstavlja talasnu impedansu tzv. unutrašnjeg sistema, koji se sastoji od površine provodnika i unutrašnje površine metalnog oklopa. Maksimalna vrednost prenapona U_1 jednaka je dvostrukoj amplitudi faznog napona.

3. MODELOVANJE SF₆ POSTROJENJA

Za prelazne procese izazvane sklopnim operacijama cilindrični karakter SF₆ postrojenja predstavlja visokofrekventno kolo sa raspodeljenim parametrima. Usled skin efekta, struja se prostire po površini provodnika i ne prodire u njegovu unutrašnjost.

Za pravilnu analizu porasta potencijala metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja, usled manipulacija rastavljačem, važno je uočiti postojanje dva sistema. Pored unutrašnjeg sistema, sastavljenog od površine provodnika i unutrašnje površine metalnog oklopa, postoji i spoljašnji sistem koji predstavljaju spoljašnja površina metalnog oklopa i površina tla (slika 2).



Slika 2. Prikaz unutrašnjeg i spoljašnjeg sistema gasom SF₆ izolovanog postrojenja

Oznake na slici 2 imaju sledeće značenje: Z_1 talasna impedansa unutrašnjeg sistema; Z_2 talasna impedansa spoljašnjeg sistema; Z_3 talasna impedansa sistema spoljašnji provodnik–tlo.

Za model prikazan na slici 2, može se definisati sledeća matrica koeficijenata odbijanja i prelamanja:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gde se koeficijent s_{ij} određuje iz izraza:

$$s_{ij} = \frac{2 Z_i}{Z_1 + Z_2 + Z_3}, \text{ za } i = 1, j \quad (2)$$

odnosno:

$$s_{ij} = 1 - \frac{2 Z_i}{Z_1 + Z_2 + Z_3}, \text{ za } i = j \quad (3)$$

Iz (1)–(3) se može zaključiti da se talas nastao manipulacijom rastavljačem u gasom SF₆ izolovanom postrojenju deli na tri dela. Drugi deo talasa prikazan kroz koeficijent S₂₁ je važan sa aspekta proračuna porasta potencijala metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja. Vrednost koeficijenta S₂₁ je srazmerna sa amplitudom potencijala metalnog oklopa.

Operacija rastavljačem je modelovana pomoću modifikovanog modela Kopplin koji opisuje otpornost luka u rastavljaču [3,4]. Elementi SF₆ postrojenja su modelovani ekvivalentnim šemama, definisanim talasnom impedansom i vremenom prostiranja [3,4,10,11].

Unutrašnji sistem gasom SF₆ izolovanog postrojenja je modelovan ekvivalentnom šemom sa raspodeljenim parametrima. Modul CABLE CONSTANTS predstavlja sastavni deo programskog paketa EMTP / ATP, i korišćen je za modelovanje unutrašnjeg sistema [9].

Za proračun parametara provodnika, korišćen je SEMLYEN model provodnika. Ovaj modul tretira provodnik kao element sa raspodeljenim parametrima, i omogućava proračun matrica otpornosti i kapacitivnosti, kao i talasne impedanse provodnika pri zadatoj učestanosti.

Modelovanje spoljašnjeg sistema se svodi na modelovanje metalnog oklopa kao provodnika sa raspodeljenim parametrima. Iz ovog razloga je metalni oklop podeljen na elemente određene dužine, pri čemu se njihova talasna impedansa određuje iz izraza:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (4)$$

gde L' i C' predstavljaju podužnu induktivnost i podužnu kapacitivnost elementa metalnog oklopa prema tlu. Ovi parametri su definisani izrazima:

$$L' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \rho} \cdot \ln \frac{2 \cdot h}{D} \quad (5)$$

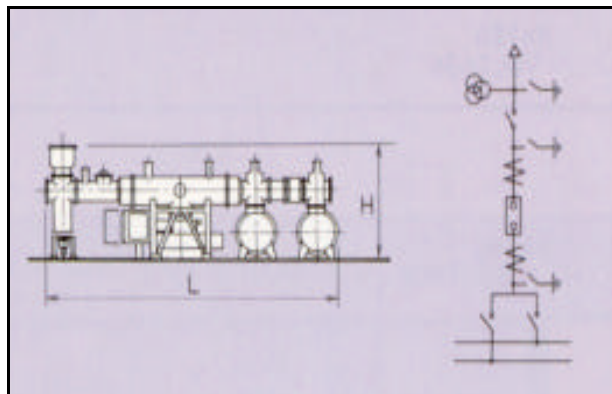
$$C' = \frac{2 \cdot \rho \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{2 \cdot h}{D}} \quad (6)$$

gde je μ₀ magnetna permeabilnost vazduha, ε₀ dielektrična konstanta vazduha, h visina elementa metalnog oklopa u odnosu na tlo, D srednji geometrijski poluprečnik elementa metalnog oklopa.

Spust koji povezuje metalni oklop sa uzemljivačem gasom SF₆ izolovanog postrojenja je takođe modelovan kao provodnik sa raspodeljenim parametrima. Korišćenjem SEMLYEN modula dobijaju se talasna impedansa spusta i vreme prostiranja talasa.

4. REZULTATI PRORAČUNA

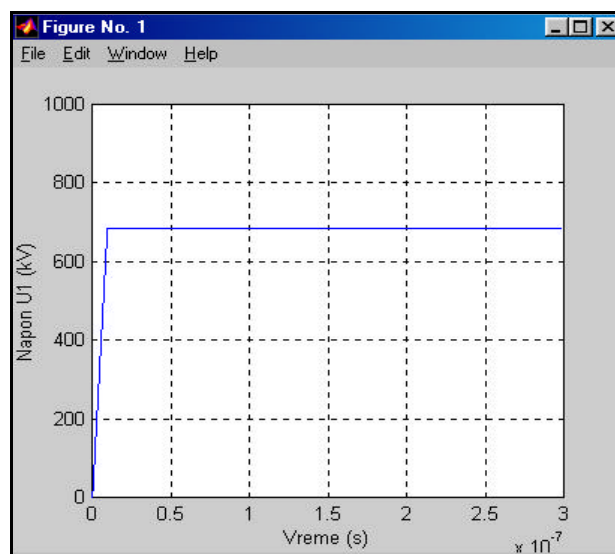
Numeričke simulacije su izvršene na jednom dalekovodnom polju 420 kV gasom SF₆ izolovanog postrojenja. Dispozicija i odgovarajuća jednopolna šema ovog polja su prikazane na slici 3. Dimenzije polja iznose WxHxL=4,5x5,6x12,6 mxmxm, gde W, H i L predstavljaju širinu, visinu i dužinu razmatranog polja.



Slika 3. Dispozicija dalekovodnog polja i odgovarajuća jednopolna šema

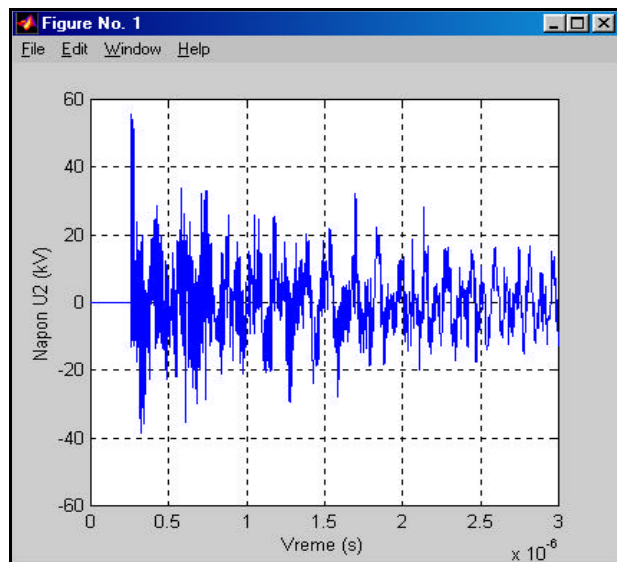
Sabirnički rastavljači, kao i prekidač su isključeni. Potencijal metalnog oklopa razmatranog SF₆ postrojenja, izazvan uključanjem izlaznog rastavljača dalekovodnog polja, određen je primenom programskog paketa EMTP / ATP [3,8] i odgovarajućih modela opisanih u poglavlju 3.

Na slici 4 je prikazan talasni oblik napona između kontakata izlaznog rastavljača. Amplituda napona ima maksimalnu moguću vrednost U₁ = 2 · 420 · √2 / √3 = 686 kV, dok vreme uspona iznosi 10 ns.

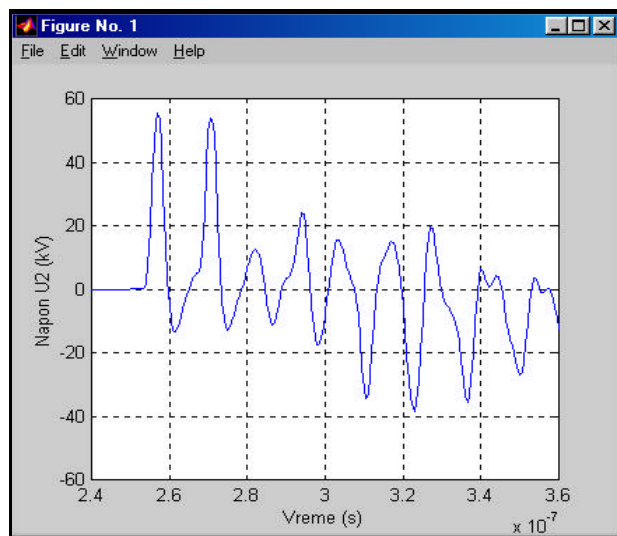


Slika 4. Talasni oblik napona između kontakata izlaznog rastavljača

Za talasni oblik napona prema slici 4 određen je potencijal metalnog oklopa na spoju gasom SF₆ izolovanog postrojenja i provodnog izolatora. Slika 5a se odnosi na vreme proračuna do 3 **ms**, dok slika 5b ilustruje talasni oblik potencijala u vremenskom periodu od 240 ns do 360 ns.



a)



b)

Slika 5. Talasni oblik potencijala metalnog oklopa na spoju gasom SF₆ izolovanog postrojenja i provodnog izolatora; a) Vremenski period od 0 do 3 **ms**; b) Vremenski period od 240 ns do 360 ns

Na osnovu rezultata prikazanih na slikama 5a i 5b mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Maksimalna vrednost potencijala metalnog oklopa u razmatranoj tački iznosi 55 kV.
- Maksimalna vrednost odgovara prvom maksimumu potencijala, i postiže se posle 255 ns od početka prelaznog procesa.

- Visokofrekventni prelazni proces na metalnom oklopu gasom SF₆ izolovanog postrojenja traje samo nekoliko ms.

Izvedeni zaključci se slažu sa ocenama izloženim u [7], prema kojima potencijal metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja ima relativno veliku amplitudu, ali traje samo nekoliko ms sa frekvencijama oko 30 MHz.

Rezultati proračuna su ukazali na to da su potencijali u ostalim tačkama metalnog oklopa nešto nižih amplituda u odnosu na amplitudu potencijala razmatrane tačke.

5. MERE ZA SNIŽENJE POTENCIJALA METALNOG OKLOPA GASOM SF₆ IZOLOVANOG POSTROJENJA

Generalno, postoje dve grupe mera koje omogućavaju sniženje razmatranog potencijala:

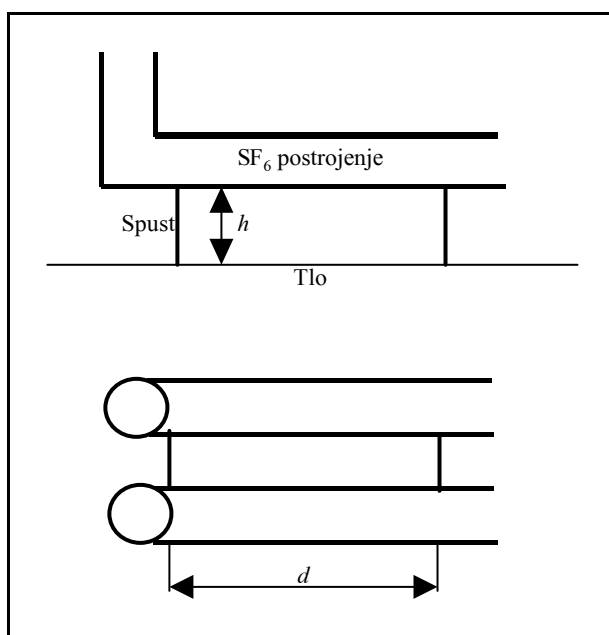
- Mera koje se preduzimaju u fazi projektovanja i montaže gasom SF₆ izolovanog postrojenja.
- Mera koje se preduzimaju u fazi eksploatacije gasom SF₆ izolovanog postrojenja.

Prva grupa mera obuhvata optimizaciju:

- Visine metalnog oklopa u odnosu na tlo, što ujedno određuje dužinu spusta do uzemljivača gasom SF₆ izolovanog postrojenja.
- Broja spusteva.
- Karakteristika tla ispod metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja.

U drugu grupu mera spadaju:

- Informisanje pogonskog osoblja o opasnosti ovog fenomena.



Slika 6. Skica postrojenja sa rasporedom spusteva

– Upozorenje pogonskog osoblja neposredno pre sklopnih operacija rastavljačima.

Na slici 6 je prikazana skica postrojenja sa rasporedom spusteva, pri čemu oznake h i d predstavljaju dužinu spusta i rastojanje između dva spusta, respektivno.

U tabeli 1 su prikazani rezultati analize uticaja parametara h i d na relativnu promenu maksimalne vrednosti potencijala metalnog oklopa razmatranog postrojenja. Proračuni su izvršeni za specifičnu otpornost tla $r = 20 \Omega m$.

Tabela 1.

Relativna promena maksimalne vrednosti potencijala metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja u funkciji dužine spusta h i rastojanja između dva spusta d

h (m)	d (m)	DU_i (%)
1,0	12,5	0,00
0,5	12,5	-31,60
1,0	4,0	-17,12

Relativna promena DU_i je određena iz izraza:

$$DU_i (\%) = \frac{U_i - U_0}{U_0} \cdot 100 \quad (7)$$

gde je U_0 maksimalna vrednost potencijala za $d=12,5 m$ i $h=1 m$.

Na osnovu rezultata proračuna prikazanih u tabeli 1 može se zaključiti da smanjenja parametara d i h predstavljaju važne mere za snižavanje potencijala metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja. Uticaj dužine spusta na porast potencijala metalnog oklopa SF₆ postrojenja se svodi na uticaj induktivnosti odgovarajuće veze. Duži spust dovodi do odgovarajućeg porasta potencijala metalnog oklopa, pa se kao mera sniženja ovog potencijala predlaže što je moguće kraća veza spusta do uzemljivača gasom SF₆ izolovanog postrojenja.

6. ZAKLJUČAK

U radu je razvijen numerički model za proračun porasta potencijala metalnog oklopa gasom SF₆ izolovanog postrojenja, izazvanog sklopnim operacijama rastavljačem. Ovaj porast potencijala može ugroziti ispravnost rada sistema zaštite i upravljanja, kao i pogonsko osoblje. Iz ovih razloga, potrebno je preduzeti odgovarajuće mere za njegovo sniženje.

Smanjenja dužine spusta i rastojanja između dva spusta predstavljaju najefikasnije mere za sniženje razmatranog potencijala koje se mogu preduzeti u fazi projektovanja i montaže gasom SF₆ izolovanog postrojenja. Informacije o opasnosti, kao i upozorenje pogonskog osoblja neposredno pre izvršenja sklopnih operacija rastavljačima, predstavljaju mere koje treba sprovesti tokom eksploatacije ovih postrojenja.

7. ZAHVALNOST

Prvi autor zahvaljuje Fondaciji Alexander von Humboldt, Bon, SR Nemačka, na finansijskoj podršci ovom radu.

8. LITERATURA

- [1] A. Eriksson, K. G. Petterson, A. Krenicky, R. Baker, J. R. Ochoa, A. Leibold: EXPERIENCE WITH GAS INSULATED SUBSTATIONS IN THE USA; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, Jan 1995, pp. 210-216.
- [2] C. M. Wiggins, D. E. Thomas, F. S. Nickel, S. E. Wright: TRANSIENT ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN SUBSTATIONS; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, Oct 1994, pp. 1869-1881.
- [3] A. M. Miri, Z. Stojković: TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PHENOMENA IN THE SECONDARY CIRCUITS OF VOLTAGE AND CURRENT TRANSFORMERS IN GIS (MEASUREMENTS AND CALCULATIONS), IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, Oct 2001, pp. 571-575.
- [4] A. M. Miri, Z. Stojković: ELEKTROMAGNETNI PRELAZNI PROCESI U SEKUNDARNIM KOLIMA MERNIH TRANSFORMATORA U SF₆ POSTROJENJU, Elektroprivreda Br. 4, 1999, str. 61-66.
- [5] V. Vinod Kumar, J. Thomas, M. S. Naidu: INFLUENCE OF SWITCHING CONDITIONS ON THE VF TO MAGNITUDES IN A GIS; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, Oct 2001, pp. 539-544.
- [6] A. Ametani, N. Nagaoka, N. Mori, K. Shimizu: SWITCHING OVERVOLTAGES ON A PIPE IN A GAS INSULATED SUBSTATION; IPST'97 International conference on power systems transients, Seattle, June 1997, pp. 286-291.
- [7] T. Irwin, J. LopezRoldan: SUBSTATION EARTHING: SPECIAL CONSIDERATIONS FOR GIS SUBSTATIONS; SUBSTATION EARTHING, IEE Seminar on, 2000, Ref. No. 2000/033, pp. 5/15/5.
- [8] EMTP RULEBOOK 1994, UNIVERSITY LEUVEN EMTP CENTER, Heverlee, Belgie, p. 930.
- [9] Z. Stojković: PROJEKTOVANJE POMOĆU RAČUNARA U ELEKTROENERGETICI – PROGRAMSKI ALATI; Monografija u izdanju Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, 2002, str. IV-1-IV-55.

[10] CIGRE Working Group 33. 02: GUIDELINES FOR REPRESENTATION OF NETWORK ELEMENTS WHEN CALCULATING TRANSIENTS (INTERNAL OVERVOLTAGES), Paris, 1991.

[11] D. Povh, H. Schmitt, O. Volcker, R. Witzmann: MODELLING AND ANALYSIS GUIDELINES FOR VERY FAST TRANSIENTS; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, Oct 1996, pp. 2028-2035.

Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Zlatan Stojković je rođen 1960. godine. Diplomirao, magistrirao i doktorirao 1984, 1991. i 1995. godine, na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Kao stipendista Fondacije „Alexander von Humboldt”, Bon, SR Nemačka, boravio je u Institutu za visok napon i elektroenergetske sisteme Univerziteta u Karlsruheu, SR Nemačka, u toku 1997/98. i 2002. godine. Vanredni je profesor Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i bavi se projektovanjem pomoću računara u elektroenergetici i primenom programskih alata.



Amir Miri je rođen 1935. godine. Diplomirao je 1960. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Hanoveru, SR Nemačka. Doktorske studije je pohađao u periodu od 1960. do 1965. godine na Univerzitetu u Karlsruheu, SR Nemačka. Doktorirao je 1965. godine na istom Univerzitetu.

Kao profesor Instituta za visok napon i elektroenergetske sisteme Univerziteta u Karlsruheu, učestvovao je u nastavnom i naučnom radu u oblasti elektroenergetskih sistema. Analiza prelaznih procesa, proračun elektromagnetnog polja i numeričke simulacije predstavljaju uže oblasti interesovanja prof. Miria. Član je radne grupe CIGRE 23-11.



Goran Mitrić je rođen 27.03.1977. godine u Sarajevu, gde je završio osnovnu školu. Srednju elektrotehničku školu i elektrotehnički fakultet je završio u Beogradu. Od 2001. godine je zaposlen na poslovima projektovanja i planiranja elektroenergetskih mreža u Urbanističkom zavodu Banja Luke.

Poslediplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu - smer Elektroenergetske mreže i sistemi, upisao 2001. godine. Trenutno radi na izradi magistarske teze pod nazivom „Analiza elektromagnetnih prelaznih procesa u SF₆ postrojenjima”.

Desimir Trijić,
Gojko Dotlić i Božidar Renner

Podešavanje rezistivnog dosega numeričkih distantnih zaštita

Stručni rad
UDK: 621.316.9; 681.584

Rezime:

Distantni releji novije generacije imaju nezavisno podešavanje dosega pojedinih stepena u rezistivnom smeru. Postojeća praksa dozvoljavala je maksimalno podešavanje ovog dosega sa jednim ograničenjem da se ne uđe u zonu pogonske impedanse. Rad daje rezultate laboratorijskih ispitivanja više tipova distantnih releja sa ciljem da se utvrdi u kojoj meri podešeni doseg po R-osi, koji višestruko prelazi podešavanje po X-osi, utiče na tačnost releja. Na osnovu sprovedenih ispitivanja potrebno je korigovati postojeću praksu podešavanja dosega u rezistivnom smeru za distantne releje novije generacije.

Ključne reči: *distantna numerička (mikroprocesorska) zaštita, rezistivni doseg distantne zaštite, otpor električnog luka*

Abstract:

NUMERIC DISTANCE PROTECTION RESISTIVE RANGE ADJUSTMENT

Setting of the reach in resistive direction for Distance protection terminals new generation is independent for each distance zone. Current practice allowed maximum adjustment of this reach, provided to avoid load impedance enchroachment of each zone. The paper gives the results of laboratory tests of several types of distance terminals with a purpose of determining influences on the relay accuracy, when the setting of the resistive reach (along R-axis) exceeds several times the setting of the reactance reach (along X-axis). Based on performed tests, it is necessary to correct the setting of the reach in resistive direction practice for new generation distance relays.

Key words: *distance numeric (microprocessor) protection, distance protection resistive range, electric arc resistance*

1. UVOD

Predmet ovoga referata je provera pouzdanosti i rada numeričkih (mikroprocesorskih) zaštita u odnosu na vrednost podešenja rezistivnog dosega. U podešenjima, rezistivni doseg se definiše i kao otpor luka (R_{arc}). U svojim tehničkim uputstvima, proizvođači daju preporuke i primere u kojim granicama

se kreću podešenja za otpore luka. Preporuke se razlikuju zavisno od proizvođača, kao i za jednofazne i međufazne kvarove i obično se daju u odnosu R/X , gde je X impedantno podešenje date zone.

U radu je ispitivano u kojim se granicama mogu podešavati odnosi R/X i preko preporučene vrednosti. Ovo pitanje ima opravdanost za slučaj kratkih vodova, kada se mogu javiti otpori luka koji su i po

Desimir Trijić, dipl. ing., mr Gojko Dotlić, dipl. ing., Božidar Renner, dipl. ing.
– „EPS” JP „Elektroistok”, 11000 Beograd, Kneza Miloša 11

nekoliko puta veći od impedantne podešenosti zone (R/X 5,10 i veći).

Za referentno podešavanje distantnih zona uzet je 400 kV vod dužine 5 km. Tipične sekundarne vrednosti parametara tog voda iznose:

$$\begin{aligned} Z_I &= R_I + jX_I = 0,0588 + j0,682 \Omega \\ Z_0 &= R_0 + jX_0 = 0,567 + j1,867 \end{aligned} \quad (1)$$

pri čemu su pretpostavljeni prenosni odnosi strujnih transformatora 1 600, a naponskih 4 000.

Testovi su rađeni samo za I distantnu zonu, i to samo za jednofazne kvarove. Ostale zone u testiranim zaštitama su isključene. Ovo je izabrano zbog jedostavnije analize i poređenja rezultata, kao i zbog eliminisanja uticaja drugih zona. Tipično podešenje reaktanse I stepena je:

$$\begin{aligned} X_I' &= 0,85X_I = 0,5797 \Omega \\ X_0' &= 0,85X_0 = 1,587 \Omega \end{aligned} \quad (2)$$

Rezistivni doseg u testovima se podešavao od preporučene maksimalne vrednosti proizvođača pa do dvosturuke ili trostruke vrednosti u definisanim koracima.

2. UZORCI DISTANTNIH ZAŠTITA

Ispitivane su sledeće distantne zaštite: REL 521 v2.0, MiCOM 442 A3.2 i 7SA513 v3.2. Proizvođači ovih releja daju različite preporuke za podešenje dosega po R -osi.

REL 521 [1]:

Podešavanje je nezavisno za svaku zonu. Postoje dva uslova za podešavanje R_{IE} (otpor luka za jednofazne kvarove) i R_{FPP} (otpor luka za međufazne kvarove) kod I stepena, i to:

$$\text{I uslov: } R_{PE}^I \leq 4,5X_{PE}^I \quad (3)$$

$$\text{II uslov: } R_{PE}^I \leq 0,8 Z_{pog.min} \quad (4)$$

gde je:

X_{PE}^I - induktivno podešenje I stepena,

$Z_{pog.min}$ - minimalna pogonska impedansa.

Podešeni otpor luka po ovoj preporuci ne sme da pređe nijedan od uslova.

MiCOM 442 [2]:

Proizvođač ne daje određene uslove za podešavanje otpora luka. U preporuci se navodi Warringtonova formula, a na osnovu te formule za određene struje kvarova i naponske nivoe izračunavaju se otpori luka.

Za otpore luka kod jednofaznih kvarova ograničenje od minimalne pogonske impedanse:

$$R_{PE}^I \leq 0,8 Z_{pog.min} \quad (5)$$

Navodi se i da rezistivni doseg za svaku zonu ne bi trebalo da bude veći 10 puta od odgovarajuće impedanse petlje kvara. Preporuka proizvođača je da tipičan rezistivni doseg iznosi 40 Ω primarno.

7SA513 [3]:

Podešenje R vrednosti za svaku zonu bi trebalo da prelazi 6 puta vrednost podešenja X date zone:

$$R/X \leq 6 \quad (6)$$

Podešavanje otpora luka za jednofazne kvarove izračunava se po formuli:

$$R_{PE}^I = RI_{line} + R_{arc} + R_{tower} \quad (7)$$

gde je:

RI_{line} - aktivna otpornost voda,

R_{arc} - otpor luka,

R_{tower} - otpornost stuba koja prema uputstvu [3] za 220 kV vod iznosi 25 Ω primarno.

3. PODEŠAVANJE DOSEGA U REZISTIVNOM SMERU PREMA POSTOJEĆOJ PRAKSI [4]

Kod distantnih zaštita sa kvadrilateralnom karakteristikom, podešavanje dosega u rezistivnom smeru moguće je na sledeće načine:

- nezavisno od podešenja dosega stepena;
- zavisno od podešenja dosega I stepena (najčešće se podešava kao odnos R/X);
- zavisno od podešenja dosega svakog stepena, tj. podešava se odnos R/X_i (gde je: $i = I, II, III$).

Otpor električnog luka zavisi od veličine struje luka i menja se u vremenu, jer dolazi do širenja luka. S druge strane prelazni otpor uzemljenja stuba zavisi od vrste tla i od toga koliko je oštećeno (skinuto) zaštitno uže na vodu. Iz tih razloga, podešenje dosega u rezistivnom smeru ne bazira se na otporu električnog luka i prelaznom otporu stuba, već treba uzeti maksimalnu vrednost koju dozvoljava pobuda distantnih zaštita nadzemnih vodova, tj:

- za distantne zaštite koje nemaju podimpedantnu pobudu

$$R_{max} = 0,6Re\{Z_{pog.min}\} \quad (8)$$

- za distantne zaštite koje imaju podimpedantnu pobudu

$$R_{max} = \{Z_{pog.min}\} \quad (9)$$

gde je:

- $Z_{pog,min}$ - minimalna pogonska impedansa,
- Z_{pob} - maksimalna pobudna vrednost,
- $Re\{Z\}$ - realna komponenta kompleksne vrednosti ($Z = R + jX$) u impedantnoj ravni.

U nedostatku tačnih podataka mogu se usvojiti podešenja doseg u rezistivnom smeru (primarne vrednosti) prema tabeli 1. Kao što se vidi, postojeća praksa je dozvoljavala da se doseg u rezistivnom smeru kod numeričkih distantnih zaštita 400 kV vodova, koje pripadaju kategoriji višesistemskih zaštita, podešava na vrednost: $R_{PE}^I = 23,96 \Omega$ (sekundarna vrednost). To u odnosu na podešenja reaktanse u posmatranom primeru iznosi čak: $R_{PE}^I/X_{PE}^I = 23,96/0,58 = 41$ puta.

Tabela 1.

Podešenja doseg u rezistivnom smeru

Napon mreže U_n	$Z_{pog,min}$	(U-I) pobuda: $R_{max}=0,6Re\{Z_{pog,min}\}$	(Z<) pobuda*): $R_{max} = Re\{Z_{pob}\}$
110 kV	56,7 Ω	34,02 Ω	
220 kV	72,9 Ω	43,74 Ω	65,9 Ω
400 kV	66,3 Ω	39,78 Ω	59,9 Ω

LEGENDA: *) Višesistemске distantne zaštite, sa zaštitom od preopterećenja.

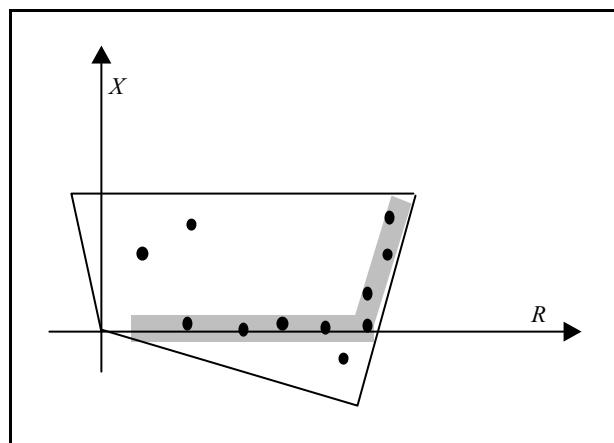
4. NAČINI TESTIRANJA

Testiranje zaštita je vršeno ispitnim uređajem *FREJA 300* i pripadajućim programskim paketom *FREJA WIN 3.0*. U ovom programskom paketu korišćen je program *DISTANCE* koji je namenjen za testiranje distantnih zaštita. *DISTANCE* sadrži nekoliko testova: *RX ramp* (ispitivanje granica kvadrilateralne karakteristike u *RX* dijagramu), *RX* (merenje vremena isključenja proizvoljne tačke u *RX* dijagramu), Z_t snimanje stepenaste karakteristike Z u funkciji vremena), *PSB* (provera blokade od nihanja snage). U radu su korišćeni *RX ramp* i *RX* testovi. Mrežni model je 3PZSTD2A, a ostala podešenja su na osnovu RIO* fajla datog releja. Težište provere je bilo da li zaštite ispravno proraduju za kvarove unutar I zone i da li postoji skraćenje u rezistivnom smeru.

Na slici 1 je prikazana jedna kvadrilateralna karakteristika u *RX* dijagramu. U oblasti koja je šrafi-

¹⁾ RIO Relay Interface by Omicron

rana, zadavane su tačke nasumice i mereno vreme isključenja. Oblast oko R ose je izabrana, zato da se proveri vreme reagovanja kada je mala vrednost X a velika R (simulacija bliskih kvarova sa velikim rezistivnim otporom). Oblast oko desne granične linije je izabrana da se proveri reagovanje zaštite kada R ima vrednost blisku podešenju, a X menjamo od manje ka većoj vrednosti. Ostale tačke su uzete kao kontrolne. Po testu je uzimano 10 do 15 tačaka, na osnovu gore opisanih uslova. Svaki test je ponovljen četiri do pet puta za isti skup tačaka. Na slikama 6, 7, 8, 9 prikazani su testovi ispitivanih zaštita u formi *Freja Report* za $R/X=10$.



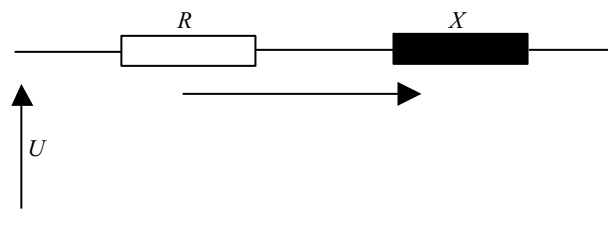
Slika 1. Kvadrilateralna karakteristika u *RX* dijagramu

5. REZULTATI ISPITIVANJA

REL 521:

Distantna zaštita je izabrana za sledeće odnose R/X : 3; 4,5; 8; 10; 15. Preporuka proizvođača daje $R_{PE}^I \leq 4,5 X_{PE}^I$, pa je $R/X=3$ uzeta kao kontrolna tačka.

Algoritam distantne zaštite radi po sledećem principu: Analogne vrednosti se sa ulaznih transformatora vode u AD konvertore. Binarni niz iz AD konvertora se dovodi u rekurzivni Fourier filter. Filter daje dve ortogonalne vrednosti (imaginarni i realni deo):



Slika 2. Zamenska šema za impedantni model

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\bar{U}) &= R \operatorname{Re}(I) + X \operatorname{Re}(I) \\ &= w_o t \quad (10) \\ \operatorname{Im}(\bar{U}) &= R \operatorname{Im}(I) + X \operatorname{Im}(I) \\ &= w_o t \end{aligned}$$

gde je $w_o = 2\pi f_{50\text{Hz}}$. Na osnovu realnih i imaginarnih vrednosti, algoritam meri impedansu:

Merena vrednost se upoređuje sa podešenim vrednostima i na osnovu trip logike generiše se isključenje.

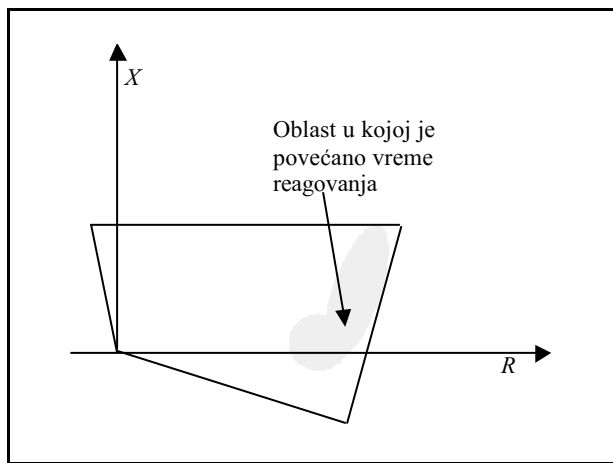
$$\begin{aligned} R_{\text{mereno}} &= \frac{\operatorname{Im}(\bar{U}) \operatorname{Re}(I) - \operatorname{Re}(\bar{U}) \operatorname{Im}(I)}{\operatorname{Re}(\bar{U}) \operatorname{Re}(I) + \operatorname{Im}(\bar{U}) \operatorname{Im}(I)} \\ X_{\text{mereno}} &= \frac{\operatorname{Im}(\bar{U}) \operatorname{Im}(I) + \operatorname{Re}(\bar{U}) \operatorname{Re}(I)}{\operatorname{Re}(\bar{U}) \operatorname{Re}(I) + \operatorname{Im}(\bar{U}) \operatorname{Im}(I)} \end{aligned} \quad (11)$$

U testu je utvrđeno da za $R/X \geq 4,5$ u nekim tačkama rele ne daje isključenje. Takođe za neke tačke u testu dobijano je isključenje > 100 ms, pa čak i preko 500 ms. Minimalna vremena se kreću oko 40 ms. Rezultati testa su prikazani u tabeli 3.

Napomena:

Kompletni ispitni izveštaji za testove nisu uključeni u tabeli 3, zbog ograničenog prostora u referatu. Tako, na primer, za test $R/X = 10$ urađeno je 96 tačaka, od kojih za 10 nije bilo isključenja. Za izabrani skup tačaka testovi su ponavljani tri i više puta. Dešavalo se da se za iste tačke u kojima je u jednom testu bilo isključenje u ponovljenom se ne dobije. Takođe za isti odnos R/X urađena je i provera na u RX Ramp testu. Po zadanim rampama rele je davao isključenja u granicama tolerancije (slika 6).

Analiziranjem rezultata može se zaključiti da rele ima povećano vreme reagovanja za kvarove koji se nalaze unutar zone koja je označena na slici 3.



Slika 3. Kvadrilateralna karakteristika REL 521 sa prikazom oblasti u kojoj je povećano vreme reagovanja

U istoj zoni su zadavane tačke u kojima nije bilo isključenja. Od tehničke podrške ABB-a (support line) dobijen je odgovor da sve distantne zaštite koje mere na osnovu formule

$$\begin{aligned} Z_m &= \frac{U_f}{I_f} - \frac{3I_0 k_n}{Z_c} \\ &= \frac{U_f}{I_f} - \frac{3Z_l}{k_n} \end{aligned} \quad (12)$$

gde je:

- Z_m - merena impedansa,
- U_f - fazni naponi,
- I_f - fazna struja,
- I_0 - struja nultnog redosleda,
- Z_l i Z_0 - impedansa direktnog i nultnog redosleda,
- k_n - koeficijent zemljospoja, za veliki odnos R/X imaju grešku u tačnosti zbog struje opterećenja.

Ukoliko je poznata struja opterećenja i na osnovu gore navedene formule se utvrdi da se doseg suviše ne ugrožava, može se koristiti i R/X veće od preporuke. Za kratke vodove preporučuje se ubrzanje drugog stepena, a podešenje R/X prvog stepena da se smanji. Za velike otpore zemljospoja predlaže se TEF *Time Earth Fault* (zemljospojna zaštita).

MiCOM 442:

Distantni algoritam ove zaštite je baziran na dva paralna algoritma:

- delta (high speed) algoritam koji koristi metod superpozicije (struja i napona pre kvara i pri kvaru). Ovaj algoritam se koristi za faznu selekciju i određivanje smera kvara. Merenje distance računa algoritam za merenje.
- konvencionalni algoritam koji meri impedansu u toku kvara. Merenje distance računa algoritam za merenje.

Delta algoritam ima prioritet u odnosu na konvencionalni. Konvencionalni algoritam dobija prednost samo ako delta algoritam ne odredi kvar u toku dva ciklusa od njegove detekcije. Delta algoritam upoređuje semplove (odbirke) struja i napona, tako da na osnovu odbiraka N i $N-1$, izračunava odbirak $N+1$. Ukoliko je $N+1$ odbirak veći od računatog za podešenu toleranciju startuje se delta algoritam.

Algoritam za merenje na osnovu polaznog sistema jednačina (matrica 3×3) korišćenjem Gauss-Seidel-ovog metoda određuje rezistansu i distancu prema jednačinama:

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{S(V_f - I_f)}{S(I_f)} \\ D_n &= \frac{S(V_f - I_f) - R_n S(I_f)}{S(Z_l - I_f)} \end{aligned} \quad (13)$$

gde je: I_f struja kvara, I struja merena u releju, V_f fazni napon meren u releju, Z_l impedansa voda (Ω /fazi), D_n mesto kvara u km od releja, R_n rezistancija kvara.

Impedantni model za jednofazne kvarove koristi sledeću formulu.

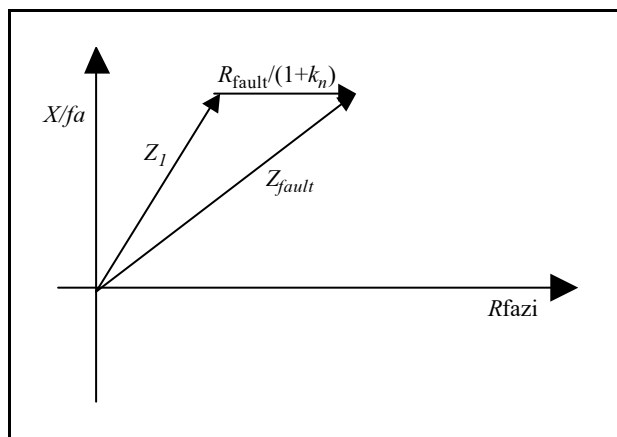
$$V_N = Z_0 (I_0 + k_n 3I_0) + R_f I_f \quad (14)$$

$$\alpha = A, B, C$$

Prvih 40 ms I_f se modeluje kao $3I_0$, a posle sa I_a .

Test je urađen za sledeće slučajeve: $R/X = 10, 15, 20$. U tehničkim preporukama navodi se i da rezistivni doseg za svaku zonu ne bi trebalo da bude veći od 10 puta odgovarajuće impedanse petlje kvara. Zato je $R/X = 10$ uzet kao početni test.

Na osnovu rezultata tabela 3 može se videti da su sva isključenja ostvarena od 33 ms pa do 40 ms. Ni u jednoj tački testa nije zapaženo da se ne dobije isključenje ili da vreme isključenja zalazi u drugi ili treći stepen. Veća vremena isključenja su za veće vrednosti R . Treba napomenuti da isključenja nisu dobijana u delu karakteristike za negativne vrednosti reaktanse.



Slika 4. Vektorski dijagram jednofaznog kvara za MiCOM 442

U tehničkom upustu *MiCOM P441 & P442 Test With Omicron CMC*, za testiranja releja u II i III kvadrantu, potrebno je da se struja kvara startuje sa nultim faznim pomerajem. Ovo se može ostvariti korišćenjem dc-offset komponente. Dati metod je opisan za Omicronove uređaje. Postojećom opremom nisu mogli da se generišu dati uslovi da bi se testovi sprovedeli za kvarove u II i III kvadrantu (REL 521 je u tim kvadrantima imao isključenja, ali ti rezultati nisu razmatrani zbog nemogućnosti poređenja sa ostalim zaštitama).

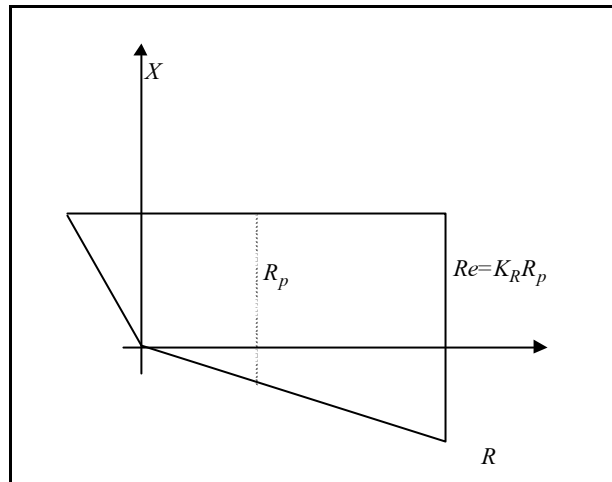
7SA513:

Impedansu jednofaznih kvarova rele 7SA513 računa po sledećoj formuli:

$$Z_{mereno} = \frac{U}{I} = Z + \frac{I_e}{I} \quad (15)$$

gde je: $Z_n = Z_0 + 3Z_1$ impedansa povratnog voda.

Zamenom $I_e = 3I_0$ i $k_n = Z_n/3Z_1$ u (15) dobija se ista formula (12) za REL 521.



Slika 5. Tipična kvadrilateralna karakteristika za 7SA513

K_R definiše tačku u kojoj je presek sa R osom prema formuli:

$$Re = K_R R_p \quad (16)$$

gde je:

$$K_k = I \frac{R_n}{R_1} \quad (17)$$

Tabela 2.

Skraćenja dosega u rezistivnom smeru

R/X	$R_{rač} = K_r R_p$ (Ω)	R_{mereno} (Ω)	$\Delta =$ $R_{rač} - R_{mer}$	Δ (%)	
3	3,588	3,580	0,008	0,20	
6	5,320	5,274	0,046	0,80	
8	9,220	9,375	0,150	1,62	
		9,375			
		9,375			
10	10,700	10,60	0,200	1,86	
		11,00			
		10,90			
12	14,000	10,32	3,130	22,35	
		10,93			
		11,36			
15	17,700	10,49	10,45	7,210	40,70

Tabela 3.

Tabelarni prikaz rezultata testova

Relej	Test R/X	Broj tačaka po testu	Tačke u kojima nije bilo isključenje		Tačke sa isključenjem u II i III zoni ²⁾			Minimalno vreme isključenja		Maksimalno vreme isključenja	
				Z (R+jX)		Z (R+jX)	Z (R+jX)	ms	Z (R+jX)	ms	Z (R+jX)
REL 521	3	27		-	-	-	-	37	0,75+j0,04	100	1,84+j0,81
	4,5	36		-	1	2,6+j0,33 (345 ms)	-	37	1,76+j0,08	167 345	2,7+j0,85 2,6+j0,33
	8	46	1	4,58+j0,4	2	4,7+j0,78 (297 ms)	4,51+j0,85 (619 ms)	41	0,7+j0,1	297 619	4,7+j0,78 4,51+j0,85
	10	43	6	5,7+j0,2 5,6-j0,12 5,76+j0,22 5,8+j0,58 5,7+j0,24 5,76+j0,21	-	-	-	43	1,6+j0,16	137	5,6+j0,12
	15	30	3	8,514+j0,2 8,514+j0,51 8,34-j0,085	-	-	-	37	2,6-j0,085	74	4,68+j0,88
MiCOM 442	10	42	-	-	-	-	-	35	0,97+j0,10	40	3,5+j0,09 3,58+j0,185 3,21+j0,057 3,56+j0,096 3,552+j0,192 3,504+j0,192 3,583+j0,185 3,442+j0,098 3,6+j0,204
	15	24	-	-	-	-	-	33	0,48+j0,102	40	3,02+j0,10 5,4+j0,102 3,01+j0,531 5,4+j0,27
	20	22	-	-	-	-	-	27	0,411+j0,160	40	6,24+j0,137 7,17+j0,251
7SA513	3	29	-	-	-	-	-	14	0,785+j0,071	25 27	2,871+j0,042 1,94-j0,042
	6	36	-	-	-	-	-	14	3,24+j0,274 0,685+j0,12	25 26	5,211+j0,12 5,057+j0,068 5,211+j0,274
	10	34	-	-	-	-	-	13 14	0,309+j0,078 3,52+j0,040	40	10,36+j0 7,971+j0,102 7,971+j0,308
	15	41	-	-	-	-	-	14	3,394+j0,068	40	10,28+j0,102 10,28+j0,274

²⁾ Za 400 kV mrežu isključenje u drugoj zoni je 250 ms, a u trećoj 500 ms.

U konkretnom slučaju K_R prilagođeno za uređaj FREJA 300 iznosi 2,01.

Rezultati testova dati u tabeli 2 Tehnička preporuka daje da odnos $R/X \leq 6$. Testovi su vršeni za sledeće $R/X = 3; 6; 8; 10; 12; 15$.

Za $R/X < 6$ isključenja su u intervalu od 14 ms do 26 ms. Veća vremena isključenja su za veće vrednosti R . Primećeno je da za $R/X > 8$ dolazi do skraćivanja doseg u odnosu po R -u, i vremena isključenja su veća do 40 ms. Skraćivanje doseg je prikazano u tabeli 2. Vidi se da sa povećanjem R/X preko 8 dolazi do skraćivanja doseg R . Sa većim R/X veće je i odstupanje. Za $R/X = 10; 12; 15$ maksimalni doseg je oko $10,8 \Omega$.

6. ZAKLJUČCI

Podšavanje odnosa R/X većeg od preporučeneog različito se manifestuje kod ispitivanih zaštita. Zajedničko za sve zaštite je da za kvarove gde je veće R vreme isključenja se povećava. Za MiCOM 442 ovo povećanje je neznatno i sva isključenja su grupisana u rasponu od 35 ms - 40 ms. Releji 7SA513 daju isključenja od 14 ms pa do 25 ms (40 ms za $R/X > 10$), dok za veće R/X javlja se skraćivanje doseg po R

(za $R/X = 10$ skraćivanje je 2%; dok za $R/X = 12$ skraćivanje je čak 22,35%). REL 521 daje isključenja u veoma širokom rasponu od 38 ms, preko 250 ms, pa čak do 500 ms (tj. dobijaju se vremena isključenja II i III stepena distantne zaštite). Za $R/X \approx 4,5$ rele u nekim tačkama gde je R veliko ne daje isključenja.

Postojeću praksu podešavanja doseg distantnih zaštita u rezistivnom smeru treba preispitati, jer kako rezultati ispitivanja pokazuju, veliki odnosi R/X mogu uzrokovati neselektivni rad i zatajivanja distantnih zaštita.

7. LITERATURA

- [1] SETTING OF THE REACH OF RESISTIVE DIRECTION APPLICATION MANUAL REL 521
- [2] Resistive Reach Calculation 2.4.5 TECHNICAL GUIDE DISTANCE PROTECTION Relays MiCOM 442
- [3] Resistive settings; NUMERICAL DISTANCE PROTECTION FOR EHV SYSTEMS 7SA513 V3.2
- [4] TU-ZA-03/01: TEHNIČKO UPUSTVO ZA PODEŠAVANJE ZAŠTITA VISOKONAPONSKIH VOĐOVA, Elektroistok, Beograd, Jun 1996

Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Desimir Trijić je rođen 28. 03. 1975. u Ljuboviji, Srbija. Osnovnu školu i gimnaziju završio u Ljuboviji. Diplomirao maja 2000. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer energetski pretvarači i pogoni. Od 2001. godine upisan na postdiplomske studije na istom fakultetu. Prvo zaposlenje u DP „Isel“ Beograd. U JP „Elektroistok“ zaposlen od avgusta 2002. godine u Sektoru Tehnika, Odeljenju relejne zaštite, na poslovima inženjera ispitivača. Od značajnih poslova radio na ispitivanjima i prvom puštanju u rad modernih mikroprocesorskih zaštita: u TS „TENT A“, zaštita transformatora 400 MVA, zaštita vodova 400 kV i 220 kV; u TS „Jablanica“, 110/35 kV 31,5 MVA, zaštita transformatora; redovna godišnja ispitivanja zaštite generatora u HE „Bajina Bašta“, TE „Morava“.



Gojko Dotlić je rođen 1949. godine. Diplomirao je 1973. godine na Elektrotehničkom Fakultetu - Elektroenergetski odeljenje na Univerzitetu u Beogradu. Na istom fakultetu je magistrirao 1989. godine na smeru Elektroenergetski sistemi. Radni vek je započeo 1974. godine u preduzeću MAŠINOPROJEKT - Beograd, gde je radio na projektovanju industrijskih elektroenergetskih postrojenja i elektromotornih pogona. Stručni ispit iz elektrotehnike položio je 1984. godine. U elektroprivredi Srbije, odnosno javnom preduzeću za prenos električne energije ELEKTROISTOK - Beograd zaposlio se 1978. godine. Od tada se pretežno bavi poslovima lokalne automatike i relejne zaštite u elektroenergetskim postrojenjima. Trenutno se nalazi na radnom mestu direktora Sektora TEHNIKA u Elektroistoku.

U periodu od 1997. do 2001. godine, kao priznati stručnjak je više puta bio angažovan od domaćih i inostranih kompanija na izgradnji elektroenergetskih postrojenja i mreža u inostranstvu (Katara, Oman).

Višegodišnji je član Studijskog komiteta br. 34 - Zaštita, JUKO CIGRE. Objavio je preko 20 referata na domaćim i inostranim simpozijumima. Autor je ili koautor više stručnih knjiga i priručnika. Radio je na izradi skoro svih preporuka i tehničkih uputstava iz oblasti relejne zaštite koje se koriste u elektroprivredi Srbije.

Od 1980. godine deo svojih aktivnosti posvetio je Savezu mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS). Sada je predsednik SMEITS-a, predsednik Komisije za polaganje stručnih ispita u oblasti elektrotehnike - Elektroenergetski smer i ispitivač u Komisiji za tehničko rukovođenje gasovodnim sistemom i rukovanje i održavanje gasnih uređaja, postrojenja i instalacija. Za dostignuća u oblasti procesne tehnike za 2001. godinu dobio je Povelju „Procesne tehnike“.



Božidar Rener je rođen 1942. godine. Gimnaziju je završio u Negotinu. Diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1969. godine. U Elektrotimoku (Zaječar) radio 4 godine. Potom 8 godina radio u pogonu Elektroistoka u Boru, u Odeljenu relejne zaštite, a potom na mestu glavnog inženjera pogona Bor. U Beograd došao 1982. godine u OOUR Ispitivanje na mesto vodećeg inženjera za ispitivanje relejne zaštite. Sada radi na mestu rukovodioca Službe za relejnu zaštitu. Aktivno učestvuje na izradi koncepcija zaštite skoro svih objekata EPS, kao i na izradi skoro svih preporuka i tehničkih uputstava iz oblasti relejne zaštite koje se koriste u elektroprivredi Srbije.

Miloš Stojić,
Goran Jakupović, Jasmina Trhulj i Ninel Čukalevski

Integracija paketa za određivanje topologije i estimaciju stanja u okviru real-time SCADA/EMS sistema

Stručni rad
UDK: 621.31; 621.39

Rezime:

U radu će se ukratko opisati organizacija i funkcije programskih paketa za određivanje topologije (NT) i estimaciju stanja (SE) elektroenergetskih sistema, kao i način njihove integracije u okviru SCADA/EMS sistema koji se realizuje od strane saradnika Instituta „Mihajlo Pupin”, kao deo projekta realizacije mrežnih aplikacija fleksibilnog nadzorno-upravljačkog SCADA/EMS/DMS sistema prenosnih i distributivnih elektroenergetskih sistema. Opisat će se specifičnosti strukture ovog savremenog SCADA/EMS/DMS sistema, čija arhitektura omogućava aplikacijama jednostavan prelaz iz režima rada u realnom vremenu u studijski mod i obratno. Predviđeno je da NT/SE programski paket podržava multiplatformski rad, odnosno predviđene su verzije i za Windows NT/2000/XP i za Linux (UNIX) platformu. U radu će biti predstavljene, kako arhitektura celokupnog sistema i osnove algoritamskog rešenja, tako i opis softverske implementacije paketa za određivanje topologije i estimaciju stanja. Posebno će biti ukazano na značaj ovog paketa u upravljanju elektroenergetskim sistemima i prednosti ovakvog rešenja.

Ključne reči: SCADA, EMS, topologija, estimacija stanja elektroenergetskog sistema

Abstract:

INTEGRATION OF NT/SE PACKAGE WITHIN THE REAL-TIME SCADA/EMS SYSTEM

The paper briefly describes the organization and functions of program packages for determination of topology and state estimation of the electric power system, as well as the means of their integration into the SCADA/EMS system, which is realized by the associates of the „Mihajlo Pupin” Institute, as part of the network application of the flexible supervisory control SCADA/EMS/DMS system of transmission and distribution electric power system project. The specific structure of this contemporary SCADA/EMS/DMS system will be described, the architecture of which enables a simple transfer of applications from the real-time operation regime into the studio mode and vice versa. It is foreseen that the program package for determination of topology and state estimation supports multi-platform operation, namely versions are foreseen for Windows NT/2000/XP and for Linux (UNIX) platform. The paper will present both the architecture of the whole system and the algorithm solution bases, as well as the description of software implementation package. Particular importance will be given to application of this package in electric power system management and the benefits of such solution.

Key words: SCADA, EMS, topology, state estimation of the electric power system

Miloš Stojić, dipl. ing, mr Goran Jakupović, dipl. ing, Jasmina Trhulj, dipl. ing, dr Ninel Čukalevski dipl. ing –
Institut „Mihajlo Pupin”, 11 000 Beograd, Volgina 15

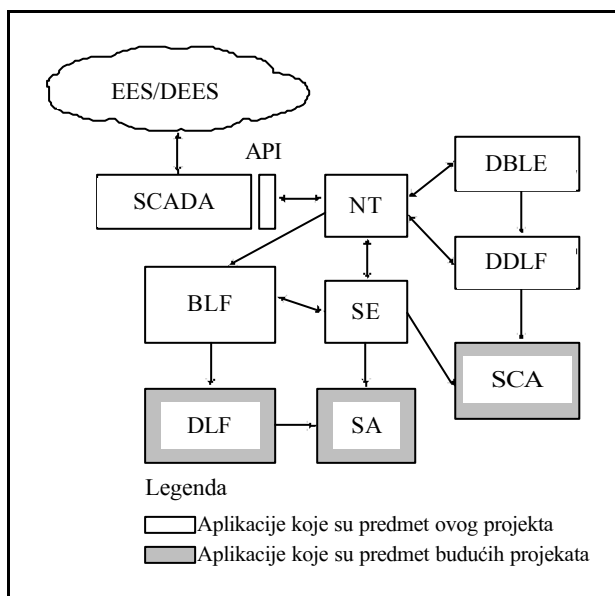
1. UVOD

Primena savremenih sistema upravljanja, kao i uvođenje informacionih tehnologija na svim nivoima upravljanja elektroenergetskim sistemima je od ogromnog značaja. Njihovom implementacijom, rad i upravljanje elektroenergetskih sistema se može učiniti znatno efikasnijim i racionalnijim, što omogućava da elektroenergetske kompanije uz niže cene omoguće znatno bolji kvalitet usluge potrošačima. Ove prednosti naročito dobijaju na značaju u uslovima deregulisanog elektroenergetskog sektora i uspostavljanja tržišta energije. U skladu sa ovim potrebama savremenih EES, koristeći dosadašnje rezultate u domenu SCADA/EMS sistema, u Institutu „Mihajlo Pupin” je projektovana bazna platforma fleksibilnog SCADA/EMS/DMS nadzorno-upravljačkog sistema upravljanja prenosnim i distributivnim mrežama. Primenljivost predložene platforme je velika i kreće se od dispečerskih centara (na različitim hijerarhijskim nivoima) proizvodno-prenosnih sistema do dispečerskih centara distributivnih EES.

U radu se ukratko opisuju organizacija i funkcije predloženog SCADA/EMS/DMS sistema, zatim detaljna arhitektura softvera SCADA/EMS dela sistema, kao i način njegove softverske implementacije (posebno SCADA API-ja), uz poseban osvrt na prednosti ovakve realizacije.

2. SCADA/EMS/DMS SISTEM

Arhitektura SCADA/EMS/DMS sistema za nadzor i upravljanje prenosnim i distributivnim mre-



Slika 1. Arhitektura predloženog nadzorno-upravljačkog sistema EES/DEES

žama, detaljnije opisana u [1], prikazana je na slici 1. Specifičnost ovog savremenog sistema ogleda se u njegovoj konfigurabilnosti u pogledu funkcionalnosti, pri čemu se u zavisnosti od zahteva konkretnih centara upravljanja dati sistem može konfigurirati u bazni SCADA/EMS ili SCADA/DMS sistem.

Predloženi sistem upravljanja se sastoji od sledećih osnovnih funkcionalnih celina:

SCADA: Paket za daljinski nadzor i upravljanje

SCADA sistemi za nadzor i upravljanje predstavljaju distribuiranu mrežu računara, koji u određenim vremenskim intervalima vrše prikupljanje podataka iz sistema, prezentaciju podataka korisniku i na osnovu prikupljenih podataka analizu rada postrojenja i izdavanje upravljačkih akcija.

API: Aplikacioni programski interfejs SCADA paketa

Aplikativni programski interfejs SCADA sistema definiše način na koji spoljne softverske aplikacije pristupaju akviziranim merenjima i drugim funkcijama SCADA sistema.

NT: Programski paket za određivanje topologije EES

Programski paket NT implementira funkciju određivanja topologije EES/DEES mreže i generiše model sistema u obliku čvorovi-grane, za potrebe svih ostalih mrežnih aplikacija.

SE: Programski paket za estimaciju statičkih stanja EES

Funkcija programskog paketa za estimaciju stanja EES je da na bazi redundantnog skupa merenja odredi module i fazne uglove napona u svim čvorovima mreže.

BLF: Prognoza opterećenja čvorova EES

Program vrši procenu aktivnih i reaktivnih snaga injektiranja u svim čvorovima EES, koje se zatim koriste u programima za estimaciju stanja i proračun tokova snaga EES.

DBLE: Procena opterećenja čvorova DEES

Zbog manje pokrivenosti telemetrisanim merenjima distributivnih mreža koristi se poseban program za ocenu opterećenja čvorova distributivne mreže (uglavnom na srednjem naponu).

DLF: Dispečerski proračun tokova snaga EES

Program vrši proračun modula i faznih uglova napona, tokova aktivnih i reaktivnih snaga i drugih promenljivih od značaja u prenosnim mrežama, za pretpostavljene uslove rada.

DDLF: Distributivni dispečerski proračun tokova snaga DEES

Program vrši proračun modula i faznih uglova napona, tokova aktivnih i reaktivnih snaga i drugih promenljivih od značaja u distributivnim mrežama, pri čemu distributivna mreža može biti slaboupegljana ili bez zatvorenih petlji.

SCA: Proračun kratkih spojeva EES/DEES

Program proračunava režim u kome se nalazi mreža u slučaju pojave kvara bilo u distributivnim ili prenosnim mrežama.

SA: Analiza sigurnosti

Program za analizu sigurnosti ocenjuje sigurnost sistema u slučaju pojave poremećaja sa liste poremećaja. Za svaki specificirani poremećaj vrši se proračun tokova snaga i proverava da li su neke granične vrednosti narušene.

3. ARHITEKTURA SCADA/EMS SISTEMA

Studijske verzije programskih paketa za određivanje topologije i formiranje modela EES (NT) i statičku estimaciju stanja (SE) pod ovom platformom su ranije razvijene i testirane u Institutu „Mihajlo Pupin” [2]. Kako su ove verzije programskih paketa namenjene radu u off-line režimu, bez neposredne veze sa SCADA-om, predviđeno je prilagođavanje ovih paketa radu u realnom vremenu. S obzirom na to da se prilikom razvijanja studijskih verzija ovih programskih paketa vodilo računa o mogućoj kasnijoj integraciji sa SCADA-om, ovi paketi su realizovani u programskom jeziku C++, primenom objektno-orijentisanih tehnologija, čime je postignuta veća fleksibilnost aplikacija, njihovo jednostavnije održavanje, kao i, u skladu sa budućim potrebama, lakše usavršavanje i proširivanje njihove funkcionalnosti. Na taj način je omogućeno jednostavno prilagođavanje ovih paketa radu u real-time režimu, kao i njihova primena na drugim hardversko-sofverskim platformama. Objektno-orijentisan pristup, pre svega primenjen u realizaciji funkcija za rad sa retkim matricama omogućava jednostavnu ponovnu upotrebu razvijenih funkcija.

Pored prilagođavanja postojećih NT i SE programskih paketa radu u realnom vremenu i njihove integracije sa SCADA sistemom, predviđen je i razvoj programskog paketa za prognozu opterećenja čvorova EES (BLF) koji vrši procenu aktivnih i reaktivnih injektiranih snaga u svim čvorovima električne mreže. Ova procena se vrši na osnovu podataka o aktuelnoj topologiji mreže dobijenih od NT-a, ukupnog opterećenja sistema dobijenog na osnovu merenja iz SCADA sistema ili na bazi njegove procene, i faktora učešća pojedinačnih potrošača u ukupnom opterećenju sistema dobijenih na osnovu estimiranih vrednosti injektiranih aktivnih i reaktivnih snaga dobijenih od SE paketa. Procenjene vrednosti opterećenja čvorova dobijene iz BLF paketa se koriste zatim od strane programskog paketa za estimaciju stanja za određivanje vrednosti pseudo merenja pri restauraciji opsevnosti.

Arhitektura savremenog SCADA/EMS sistema projektovanog u IMP, čija je implementacija u toku, prikazana je na slici 2.

Prikazani SCADA/EMS sistem namenjen je, kako radu u realnom vremenu, tako i radu u studijskom režimu.

Statički podaci koji se koriste u toku izvršavanja elektroenergetskih aplikacija, razvijenih kao deo ovog EMS sistema, se ne menjaju automatski, već se izmene vrše samo na zahtev operatera, dok se svi dinamički ulazni podaci potrebni za izvršavanje ovih aplikacija grupišu u radnoj memoriji, u takozvani „Slučaj”. Pod Slučajem se podrazumeva skup svih ulaznih podataka koji potpuno definišu sistem koji se analizira. Svakom slučaju odgovara jedan ciklus proračuna. Pored ulaznih podataka u Slučaj se još grupišu i neki izlazni podaci koji su rezultat zahtevnijih proračuna. Tu se misli, pre svega, na vektor stanja nastao kao rezultat rada estimatora stanja ili programa za proračun tokova snaga. Podaci iz Slučaja se na zahtev operatera mogu smestiti u „Bazu sačuvanih slučajeva” tako da se kasnije mogu izvoditi studijske analize. S obzirom da većem broju sačuvanih slučajeva može odgovarati isti skup statičkih podataka, čuvanje statičkih podataka za svaki sačuvani slučaj pojedinačno se izbegava kreiranjem posebne baze statičkih podataka u koju se smeštaju samo različiti skupovi statičkih podataka koji odgovaraju sačuvanim slučajevima. Svaki sačuvani slučaj sadrži identifikacioni podatak koji ukazuje koji skup iz baze statičkih podataka je njemu odgovarajući. U slučaju kasnijih studijskih analiza, rezultati ranijih zahtevnijih proračuna su sačuvani čime se obezbeđuje dobar balans između efikasnosti i količine čuvanih podataka. Ovakvim konceptom se omogućava lak prelaz između režima rada u realnom vremenu i studijskog režima rada. Struktura izvršavanja programskih modula je slična u oba slučaja, jedina razlika je u načinu kako se formira slučaj. U režimu realnog vremena on nastaje na osnovu telemetrisanih merenja, dok se u studijskom režimu on jednostavno, poput fijke izvlači iz „Baze sačuvanih slučajeva” i smešta u Slučaj, kao osnova nad kojom se izvode mrežne aplikacije.

Za povezivanje Slučajeva sa statičkim podacima, smeštanje statičkih podataka i Slučajeva u bazu, kao i uzimanje Slučajeva i statičkih podataka iz baze za potrebe rada u studijskom režimu, koristi se Menadžer Slučajeva i statičkih podataka.

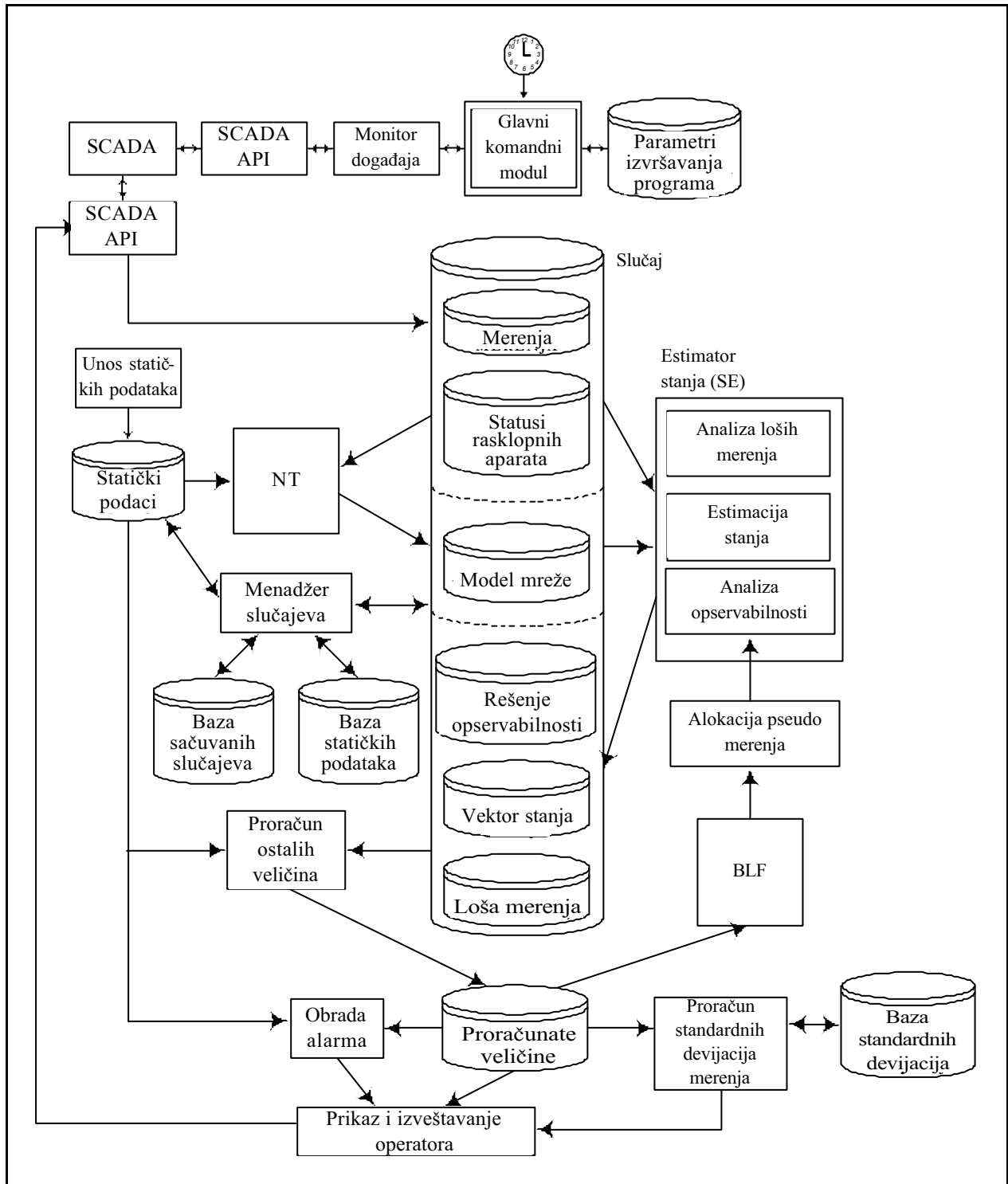
Svi statički podaci i sačuvani slučajevi se čuvaju u relacionoj bazi podataka. Interfejs od aplikacija prema ovim podacima je zasnovan na primeni ODBC interfejsa čime se postiže nezavisnost od konkretnog sistema za upravljanje bazom podataka (RDBMS). Kao pogodni RDBMS, kako u fazi razvoja i testiranja, tako i u implementacionoj fazi predviđeni su MySQL (verzije 3.23.xx i 4.xx) i Postgres RDBMS-ovi. Međutim, moguće je iskoristiti i bilo koji RDBMS za koji postoje odgovarajući ODBC drajveri.

Modul za proračun ostalih veličina služi da na osnovu vektora stanja izvrši proračun ostalih veličina od interesa.

Glavni komandni modul je funkcionalno povezan sa svim modulima, što nije eksplicitno prikazano na slici 2 kako se ne bi izgubilo na preglednosti

slike, i ima zadatak da upravlja tokom izvršavanja svih aplikacija. Programi se mogu izvršavati:

- ciklično u pravilnim vremenskim intervalima
- po određenom redosledu
- na zahtev operatera



Slika 2. Arhitektura SCADA/EMS sistema

- u slučaju pojave „događaja”, koji tipično predstavljaju promene stanja rasklopnih aparata i generišu se unutar SCADA sistema

Glavni komandni modul na osnovu baze parametara izvršavanja programa određuje redosled izvršavanja pojedinih modula i prosleđuje im specifične parametre za njihovo izvršavanje. Sistem inženjer tabelarno definiše redosled izvršavanja programa. Redosled je fiksiran, a na sistem inženjeru je da isključi ili uključi izvršavanje pojedinih modula poštujući određena ograničenja. Ograničenja postoje samo u režimu rada u realnom vremenu, dok u studijskom režimu nema ograničenja u pogledu redosleda izvršavanja.

U okviru SCADA sistema modul „Monitor događaja” detektuje pojavu događaja u sistemu koji mogu zahtevati pokretanje odgovarajuće akcije. Ukoliko je u glavnom komandnom modulu tako konfigurisana sekvenca izvršavanja programa, pojava događaja može suspendovati izvršavanje svih mrežnih aplikacija i pokrenuti novi ciklus proračuna.

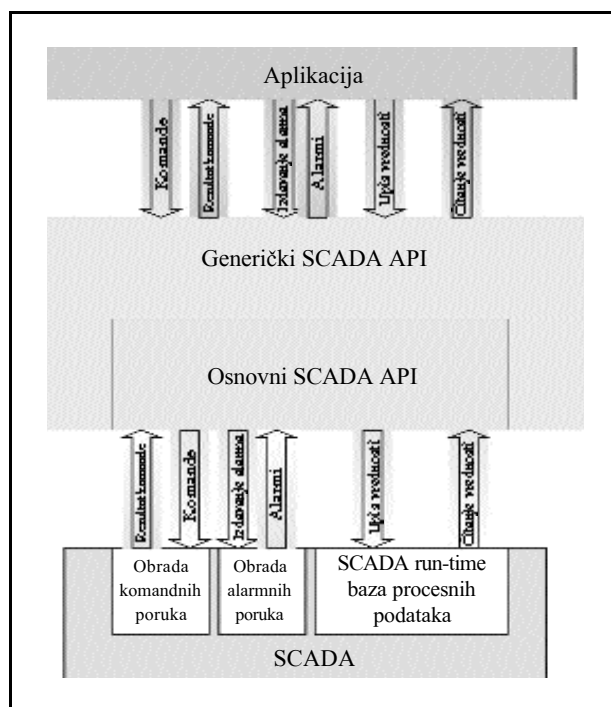
4. SOFTVERSKA IMPLEMENTACIJA

4.1. Aspekti integracije

Sistem za akviziciju podataka i nadzorno upravljanje, SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) predstavlja kombinaciju sistema telemetrije i daljinskog upravljanja, odnosno sastoji se od sistema za akviziciju podataka, sistema za prenos podataka do centralnog računara i sistema za prikaz i analizu prikupljenih podataka. Kao takav SCADA sistem obezbeđuje informacionu osnovu za rad elektroenergetskih aplikacija. Merenja i indikacije potrebni za rad elektroenergetskih aplikacija dobijaju se od SCADA sistema posredstvom odgovarajućeg aplikacionog programskog interfejsa (API-ja). U okviru Elektroprivrede Srbije najzastupljeniji SCADA sistemi su VIEW6000 i VIEW2 razvijeni od strane Instituta „Mihajlo Pupin”, ali se pored njih koriste i drugi SCADA sistemi. Kako je elektroenergetske aplikacije potrebno učiniti što nezavisnijim od konkretnog SCADA sistema razvijen je poseban apstraktni SCADA API kao posrednik između bazičnog SCADA API-ja, vezanog za konkretan SCADA sistem, i elektroenergetskih aplikacija. Ovaj API je razvijen primenom objektno-orijentisanih tehnologija u programskom jeziku C++ i trenutno podržava VIEW6000 i VIEW2 SCADA sisteme. Programski interfejs prema SCADA sistemu je, kao što je prikazano na slici 3, razdvojen na dva nivoa:

- Nivo osnovnog SCADA programskog interfejsa - vezanog za specifični tip SCADA sistema (tzv. osnovni SCADA API)

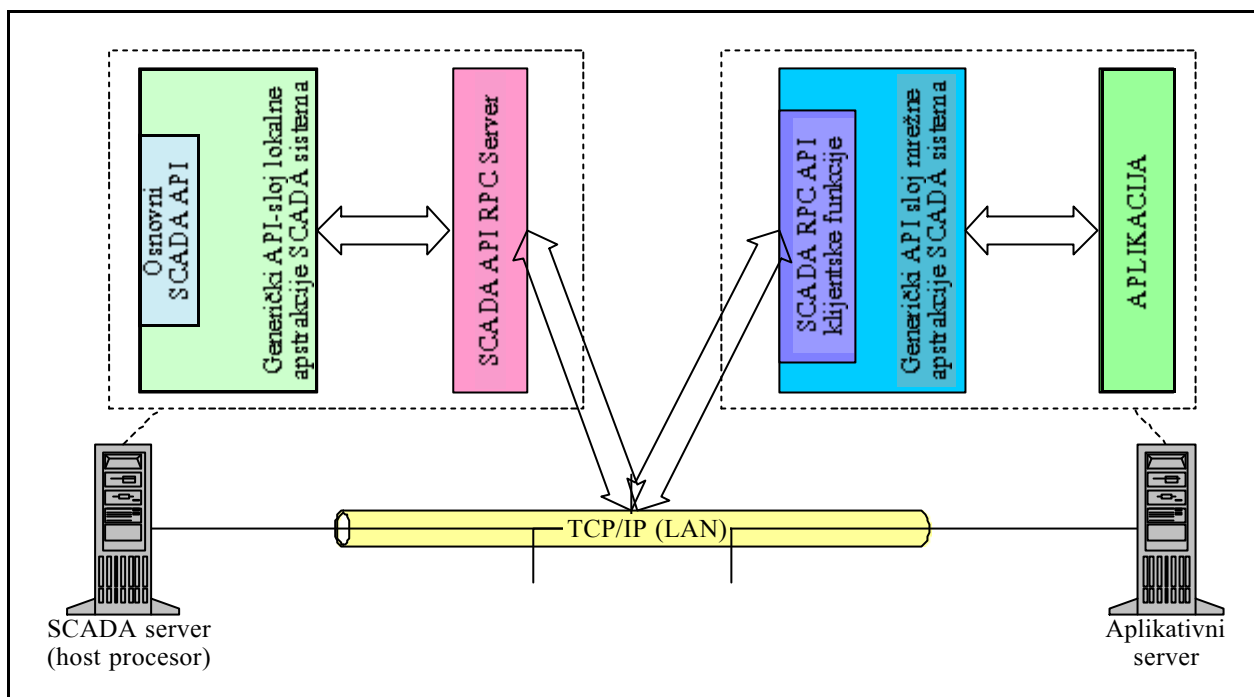
- Nivo apstraktnih SCADA objekata - sloj apstrakcije SCADA sistema (SAL - SCADA Abstraction Layer) (tzv. generički API).



Slika 3. Struktura programskog interfejsa (API-ja) za lokalni pristup SCADA sistemu

Programski interfejs se može realizovati kao statička ili dinamička biblioteka koju aplikacija koristi za pristup SCADA sistemu. Ako se koristi dinamička programska biblioteka, odnosno programska biblioteka koja se dinamički povezuje sa ostatkom programa u samom trenutku izvršavanja, onda program koji koristi takav programski interfejs nije potrebno ponovo prevoditi ako se izvrše izmene na programskom interfejsu prema SCADA sistemu, već je potrebno samo zameniti odgovarajuću dinamičku biblioteku u sistemu (ovo naravno važi pod uslovom da izmene nisu takve da menjaju način upotrebe programskog interfejsa).

Na ovaj način je obezbeđen pristup SCADA sistemu od strane aplikacija koje se izvršavaju na istom računaru na kome se izvršava i SCADA server (u slučaju VIEW6000 i VIEW2 SCADA sistema to mora biti Red Hat Linux računar). U praksi je, međutim, mnogo pogodnije da se elektroenergetske aplikacije izvršavaju na posebnom aplikativnom serveru u okviru iste lokalne računarske mreže. Pored toga što se ove aplikacije obično izvršavaju na drugom računaru, one vrlo često rade i pod različitim operativnim sistemom u odnosu na SCADA server. Zbog toga je razvijena ekstenzija ovog SCADA



Slika 4. Struktura programskog interfejsa (API-ja) za pristup SCADA sistemu preko mreže

API-ja, koja obezbeđuje podršku za mrežni klijent-server pristup SCADA sistemu, zasnovana na primeni Open Network Computing Remote Procedure Call (ONC/RPC) mehanizama [3]. Struktura ovog programskog interfejsa za pristup SCADA sistemu na udaljenom računaru u okviru lokalne mreže je prikazana na slici 4.

RPC mehanizam, odnosno „mehanizam za poziv udaljene procedure“ je srednji sloj (middleware) koji obezbeđuje API koji omogućava izvršavanje aplikacija koje koriste/pozivaju procedure, koje se izvršavaju na udaljenom računaru, kao da se izvršavaju na lokalnom. Aplikacija koja poziva proceduru se naziva klijent, a aplikacija koja izvršava proceduru server. Suštinski sve što RPC mehanizam omogućava je:

- Prevođenje argumenata funkcije u format nezavisnog od mašine (External Data Representation - XDR)
- Utvrđivanje da li postoji odgovarajuća serverska aplikacija i na kom portu je (Ovo u slučaju ONC/RPC radi poseban RPC servis Portmapper - ovaj servis vodi „evidenciju“ svih RPC servera na lokalnoj mašini i na poziv klijentske aplikacije utvrđuje da li odgovarajući server postoji i ako postoji vrši povezivanje klijenta i servera).
- Po uspostavljanju konekcije vrši prevođenje argumenata iz XDR formata u format server-

ske mašine i prosleđivanje odgovarajućoj serverskoj proceduri.

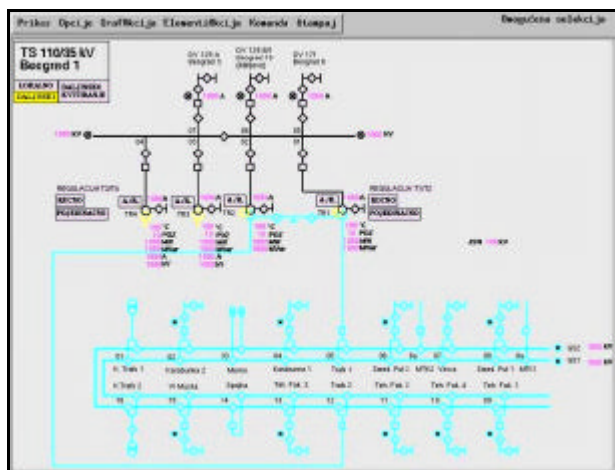
- Rezultat se prevodi u XDR format i vraća klijentu gde se opet prevodi u format klijentske mašine i vraća kao rezultat procedure.

U slučaju API-ja za pristup preko mreže, to konkretno znači da se realizuje odgovarajući RPC server koji koristi API za lokalni pristup SCADA sistemu. Ovaj server eksportuje procedure koje se pozivaju preko RPC mehanizama i koje kao rezultat poziva iz klijentske procedure vraćaju informacije (merjenja, indikacije, statuse izvršenih upravljačkih naloga, ...). Sam server pristupa SCADA sistemu korišćenjem implementacije generičkog API-ja namenjene lokalnom pristupu SCADA sistemu. Oko klijentskih RPC funkcija se definiše obavijajući sloj (wrapper) koji koriste direktno energetske aplikacije. Ove funkcije treba da budu identične funkcijama koje se koriste kod implementacije API-ja za lokalni pristup SCADA sistemu, odnosno potpuno sakrivaju RPC mehanizam. Na taj način se postiže da aplikacije imaju identičan izvorni kod bez obzira da li će se izvršavati na lokalnoj ili udaljenoj mašini.

Predviđena hardversko-softverska platforma elektroenergetskih aplikacija koje su predviđene za realizaciju u okviru ovog projekta, su standardni PC računari pod Linux operativnim sistemom. Predviđena je, takođe, i Windows NT/2000/XP verzija ovih aplikacija.

4.2. Korisnički interfejs

Kao osnova za izradu grafičkog korisničkog interfejsa koriste se multiplatformske wxWindows biblioteke [4], čime je obezbeđeno lako prenošenje izvornog koda korisničkog interfejsa sa UNIX (Linux) na Windows platformu. Ovime se postiže i unifikacija izgleda i funkcionalnosti grafičkog korisničkog interfejsa kako na različitim platformama-operativnim sistemima, tako i između pojedinih komponenti grafičkog korisničkog interfejsa. Razvijena studijska verzija NT/SE programskog paketa je imala grafički korisnički interfejs zasnovan na primeni MFC biblioteka za Win32 platformu. Međutim, predviđeno je da u konačnoj verziji i Windows verzija ovog paketa koristi wxWindows biblioteke zbog pomenutih prednosti.



Slika 5. Prikaz dela grafičkog korisničkog interfejsa VIEW2 SCADA sistema

Za prikaz jednopolnih šema i odgovarajućih vrednosti i statusa predviđena je upotreba standardnih prikaza odgovarajućeg SCADA sistema preko SCADA API funkcija. Primer prikaza jednopolne šeme u okviru grafičkog korisničkog interfejsa VIEW2 SCADA sistema je prikazan na slici 5.

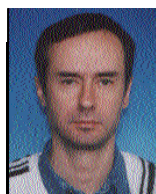
5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana arhitektura fleksibilnog nadzorno-upravljačkog SCADA/EMS/DMS sistema prenosnih i distributivnih EES, koja omogućava jednostavnu konfiguraciju sistema u SCADA/EMS ili SCADA/DMS sistem, čime se postiže široka primenljivost platforme u dispečerskim centrima upravljanja, kako na proizvodno-prenosnom, tako i na distributivnom nivou. Dat je i detaljni opis organizacije i funkcija SCADA/EMS sistema, kao i način njegove softverske implementacije, kojim će biti omogućena primena ovog sistema na različitim hardversko-softverskim platformama. Primenom objektno-orijentisanih tehnologija je omogućen jednostavan prelaz aplikacija iz režima rada u realnom vremenu u studijski režim rada i obratno. Ovakvi sistemi upravljanja, zasnovani na primeni savremenih informacionih tehnologija naročito dobijaju na značaju u uslovima deregulisanog elektroenergetskog sektora, praćenog čestim i dubokim promenama.

6. LITERATURA

- [1] N. Čukalevski, M. Stojić, J. Trhulj, G. Jakupović, MREŽNE APLIKACIJE FLEKSIBILNOG NADZORNO-UPRAVLJAČKOG SISTEMA PRENOSNIH I DISTRIBUTIVNIH SISTEMA, XLVI konferencija ETRAN, Banja Vrućica (Teslić), 3-6. juna 2002. godine
- [2] M. Stojić, B. Vešović, N. Čukalevski, D. Vlajsavljević, N. Mijušković, PROGRAMSKI PAKETI ZA ODREĐIVANJE TOPOLOGIJE I ESTIMACIJU STATIČKIH STANJA EES JUKO-CIGRE, Herceg Novi, Maj 1998. godine
- [3] John Bloomer, POWER PROGRAMMING WITH RPC, O'Reilly&Associates, Inc., 1992. godine
- [4] Franky Braem, WXWINDOWS 2 - PROGRAMMING CROSS-PLATFORM GUI APPLICATIONS IN C++, 2002. godine
- [5] Laplante Philip A. REAL TIME SYSTEMS DESIGN AND ANALYSIS: AN ENGINEER'S HANDBOOK, IEEE Press & IEEE Computer Society Press, 1997. godine

Rad je primljen u uredništvo 09. 06. 2003. godine



Miloš Stojić je rođen 1961. godine u Beogradu. Diplomirao je 1984. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, smer „Elektromotorni pogoni”. Magistrirao je 1992. godine u „Centru za multidisciplinarne studije Univerziteta u Beogradu” na smeru „Logistika i sistemi”.

Od 1986. do 1988. je radio na Rudarsko geološkom fakultetu u Laboratoriji za elektronsku mikroanalizu. Od 1988. je zaposlen u institutu „Mihajlo Pupin”.

Radi na razvoju softverskih paketa u oblasti upravljanja elektroenergetskim sistemima, pre svega u oblasti statičke estimacije stanja (EES). Tokom profesionalne karijere se bavio i problemima upravljanja saobraćajem, elektronskim pomagalima za slepe, bazama podataka. Autor je više radova i patentata objavljenih u zemlji i inostranstvu.

Član je studijskog komiteta 39 (Upravljanje i eksploatacija EES) Jugoslovenskog komiteta CIGRE.



Goran Jakupović je rođen 1971. godine u Beogradu. Diplomirao je 1995. godine na odseku za elektroniku, telekomunikacije i automatiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Magistrirao je 2003. godine na istom fakultetu na smeru za Upravljanje sistemima.

Od septembra 1995. godine, kao stipendista Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije radi u odeljenju za inteligentne sisteme, laboratorije za Automatiku, Instituta „Mihajlo Pupin”. U januaru 1996. godine prelazi u Odeljenje za upravljanje elektroenergetskim sistemima laboratorije za Automatiku, Instituta „Mihajlo Pupin” gde radi i danas.

Radi na razvoju softverskih rešenja iz oblasti upravljanja elektroenergetskim sistemima. Istraživački i razvojni rad mu je, uglavnom, vezan za razvoj, simulacionu analizu i softversku implementaciju upravljačkih algoritama u elektroenergetskim sistemima, u okviru SCADA/EMS sistema. Takođe se bavi i problemima primene inteligentnih algoritama upravljanja zasnovanih na fazi logici i neuralnim mrežama.

Član je studijskog komiteta 39 (Upravljanje i eksploatacija EES) Jugoslovenskog komiteta CIGRÉ. Autor je ili koautor 27 radova izloženih na konferencijama u zemlji i inostranstvu.



Jasmína Trhulj je rođena 1973. godine u Beogradu. Diplomirala je 1998. godine na smeru za elektroenergetske sisteme Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu.

Od februara 1999. godine zaposlena je u Odeljenju za upravljanje elektroenergetskim sistemima laboratorije za Automatiku, Instituta „Mihajlo Pupin”, gde radi i danas.

Bavi se istraživanjem i razvojem softvera u oblasti upravljanja elektroenergetskim sistemima, a posebno SCADA/EMS/DMS sistemima. Posebna oblast stručnog interesovanja joj je deregulacija tržišta električne energije i problematika upravljanja elektroenergetskim sistemima u deregulisanom okruženju.

Autor ili koautor 6 radova izloženih na konferencijama u zemlji.



Ninel Čukalevski je rođen 1949. godine u Beogradu. Diplomirao je 1972. godine, magistrirao 1983. godine i doktorirao 1990. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na problemima upravljanja elektroenergetskim sistemima. Od 1973. do 1976. godine je radio u Elektrotehničkoj školi „Nikola Tesla” u Beogradu, a od 1977. godine neprekidno je zaposlen u Institutu „Mihajlo Pupin” u RJ Automatika, gde je 1986. godine formirao Odeljenje za upravljanje EES, čiji je rukovodilac od tada. Do sada je radio na brojnim problemima primene informacionih tehnologija (IT) u elektroenergetici, kao i na problemima analize, planiranja i upravljanja savremenim elektroenergetskim sistemima (EES). Njegovi sadašnji stručni interesi se nalaze u oblasti projektovanja i realizacije distribuiranih informacionih sistema, skladišta podataka (Data Warehouses) i metoda integracije aplikacija korporativnih informacionih sistema (EAI), dok se istraživački interesi nalaze u domenu analize efekata deregulacije i restrukturiranja EE sektora na upravljanje i potrebnu IT podršku.

Godine 1998. je izabran za profesora za predmet „Klijent-server sistemi” na smeru za Nove računarske tehnologije Više elektrotehničke škole u Beogradu (sa nepunim radnim vremenom). Godine 2003. izabran je u NI zvanje naučni savetnik.

Kao autor ili koautor objavio je 104 rada u zemlji i inostranstvu (od čega: 4 poglavlja u dve monografije, 7 radova u vodećim međunarodnim časopisima, 19 radova na međunarodnim konferencijama, 9 radova u domaćim časopisima i 65 radova na domaćim konferencijama) i realizovao je brojna tehnička rešenja (pre svega u domenu informacionih sistema, baza podataka i aplikativnih programskih paketa). Pored toga, učestvovao je u realizaciji (kao obrađivač i/ili rukovodilac) značajnog broja studija i projekata (više od 50) urađenih za različite naručioce u Jugoslaviji i inostranstvu, čiji su rezultati prezentovani u preko 90 dokumenata.

Od profesionalnih zaduženja, član je međunarodne organizacije IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), Power Engineering Society (PES) od 1986. godine i Computer Society od 2000. godine. Član je međunarodne radne grupe (WG39.01) za centre upravljanja EES, kao i radne grupe (WG39.03) za obuku dispečera primenom simulaciono-treningnih sistema, međunarodne organizacije CIGRE Pariz, kao i član STK-39 (Upravljanje i eksploatacija EES) JUKO CIGRE. Član je programskog odbora jugoslovenskog udruženja ETRAN.

Miroslav Vuković,
Predrag Mikša i Zoran Nešovanović

Uklapanje HE Buk Bijela i HE Srbinje u elektroenergetski sistem

Stručni rad
UDK: 621.31; 621.311.21; 621.311.213

Rezime:

Cilj ove studije je bio da se detaljno ispitaju mogućnosti uklapanja HE Buk Bijela i HE Srbinje u prenosnu mrežu BiH odnosno Crne Gore, respektujući značaj uključenja novih elemenata mreže na performanse buduće integrisane prenosne mreže u BiH i u interkonekciji sa susednim elektroenergetskim sistemima. Analizirana je 400, 220 i 110 kV mreža, s tim da se detaljnije modelovanje mreže 110 kV odnosilo samo na područje od interesa za plasman snage HE Buk Bijela i HE Srbinje. Sagledano je obezbeđenje sigurnog plasmansnaga i energije HE Buk Bijela i HE Srbinje izgradnjom jednog od kandidovanih novih 400 kV dalekovoda od HE Buk Bijela do nekog od susednih 400 kV čvorišta. Zadatak ove studije je bio da sagleda sve mogućnosti i predloži najbolje tehno-ekonomsko-investiciono rešenje.

Ključne reči: Buk Bijela, mreža, model, PSS, dalekovod, hidroelektrana, uklapanje

Abstract:

FITTING HPP BUK BIJELA AND HPP SRBINJE INTO THE ELECTRIC POWER SYSTEM

The purpose of this study was to investigate in details the possibilities of fitting HPP Buk Bijela and HPP Srbinje into the transmission network of Bosnia & Herzegovina and Montenegro, respecting the significance of including the new network elements in performances of the future integrated transmission network of B&H into the interconnection with the neighbouring electric power systems. Analysis was made on the network model including 400, 220 and 110 kV networks, whereas detailed modelling of 110 kV network referred only to the area concerning electric power supplied by HPP Buk Bijela and HPP Srbinje. Reliable electric power supply from HPP Buk Bijela and HPP Srbinje will be provided by construction of one of the candidates 400 kV transmission lines going from HPP Buk Bijela to some of the neighbouring 400 kV nodes. The aim of this study was to review all the possibilities and propose the best technical-economic and investment solution.

Key words: Buk Bijela, network, model, PSS, transmission line, hydro power plant, fitting

1. UVOD

Uklapanje HE Buk Bijela u elektroenergetski sistem BiH, odnosno Crne Gore bio je predmet mno-

gih studija. Cilj ove studije je bio da detaljno ispita mogućnosti uklapanja HE Buk Bijela i HE Srbinje u prenosnu mrežu, respektujući značaj uključenja novih elemenata mreže.

Miroslav Vuković, dipl. ing, Predrag Mikša, dipl. ing. i Zoran Nešovanović, dipl. ing.
– Elektroenergetski koordinacioni centar, 11 000 Beograd, Vojvode Stepe 412

Rađene su analize tokova snaga, naponskih prilika, statičke sigurnosti i gubitaka električne energije u postojećoj prenosnoj mreži pre i nakon izgradnje HE Buk Bijela. U ovoj studiji su potvrđena ranije uočena uska grla u plasmanu snage i energije iz kompleksa HE Buk Bijela.

Analizirani su uticaji tri nova kandidovana 400 kV dalekovoda na plasman snage iz HE Buk Bijela i to: HE Buk Bijela-TE Gacko, HE Buk Bijela-HE Višegrad i HE Buk Bijela-TE Pljevlja.

Izvršena je analiza osetljivosti na različita angažovanja elektrana. Analizirano je pet scenarija: nepovoljna hidrologija na reci Drini (sve elektrane u slivu Drine angažovane na tehničkom minimumu) i neraspoloživost najvećih jedinica u termoelekttranama Gacko, Ugljevik, Tuzla i Pljevlja.

Takođe je izvršena analiza tokova snaga, naponskih prilika, gubitaka i statičke sigurnosti prenosne mreže u slučaju različitih programa razmene električne energije.

Pored toga, dat je i proračun struja kratkog spoja u karakterističnim tačkama elektroenergetskog sistema kao i ekonomsko investiciona analiza.

2. POLAZNE POSTAVKE

Za izradu Studije korišćen je regionalni model, urađen u okviru SECI (South-eastern European Cooperation Initiative) projekta, za proračun tokova snaga i naponskih prilika za zemlje jugoistočne Evrope. Model je rađen za predviđeni nivo optere-

ćenja za 2005. godinu za zimski režim (maksimalni režim). U okviru regionalnog modela jugoistočne Evrope modelovana je kompletna 400 i 220 kV mreža EES-a Albanije, Bugarske, Grčke, Mađarske, Rumunije, Turske i mreža bivših jugoslovenskih republika kao i deo glavne mreže UCTE-a.

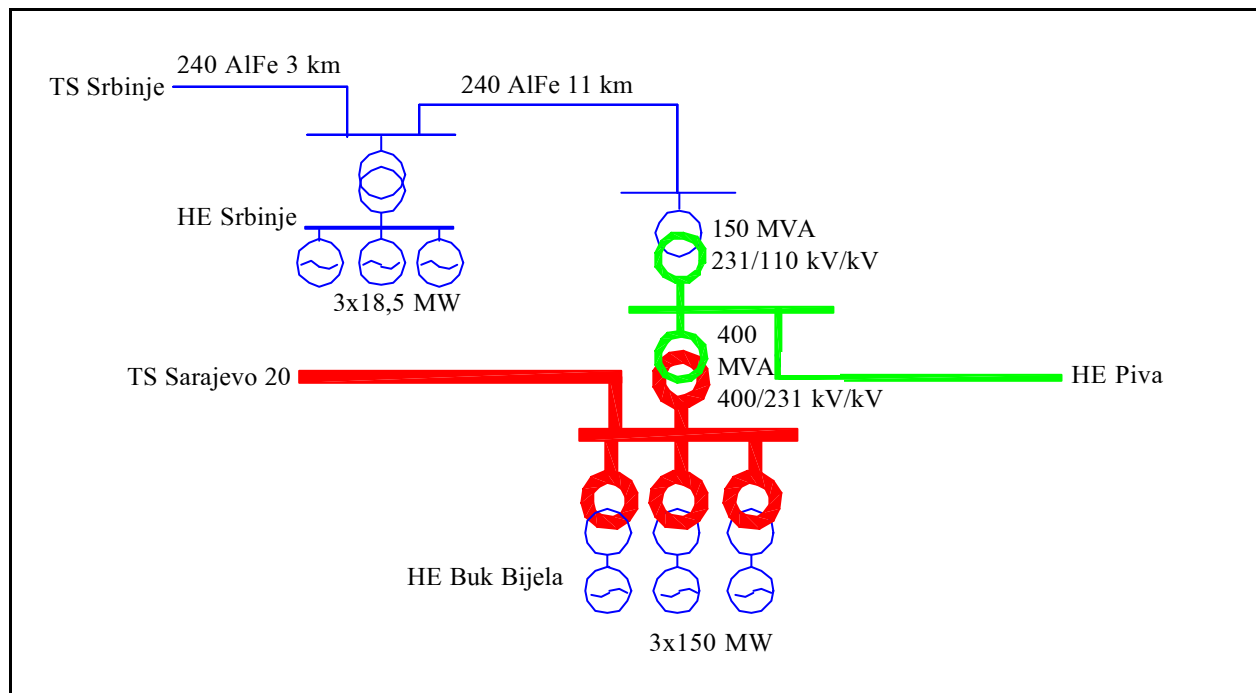
Modelovane su i razmene električne energije, s obzirom na to da neki od elektroenergetskih sistema predviđaju deficit električne energije u 2005. godini.

Model se zbog prirode analiziranog elektroenergetskog sistema morao proširiti delovima 110 kV mreže, na potezu HE Višegrad-Sarajevo-HE Srbinje-HE Buk Bijela. Takođe, radi što tačnije raspodele tokova snaga, modelovana je i 110 kV mreža Crne Gore.

Iako je ovaj model kreiran za prognozirano opterećenje potrošača u 2005. godini, ne treba ga vezati za godinu, već za nivo potrošnje. Jasno je da izgradnja HE Buk Bijela traje preko dvadeset osam godina i da je nerealno da ona bude u pogonu 2005. godine. Međutim, poredeći nivo opterećenja modelovan u Studiji i prognozirani nivo opterećenja elektroenergetskih sistema BiH i Crne Gore u periodu završetka izgradnje HE Buk Bijela, jasno je da korišćen regionalni model u potpunosti zadovoljava visoke zahteve koje je postavio cilj ove Studije.

U svim dosadašnjim studijama i analizama, HE Buk Bijela predviđena je da radi na 400 kV naponskom nivou i da se uklopi na prenosnu mrežu preko postojećih dalekovoda:

- 400 kV dalekovod HE Buk Bijela - TS Sarajevo 20 AIFe 2x490/65 mm² dužine 61,1 km



Slika 1. Kompleks HE Buk Bijela

– 220 kV dalekovod HE Buk Bijela - HE Piva
AlFe 490 mm² po fazi dužine 23 km.

U sadašnjoj topologiji elektroenergetske mreže oba navedena dalekovoda čine jednu celinu koja radi pod 220 kV naponom. U TS 400/220/110 kV/kV/kV Sarajevo 20 jedan sistem sabirnica 400 kV radi pod 220 kV naponom na koji je spojen transformator 220/110 kV/kV, 150 MVA. Režim u 2005. godini sa ovakvom topologijom je obrađen kao „nulti režim”, što znači da je to režim u kome HE Buk Bijela i HE Srbinje nisu u pogonu.

Za „osnovni režim” usvojena je topologija elektroenergetskog sistema za planirano stanje izgrađenosti elektroenergetskog sistema u 2005. godini, sa izgrađenim HE Buk Bijela i HE Srbinje, što podrazumeva da bi navedeni dalekovodi radili pod naponom za koji su predviđeni. U postrojenju HE Buk Bijela predviđene su transformacije: 400/220 kV/kV i 220/110 kV/kV. Predviđeno je da se HE Srbinje u osnovnom režimu priključi na mrežu i plasira svoju proizvodnju preko dalekovoda 110 kV HE Buk Bijela-HE Srbinje, dužine 11 km i HE Srbinje-Srbinje dužine 3 km.

S obzirom na to da predstavljaju jednu tehnološku celinu, sve napred opisano nazvano je „kompleksom hidroelektrane Buk Bijela”. Šema kompleksa hidroelektrane Buk Bijela prikazana je na slici 1.

Maksimalno vršno opterećenje konzuma u elektroenergetskom sistemu Crne Gore u svim varijantama je 740 MW. U nultoj varijanti deficit u elektroenergetskom sistemu Crne Gore je 270 MW, dok je u osnovnoj i svim ostalim varijantama u kojima egzistira kompleks HE Buk Bijela 100 MW.

U svim analiziranim varijantama postoji razmena između elektroenergetskih sistema Republike Srpske i Crne Gore, jer prema ugovoru između Elektroprivreda Crne Gore i Republike Srpske, Elektroprivredi Crne Gore pripada 33,33 % od ukupne angažovane snage i energije kompleksa HE Buk Bijela.

Pokriivanje konzuma Crne Gore je predviđeno iz elektroenergetskog sistema BiH s obzirom na to da će 2005. godine BiH raspolagati sa velikim viškovima energije.

Za celokupan model, referentni čvor je u Austriji u čvorištu 400/220 kV BUERS. Za balansni čvor elektroenergetskog sistema u BiH izabrana je termoelektrana Tuzla, a u sistemu Crne Gore HE Perućica.

3. RAZLIČITA ANGAŽOVANJA ELEKTRANA, RAZLIČITI PROGRAMI RAZMENE I RAZLIČITI PLASMANI ENERGIJE IZ ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA BIH

Analiza osetljivosti na različita angažovanja elektrana, različite programe razmena preko mreže BiH i različite plasmane energije iz elektroenergetskog sistema BiH rađeni su za slučaj da će se nedo-

stajuća snaga za potrebe konzuma Crne Gore realizovati uvozom iz BiH. Kada je TE Pljevlja van pogona nedostajuća snaga se obezbeđuje iz pravca Srbije.

Analiza osetljivosti na različita angažovanja elektrana je izvršena za slučajeve loše hidrologije na Drini, a zatim i neraspoloživosti neke od izabranih termoelektrana. Izbor neraspoloživosti generatorskih jedinica u termoelektranama vršen je prema veličini instalisane snage agregata (uzeti su u obzir ispadni najvećih generatorskih jedinica).

U studiji su pored različitih programa razmene modelovani i različiti plasmani proizvedene snage iz elektroenergetskog sistema BiH u druge elektroenergetske sisteme, odnosno da se celokupna proizvodnja kompleksa HE Buk Bijela izvozi.

Analiza uticaja tranzita preko mreže BiH izvršena je modelovanjem dva slučaja. Prvi analizirani tranzit je u iznosu od 500 MW iz Austrije, odnosno Italije ka Albaniji i Grčkoj, i drugi tranzit je u suprotnom smeru nepromenjenog iznosa.

4. ANALIZA TOKOVA SNAGA, NAPONSKIH PRILIKA, GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE I STATIČKE SIGURNOSTI

Analiza nultog režima pokazuje da u normalnom režimu rada nema preopterećenja u elektroenergetskim sistemima BiH i Crne Gore i da su naponi u granicama dozvoljenih. U slučaju provere kriterijuma sigurnosti preopterećenja se javljaju u mreži 110 kV u Crnoj Gori. Sva prekoračenja napona na 110 kV naponskom nivou su u elektroenergetskom sistemu Crne Gore. Problem naponsko reaktivnih prilika na ovom naponskom nivou je lokalnog karaktera i spada u problematiku razvoja visokonaponske mreže EES Crne Gore, a i niz ovih prekoračenja i nesigurnih stanja se može prevazići uobičajenim dispečerskim akcijama.

Analize osnovne varijante su pokazale da u slučaju neraspoloživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela - Sarajevo 20, hidroelektrana Buk Bijela ne sme biti angažovana sa svojom punom snagom od 3x150 MW zbog preopterećenja dalekovoda 110 kV Goražde - Srbinje, dalekovoda 110 kV Srbinje - HE Srbinje i transformatora 400 kV/220 kV u HE Buk Bijela. Maksimalno moguće angažovanje HE Buk Bijela u tom slučaju za postojeću topologiju, je:

- 270 MW ukoliko je realizovan paralelan rad 220 i 110 kV mreže preko transformacije 220/110 kV/kV u postrojenju HE Buk Bijela i dalekovoda 110 kV HE Buk Bijela-HE Srbinje;
- 390 MW pod uslovom da je 110 kV dalekovod HE Buk Bijela-HE Srbinje isključen ili da je isključena transformacija 220/110 kV/kV u postrojenju HE Buk Bijela.

Svi ostali analizirani slučajevi ispada/neraspoloživosti elemenata prenosne mreže ne predstavljaju ograničenje za maksimalan plasman snage iz kompleksa HE Buk Bijela.

Izgradnja dalekovoda 110 kV Sarajevo 20 -Trnovo-Miljevina (Kalinovik)-HE Srbinje, ukupne dužine oko 78 km (23 km+25 km+30 km), omogućava povećanje snage koju HE Buk Bijela može plasirati u mrežu pri neraspoloživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-Sarajevo 20 sa 270 MW na 380 MW, odnosno nije neophodno isključivanje dalekovoda 110 kV HE Buk Bijela-HE Srbinje i/ili transformatora 220/110 kV/kV u HE Buk Bijela.

Neraspoloživost dalekovoda 220 kV HE Buk Bijela-HE Piva ne ograničava plasman celokupne instalisane snage HE Buk Bijela u elektroenergetski sistem.

U slučaju izgradnje dalekovoda **HE Buk Bijela-TE Gacko**, dužine 42 km gubici u prenosnoj mreži se smanjuju za reda veličine 2 MW i eliminišu se sve uočene nesigurnosti pri ispadu dalekovoda HE Buk Bijela-Sarajevo 20.

Dalekovod **HE Buk Bijela-TS Višegrad** rastećuće 400 kV pravac HE Buk Bijela-Sarajevo 20-Sarajevo10-Tuzla, gubici aktivne snage se smanjuju za oko 1 MW, a analiza statičke sigurnosti pokazuje da izgradnja dalekovoda HE Buk Bijela -TS Višegrad ne uvodi nova nesigurna stanja.

Izgradnjom dalekovoda 400 kV **HE Buk Bijela-TE Pljevlja**, dužine 67 km dolazi do preusmeravanja dela plasmata snage HE Buk Bijela u iznosu od oko 90 MW ka TE Pljevlja. Predmetni dalekovod otklanja sva nesigurna stanja.

Izgradnjom bilo kog od kandidovanih dalekovoda eliminiše se potreba za smanjenjem angažovanja kompleksa HE Buk Bijela tj. ostvaruje se siguran plasman snage i energije iz HE Buk Bijela i HE Srbinje.

Analiza osetljivosti je vršena sa ciljem prikaza uticaja različitog angažovanja elektrana koje se nalaze u okruženju na rad proizvodnih jedinica u okviru kompleksa HE Buk Bijela i to uzimajući u obzir različite varijante topologije mreže elektroenergetskog sistema Bosne i Hercegovine. Na osnovu izvršene analize, zaključuje se da u svim analiziranim scenarijima angažovanja elektrana izgradnja bilo kog od novih dalekovoda dovodi do povećanja toka snage po dalekovodu 220 kV HE Buk Bijela-HE Piva, osim u slučaju loše hidrološke situacije na slivu reke Drine i postojanja dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-Gacko, kao i u slučaju neraspoloživosti TE Pljevlja. Plasman snage iz kompleksa HE Buk Bijela u elektroenergetski sistem jednako je moguć kako u osnovnoj topologiji (uvažavajući zaključke u vezi sa neraspoloživosti dalekovoda HE Buk Bijela-Sa-

rajevo 20), tako i u varijanti sa novoizgrađenim dalekovodima 400 kV, nezavisno od načina angažovanja izvora u okruženju.

Analiza uticaja različitog angažovanja elektrana je pokazala da se gubici u prenosnoj tj. 400 kV i 220 kV mreži elektroenergetskog sistema Bosne i Hercegovine smanjuju. Gubici prenosne mreže Crne Gore najviše se smanjuju u slučaju izgradnje dalekovoda HE Buk Bijela-TE Gacko.

Razlog za analizu tokova snaga, naponskih prilika, gubitaka i statičke sigurnosti u slučaju različitih programa razmene je da se sagledaju tranzitne mogućnosti prenosne mreže BiH, odnosno ispita sistemski uloga svakog od kandidovanih dalekovoda.

Generalno se može reći da je elektroenergetski sistem BiH malo osetljiv na analizirane tranzite, jer je procenat učešća u svim slučajevima niži od 30 %. Elektroenergetski sistem BiH je siguran na tranzite jer isti ne izazivaju dodatne nesigurnosti

Naponska ograničenja u 400 i 220 kV mreži kod analiziranih tranzita pri punoj topologiji mreže BiH i pri izgradnji bilo kog od kandidovanih dalekovoda su u dozvoljenim granicama, dok se gubici aktivne snage bez obzira na tretirani tranzit smanjuju. Za elektroenergetski sistem Crne Gore kandidovani dalekovodi ne izazivaju uvek smanjenje gubitaka, već naprotiv, bez obzira na analizirani tranzit, izgradnja 400 kV dalekovoda HE Buk Bijela-TE Pljevlja izaziva njihovo neznatno povećanje, jer povećava učešće elektroenergetskog sistema Crne Gore u tranzitiranju električne energije.

U studiji je analizirano i učešće kompleksa HE Buk Bijela pri različitim režimima izvoza ERS, odnosno elektroenergetskog sistema BiH u iznosu od 300 MW u četiri različita pravca: zapad, sever, istok i jug. Izvoz je modelovan kao dodatna razmena na već postojeće razmene u modelu.

Generalno gledano, u slučaju ispitanih plasmata snage iz elektroenergetskog sistema BiH, izgradnja bilo kog od kandidovanih 400 kV dalekovoda ne utiče značajno na preraspodelu tokova snaga između BiH i susednih sistema u odnosu na osnovnu varijantu. Izgradnja nekog od 400 kV dalekovoda kojim bi se obezbedio siguran plasman kompletne snage kompleksa HE Buk Bijela u najvećoj meri utiče na preraspodelu tokova snaga u unutrašnjoj mreži BiH i to uglavnom u njenom 400 kV delu. Svaki od dalekovoda kandidata omogućava siguran plasman snage i energije iz kompleksa HE Buk Bijela i ne dovodi do pojave novih nesigurnih stanja.

5. EKONOMSKO INVESTICIONA ANALIZA

Cilj predmetne analize je bio da se ispita ekonomska opravdanost izgradnje novog 400 kV dale-

kovoda kojim bi se obezbedio siguran plasman kompletne snage kompleksa HE Buk Bijela. To znači da je težište dato onom elementu tj. dalekovodu 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20 čija neraspoloživost uzrokuje da hidroelektrana Buk Bijela ne može raditi sa maksimalno instalisanom snagom.

Neraspoloživost dalekovoda 220 kV HE Buk Bijela - HE Piva ne ograničava plasman celokupne instalisane snage HE Buk Bijela u elektroenergetski sistem.

Dalekovod HE Buk Bijela-Sarajevo 20 je do sada radio pod naponom 220 kV, iako je koordinacija izolacije dimenzionisana na 400 kV i njegova očuvanost je na zavidnom nivou.

Vek trajanja dalekovoda 400 kV uz dobro održavanje i normalnu eksploataciju se danas u svetu procenjuje na iznad 40 godina. Izgradnjom hidroelektrane Buk Bijela, koja će se eksploatisati duže od trideset godina, ovaj dalekovod će preći tu granicu i moraće se rekonstruisati.

U analizi su odbačena sva stanja u sistemu kod kojih se ima više od dva neradno sposobna elementa kao malo verovatna.

U zavisnosti od dijagrama potrošnje zavisice i potreba za angažovanjem hidroelektrane maksimalnom snagom. Očigledno je da će biti vremenskih intervala kada će hidroelektrana bez obzira na raspoloživost dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20 biti angažovana sa manjom snagom od instalisane.

U ovoj analizi se za pokrivanje dnevnog dijagrama opterećenja uvek računalo sa angažovanjem HE Buk Bijela punom snagom.

Verovatnoća angažovanja HE Buk Bijela sa manjom snagom od instalisane je dosta visoka i treba je superponirati na verovatnoću neraspoloživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20.

U cilju dobijanja optimističkih rezultata, u analizi se polazi od sledećih pretpostavki:

- korišćenje energije i snage iz hidroelektrane zavisi u prvom redu od rasporeda proizvodnje tokom godine, a taj raspored zavisi od prirodnih protoka, zbog čega se rad HE Buk Bijela predviđa uvek sa maksimalnom instalisanom snagom
- dijagram potrošnje u potrošačkim čvorovima tj. dnevni dijagram opterećenja elektroenergetskih sistema BiH i Crne Gore pokriva se uvek sa maksimalno instalisanom snagom iz HE Buk Bijela
- u vreme neraspoloživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20, HE Buk Bijela bi trebala da radi sa maksimalno instalisanom snagom, ali zbog nemogućnosti takvog rada pretpostavlja se da će hidroelektrana raditi sa snagom od 380 MW.

Sve pretpostavke uzrokuju maksimalne štete usled neisporučene električne energije iz kompleksa HE Buk Bijela i na strani su povećanja vremena neraspoloživosti rada hidroelektrane Buk Bijela sa ukupno instalisanom snagom.

U ovoj analizi je trebalo utvrditi da li ekonomske posledice zbog nemogućnosti plasmana ukupno instalisane snage u elektroenergetski sistem, mogu i kada prevazići ukupna investiciona ulaganja u izgradnju novog elementa koji osigurava plasman ukupno instalisane snage HE Buk Bijela.

Ukupno vreme neraspoloživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20 u periodu 1999. do 2002. godine je:

1999:	11 h 34 min
2000:	30 h 46 min
2001:	2 h 56 min
2002:	13 h 10 min
Prosek	15 h

Za prosečno vreme neraspoloživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20 u poslednje četiri godine dobijena je vrednost od 15 časova. Pretpostavlja se da će dalekovod 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20 u narednom periodu u proseku biti neraspoloživ oko 48 časova u toku godine.

Usvojeno prosečno vreme od 48 časova je vreme za koje će HE Buk Bijela morati raditi sa snagom manjom od instalisane.

Hidroelektrana Buk Bijela u slučaju neraspoloživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20 mora raditi sa snagom ne većom od 380 MW i u slučaju neraspoloživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20 ne može plasirati 70 MW. Maksimalna ukupna godišnja neisporučena energija je 3,360 MWh, što predstavlja zanemarljivih 0,29 % od ukupno predviđene prosečno godišnje proizvedene električne energije HE Buk Bijela.

Jedinična cena na pragu elektrane je značajno različita i zavisi od više faktora među kojima se navode samo neki: sezona, mesec, doba dana, sati obezbeđenja maksimalne snage itd.

Cena električne energije u HE Buk Bijela će takođe biti visoka s obzirom na to da se radi o vršnoj „skupljor” električnoj energiji.

Usvojena je vrednost od 34,85 Eura/MWh kao prosečna cena vršne električne energije u 2001. godini na zapadnoevropskom tržištu.

Za sva tri analizirana 400 kV dalekovoda može se reći da su:

- konstrukcije 400 kV dalekovoda iste
- isti prirodno klimatski uticaji u predelima kroz koje prolaze
- iste dužine eksploatacionog veka
- iste metode i karakteristike u eksploatacionom održavanju dalekovoda

Cene dalekovoda 400 kV za napred navedenu konfiguraciju terena kao i cene kompletno opremljenih 400 kV dalekovodnih polja date su u tabeli 1:

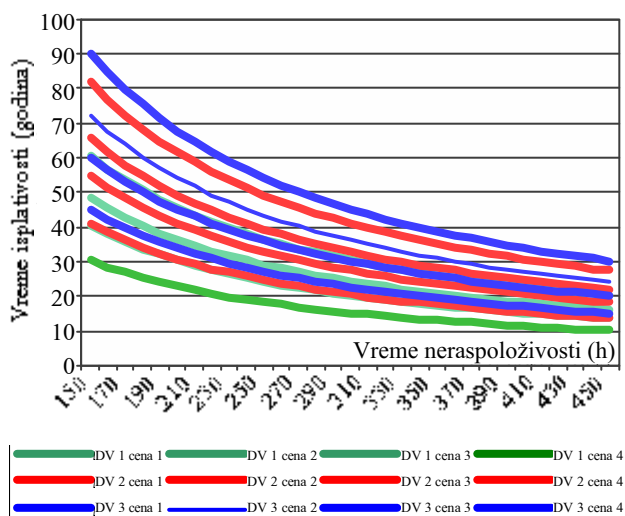
Tabela 1.

Cene dalekovoda 400 kV

Dalekovod	L dužina (km)	Ukupna investiciona suma DV+ 2 polja	Štete usled neisporučene električne energije miliona \$/godišnje	Isplativost investicije (godina)
HE Buk Bijela TE Gacko	42	10 650 000	117 096	91
HE Buk Bijela TS Višegrad	60	14 250 000	117 096	122
HE Buk Bijela TE Pljevlja	67	15 650 000	117 096	134

Uz usvojenu prosečnu cenu električne energije u tabeli 1 data je celokupna isplativost investicije izražena u godinama.

Najpre će se isplatiti 400 kV dalekovod HE Buk Bijela-TE Gacko što je i razumljivo s obzirom na to da ima najmanju dužinu.



Slika 2. Krive isplativosti

Na slici 2 predstavljene su krive vremena isplativosti u funkciji vremena nerasploživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20 i različitih cena električne energije (cena1=20, cena2=25, cena3=30 i cena4=40 Eura/MWh).

Uočava se da izuzetno velika vremena nerasploživosti dalekovoda 400 kV opravdavaju uložena investiciona sredstva. Kako to u stvarnosti nije slučaj, definitivno se može reći da nerasploživost da-

lekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20 koji direktno ograničava plasman instalisane snage iz HE Buk Bijela u elektroenergetski sistem za duži niz godina ne vraća uložena sredstva.

Iz prethodno iznesenog sledi da nerasploživost dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-TS Sarajevo 20, kojim bi se obezbedio siguran plasman celokupno instalisane snage iz HE Buk Bijela ne opravdava izgradnju novog 400 kV dalekovoda.

6. ZAKLJUČCI

1. Izgradnjom bilo kog od sledećih dalekovoda 400 kV:

- HE Buk Bijela-TE Gacko, dužine 42 km
- HE Buk Bijela-Višegrad, dužine 60 km
- HE Buk Bijela-TE Pljevlja, dužine 67 km

moguće je angažovanje kompleksa hidroelektrane Buk Bijela u svom punom iznosu od oko 500 MW, bez obzira na to da li je neki od elemenata elektroenergetskog sistema nerasploživ.

2. Posmatrajući zbirno gubitke aktivne snage u elektroenergetskim sistemima BiH i Crne Gore u osnovnoj varijanti (bez izgradnje novog dalekovoda 400 kV) i u varijantama sa novim dalekovodom 400 kV, može se zaključiti da se oni u svim analiziranim varijantama neznatno razlikuju. Najmanja zbirna vrednost je u slučaju izgradnje 400 kV dalekovoda HE Buk Bijela- TE Gacko. Najniža vrednost gubitaka aktivne snage u elektroenergetskom sistemu BiH je u varijanti sa dalekovodom 400 kV HE Buk Bijela-TE Pljevlja, a najveća u osnovnoj varijanti. U elektroenergetskom sistemu Crne Gore najmanja vrednost gubitaka je sa dalekovodom 400 kV HE Buk Bijela-Gacko, a najveća vrednost sa dalekovodom 400 kV HE Buk Bijela-TE Pljevlja.

3. Analiza osetljivosti na različito angažovanje elektrana koje se nalaze u elektroenergetskom sistemu BiH i okruženju pokazuje da je plasman snage iz kompleksa HE Buk Bijela u elektroenergetski sistem jednako moguć kako u osnovnoj topologiji tako i u varijanti sa novoizgrađenim dalekovodima 400 kV nezavisno od načina angažovanja izvora u okruženju.

4. Dalekovodi 400 kV kandidati za izgradnju imaju značajniji uticaj na internu preraspodelu tokova snaga u elektroenergetskom sistemu BiH i Crne Gore, dok je njihovo učešće u prenosu snage sa Istoka na Zapad i obrnuto, srazmerno malo. Elektroenergetski sistem BiH je siguran na analizirane tranzite, jer ne uzrokuju dodatne nesigurnosti. Analize programa razmena (tranziti električne energije

preko elektroenergetskog sistema BiH i plasmanski snage iz sistema BiH u okolne sisteme) ukazuju na učešće pomenutih dalekovoda u internoj preraspodeli snaga u elektroenergetskim sistemima BiH i Crne Gore, ali ne ističu značajnije tehničke prednosti jednog dalekovoda u odnosu na ostale.

5. U ekonomsko-investicionoj analizi uočava se da bi samo izuzetno velika vremena neraspoloživosti dalekovoda 400 kV HE Buk Bijela-Sarajevo 20 opravdavala uložena investicijska sredstva u izgradnju novog 400 kV dalekovoda kojim bi se obezbedio siguran plasman kompletne snage iz kompleksa HE Buk Bijela. Kako to u stvarnosti nije slučaj (prosečno vreme neraspoloživosti ovog voda u poslednje četiri godine je reda 15 h) definitivno se može reći da neraspoloživost predmetnog dalekovoda, koji direktno ograničava plasman celokupne instalisane snage iz HE Buk Bijela u elektroenergetski sistem, za duži niz godina ne vraća uložena sredstva.
6. Veoma obimne analize ukazuju na to da sva tri kandidovana dalekovoda 400 kV treba sagledati ne samo u okviru rešavanja načina uklapanja HE Buk Bijela u elektroenergetski sistem, već i u svetlu razvoja visokonaponske prenosne mreže, kako elektroenergetskog sistema BiH, tako i prenosne mreže jugoistočne Evrope. U ranijim studijama razvoja visokonaponske prenosne mreže koje su rađene u bivšoj SFRJ uočeno je da neki od navedenih dalekovoda imaju sistemsku funkciju za ceo

region. Da bi se tačno odredila ova funkcija mora se naći zajednički interes za izradu Studije razvoja visokonaponske prenosne mreže za zemlje jugoistočne Evrope uz tačno definisani programski zadatak. Programski zadatak pored navedenih kandidovanih dalekovoda mora istovremeno uzeti u obzir već izgrađen dalekovod 400 kV Žerjavinec-Hević, kao i perspektivne dalekovode 400 kV Banja Luka-Bihać-Zagreb i Podgorica-Elbasan.

7. LITERATURA

- [1] STRATEGIJA RAZVOJA ENERGETIKE REPUBLIKE SRPSKE, Energoprojekt, 1997. godine
- [2] STUDIJA UKLAPANJA HE BUK BIJELA I HE FOČA U ELEKTROENERGETSKI SISTEM, Institut za Elektroprivredu BiH,
- [3] STUDIJA - PLANIRANJE MREŽE RS - 1993
- [4] TEHNO - EKONOMSKA ANALIZA OBEZBEĐENJA PLASMANA RASPOLOŽIVE SNAGE I ENERGIJE IZ HE VIŠEGRAD, Elektrotehnički Institut Nikola Tesla, 1994. godine
- [5] UKLAPANJE U ELEKTROENERGETSKI SISTEM ISTOČNE HERCEGOVINE HIDROELEKTRANA DABAR, NEVESINJE I BILEĆA, Elektroenergetski koordinacioni centar, 1995. godine
- [6] STUDIJA RAZVOJA PRENOSNE MREŽE JUGOSLAVIJE DO 2000. GODINE SA OSVRTOM NA 2010. GODINU, Institut Nikola Tesla Beograd, Institut za Elektroprivredu Zagreb, Elektroinstitut Milan Vidmar Ljubljana, Juli 1991. godine
- [7] REGIONALNI MODEL SECI 2001/2002. godine

Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Miroslav Vuković je rođen 1957. godine u Sarajevu. Magistar je elektrotehnike, oblast interesovanja tehnički i energetski aspekti elektroenergetskog sektora i radi na mestu Rukovodioca Sektora za analize i konsalting u Elektroenergetskom Koordinacionom Centru (EKC)-Beograd.



Predrag Mikša je rođen 1972. godine u Beogradu. Diplomirani je inženjer elektrotehnike i radi na mestu inženjera za konsalting u Elektroenergetskom Koordinacionom Centru (EKC)-Beograd, oblast interesovanja problemi planiranja i mrežne analize.



Zoran Nešovanović je rođen 1974. godine u Čačku. Diplomirani je inženjer elektrotehnike. Radi na mestu inženjera za istraživanje u Elektroenergetskom Koordinacionom Centru (EKC)-Beograd, oblast interesovanja problemi planiranja i mrežne analize.

Maja S. Turković i Emilija Radojičić–Turković

Elektroenergetski sistemi 2020. godine – pogled u budućnost

Stručni rad
UDK: 621.3.05.621.31

Rezime:

U radu su analizirane promene u elektroenergetskom sektoru, prisutne u poslednjoj deceniji u velikom broju zemalja sveta. One se u prvom redu odnose na restrukturiranje energetskog sektora u celini (kao posledica novih regulativa), sve intenzivnije prisustvo otvorenog tržišta električne energije, promenu karaktera i strukture izvora, uvođenje novih tehnologija i materijala i dr. Za dva reprezentativna skupa zemalja, Zemlje OECD-a i Zemlje u razvoju, koje obuhvataju oko 90 % svetske potrošnje električne energije, izvršena je analiza postojećeg stanja, trendova i očekivanih promena i na osnovu toga su definisana dva moguća scenarija razvoja elektroenergetskih sistema 2020. godine: „distributivni scenario”, koji se zasniva na centralizovanoj proizvodnji električne energije, i „mešoviti - disperzioni scenario” u kojem je udeo disperzovane proizvodnje 20-30 %. U zaključku rada se ističe da bez obzira na specifičnosti pojedinih scenarija, svaki od njih se može primeniti, kako na nivou pojedinih zemalja tako i na regionalnom nivou.

Ključne reči: elektroenergetski sistem, perspektivni razvoj, prognoza, deregulacija

Abstract:

ELECTRIC POWER SYSTEMS IN 2020 - VISION OF THE FUTURE

The paper analyzes changes of the electric power sector, present in the last decade in many countries throughout the world. They primarily refer to the restructuring of the whole power sector (as a consequence of new regulations), a more intensive presence of the open electric power market, change of source character and structure, introduction of new technologies and material etc. For two representative groups of countries, the OECD and Developing countries, which cover about 90 per cent of the world electric power demand, an analysis of the existing state, trends and expected changes was made and on account of that were made two possible scenarios of the electric power systems development up to the year 2020:

The „distribution” scenario, based on centralized electric power generation and the „mixtribution” scenario, which has a 20 - 30 per cent share of the dispersed generation. In the conclusion of the paper it is emphasized that, irrespective of the specific characteristics of some scenarios, each of them may be applied at the level of certain countries, as well as at the regional level.

Key words: electric power system, future development, forecast, deregulation

Maja S. Turković dipl. ing; Mr Emilija Radojičić–Turković, dipl. ing.
– Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a

1. UVOD

Na početku 21. veka elektroprivredna delatnost širom sveta se suočila sa dramatičnim promenama, uslovljenim pre svega prihvatanjem koncepta održivog razvoja energetike, koji podrazumeva korišćenje prirodnih dobara na način koji će omogućiti očuvanje energetskih resursa i životne sredine za buduće generacije. U uslovima porasta potrošnje električne energije i ograničenih resursa za njenu proizvodnju, značajno su potencirani zahtevi za povećanjem energetske efikasnosti u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije, povećanje pouzdanosti napajanja potrošača, adekvatnu zaštitu čovekove sredine i ukidanje monopola u ovom sektoru [1,2]. Ovi zahtevi su doveli do restrukturiranja elektroenergetskog sektora i liberalizacije tržišta električne energije. Direktiva Evropske unije o zajedničkim pravilima formiranja tržišta energije [3,4] predviđela je postepenu liberalizaciju tržišta električne energije, pa se očekuje da će uskoro oko dve trećine energije, biti na liberalizovanom tržištu. Deregulacija tržišta električne energije dovela je do promena u strukturi proizvodnje električne energije, a tehnološki razvoj energetske opreme i razvoj u oblasti informacionih tehnologija i njihova ubrzana implementacija u EES-u otvaraju šansu za značajno podizanje energetske efikasnosti EES-a. U ovim uslovima, tradicionalni koncept vertikalno i hijerarhijski organizovanih sistema, zasnovan na centralizovanoj proizvodnji, biva potiskivan i postepeno se prelazi na decentralizovan koncept koji će raditi u uslovima veoma oštre konkurencije i delovanja tržišnih mehanizama.

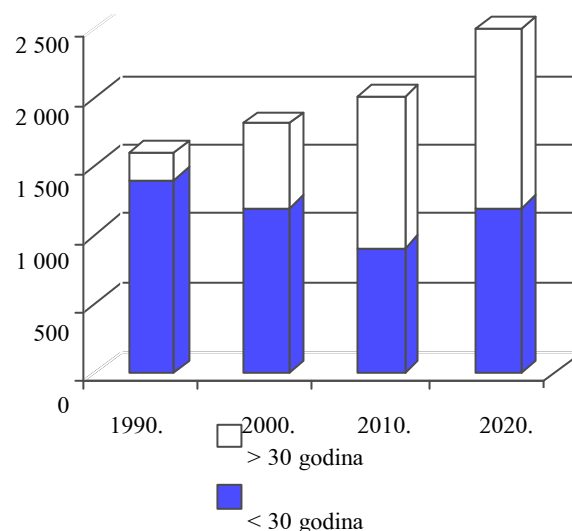
U stručnoj javnosti užurbano se radi na razradi praktičnih rešenja u okviru novog koncepta, uz intenzivno korišćenje inovativnih tehnologija, ali se još nije došlo do odgovora da li su ona tehnički, ekološki, ekonomski i politički ostvariva. Na niz otvorenih pitanja, počev od onih tehničkih - da li će nova rešenja, bazirana na implementaciji novih tehnologija, moći da obezbede zahtevane performanse EES-a uz prihvatljive troškove, do političkih - da li će međunarodna kontrola u decentralizovanim sistemima biti politički prihvatljiva - još se ne znaju odgovori. CIGRE, kao najrespektabilnija međunarodna organizacija za električne mreže, po tradiciji je i u ovom, za prognozu nezahvalnom momentu, preuzela ulogu lidera i na svom 39. Savetovanju održanom avgusta meseca 2002. godine u Parizu, organizovala panel diskusije na temu „Elektroenergetski sistemi 2020. godine”, sa željom da zaviri u budućnost. U ovom radu prikazani su osnovni akcenti iz te diskusije [2] vođene sa ciljem da se stručna javnost u elektroenergetskom sektoru pripremi za promene, kako bi na adekvatan način odgovorila na nove tehničke izazove u ovoj oblasti.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA I TRENDVI PROMENA

Pre nego što se čia vizija elektroenergetskih sistema (EES) u 2020. godini neophodno je osvrnuti se na njihove osnovne karakteristike u sadašnjem trenutku. Bez obzira na specifičnosti EES-a pojedinih zemalja, moguće je za svrhe ove teme izvršiti njihovu agregaciju u dva, u električnom smislu, reprezentativna skupa: EES u zemljama OECD-a (Organisation for Economic Cooperation and Development) i EES Zemalja u razvoju. U okviru ova dva skupa, koncentrisano je oko 90 % od ukupne potrošnje električne energije u svetu, dok ostatak od 10 % pripada zemljama u tranziciji.

2.1. EES u zemljama OECD

Elektroenergetsku infrastrukturu u većini zemalja OECD-a u osnovi čine veliki interkonektivni sistemi, sa centralizovanom proizvodnjom električne energije i kapacitetima čija starost često prelazi 30 godina. Udeo proizvodnih kapaciteta starijih od 30 godina u ukupnim proizvodnim kapacitetima zemalja OECD-a raste iz godine u godinu (od 12 % u 1990. godini do 31 % u 2000. godini), a očekuje se da u 2010. godini dostigne 50 % (slika 1).



Slika 1. Instalirana snaga (GW) u zemljama OECD

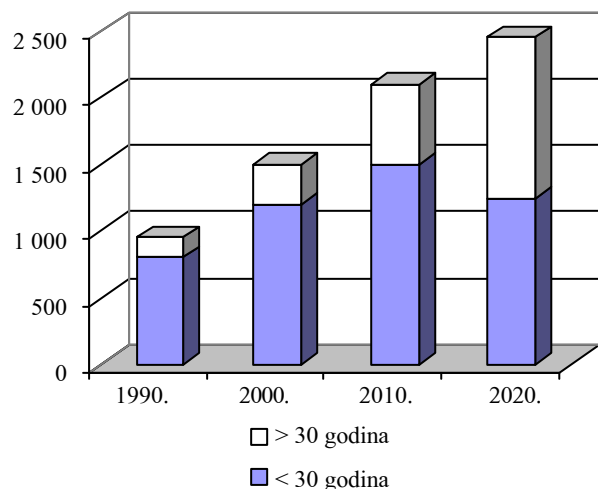
Osim toga, oko 65 % ovih proizvodnih kapaciteta za proizvodnju električne energije koristi fosilna goriva čija energetska efikasnost ne prelazi 35 %, što je znatno ispod one vrednosti koje danas obezbeđuju savremene tehnologije (do 50 %). Da bi se prekinuo ovaj očigledno nepovoljni trend, u većini zemalja pokrenuti su programi zamene i revitalizacije starih kapaciteta, čime će se uz povećanje energetske efikasnosti pri konverziji energije goriva u elek-

trichnu energiju doprineti i povecanju instalisane snage. Primena novih, čistijih tehnologija u okviru ovih programa obezbediće i niže emisije zagađivača, čime će se smanjiti zagađenje životne sredine. Treba, međutim, imati u vidu da su dometi ovih rešenja ograničeni i da se za postizanje većih efekata moraju primeniti efikasnije tehnologije i materijali i nova goriva (ili njihova kombinacija).

Slična situacija je i sa prenosnom i distributivnom mrežom, jer je njihov razvoj tesno vezan za razvoj elektrana, dok je životni vek nešto duži. Interkonektivne prenosne mreže u većini zemalja OECD-a veoma su stare (neke čak 70 godina), pa je i za njih razrađen program revitalizacije koji treba da doprinese povecanju njihove pouzdanosti, energetske efikasnosti i redukciji vizuelnog, elektromagnetnog i akustičnog uticaja na okolinu.

2.2. EES u Zemljama u razvoju

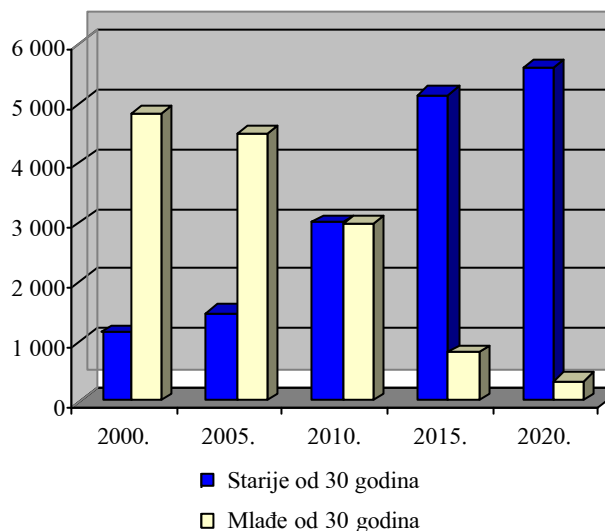
Elektroenergetska infrastruktura u većini zemalja u razvoju je relativno mlada, tako da je udeo proizvodnih kapaciteta starijih od 30 godina u ukupnim proizvodnim kapacitetima (posmatrano po snazi) nizak i kreće se od 5 % u 1990. godini do 16 % u 2000. godini (pri tome oko 73 % proizvodnje električne energije bazira se na korišćenju fosilnih goriva). Razlog ovome je i niska potrošnja električne energije po glavi stanovnika (između 340 i 3 400 kWh godišnje). Sa povecanjem stepena urbanizacije, povećava se i nivo potrošnje električne energije (u prvom redu za komercijalne svrhe), koju je morala da prati odgovarajuća infrastruktura. Prema projekciji, snaga proizvodnih kapaciteta u Zemljama u razvoju dostići će u 2020. godini 2 400 GW (slika 2), tj. skoro je istog nivoa kao u Zemljama OECD-a. Pri tome, raste i udeo proizvodnih kapaciteta starijih od 30 godina u ukupnoj snazi proizvodnih kapaciteta Zemalja u razvoju i već 2010. godini iznosi 27 %.



Slika 2. Instalirana snaga (GW) u zemljama u razvoju

Kada je reč o mrežnoj infrastrukturi, njen razvoj je vezan za razvoj proizvodnih kapaciteta. Ona se ubrzano razvija i raste, kako po dimenzijama tako i po geografskoj rasprostranjenosti. Ipak, morfologija mrežne infrastrukture je nepovoljna, jer je reč o nepovezanim mrežama koje rade izolovano.

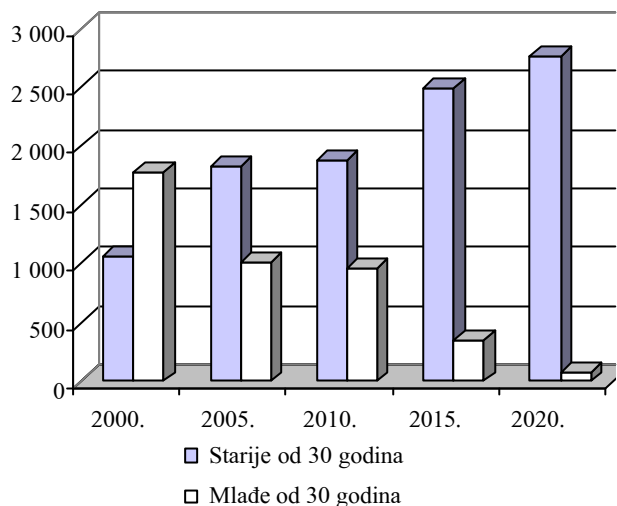
U okviru razmatranja u ovom poglavlju od interesa je osvrnuti se na elektroenergetsku infrastrukturu kod nas. Kao što je poznato, i u Srbiji celokupna elektroenergetska infrastruktura je veoma stara. Udeo snage proizvodnih kapaciteta starijih od 30 godina u ukupnoj instaliranoj snazi proizvodnih kapaciteta u Srbiji je izuzetno visok, bilo da je reč o hidrokapacitetima ili termokapacitetima i ima rastući trend (slika 3 i slika 4). Proizvodnja u termoelektrocentrama se uglavnom bazira na korišćenju fosilnih goriva (slika 5). Sličan zaključak važi i za prenosnu infrastrukturu, koja je takođe veoma stara i već u dužem periodu stagnira u razvoju, a osim toga je oštećena i razorena ratnim dejstvima. U tekućem periodu doneti su planovi za rehabilitaciju i revitalizaciju, kako proizvodnih kapaciteta tako i prenosne mreže, i u toku je njihova realizacija, što je od izuzetnog značaja za očekivano uključivanje EES Srbije u otvoreno tržište električne energije.



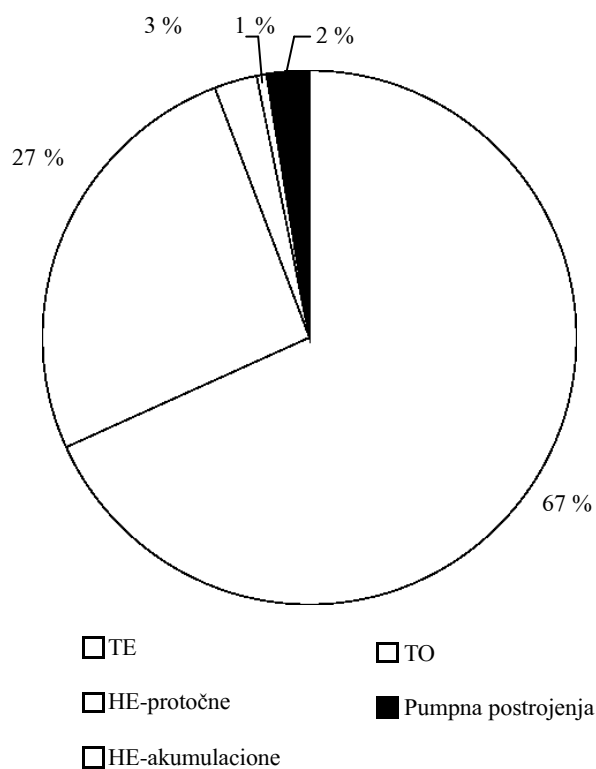
Slika 3. Starost TE u EES Srbije

2.3. Problemi daljeg rada

Elektroenergetski infrastrukturni sistemi su naj-složeniji tehničko-tehnološki sistemi, sa velikim (nažalost nepovoljnim) uticajem na životnu sredinu, privredu i društveni razvoj. S obzirom na to da su vezani za vrlo velika kapitalna ulaganja i duge rokove izgradnje, u vertikalno organizovanoj i hijerarhijski jasno postavljenoj strukturi, država je kao vlasnik (ili



Slika 4. Starost HE u EES Srbije

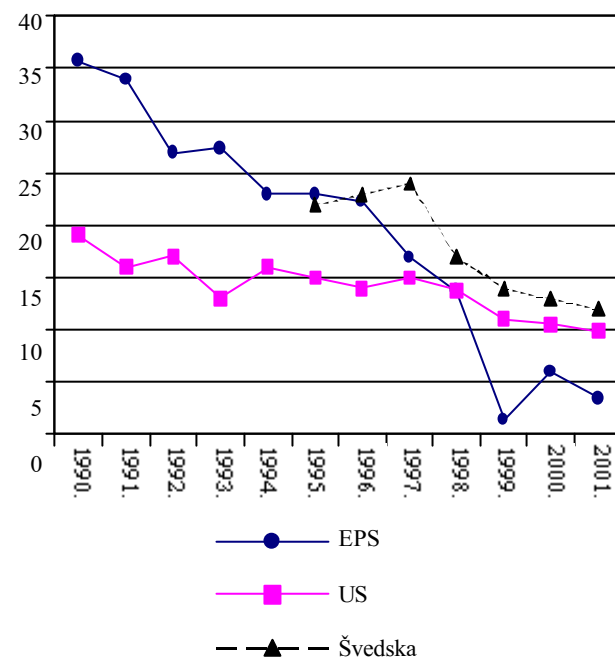


Slika 5. Struktura proizvodnje električne energije u Srbiji (2001. godina)

bar većinski vlasnik) sa svojom regulativom preuzela na sebe funkciju planiranja dugoročnog razvoja EES-a i usklađivala njegov razvoj sa prognozom potreba električne energije u budućem periodu.

U uslovima deregulacije i pojave liberalizovanog tržišta električne energije, ulaganje u nove proizvodne kapacitete je prepušteno mehanizmima tržišta, dok planiranje prenosne mreže se usmerava u domen planiranja sistemskih usluga.

U većini zemalja OECD-a, liberalizacija tržišta električne energije je prisutna već više od decenije. U tom periodu ulaganja u elektroenergetsku infrastrukturu su bila na veoma niskom nivou (razlozi su u prvom redu vezani za konkurenciju i nesavršenost tržišta) što je uslovalo značajno sniženje neophodne rezerve snage u proizvodnim kapacitetima (slika 6), ali i eksploataciju mreže na granici tehničkih mogućnosti (uslovljeno pojavom nezavisnih proizvođača i uvođenjem prava potrošača da bira isporučioaca energije). Povećana međudržavna razmena električne energije ublažila je problem rezerve ali je stvorila „uska grla” kako unutar pojedinih EES-a, tako i na interkonektivnim vodovima, što u perspektivi može postati limitirajući faktor, pa su potrebni dodatni naponi da se na adekvatan način uskladi dinamika tržišta sa dinamikom investiranja u infrastrukturu EES-a.



Slika 6. Granične vrednosti rezerve snage u proizvodnim kapacitetima

Što se tiče zemalja u razvoju, njihovi EES su većinom nepovezani, pa prisutni problemi u funkcionisanju EES-a zahtevaju brži razvoj prenosne infrastrukture, kako na nivou zemlje, tako i na regionalnom nivou.

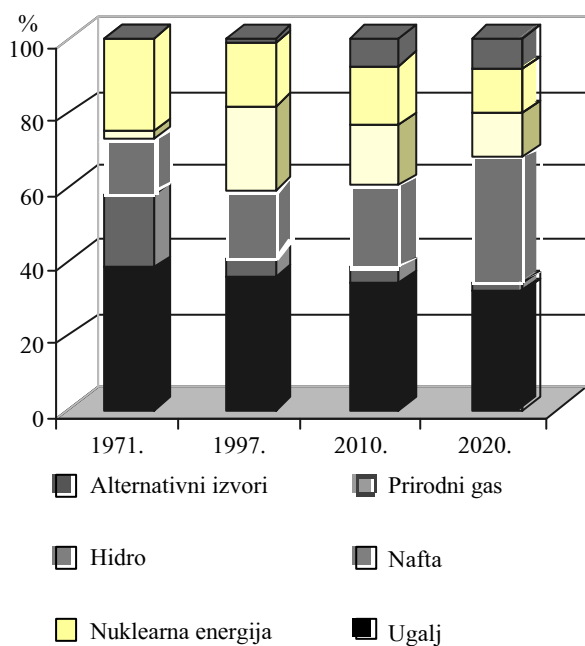
3. PROMENE KOJE DEFINIŠU BUDUĆI RAZVOJ

Započete reforme elektroenergetskog sektora u budućem periodu zahvatiće većinu zemalja sveta. Za razvoj EES-a do 2020. godine najveći značaj imaju:

- promena strukture proizvodnih kapaciteta;
- uspostavljanje liberalizovanog tržišta električne energije;

3.1. Struktura proizvodnih kapaciteta do 2020. godine

Međunarodna agencija za energiju (IEA) izradila je referentni scenario za zemlje OECD-a, prema kojem se u periodu do 2020. godine predviđa izmena strukture proizvodnih kapaciteta, uz značajno povećanje korišćenja prirodnog gasa za proizvodnju električne energije (slika 7). Tako udeo proizvodnje električne energije iz prirodnog gasa u ukupnoj proizvodnji električne energije raste od 14 % u 2000. godini na 31 % u 2020. godini. U istom periodu udeo proizvodnje bazirane na korišćenju fosilnih goriva ostaje nepromenjen i na visokom nivou, dok se smanjuje udeo hidroenergije (sa 15 % u 2000. godini na 12 % u 2020. godini), kao i udeo proizvodnje bazirane na korišćenju drugih goriva (nafta, nuklearno gorivo). Takođe, udeo proizvodnje obnovljivih izvora energije raste i u 2020. godini treba da dostigne 4 % u ukupnoj proizvodnji (u 2000. godini taj udeo je 2 %). Međutim, oni i dalje nemaju veliki značaj u elektroenergetskom bilansu zemalja OECD.



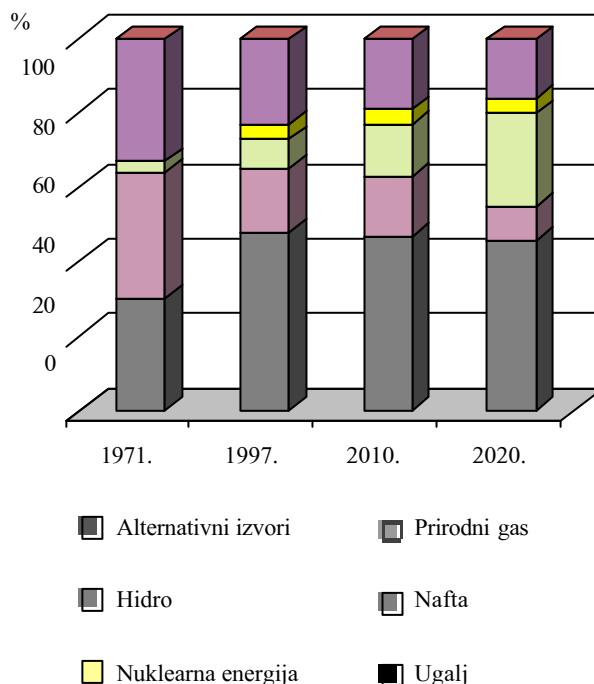
Slika 7. Proizvodnja energije (TWh) u zemljama OECD-a

Sve veće korišćenje prirodnog gasa za proizvodnju električne energije uslovljava i široku primenu gasnih turbina za proizvodnju električne energije, što omogućuje postizanje visoke energetske, ekološke i ekonomske efikasnosti (visoka raspoloživost,

fleksibilnost u pogonu - koriste se i kao bazni i kao vršni izvori - relativno niske investicije koje ih čine pogodnim za privatni kapital i kratki rokovi izgradnje, smanjena emisija zagađivača i dr.). U zemljama Evropske unije takođe je prisutan porast korišćenja prirodnog gasa i gasnih turbina za proizvodnju električne energije (prema planu njihov udeo u ukupno instalisanoj snazi treba da dostigne 40 % u 2020. godini)

Očigledna promena strukture goriva koje će se koristiti za proizvodnju električne energije u zemljama OECD-a u budućem periodu, nužno je praćena primenom novih tehnologija u proizvodnji električne energije, što će doprineti značajnom povećanju energetske efikasnosti i promeni morfologije samih EES-a. Pored tradicionalne centralizovane proizvodnje (koja će se i dalje obavljati na elektranama velike snage sa velikim jediničnim snagama agregata), u EES će se pojaviti i disperzovana proizvodnja iz agregata male i srednje snage, koja će imati značajnu ulogu u kolebljivim tržišnim uslovima.

Prema scenariju koji je napravila IEA, za Zemlje u razvoju takođe je predviđeno značajno povećanje udela prirodnog gasa u proizvodnji električne energije u periodu do 2020. godine (od 13 % u 2000. na 23 % u 2020. godini) (slika 8). Takođe se predviđa sporiji rast udela energije bazirane na korišćenju fosilnih goriva, dok se udeo ostalih energenata (uključujući obnovljive izvore) zadržava na praktično istom (marginalnom) nivou, dok udeo hidroenergije opada.



Slika 8. Proizvodnja energije (TWh) u Zemljama u razvoju

U grupi Zemalja u razvoju posebnu specifičnost predstavlja Kina, čija proizvodnja električne energije po veličini dostiže 1/3 proizvodnje svih ostalih Zemalja u razvoju. Međutim, scenario IEA za Zemlje u razvoju ne važi za EES Kine, jer se njena proizvodnja električne energije bazira na korišćenju fosilnih goriva. Prema planu u periodu do 2020. godine, udeo proizvodnje električne energije iz termoelektrana koje koriste fosilna goriva treba da iznosi oko 70 %, udeo hidroenergije oko 25 %, dok samo 5 % otpada na proizvodnju iz ostalih energenata.

Može se zaključiti da je u Zemljama u razvoju promena strukture goriva u periodu do 2020. godine, manje izražena nego u zemljama OECD-a, što znači da se morfologija proizvodnih kapaciteta neće bitno promeniti. Ovo ne važi kad je reč o prenosnoj infrastrukturi koja treba da radi u dramatično izmenjenom okruženju, liberalizovanog tržišta električne energije.

3.2. Liberalizacija tržišta električne energije

Na kraju prošlog milenijuma, u zemljama OECD-a već je delovalo otvoreno tržište električne energije i izvršena deregulacija EES-a, pri čemu je tradicionalno vertikalno integrisan sistem (u državnom ili privatnom vlasništvu) zamenjen sa horizontalnim (decentralizovanim) sistemom u kome se kao nezavisni akteri pojavljuju: proizvodnja, prenosni sistem, distributivni sistemi, operatori sistema, operatori tržišta i dr. Pri tome, domen proizvodnje radi u uslovima konkurencije, dok prenosna i distributivna infrastruktura ostaju prirodni monopol. Deregulacija u pojedinim EES se odvija po različitim modelima, zavisno od specifičnosti EES-a, uz brojna pozitivna i negativna iskustva. Očekuje se da će u dolazećem periodu nesavršenosti i teškoće biti savladane i da će se stvoriti regulatorno okruženje naklonjeno investiranju u elektroenergetsku infrastrukturu.

Drugim rečima početni „prelazni period“ nastao uvođenjem liberalizacije u zemljama OECD-a biće eliminisan, pa će se rad EES-a bez problema odvijati po tržišnim principima.

Na bazi promena i iskustava zemalja OECD-a, Zemlje u razvoju će pristupiti restrukturisanju njihovog elektroenergetskog sektora, imajući pri tome u vidu da električna energija ima i socijalnu dimenziju. Imajući u vidu početno stanje u ovoj oblasti u Zemljama u razvoju očekuje se da će ovaj proces dugo trajati, ali isto tako da će EES u nekim od Zemalja u razvoju do 2020.godine raditi u sličnom okruženju kao OECD zemlje.

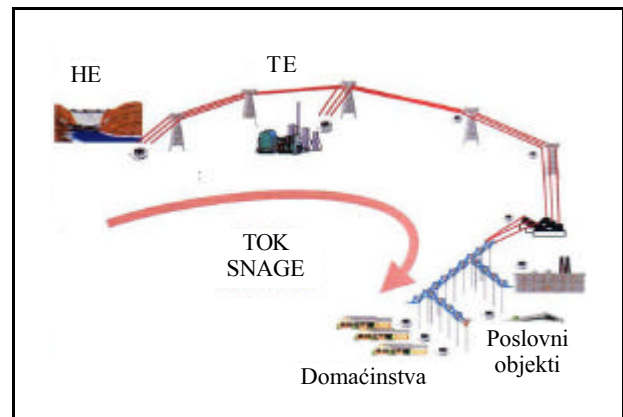
4. ELEKTROENERGETSKI SISTEMI 2020. GODINE

Osnovne karakteristike EES-a i promene koje se očekuju u elektroenergetskom sektoru u periodu do 2020.godine, poslužile su kao osnova za oblikovanje dva scenarija EES-a u 2020. godini.

Prvi scenario bi važio za EES u kojima preovlađuje centralizovana proizvodnja električne energije na elektranama velike snage sa velikim jediničnim snagama agregata, pri čemu se proizvedena energija ubacuje u interkonektivnu mrežu vrlo visokog (i visokog) napona, a zatim distribuira potrošačima. Ovaj scenario je nazvan „distributivni“ scenario („distribution“ scenario) (slika 9).

Drugi scenario se odnosi na EES u kojima se električna energija proizvodi u disperzovanim kapacitetima manje jedinične snage, u obimu 20-30 %, dok se ostatak energije obezbeđuje iz centralizovanih proizvodnih kapaciteta. Disperzovane jedinice se na odgovarajući način uključuju u mrežnu infrastrukturu - obično na distributivnu mrežu (slika 10). Ovaj scenario je nazvan „mešoviti“ scenario („mix-tribution“ scenario).

Oba scenarija se mogu primeniti bilo na nivou zemlje ili regiona, pa i šire, a moguće ih je primeniti oba u isto vreme na širim geografskim područjima.

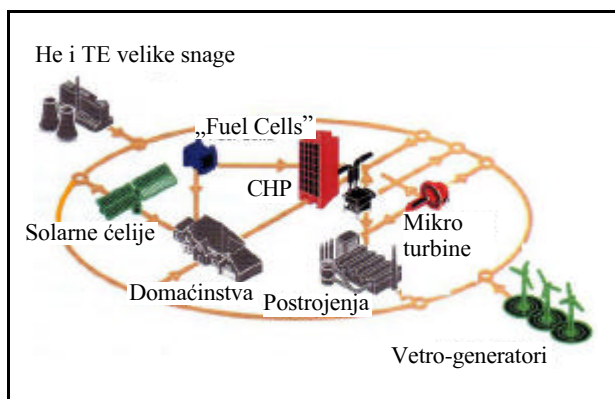


Slika 9. „Distributivni“ scenario

Da bi se dobila celovita slika o viziji EES-a u 2020. godini neophodno je razmotriti specifičnosti svakog od scenarija.

4.1. „Disributivni“ scenario

Kao što je napred rečeno, za ovaj scenario karakteristična je centralizovana struktura proizvodnih kapaciteta. Iz toga proizilazi da se morfologija i uloga budućih EES-a neće mnogo promeniti u odnosu



Slika 10. „Mešoviti” scenario

na situaciju koja danas postoji. Međutim, zbog nastalih promena u okruženju, promeniće se performanse EES-a, tehnički nivo i operativne karakteristike. „Vizionari” smatraju da će EES-i za koje je tipičan „distributivni” scenario u 2020. godini, imati sledeće karakteristike:

– Budući EES-i biće ekološki prihvatljivi sa niskim uticajem na životnu sredinu. Ovakve karakteristike će se postići promenom strukture goriva, odnosno uvođenjem prirodnog gasa u proizvodnju električne energije (gasna postrojenja imaju manji štetan uticaj na okolinu zahvaljujući nižoj emisiji, nego postrojenja koja koriste fosilna goriva) i značajnim povećanjem udela obnovljivih izvora energije. U domenu prenosne i distributivne infrastrukture doći će do uvišestručavanja broja vodova na istim koridorima, ali će oni biti prihvatljivi sa aspekta životne sredine zahvaljujući primeni novih materijala sa malim vizuelnim, elektromagnetnim i audio uticajem i atraktivnom dizajnu.

– Budući EES-i će obezbediti snabdevanje potrošača električnom energijom prema standardima koji garantuju visok kvalitet života korisnika. To ujedno znači, da će prenosna infrastruktura imati ključnu ulogu kako bi se premostila prostorna i vremenska neuravnoteženost između proizvodnje i potrošnje. S obzirom na porast potrošnje u budućem periodu, biće i dalje aktuelni prenosi velikih snaga, pa će nacionalne mreže rasti po značaju i kapacitetu. Istovremeno, porašće značaj (i povećaće se prenosna moć) interkonektivnih vodova koji povezuju nacionalne mreže u određenom regionu. Npr., neki regioni u svetu već danas iskazuju potrebu da se kapacitet međunarodnih interkonektivnih vodova poveća na nivo 10-20 % od instalisanih proizvodnih kapaciteta u sistemu.

– EES-i će obezbediti širok pristup električnoj energiji u svim delovima sveta. Imajući u vidu da ekonomski uslovi u pojedinim regionima predstavljaju ograničavajući faktor, to se planira modularni

pristup uz primenu onih rešenja koja zahtevaju niske investicione troškove i niske troškove održavanja. U većini Zemalja u razvoju, razvoj elektroenergetske infrastrukture se finansira iz nacionalnih državnih budžeta (keš ili iz zajmova za koje garantuje Vlada). Ovaj vid finansiranja u budućem periodu ustupice mesto stranom kapitalu, uz stvaranje političkih zakonodavnih i regulativnih okvira i ekonomske stabilnosti u regionu. U tome će uzeti učešće međunarodne, nacionalne institucije, banke, proizvođači opreme i dr. Na taj način obezbedice se snabdevanje potrošača električnom energijom, bez negativnog uticaja na nacionalni budžet.

– Budući EES treba da obezbedi pouzdanost snabdevanja potrošača i visok kvalitet električne energije. U sledećih 20 godina doći će do suštinskih poboljšanja u ovom pogledu. Slabosti, koje danas poseduje, otklonice se primenom „inteligentne opreme” u prenosnoj infrastrukturi, koja će povećati pouzdanost napajanja i zadovoljiti individualne zahteve u pogledu kvaliteta različitih kategorija potrošača. Uspostaviće se korelacija između isporučioća električne energije i potrošača preko komercijalnih ugovora, na transparentan način.

– EES u budućem periodu radiće uz široku primenu i podršku informacionih tehnologija koje će omogućiti upravljanje složenim EES velikih dimenzija. Na ovaj način, povećaće se energetska efikasnost EES-a. Oprema visokog napona u značajnoj meri će postati „inteligentna” i imaće mogućnost da minimizira električna i mehanička naprezanja, a monitoring i dijagnostika biće integrisani deo upravljanja sistemom i osnov za optimizaciju rada sistema u realnom vremenu. Time će se obezbediti maksimalna raspoloživost sistema za optimalno korišćenje izvora, i dinamičke karakteristike koje obezbeđuju sigurnost rada EES-a. Primenom informacionih tehnologija, obezbedice se automatska komunikacija u sistemu i poboljšanje njegove performanse, kao i integralna baza podataka koja će pokriti sve aspekte rada EES-a, počev od planiranja, projektovanja, do eksploatacije i upravljanja (posebno značajne za rad u realnom vremenu).

– EES 2020.godine obezbedice visoke parametre koji se odnose na energetska efikasnost u proizvodnji, prenosu, distribuciji i korišćenju električne energije. U dostizanju tih ciljeva, ključnu ulogu će imati nove tehnologije i novi materijali. Pre svega, uvođenjem novih tehnologija povećaće se efikasnost pri konverziji energije goriva u električnu energiju, a primenom novih materijala obezbediti oprema sa niskim specifičnim gubicima. Razviće se nova filozofija u projektovanju, bazirana na modularnom principu, koja će u znatnoj meri skratiti vreme izrade projekta. Primena informacionih tehnolo-

gija omogućit će sniženje tehnološkog utroška električne energije na putu od izvora do potrošača.

– Budući EES-i biće fleksibilni i kontrolabilni tako da će omogućiti brzu, tačnu i efikasnu isporuku električne energije, prema zahtevima tržišta. U domenu proizvodnje, hidrogeneratori će bez obzira na snagu i dalje imati potrebnu fleksibilnost, kao i izvori, koji koriste gas (ako eventualno budu uključeni u EES), koji će pokrivati varijacije potrošnje (odnosno prilagođavati se zahtevima tržišta). U prenosnu infrastrukturu, posebno na međunarodnim interkonektivnim vodovima, ugrađiće se veliki broj inteligentnih kontrolera snage (FACTS i HVDC) što će poboljšati kako statičke, tako i dinamičke performanse sistema i obezbediti prilagođavanje EES dinamičkim „ćudima” tržišta (prevazilazeći pri tome neka od postojećih ograničenja). I sistem zaštite će se zasnivati na primeni „inteligentnih” tehnologija, čime će se u značajnoj meri uticati na podizanje sigurnosti EES. Na „inteligentnim” sistemima će se bazirati i komunikacija između potrošača, isporučioaca energije i operatora, čime će se obezbediti bolja fleksibilnost kako u maksimalnim, tako i u minimalnim režimima.

Najzad, treba pomenuti da danas nije moguće sagledati koje će funkcije i aplikacije u EES-u omogućiti mobilna i internet tehnologija čiji je razvoj u punom zamahu. Može se ipak očekivati da će to doprineti još većoj fleksibilnosti i kontrolabilnosti EES-a i poboljšanju svih njihovih performansi.

4.1. „Mešoviti” scenario

Kao što je napred rečeno, ovaj scenario je tipičan za EES u kojima je udeo disperzovane proizvodnje u ukupnoj proizvodnji električne energije 20-30 % (ostatak se obezbeđuje iz proizvodnih jedinica priključenih na mrežu visokog i vrlo visokog napona). Disperzovani izvori omogućuju proizvodnju električne energije i/ili toplote, locirani su bliže potrošačkim centrima i zahvaljujući nižim investicionim troškovima, pogodni su za priključak na distributivne mreže. Otuda se može reći, da disperzovana proizvodnja unosi značajne novine pre svega na distributivnom nivou, koje će obuhvatiti sve oblasti, počev od planiranja projektovanja, eksploatacije do upravljanja.

Posmatrano sa aspekta sistema, novine će obuhvatiti sledeće aspekte:

– Fleksibilnost (da bi se omogućila integracija disperzovane proizvodnje u EES-u).

Većina današnjih distributivnih sistema, (uključujući i one u kojima postoje disperzovani proizvođači električne energije) nemaju ugrađene adekvatne uređaje za daljinsku kontrolu u realnom vremenu.

Razlog tome što su oni prvobitno bili predviđeni za rad u radijalnim mrežama (prenos u jednom smeru). Međutim, u novim uslovima rada zahteva se veća fleksibilnost tj. operativni uslovi nameću potrebu prenosa u oba smera (između generatora i mreže). To znači da je u takvim mrežama nužno obezbediti automatizovanu daljinsku kontrolu u realnom vremenu i ugraditi kontrolere snage, čime će se osigurati zahtevane performanse novih EES-a. Postojeća filozofija upravljanja u distributivnim mrežama fundamentalno će se izmeniti. Veliku ulogu u tome mogu odigrati Internet tehnologije.

– Operativnost (da bi se ostvarili maksimalni efekti u EES-u, pri promeni angažovanja elektrana).

Disperzovani proizvodni kapaciteti mogu (pri upravljanju u realnom vremenu) obezbediti prateće usluge u EES-u (koje se odnose na obezbeđenje nivoa napona, upravljanje reaktivnim snagama, regulaciju frekvence, obezbeđenje rezerve) posebno u režimima ispada nekih agregata u visokonaponskoj mreži. Takođe, u slučaju raspada EES-a, brzim uključanjem tih kapaciteta moguće je obezbediti ostrvski rad sistema i smanjiti štete od neisporučene energije.

U svakom slučaju, rad distributivnih sistema koji sadrže disperzovane proizvodne kapacitete je kompleksniji nego kod tradicionalnih distributivnih mreža, što nameće potrebu temeljnih preispitivanja postojeće prakse, kako u domenu planiranja tako i u domenu upravljanja.

Rad u uslovima konkuretskog tržišta nametnuće oštre zahteve u ovom scenariju u pogledu raspoloživosti nekih disperzovanih kapaciteta (kao što su npr. vetrogeneratori, solarna energija), što nameće opreznost i potrebu razrade pravila za njihovu integraciju u EES.

– Kvalitet električne energije uz respektovanje visokih standarda kvaliteta.

Primena informacionih tehnologija u oblasti planiranja, projektovanja i upravljanja EES-a, obezbediće visoku raspoloživost, pouzdanost isporuke električne energije i kvalitet električne energije u okviru visokih standarda. Pri tome, treba imati u vidu da intermitirajući proizvodni kapaciteti (npr. vetrogeneratori) imaju značajan uticaj na nivo napona u mrežama na koje su priključeni, pa prema tome i na kvalitet isporučene energije. Otuda se u ovom scenariju predviđa ugradnja „inteligentnih” kontrolera u periodu do 2020. godine.

– Sigurnost EES-a (uz obezbeđenje uslova za bezbedan rad opreme i stanovništva). Uključenje disperzionih proizvodnih kapaciteta u distributivnu mrežu nameće potrebu da se obrati pažnja na bezbednost opreme i stanovništva. Naime, veća agregacija disperzionih kapaciteta dovodi do povećanja nivoa snaga kratkog spoja. Otuda je potrebno izvršiti

pojačanje mreže da bi se nivo snaga kratkog spoja uskladilo sa snagom komutacione opreme. U domenu održavanja, povećan broj disperzovanih kapaciteta nameće potrebu definisanja novih pravila, da bi se osigurala bezbednost personala.

Što se tiče dela EES-a sa centralizovanom proizvodnjom, njegove karakteristike su date detaljno u poglavlju 4.1. Treba, međutim, naglasiti da će prema „mešovitom” scenariju prenos energije kroz mreže visokog napona biti redukovana, zahvaljujući priključku disperzovanih proizvodnih kapaciteta bliže potrošačkim centrima. To će nametnuti nove zahteve pri planiranju, projektovanju i eksploataciji celokupne prenosne infrastrukture, pri čemu će veoma značajan uticaj imati interakcija između mreže i disperzovanih proizvodnih jedinica.

5. ZAKLJUČCI

Vizionari EES-a 2020.godine na kraju su zaključili:

– *Električna energija i u 21. veku ostaje energija budućnosti.*

– *Istorijski razvoj EES-a u prošlom veku karakterisan je nizom koraka: EES-a su se razvijali od lokalnih, preko regionalnih do nacionalnih EES-a. U poslednjoj deceniji prošlog veka EES-i su prešli nacionalne granice.*

– *Upućujući pogled 20 godina unapred, očekuje se da se ovaj trend nastavi, posebno u zemljama u razvoju („distributivni” scenario EES-a). U zemljama OECD-a, pored tradicionalne centralizovane proizvodnje električne energije na elektranama veli-*

ke snage, uvodi se disperzovana proizvodnja („mešoviti” scenario).

– *Primena novih informacionih tehnologija i materijala omogućiće da za dolazeće generacije ovi scenariji ne budu nepremostivi tehnički izazov.*

– *Najveće promene koje donosi vreme koje je pred nama odnose se na promenu strukture goriva i favorizovanje prirodnog gasa kao energenta budućnosti i pojava liberalizovanog tržišta električne energije.*

Prenos i distribucija električne energije predstavljace i dalje važnu kariku i u novom tržišnom okruženju.

Na kraju sledi završna poruka koju je gospodin M. Chamia uputio elektroprivrednim kompanijama i svima nama:

„MOLIM VAS, BUDITE SPREMNI ZA PROMENE, JER BUDUĆNOST NIJE VIŠE ONO ŠTO JE NEKAD BILA”.

6. LITERATURA

- [1] W.Patterson, „TRANSFORMING ELECTRICITY”, The Royal Institute of International Affairs/Earthscan, London.
- [2] PANEL ON ELECTRICAL POWER SYSTEMS 2020, August 2002, CIGRE, Paris.
- [3] DIRECTIVE 96/92 EC ON INTERNAL ELECTRICITY MARKET, 1996.
- [4] CONSOLIDATED VERSION OF THE PROPOSAL FOR A DIRECTIVE AMENDING DIRECTIVE 96/92 EC ON COMMON REGULATIONS FOR THE ELECTRICITY MARKET, Europe energy, No 599, March, 2002.

Rad je primljen u uredništvo 11. 06. 2003. godine



Maja S. Turković (1972) rođena je u Beogradu, gde je završila osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirala je na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Nakon diplomiranja radila je u Elektrotehničkom institutu u Beogradu, a zatim u Ministarstvu rudarstva i energetike Srbije. Kao istraživač učestvovala je u realizaciji 6 studija, a autor je 22 stručna rada, od čega su 2 objavljena u zbornicima radova međunarodnih konferencija.



Emilija Radojčić-Turković (1938) rođena je u Rajcu (Čačak). Osnovnu školu i gimnaziju završila je u Čačku. Diplomirala je i magistrirala na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu.

Svoj radni vek započela je 1961. godine u IRCE - Energoinvest u Sarajevu, zatim nastavila u Elektrotehničkoj školi „Nikola Tesla” u Beogradu, a od 1964. godine radi u Institutu „Nikola Tesla” u kome je prošla sva istraživačka stručna zvanja. Trenutno je direktor Centra za Elektroenergetske sisteme u Institutu „Nikola Tesla”. Direktor je nacionalnog programa za energetske efikasnost u prenosu i distribuciji električne energije u Ministarstvu za nauku tehnologiju i razvoj Srbije.

U toku svog istraživačkog rada bavila se problemima elektroenergetskih sistema iz domena planiranja i eksploatacije. Bila je rukovodilac više projekata i studija (80). Autor ili koautor je 5 radova objavljenih u međunarodnim časopisima i više desetina radova objavljenih u nacionalnim časopisima i prezentiranim na nacionalnim i međunarodnim konferencijama.

Tomislav Sajdl, Goran Jakupović,
Ninel Čukalevski, Sovjetka Krstonijević, Suzana Cvetičanin,
Milorad Pavlović i Zoran Nedeljković

Aplikacije za proračun mogućnosti opterećenja transformatora i dalekovoda

Stručni rad
UDK: 621.314.21; 621.315.24; 621.315.1

Rezime:

U ovom radu su opisane dve računarske aplikacije koje je razvio Institut „Mihajlo Pupin” za potrebe „Elektroistoka”. Aplikacije služe za proračun mogućih opterećenja transformatora i dalekovoda, na osnovu merenih struja i uslova okoline i na osnovu procenjenih opterećenja i uslova okoline u budućnosti. Trenutni i istorijski podaci se preuzimaju sa SCADA sistema. Na osnovu savremenih standardnih termičkih modela transformatora i dalekovoda, programi estimiraju kritične parametre - u ovom slučaju temperature - i na taj način pomažu operatoru da racionalno koristi raspoložive resurse. Postoji i moduo koji proračunava starenje transformatora. U radu su prikazani modeli, delovi softverske implementacije, kao i osnovni modovi upotrebe programâ.

Ključne reči: modelovanje, transformator, dalekovod, mogućnosti preopterećenja, SCADA, upravljanje EES

Abstract:

APPLICATIONS FOR CALCULATIONS OF POSSIBLE TRANSFORMER AND TRANSMISSION LINE LOAD

This paper describes two software applications developed by the „Mihajlo Pupin” Institute for the needs of „Elektroistok”. The applications are used for computation of possible transformer and transmission line loads/overloads, on the basis of measuring currents and environmental conditions and on the basis of future estimated loads and environmental conditions. Actual and historical data are taken from the SCADA system. On the basis of advanced standard transformer and transmission line thermal models, the programs estimate critical parameters - in this case temperatures - thereby allowing the operator to rationally use the available resources. There is also a program feature for computing the transformer aging. The paper presents models, describes software implementation details, as well as the basic modes of program use.

Key words: modelling, transformer, transmission line, overload possibility, SCADA, electric power system control

1. UVOD

Porast kompleksnosti, kako u tehničkom, tako i u komercijalnom poslovanju elektroprivrede poslednjih godina zahteva što potpunije iskorišćenje postojeće elektroenergetske opreme, posebno one krupne,

kakvi su transformatori i dalekovodi. Dosadašnji pristup eksploataciji je bio dominantno planerski, što ostavlja značajnu rezervu za unapređenje.

Aplikacije za proračun mogućnosti opterećenja transformatora i dalekovoda su deo sistema operativnog upravljanja prenosnom mrežom EES. Ove

Tomislav Sajdl, dipl. ing.; mr Goran Jakupović, dipl. ing.; dr Ninel Čukalevski, dipl. ing.; mr Sovjetka Krstonijević, dipl. ing.; Suzana Cvetičanin, dipl. ing. – Institut „Mihajlo Pupin”, Beograd, Volgina 15
Milorad Pavlović, dipl. ing.; Zoran Nedeljković, dipl. ing. – „EPS” JP „Elektroistok”, 11 000 Beograd, Kneza Miloša 11

aplikacije se realizuju od strane saradnika Instituta „Mihajlo Pupin”, kao deo projekta realizacije elektroenergetskih aplikacija i baze istorijskih podataka novih MRC-eva Elektroistoka.

Aplikacija PMOT (proračun mogućnosti opterećenja transformatora) omogućava sledeću funkcionalnost:

- proračun relevantnih temperatura transformatora u narednim satima, na bazi tekućih i prognoziranih struja i temperatura ambijenta
- proračun mogućih struja opterećenja, a na bazi tekućeg opterećenja, očekivanih temperatura ambijenta i prisutnih ograničenja
- proračun starenja transformatora za realizovane uslove rada.

Slično aplikaciji PMOT, aplikacija PMODV (proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda) omogućava:

- proračun temperature dalekovoda u narednim satima, na bazi tekućih i prognoziranih struja i varijabli ambijenta (temperatura, vetar, sunčevo zračenje, itd.);
- proračun mogućih struja opterećenja, a na bazi očekivanih varijabli ambijenta i prisutnih ograničenja;
- proračun mogućeg vremena terećenja za definisane struje, definisane uslove ambijenta i prisutnih ograničenja.

Modeli su zasnovani na standardnom termičkom modelu transformatora (IEC 354) [1], odnosno dalekovoda (Cigre Electra) [3, 4].

U radu su izloženi matematički modeli na kojima se zasnivaju proračuni, tehnička realizacija u vidu softverskih rešenja. Prikazani su načini rada napravljenih aplikacija. Takođe je skrenuta pažnja na to u kojim okolnostima je moguće iskoristiti prednosti koje ove aplikacije pružaju.

Detaljniji opis ovih aplikacija je dat u odgovarajućoj funkcionalnoj dizajn specifikaciji [5].

2. APLIKACIJA ZA PRORAČUN MOGUĆNOSTI OPTEREĆENJA TRANSFORMATORA (PMOT)

Osnovni problem pri eksploataciji transformatora je procena njegovog mogućeg opterećenja. Kao i kod svih električnih mašina, mogućnosti njegovog opterećenja su definisane termičkim ograničenjima. Ulje i izolacija namotaja menjaju svoja izolaciona svojstva na visokim temperaturama. Pogotovo je problematična izolacija namotaja, jer se može trajno oštetiti, a ne može se lako zameniti. Usled povišene temperature ova izolacija ubrzano stari, čime se skraćuje projektovani radni vek transformatora.

S obzirom na složenost izraza kojima se mogu odrediti vrednosti kritičnih veličina transformatora, nameće se ideja automatizacije. Izbor modela je olakšan time što postoji termički model transformatora koji je prihvaćen kao standard (model IEC 354) [1]. Štaviše, u nekoliko radova (kao npr. u [2]) je pokazano da je model verifikovan u praksi, i da se pokazao uspešan.

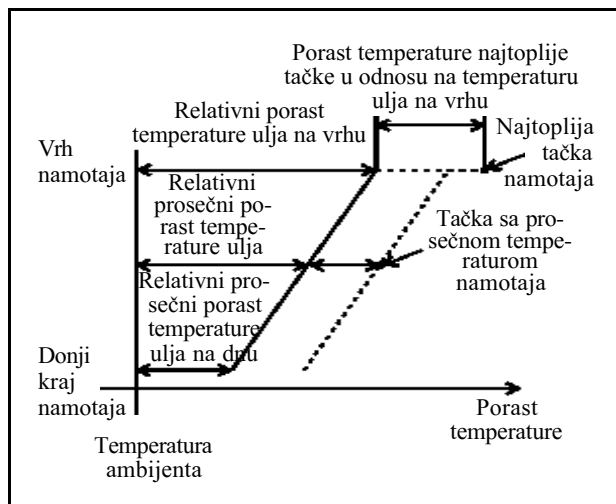
Po tom modelu, u eksploataciji postoje tri postavljena ograničenja: vrednost struje, vrednost temperature ulja na vrhu suda (engl. *top oil*) i vrednost temperature najtoplije tačke namotaja (engl. *hot-spot*). Definisani su i standardni režimi rada: uobičajeno ciklično terećenje (engl. *normal cycling loading*), dugotrajno havarijsko ciklično terećenje (engl. *long-time emergency cyclic loading*) i kratkotrajno havarijsko terećenje (engl. *short-time emergency loading*). Zavisno od režima rada su vrednosti propisanih maksimuma. Takođe, ove propisane vrednosti zavise i od veličine transformatora. Ograničavajuće temperature su date kao apsolutne vrednosti (jer fizičke promene u dielektricima zavise od apsolutne temperature), a maksimalna struja je definisana u relativnim jedinicama.

Ideja automatizacije je ta da program sam preuzima ulazne podatke sa SCADA sistema, da preko odgovarajućeg korisničkog interfejsa omogući unos pretpostavljenih (prognoziranih) vrednosti, te da na osnovu matematičkog modela odredi vrednosti kritičnih veličina u budućnosti. Osim ograničenja pomenutim veličinama koje definiše IEC propis, postoji i problem starenja transformatora (posledica ireverzibilne promene strukture izolacije provodnika usled temperature). Postoji aproksimativni izraz kojim se može odrediti relativno starenje transformatora, zavisno od temperature najtoplije tačke provodnika. To je bitna veličina kojom operater može sagledati trajne posledice preopterećivanja i odlučivati u skladu sa njom.

3. MATEMATIČKI MODEL ZAGREVANJA TRANSFORMATORA

Način rada programa postaje jasniji kada se sagleda matematički model na kojem se proračun zasniva.

Model koji se koristi pretpostavlja da temperatura ulja linearno raste od početka do vrha namotaja. Takođe se pretpostavlja da je najtoplija tačka namotaja, tačka na vrhu namotaja. Porast temperature ulja se opisuje linearnim modelom prvog reda, a usled male vremenske konstante namotaja, smatra se da se promena temperature najtoplije tačke namotaja u odnosu na temperaturu ulja dešava trenutno. Na slici 1 se vidi termički dijagram transformatora.



Slika 1. Termički dijagram transformatora

Proračun se zasniva na izračunavanju temperature ulja na vrhu, za slučaj hevisajdovske promene struje. Pošto smo rekli da se ono tretira modelom prvog reda, može se napisati:

$$Dq_{to}(t) = (Dq_{to\infty} - Dq_{to0}) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

to jest, relativni porast temperature u nekom trenutku t se može izračunati ako znamo trenutnu vrednost relativnog porasta (Dq_{to0}) i odgovarajuću vrednost u ustaljenom stanju ($Dq_{to\infty}$), kao i vremensku konstantu (τ).

Trenutnu temperaturu ulja možemo dobiti merenjem, pa zatim od nje oduzeti temperaturu ambijenta, čime dobijamo potreban relativni porast temperature. Potrebno je izračunati vrednost relativne temperature u ustaljenom stanju. Tu temperaturu možemo odrediti znajući koliko se transformator greje u nominalnom režimu, i ukoliko poznajemo odnos gubitaka u bakru i gubitaka u gvožđu. Tako možemo napisati izraz:

$$Dq_{to} = Dq_{or} \frac{1 + RK^2}{1 + R} \quad (2)$$

gde je R odnos gubitaka u bakru i gvožđu pri nominalnom opterećenju, a K je odnos struje terećenja i nominalne struje. Parametar x koji se u izrazu javlja kao eksponent je konstrukcioni parametar. On služi za korekciju našeg idealizovanog modela. (Njegova vrednost je između 0,8 i 1 i definisana je u IEC standardu tablično, zavisno od načina hlađenja i veličine transformatora.) Na kraju je ostao parametar Dq_{or} , koji predstavlja relativni porast temperature ulja pri nominalnom opterećenju. Mi ćemo ovu vrednost smatrati parametrom modela.

Gornji izraz važi za uljne transformatore sa prirodnom cirkulacijom ulja (ON tip), dok je izraz za transformatore sa forsiranom cirkulacijom ulja (OF tip)

$$Dq_{to} = Dq_{or} \frac{1 + RK^2}{1 + R} + 2 Dq_{imr} + Dq_{br} K^y \quad (3)$$

Veličina Dq_{imr} je prosečan porast temperature ulja (videti sliku 1) a veličina Dq_{br} porast temperature ulja na dnu namotaja.

Sledi korak izračunavanja temperature najtoplije tačke. Razlika u odnosu na temperaturu ulja na vrhu je definisana izrazom

$$Dq_{to-hs} = Hg_r K^x \quad (4)$$

Kada se na ovako izračunatu relativnu temperaturu ulja i relativnu temperaturu najtoplije tačke doda temperatura ambijenta, onda dobijamo apsolutne temperature.

Ostaje još da se definiše izraz za relativno starenje transformatora. Pod pojmom relativno starenje mislimo na to koliko je transformator „potrošio“ od svog očekivanog radnog veka. Pri celodnevnom nominalnom opterećenju, transformator bi trebalo da potroši jedan dan svog očekivanog radnog veka. Ako je bio preopterećen, on je potrošio više. IEC standard definiše empirijski izraz koji glasi

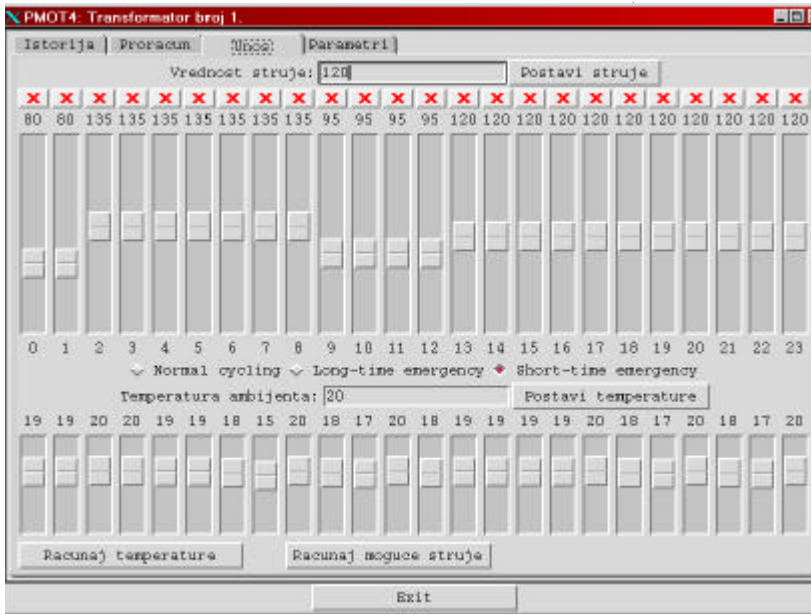
$$V = 2^{(q_{hs}-98)/6} = 1,122 462^{(q_{hs}-98)} \quad (5)$$

Vrednost 98 predstavlja zapravo nominalnu temperaturu najtoplije tačke. Pošto je u pitanju eksponencijalna funkcija, vidimo da se radni vek drastično skraćuje porastom temperature. Porast temperature za samo 6 stepeni ubrzava starenje dva puta. (Srećom, vidimo i da se starenje drastično usporava snižavanjem temperature.)

4. TEHNI^KA REALIZACIJA APLIKACIJE PMOT

Aplikacija je napravljena kao deo softverskog paketa Energo Warehouse (baza istorijskih podataka), za potrebe „Elektroistoka“. Aplikacija je napravljena za Linux, i može se izvršavati na verziji Red Hat 5.2 ili novijoj. Napisana je u programskim jezicima C++ i Tcl/Tk. Program realizuje direktnu vezu sa VIEW2 SCADA-om, i sa ostalim aplikacijama iz Energo Warehouse sistema.

Sa SCADA sistema aplikacija PMOT preuzima podatke o trenutnom stanju transformatora - temperaturu ulja (ili temperaturu najtoplije tačke, ako transformator ima odgovarajući senzor), temperaturu okoline i vrednost struje transformatora. Ukoliko iz



Slika 2. Ekran za unos prognoziranih vrednosti i iniciranje proračuna

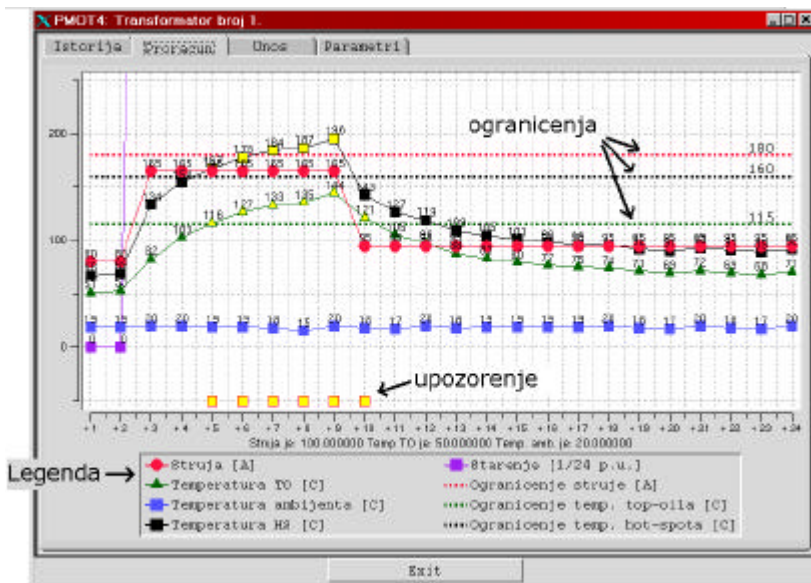
neko razloga ne može da dođe do odgovarajućih podataka (usled kvara senzora, prekida komunikacije ili jednostavno zbog nepostojanja merenja), aplikacija će tražiti od korisnika da nedostajuće podatke unese. Podatke koji sa stanovišta proračuna predstavljaju parametre, program dobija iz sistema Energo Warehouse.

U aplikaciji postoji odgovarajući deo za unos pretpostavljenih vrednosti struja i temperatura okoline (slika 2), koji su potrebni za proračun. Na tom ekranu se i inicira proračun. Radi lakšeg korišćenja

za vrlo kratak vremenski period (najviše do nekoliko časova).

5. AKVIZICIJA PODATAKA O STARENJU TRANSFORMATORA

Vrlo je korisno imati podatke o tome koliko je ukupno relativno starenje pojedinog transformatora. (U 3 odeljku je prikazan način proračuna.) Takve podatke ne može da obezbedi aplikacija PMOT, jer se ona aktivira po volji korisnika, a nama je potrebno 24-časovno praćenje podataka o temperaturi. Takođe, PMOT vrši proračun na osnovu pretpostavljenih vrednosti, dok je stvarno starenje potrebno izračunati na osnovu stvarnih vrednosti temperatura namotaja. Pošto postoji druga aplikacija u Energo Warehouse paketu koja permanentno prati sve merene veličine transformatora (kao i veličine sabirnica i dalekovoda), ona je iskorištena za tu funkciju. U njoj je implementiran isti algoritam za proračun starenja kao i u PMOT aplikaciji, te ona zajedno sa ostalim podacima arhivira i starenje transformatora za periode od po 15 minuta, a omogućuje izdavanje odgovarajućih izveštaja korisnicima, zajedno sa ostalim istorijskim podacima o transformatoru.



Slika 3. Prozor koji prikazuje grafik sa rezultatima proračuna programa PMOT

6. APLIKACIJA ZA PRORAČUN MOGUĆNOSTI OPTEREĆENJA DALEKOVODA (PMDV)

Analogno problemima proračuna mogućnosti opterećenja transformatora, postoje problemi određivanja termičkog stanja dalekovoda. Analogija koja postoji je u tome da su u pitanju termičke pojave izazvane pre svega Džulovim gubicima, kao i to da ne postoji direktno merenje temperature provodnika, već se ta vrednost mora estimirati. Osnovni problem preopterećenja dalekovoda je topljenje zaštitne masti užeta i to topljenje dovodi do ubrzanog propadanja dalekovoda. Međutim, problem zagrevanja dalekovoda je dosta složen. Iako je transformator sam po sebi složenije konstrukcije, na sam transformator mnogo manje utiču spoljni činioci kao što su npr. vetar i sunčevo zračenje. Dalje, usled nelinearnosti izraza, jedini mogući put za proračun je numerička analiza.

7. MATEMATIČKI MODEL ZAGREVANJA DALEKOVODA

Ovde ćemo ukratko prikazati osnovne elemente proračuna, jer je ceo proračun izrazito složen.

Osnovni izraz na kojem se zasniva proračun je jednačina zagrevanja za infinitezimalni porast temperature provodnika:

$$mc_p \frac{dT_{av}}{dt} = P_j + P_S + P_M - P_r - P_c. \quad (5)$$

Dakle, brzina porasta prosečne temperature provodnika (dT_{av}/dt) zavisi od termičkog kapaciteta provodnika (c_p) i od snage kojom se provodnik greje, odnosno hladi. Imamo pet elemenata sa desne strane izraza: zagrevanje usled Džulovih gubitaka zbog prolaska struje kroz provodnik (P_j), zagrevanje usled sunčevog zračenja (P_S), zagrevanje usled magnetnih gubitaka u provodniku (P_M , njega zanemarujemo), hlađenje provodnika zračenjem u okolinu (P_r) i hlađenje provodnika konvekcijom (P_c).

Uvažava se da termički kapacitet zavisi od temperature (linearni porast), i da otpornost provodnika takođe raste linearno. Zagrevanje usled sunčevog zračenja nije problem izračunati ako se zna jačina sunčevog zračenja. Izraz za hlađenje zračenjem se lako dobija u skladu sa Štefan-Bolcmanovim zakonom.

Osnovni problem u proračunu predstavlja izračunavanje odvođenja toplote konvekcijom. Proračun ove vrednosti zahteva određivanje Nuseltovog broja, jer je osnovni izraz

$$P_c = \rho l_f (T_S - T_a) Nu. \quad (6)$$

(U ovom izrazu l_f predstavlja termičku provodnost vazduha, T_S temperaturu površine provodnika, T_a temperaturu okoline, a Nu Nuseltov broj). Problem sa određivanjem Nuseltovog broja je to što je njegova zavisnost od ulaznih parametara veoma nelinearna i što izrazito zavisi od brzine vetra. Pošto ni u literaturi ne postoji opšta saglasnost o tome koji je algoritam za njegovo izračunavanje najtačniji, za brzine vetra iznad 0,5 m/s, Nuseltov broj se izračunava na tri različita načina, i onda se odabira najveća izračunata vrednost. Da bismo dodatno ilustrovali složenost ovog izračunavanja, napomenimo samo to da u proračun ulazi čak sedam raznorodnih parametara, od kojih je jedan i nadmorska visina (potrebna radi računanja gustine vazduha).

8. TEHNIČKA REALIZACIJA APLIKACIJE PMDV

Ako izuzmemo detalj da je u ovoj aplikaciji neophodna numerička integracija da bi se izveo proračun, aplikacija po strukturi dosta nalikuje aplikaciji PMOT. I ovde je neophodno preuzeti podatke koje se mere sa SCADA sistema, a omogućiti korisniku unos podataka čije merenje nije automatizovano i unos onih podataka koji se prognoziraju. Međutim, postoji još jedna bitna razlika u odnosu na PMOT:

Slika 4. Izlazni ekran programa za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda

pošto se temperatura provodnika ne meri direktno, a njena početna vrednost nam je potrebna radi proračuna, mi je moramo estimirati. Estimaciju vršimo tako što primenjujemo proračun od neke tačke u prošlosti, počevši od neke pretpostavljene vrednosti temperature provodnika, i znajući da će usled fizike procesa proračun konvergirati ka tačnoj vrednosti za nekoliko vremenskih konstanti zagrevanja dalekovoda.

Pošto se jedan dalekovod proteže desetinama kilometara, logično je da ne vladaju isti uslovi na svim delovima njegove trase. Zato se dalekovod deli na deonice, i deonica je osnova proračuna. Korisnik bira deonicu, unosi potrebne podatke i zadaje proračun. Kada se zahteva proračun za ceo dalekovod, aplikacija izvodi proračun za sve njegove deonice, i onda prikazuje koja je deonica kritična.

Aplikacija ima tri moda rada. Prvi je kada se na osnovu zadate struje i vremenskog intervala računa temperatura provodnika. Drugi je kada se zada maksimalna temperatura provodnika i kada se zada vrednost struje, pa se proračunava u kojem trenutku (tj. za koje vreme) će se zadata temperatura dosegnuti. Treći mod je kada se zadaju temperatura i vreme, a program proračunava sa kojom će vrednošću struje dalekovod dostići tu temperaturu u zadatom trenutku.

Korisnički interfejs je napravljen tako da liči na aplikaciju PMOT. Isto kao u njoj, i ovde se rezultat proračuna prikazuje na kombinovanom grafiku (slika 4).

9. ZAKLJUČAK

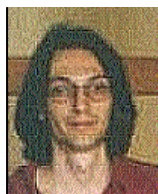
Aplikacije za proračun mogućnosti opterećenja transformatora i dalekovoda su deo paketa aplikacija napravljenih od strane Instituta „Mihajlo Pupin” za potrebe „Elektroistoka”. Aplikacije su napravljene da maksimalno automatizuju proračune mogućnosti opterećenja, direktnom vezom sa SCADA sistemom i sa ostalim aplikacijama paketa Energo Warehouse. Naravno, upotrebljivost ovih aplikacija di-

rektno zavisi od kvaliteta ulaznih podataka, tj. od parametara koji opisuju modele. Ovo je posebno bitno za dalekovode, jer su kod njih parametri promenljivi u vremenu (kao što je npr. koeficijent emisije toplote). Korišćenjem ovih aplikacija se mogu ostvariti značajne uštede u toku eksploatacije, posebno u havarijskim režimima kada je moguće obezbediti rad sa manjim sigurnosnim marginama bez bojazni od dodatnih otkaza.

10. LITERATURA

- [1] LOADING GUIDE FOR OIL-IMMERSED POWER TRANSFORMERS (IEC 354, 1991), Ženeva, 1991.
- [2] G. Swift, T. Molinski, R. Bray, R. Menzeis, A FUNDAMENTAL APPROACH TO TRANSFORMER THERMAL MODELING - PART II: FIELD VERIFICATION (IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 16, br. 2 april 2001).
- [3] THE THERMAL BEHAVIOUR OF OVERHEAD CONDUCTORS, SECTION 1 AND 2: MATHEMATICAL MODEL FOR EVALUATION OF CONDUCTOR TEMPERATURE IN THE STEADY STATE AND THE APPLICATION THEREOF (ELECTRA br. 144, oktobar 1992).
- [4] THE THERMAL BEHAVIOUR OF OVERHEAD CONDUCTORS, SECTION 3: MATHEMATICAL MODEL FOR EVALUATION OF CONDUCTOR TEMPERATURE IN THE UNSTEADY STATE (ELECTRA br. 174, oktobar 1997).
- [5] Institut „Mihajlo Pupin” - „IMP-Automatika” ELEKTROENERGETSKE APLIKACIJE I BAZA ISTORIJSKIH PODATAKA NOVOG MRC-A, FUNKCIONALNA DIZAJN-SPECIFIKACIJA (F100, Rev. 3, 5. jun 2000).
- [6] N. Čukalevski, B. Tomašević BAZA ISTORIJSKIH PODATAKA I EE APLIKACIJE MREŽNO-REGIONALNOG CENTRA UPRAVLJANJA, 25. savetovanje JUKO CIGRE, Herceg-Novi 21-24. maj 2002.

Rad je primljen u uredništvo 03. 06. 2003. godine



Tomislav Sajdl je rođen 1976. godine u Beloj Crkvi u Banatu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Elektrotehnički fakultet u Beogradu je upisao 1994. godine, a diplomirao je 2000. godine, na Energetskom odseku, na smeru „Energetski pretvarači i pogoni”. Postdiplomske studije je upisao iste godine na smeru „Upravljanje sistemima”. Neposredno posle završenog fakulteta zaposlio se u Institutu „Mihajlo Pupin”, u Odeljenju za upravljanje elektroenergetskim sistemima, gde je radio do marta 2003. godine. Trenutno radi u beogradskom predstavništvu britanske firme „Community Mesh”. Autor je, ili koautor 6 radova izloženih na konferencijama u zemlji.



Goran Jakupović je rođen 1971. godine u Beogradu. Diplomirao je 1995. godine na odseku za elektroniku, telekomunikacije i automatiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Magistrirao je 2003. godine na istom fakultetu, na smeru za Upravljanje sistemima.

Od septembra 1995. godine, kao stipendista Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije radi u odeljenju za inteligentne sisteme, laboratorije za Automatiku, Instituta „Mihajlo Pupin”. U januaru 1996. godine prelazi u Odeljenje za upravljanje elektroenergetskim sistemima laboratorije za Automatiku, Instituta „Mihajlo Pupin”, gde radi i danas.

Radi na razvoju softverskih rešenja iz oblasti upravljanja elektroenergetskim sistemima. Istraživački i razvojni rad mu je, uglavnom, vezan za razvoj, simulacionu analizu i softversku implementaciju upravljačkih algoritama u elektroenergetskim sistemima, u okviru SCADA/EMS sistema. Takođe bavi i problemima primene inteligentnih algoritama upravljanja zasnovanih na fazi logici i neutralnim mrežama.

Član je studijskog komiteta 39 (Upravljanje i eksploatacija EES) JUKO CIGRE.

Autor je, ili koautor 27 radova izloženih na konferencijama u zemlji i inostranstvu.



Ninel Ćukalevski je rođen 1949. godine u Beogradu, diplomirao je 1972. godine, magistrirao 1983. godine i doktorirao 1990. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu., na problemima upravljanja elektroenergetskim sistemima. Od 1973. do 1976. godine je radio u Elektrotehničkoj školi „Nikola Tesla” u Beogradu, a od 1977. godine neprekidno je zaposlen u Institutu „Mihajlo Pupin” u RJ Automatika, gde je 1986. godine formirao Odeljenje za upravljanje EES, čiji je rukovodilac od tada. Do sada je radio na brojnim problemima primene informacionih tehnologija (IT) u elektroenergetici, kao i na problemima analize, planiranja i upravljanja savremenim elektroenergetskim sistemima (EES). Njegovi sadašnji stručni interesi se nalaze u oblasti projektovanja i realizacije distribuiranih informacionih sistema, skladišta podataka (Data Warehouses) i metoda integracije aplikacija korporativnih informacionih sistema (EAI), dok se istraživački interesi nalaze u domenu analize efekata deregulacije i restrukturiranja EE sektora na upravljanje i potrebnu IT podršku.

Godine 1998. je izabran za profesora za predmet „Klijent-server sistemi” na smeru za Nove računarske tehnologije Više elektrotehničke škole u Beogradu (sa nepunim radnim vremenom). Godine 2003. izabran je u NI zvanje naučni savetnik.

Kao autor ili koautor objavio je 104 rada u zemlji i inostranstvu (od čega: 4 poglavlja u dve monografije, 7 radova u vodećim međunarodnim časopisima, 19 radova na međunarodnim konferencijama, 9 radova u domaćim časopisima i 65 radova na domaćim konferencijama) i realizovao je brojna tehnička rešenja (pre svega u domenu informacionih sistema, baza podataka i aplikativnih programskih paketa). Pored toga, učestvovao je u realizaciji (kao obrađivač i/ili rukovodilac) značajnog broja studija i projekata (više od 50) urađenih za različite naručioce u Jugoslaviji i inostranstvu, čiji su rezultati prezentovani u preko 90 dokumenata.

Od profesionalnih zaduženja, član je međunarodne organizacije IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), Power Engineering Society (PES) od 1986. godine i Computer Society od 2000. godine. Član je međunarodne radne grupe (WG39.01) za centre upravljanja EES, kao i radne grupe (WG39.03) za obuku dispečera primenom simulaciono-trežnih sistema, međunarodne organizacije CIGRE Pariz, kao i član STK-39 (Upravljanje i eksploatacija EES) JUKO CIGRE. Član je programskog odbora jugoslovenskog udruženja ETRAN.

Od profesionalnih zaduženja, član je međunarodne organizacije IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), Power Engineering Society (PES) od 1986. godine i Computer Society od 2000. godine. Član je međunarodne radne grupe (WG39.01) za centre upravljanja EES, kao i radne grupe (WG39.03) za obuku dispečera primenom simulaciono-trežnih sistema, međunarodne organizacije CIGRE Pariz, kao i član STK-39 (Upravljanje i eksploatacija EES) JUKO CIGRE. Član je programskog odbora jugoslovenskog udruženja ETRAN.

Sovjetka Krstonijević je rođena 14. 12. 1966. godine u Mostaru. Osnovnu i srednju školu, prirodno-matematičkog smera završila je u Podgorici. Diplomirala je na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu 1993. godine na Odseku za elektroniku - smer elektronika. Magistarski rad je odbranila na istom fakultetu 2001. godine, na smeru za elektroniku.

Od novembra 1993. godine do decembra 1998. godine radila je u d.d. „Teleoptik”, prvo u Odeljenju za Medicinsku opremu, a potom u delu za Automatiku. Od septembra 2001. godine radi u Institutu „Mihajlo Pupin” u Odeljenju za upravljanje elektroenergetskim sistemima.

Suzana Cvetičanin je rođena u Beogradu, gde je završila osnovnu školu i Matematičku gimnaziju. Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Računarska tehnika i informatika, diplomirala je 1998. godine. Od septembra 2000. godine radi u Institutu Mihajlo Pupin u Odeljenju za upravljanje elektroenergetskim sistemima. Koautor je 5 radova izloženih na konferencijama u zemlji.



Zoran Nedeljković je rođen 1954. godine u Beogradu. Elektrotehničku školu je završio u Beogradu. Diplomirao je 1980. godine na Elektrotehničkom fakultetu, Energetski odsek Univerziteta u Beogradu.

Radni vek je započeo 1982. godine u Elektroprivredi Srbije, odnosno Javnom preduzeću za prenos električne energije „Elektroistok” na poslovima prenaponske zaštite i koordinacije izolacije. Aktivno je učestvovao na definisanju tehničkih parametara visokonaponske opreme i postrojenja za prenos električne energije. Ima dvadesetogodišnje iskustvo na polju planiranja održavanja postrojenja nazivnog napona 110 kV do 400 kV. Učestvovao je u razvoju tehničkog informacionog sistema Elektroistoka od njegovog osnivanja. Učestvovao je u definisanju i izradi dela tehničkih preporuka i upustava iz oblasti visokonaponske opreme i postrojenja u elektroprivredi Srbije. Aktivno je učestvovao na poslovima rekonstrukcije i gradnje objekata prenosa elektroprivrede Srbije.

Član je studijskih komiteta broj 33 – Prenaponi i koordinacija izolacije, broj. 13 – Rasklopni aparati, JUKO CIGRE, član nadzornog odbora JUKO CIGRE. Član je različitih stručnih komisija Saveznog zavoda za standarde, recenzent stručnih radova i studija. Koautor je više referata na domaćim i inostranim simpozijumima i časopisu Elektroprivreda.

Nova organizacija studijskih komiteta JUKO CIGRE 2003.

Oznaka	Naziv i kratak pregled rada
	Obrtne električne mašine
A1	Ekonomija, projektovanje, izgradnja, ispitivanja, ponašanje i materijali za turbogeneratore, hidrogeneratore, nekonvencionalne mašine i velike motore.
	Transformatori
A2	Projektovanje, izgradnja, proizvodnja i rad svih vrsta energetskih transformatora, uključujući industrijske, DC pretvarače i transformatore za prebacivanje faze i sve tipove prigušnica i komponenti transformatora (potporni izolatori, regulacione preklopke...)
	Visokonaponska oprema
A3	Teorija, projektovanje, izgradnja i rad svih uređaja za uključenje i isključenje, prekidanje i ograničenje struja, odvodnika prenapona, kondenzatora, sabirnica i izolatora za opremu i mernih transformatora.
	Kablovi
B1	Teorija, projektovanje, primena, proizvodnja, postavljanje, servisiranje, ispitivanja, eksploatacija, održavanje i dijagnostičke tehnike za zemaljske i podmorske AC i DC izolacione kablovske sisteme, za primenu u zemlji i ispod morske površine.
	Nadzemni vodovi
B2	Projektovanje, proučavanje električnih i mehaničkih karakteristika i performansi, izbor trase, izgradnja, eksploatacija, vek trajanja, održavanje, obnavljanje, povećanje naponskog nivoa, poboljšanje karakteristika nadzemnih vodova i njihovih komponenti, uključujući: provodnike, zemljovodnu užad, izolatore, stubove, temelje i sisteme uzemljenja.
	Pstrojenja
B3	Projektovanje, izgradnja, održavanje i tekući postupci upravljanja postrojenjima i električnim instalacijama u elektranama, izuzimajući generatore.
	HVDC i energetska elektronika
B4	Ekonomija, primena, aspekti planiranja, projektovanje, zaštita, upravljanje, izgradnja, i ispitivanja HVDC veza i pridružene opreme. Energetska elektronika za AC sisteme i poboljšanje kvaliteta napajanja (PQ) i savremena energetska elektronika.
	Zaštita i automatizacija
B5	Principi, projektovanje, primena i rukovođenje zaštitom energetskog sistema; upravljanje postrojenjima; automatizacija; monitoring i registrovanje - podrazumevajući unutrašnje i spoljašnje komunikacije, merne sisteme postrojenja i interfejs za daljinsko upravljanje i monitoring.
	Ekonomija i razvoj EES
C1	Ekonomija i metode za analize za razvoj i istraživanja u oblasti EES: metode i alati za analize statičkih i dinamičkih stanja, problematika razvoja, planiranje i metode u različitom kontekstu, strategije upravljanja resursima.
	Upravljanje i eksploatacija EES
C2	Aspekti tehničkih i ljudskih resursa rada EES: metode i alati za upravljanje frekvencijom, naponom i opremom; operativno planiranje i utvrđivanje sigurnosti u realnom vremenu; upravljanje u slučaju kvara i obnove sistema; vrednovanje performansi; funkcije upravljačkih centara i obuka operatera.
	Performanse sistema zaštite životne sredine
C3	Identifikacija i utvrđivanje uticaja EES na životnu sredinu i metode vrednovanja i upravljanja uticajem životne sredine u kojoj se nalazi oprema.
	Tehničke performanse EES
C4	Metode i alati za analizu EES u sledećim oblastima: performanse kvaliteta napajanja, EMC, karakteristike atmosferskog pražnjenja i njegova interakcija sa sistemom, koordinacija izolacije.
	Tržište električne energije i deregulacija
C5	Analiza različitih pristupa organizacije elektroprivrede: različite strukture tržišta i proizvodnje, odgovarajuće tehnike i alati, aspekti regulative.
	Distributivni sistemi i distribuirana proizvodnja
C6	Utvrđivanje tehničkog uticaja i zahteva koje postavljaju nove distributivne karakteristike na strukturu i rad sistema: značaj razvoja distribuirane proizvodnje, primena uređaja za skladištenje energije, upravljanje potrošnjom; elektrifikacija seoskih naselja.
	Materijali i savremene tehnologije
D1	Monitoring i vrednovanje novih i postojećih materijala za tehnologije u oblasti elektrotehnike, dijagnostičke tehnike i odgovarajuća znanja i savremene tehnologije koje imaju potencijalni uticaj na sistem u srednjeročnom i dugoročnom periodu.
	Informacioni sistemi i telekomunikacije
D2	Principi, ekonomija, projektovanje, razvoj, karakteristike, rad i održavanje telekomunikacionih i informacionih mreža i servisa za elektroprivredu: monitoring i odgovarajuće tehnologije.

*Predsednik JUKO CIGRE
Radomir Naumov*