

Godina
Year

LIV

Jul-Septembar
July-September

Broj
No. 3

Sadržaj

Strana
Page

Content

Sadržaj	Strana	Content
<i>Radomir M. Naumov</i>		
UMESTO UVODA	3	EDITORIAL
<i>Zoran P. Stajić, Dragan S. Petrović, Dušan Arnautović</i>		
ODREĐIVANJE OBLIKA FUNKCIJE POGONSKOG MOMENTA STARTNOG GENERATORA NA OSNOVU SNIMAKA SINHRONOG POKRETANJA	5	DETERMINATION OF FORM OF DRIVING TORQUE FUNCTION OF STARTING GENERATOR ON THE BASIS OF SYNCHRONOUS STARTING RECORDS
<i>Aleksandar Bojković, Đorđe Jovanović</i>		
PREVENTIVNA KONTROLA I ODRŽAVANJE REGULACIONIH SKLOPKI ENERGETSKIH TRANSFORMATORA	11	PREVENTIVE CONTROL AND MAINTENANCE OF REGULATING SWITCHES ON POWER TRANSFORMERS
<i>Saša Stojković, Žarko Stevanović</i>		
RAZVOJ PREKIDNOG ELEMENTA SF₆ PREKIDAČA – GASODINAMIČKI ASPEKT	17	DEVELOPMENT OF SF₆ INTERRUPTER - GAS FLOW ANALYSIS
<i>Jasna Dragosavac</i>		
FUZZY REGULATOR POBUDE SINHRONOG GENERATORA	23	FUZZY LOGIC CONTROLLERS OF SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION
<i>Dragan Filipović</i>		
SNIMANJE BRZOG NAPONSKOG TRANZIJENTA U TEČNIM IZOLATORIMA TOMOGRAFSKIM POSTUPKOM	30	RECORDING OF FAST VOLTAGE TRANSIENT IN LIQUID INSULATORS BY MEANS OF TOMOGRAPHIC PROCEDURE
<i>Aleksandra Popovac-Damljanović, Stojan Nikolajević, Zvonko Mitrović</i>		
METODE TRANSPOZICIJE METALNIH PLAŠTEVA VISOKONAPONSKIH KABLOVA	36	TRANSPOSITION OF METAL JACKETS OF HIGH-VOLTAGE CABLES
<i>Vlastimir Tasić, Sreten Pavlović</i>		
MOGUĆNOST SANACIJE DALEKOVODA 110 kV STOLAC – BILEĆA Na armirano - betonskim stubovima tipa „Šperac”	40	POSSIBILITY OF REFURBISHMENT OF 110 kV TRANSMISSION LINE STOLAC – BILEĆA ON REINFORCED-CONCRETE POLES TYPE "ŠPERAC"
<i>Čedomir Spaić, Dobrivoje Dinić, Radoslav Bulatović</i>		
IZBOR ŠEME NAPAJANJA SOPSTVENE POTROŠNJE TRANSFORMATORSKIH STANICA 400/X kV/kV I 220/X kV/kV SA TERCIJERA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA VIŠIH NAZNAČENIH NAPONA 420 kV I 245 kV	45	SELECTION OF SUPPLY SCHEME OF OWN DEMAND OF 400/X kV/kV AND 220/X kV/kV TRANSFORMER STATIONS FROM POWER TRANSFORMER TERTIARY AT HIGHER NOMINAL VOLTAGES 420 kV AND 245 kV
<i>Zlatan Stojković, Milan S. Savić</i>		
DINAMIČKI MODEL UDARNIH KARAKTERISTIKA UZEMLJIVAČA DALEKOVODNIH STUBOVA	50	DYNAMIC MODEL OF TRANSMISSION LINE TOWER GROUNDING CHARACTERISTICS
<i>Duško Bekut, Branislav Orešković, Milica Mirković</i>		
PROCENA MESTA KVARA U SREDNJENAPONSKIM MREŽAMA	57	ESTIMATE OF FAULTY PLACE IN VOLTAGE NETWORKS
<i>Milan Paroški</i>		
ANALIZA TELEKOMUNIKACIONIH PUTEVA NA PODRUČJU VOJVODINE	63	ANALYSIS OF TELECOMMUNICATION ROUTES IN THE REGION OF VOIVODINA
<i>Vladimir Katić</i>		
ISTRAŽIVANJE VIŠIH HARMONIKA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI - KRATAK PREGLED I ISKUSTVA	72	RESEARCH OF HARMONICS IN THE DISTRIBUTION NETWORK – SHORT REVIEW AND EXPERIENCES
<i>Slobodan Milić</i>		
POVEĆANJE PROIZVODNJE I SNAGE HIDROELEKTRANA I NJIHOV UTICAJ NA ENERGETSKE EFEKTE U SISTEMU	80	INCREASED HYDRO POWER PLANT PRODUCTION AND CAPACITY AND THEIR IMPACT ON ENERGY EFFECTS IN THE SYSTEM
<i>Vladimir Janković</i>		
STATIČKA ANALIZA NAPONSKE STABILNOSTI	87	STATIC ANALYSIS OF VOLTAGE STABILITY
<i>Aca Vučković, Nikola Nikolić, Marijana Sučević-Tasić, Nataša Blagojević, Slobodan Ružić</i>		

**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.jugel.com; E-mail: jugel@sezampro.yu

**V.D. DIREKTORA I GLAVNOG I ODGOVORNOG UREDNIKA
ACTING DIRECTOR AND CHIEF EDITOR**

Branislav A. Bošković, dipl. ing.

**IZDAVAČKI SAVET
PUBLISHING COUNCIL**

*Branislav A. Bošković, dipl. ing., vršilac dužnosti predsednika,
Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd;
Dr Duško Tubić, dipl. ing., član, JP "Elektroprivreda Srbije", Beograd;
Dr Slobodan Ružić, dipl. ing., član, JP "Elektroprivreda Srbije", Beograd;
Mr Rade Drča, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd;
Dr Radomir Milović, dipl. ing., član, "Elektroprivreda Crne Gore" AD, Nikšić;
Branko Kotri, dipl. ing., "Elektroprivreda Crne Gore" AD, Nikšić.*

**REDAKCIONI ODBOR
EDITORIAL BOARD**

*Dr Duško Tubić, dipl. ing., predsednik, JP "Elektroprivreda Srbije", Beograd;
Dr Petar Vukelja, dipl. ing., zamenik predsednika, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd;
Prof. dr Dragomir Jelovac, član, Elektrotehnički fakultet, Podgorica;
Dr Strahinja Bulajić, dipl. ing., član, "Elektroprivreda Crne Gore" AD, Nikšić;
Nikola Jablan, dipl. ing., član, "Elektroprivreda Crne Gore" AD, Nikšić;
Prof. dr Miroslav Benišek, član, Mašinski fakultet, Beograd;
Prof. dr Branislav Đorđević, član, Građevinski fakultet, Beograd;
Prof. dr Jovan Nahman, član, Elektrotehnički fakultet, Beograd;
Prof. dr Nikola Rajaković, član, Elektrotehnički fakultet, Beograd;
Prof. dr Dragan Popović, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd;
Radomir Naumov, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd;
Dr Borislav Perković, dipl. ing., član, JP "Elektroprivreda Srbije", Beograd;
Dr Gordan Tanić, dipl. ek., član, JP "Elektroprivreda Srbije", Beograd;
Mr Milan Gavrilović, dipl. ing., član, JP "Elektroprivreda Srbije", Beograd;
Gojko Lončar, dipl. ing., član, JP "Elektroprivreda Srbije", Beograd;
Dragomir Marković, dipl. ing., "EPS" - JP TE "Nikola Tesla", Obrenovac;
Ljubo Mačić, dipl. ing., član, JP "Elektroprivreda Srbije", Beograd;
Srećko Milić, dipl. ing., član, "EPS" - JP "Elektroistok", Beograd;
Dragoljub Popović, dipl. ing., član, JP "Elektroprivreda Srbije", Beograd;
Mr Radmilo Ivanković, član;
Momčilo Gojgić, dipl. prav., član, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd;
Lela Lončar, dipl. filolog, član, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd.*

**TEHNIČKI UREDNIK
TECHNICAL EDITOR**

Jovo Todorović

**LEKTOR
LINGUISTIC REVIEW**

Lela Lončar

**TEHNIČKI CRTAČ
MAPS AND GRAPHICS**

Milanka Pejović

Časopis "Elektroprivreda" izlazi kvartalno.
The "Elektroprivreda" journal is issued quarterly.

Časopis "Elektroprivreda" se izdaje u 2001. godini uz finansijsku pomoć
Saveznog sekretarijata za razvoj i nauku.

The "Elektroprivreda" journal is published in 2001 with financial support of
the Federal Secretariat for Development and Science.

Štampa: "Grmeč" AD - "Privredni pregled", Beograd, Maršala Birjuzova 3

PRINTED BY: "Grmeč LTD" - "Economic Review", Beograd, Maršala Birjuzova 3

TIRAŽ: 1 000 primeraka

CIRCULATION: 1,000 copies

Umesto uvoda

Ove godine pada niz okruglih godišnjica vezanih za strukovno delovanje elektroenergetičara u svetu i kod nas.

*Pre osamdeset godina je u Parizu održana Prva međunarodna konferencija za velike električne mreže (Conférence Internationale des **Grand Réseaux Electriques**) - **CIGRE**. Od tog dana do danas elektroenergetičari i drugi stručnjaci zainteresovani za velike električne sisteme neprekidno u okviru **CIGRE** razmenjuju iskustva i znanja, delujući kroz studijske komitete (čiji su članovi vrhunski svetski eksperti), na konferencijama, simpozijumima i drugim skupovima. Takođe je u okviru **CIGRE** pre sedamdeset godina počeo da izlazi, u stručnom svetu veoma cenjeni časopis **ELECTRA**.*

*Ove godine se obeležavaju i jubileji vezani za jugoslovenske elektroenergetičare: Jugoslovenski komitet **CIGRE** slavi pedeset godina od osnivanja i deset godina rada u današnjoj Jugoslaviji.*

Editorial

Several round anniversaries in connection with professional contribution of electrical energy experts worldwide and in our country fall this year.

*Eighty years ago the first session of the International Conference on Large High Voltage Electric Systems (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques) - **CIGRE** was held. Since then to date electrical energy experts and other experts interested in large high voltage electric systems have been continuously exchanging experience and know-how, acting through study committees (whose members are top world experts), at conferences, symposia and other gatherings. Seventy years ago, a technical journal, **ELECTRA**, highly appreciated among experts, was first issued. This year was marked by jubilees in connection with Yugoslav electrical energy experts: the Yugoslav Committee **CIGRE** celebrates fifty years of establishment and ten years of work in present Yugoslavia.*

U toku proteklog perioda JUKO CIGRE je organizovao 25 savetovanja elektroenergetičara Jugoslavije. Poslednje savetovanje je održano ove jeseni (16-20. septembar, Herceg- Novi), uz učešće oko hiljadu stručnjaka i gostiju iz Jugoslavije i Republike Srpske, na kome je javnosti prezentovano oko 170 referata iz svih oblasti rada CIGRE.

Poslednjih desetak godina smo svedoci značajnih i brzih promena u elektroenergetskom sektoru svuda u svetu. Reforme ovog sektora imaju za cilj povećanje efikasnosti poslovanja unutar elektroenergetskih sistema, kao i uvođenje načela zdrave konkurencije u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije.

Elektroprivrede u Jugoslaviji se nalaze na samom početku reformskih procesa.

Velika obaveza, zadatak i izazov studijskih komiteta i JUKO CIGRE u celini je da svoje delovanje usmere i prilagode novim uslovima, kako bi zadržali svoju vodeću ulogu na području elektroenergetike i u vremenu koje je pred nama.

Redakcija časopisa ELEKTROPRIVREDA posvećuje ovaj svoj broj nedavno održanom 25. savetovanju elektroenergetičara Jugoslavije i Republike Srpske, koje je organizovao JUKO CIGRE, objavljivanjem najzapaženijih radova na savetovanju, po izboru matičnih studijskih komiteta.

Predsednik JUKO CIGRE
Radomir M. Naumov

Beograd, 19. novembra 2001.

During the past period, JUKO CIGRE has organized 25 consultative meetings of electrical energy experts of Yugoslavia. The last meeting was held this autumn (Herceg Novi, from 16th to 20th September), with the participation of around one thousand experts and guests from Yugoslavia and the Republic of Srpska, where about 170 papers from all fields of CIGRE's works were presented in public.

For the last ten years, we have witnessed significant and rapid changes in the power sector worldwide. Reforms of this sector aim towards an increased efficiency of business activities within the electric power systems, as well as towards the introduction of the principle of sound competition in the production, transmission and distribution of electrical energy.

The Yugoslav power utilities are at the very beginning of reform processes.

It is a great obligation, task and challenge for the Study Committees and JUKO CIGRE on the whole to direct their activities and adjust them to new conditions, in order to retain their leading role in the area of electrical energy in the time to come.

The editorial office of the ELEKTROPRIVREDA journal dedicates this issue to the recently held 25th Meeting of electrical energy experts of Yugoslavia and the Republic of Srpska, organized by JUKO CIGRE, by publishing the most distinguished papers presented at the meeting, as selected by the parent study committees.

Radomir M. Naumov
President of JUKO CIGRE

Belgrade, 19th November 2001

Zoran P. Stajić,
Dragan S. Petrović, Dušan B. Arnautović

Određivanje oblika funkcije pogonskog momenta startnog generatora na osnovu snimaka sinhronog pokretanja

Rezime:

U radu je izložena ideja za približno određivanje funkcije pogonskog momenta startnog generatora pri sinhronom pokretanju sinhronih motora, koja se bazira na poređenju rezultata dobijenih modelovanjem ovog procesa na računaru sa oblicima karakterističnih veličina snimljenih u konkretnom eksperimentu. Na primeru sinhronog pokretanja u Hidroelektranama "Bajina Bašta" pokazano je da način modelovanja pogonskog momenta startnog generatora koji se gotovo redovno primenjuje u literaturi, dovodi do znatnog odstupanja karakterističnih veličina pri pokretanju od njihovih realnih vrednosti. Velika osetljivost struja statora obeju mašina koje učestvuju u pokretanju na promenu funkcije pogonskog momenta startnog generatora iskorišćena je da se dođe do oblika ove funkcije bliskog realnom. Slaganje rezultata dobijenih modelovanjem sa eksperimentalnim, koje je postignuto nakon toga, svedoči o valjanosti prikazanog pristupa i predstavlja najbolju verifikaciju izvedenih matematičkih modela.

Ključne reči: sinhrono pokretanje sinhronih motora, pogonski moment startnog generatora

Abstract:

DETERMINATION OF FORM OF DRIVING TORQUE FUNCTION OF STARTING GENERATOR ON THE BASIS OF SYNCHRONOUS STARTING RECORDS

The paper deals with the idea of approximate determination of driving torque function of starting generator during synchronous starting of synchronous machines based on comparison of results obtained by computer modelling of this process with forms of specific size recorded in a concrete experiment. On the example of synchronous starting in Hydroelectric Power Plant "Bajina Bašta" it was proved that the mode of modelling of starting generator driving torque, regularly applied in literature, causes considerable deviation of specific values from their real values. Great sensitivity of stator current of both machines to change of starting generator driving torque function was used to obtain the form of this function, which is close to the real form. Agreement of results obtained by modelling with the experiment at once, obtained after that, proves the adequacy of presented approach and represents the best verification of performed mathematical models.

Key words: synchronous starting of synchronous machines, starting generator driving torque

Dr Zoran P. Stajić – Elektronski fakultet, 18000 Niš, Beogradska 14
Prof. dr Dragan S. Petrović – Elektrotehnički fakultet, 11120 Beograd, Bulevar Kralja Aleksandra 73
Dr Dušan B. Arnautović – Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", 11060 Beograd, Koste Glavinića 8a

1. UVOD

Sinhronom pokretanju sinhronih motora ("back-to-back start") u literaturi je poklonjeno dosta pažnje, jer se radi o jednoj od najčešće korišćenih metoda za pokretanje sinhronih motora većih snaga [1]-[7]. Međutim, gotovo sve analize koje su na ovu temu radene odnosile su se uglavnom na određivanje parametara za uspešno pokretanje, dok pitanjima kvaliteta i optimizacije samog načina pokretanja nije poklanjana šira pažnja. Osnovni razlog za to je prevelika složenost procesa sinhronog pokretanja (SP), usled čega nije bilo moguće izvesti detaljne matematičke modele koji bi omogućavali ovakav tip analiza, već je nužno pribegavano brojnim aproksimacijama. Jedna od redovno uvođenih aproksimacija koja je u velikoj meri uticala na upotrebljivost formiranih matematičkih modela odnosi se na oblik funkcije pogonskog momenta startnog generatora (SG), jer se do njega ne može doći bez modelovanja turbine i kompletnog hidrosistema.

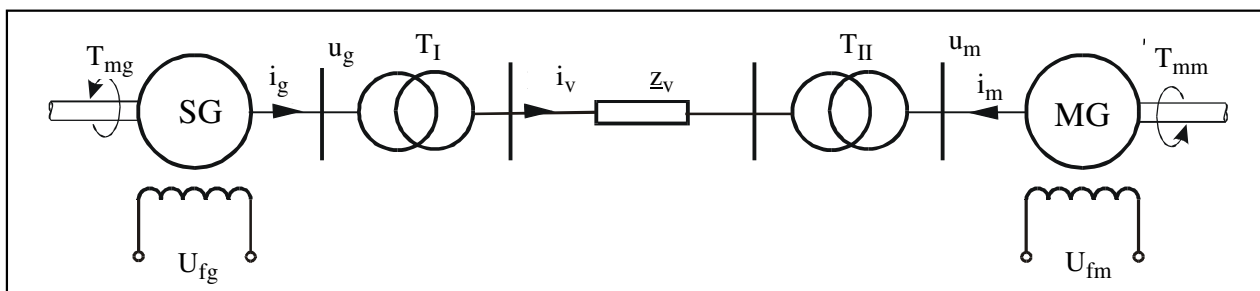
Kada je reč o modelovanju hidrosistema, može se zaključiti da se detaljni matematički modeli koji polaze od najsloženijih oblika jednačina dinamike fluida koriste jedino pri projektovanju hidroelek-

Opisani problemi dovoljno jasno govore iz kojih se razloga gotovo u svim studijama sinhronog pokretanja sinhronog motora (SPSM) funkcija pogonskog momenta SG uzima aproksimativno (čak i kada se radi o analizama proizvođača opreme za reverzibilne hidroelektrane i pumpno-akumulaciona postrojenja [7] i koliki je značaj njenog bar približnog određivanja.

Osnovna ideja na kojoj se bazira ovaj rad bila je poći od nekog od složenijih matematičkih modela, i nakon njegove primene, na konkretnom primeru SP i poređenja dobijenih rezultata sa eksperimentalnim potražiti odgovor na pitanje koliko se u uvedenim aproksimacijama greši i može li se na taj način doći do oblika funkcije pogonskog momenta SG koji više odgovara realnosti. U tu svrhu korišćen je primer SP u Hidroelektranama "Bajina Bašta".

2. MATEMATIČKI MODEL SINHRONOG POKRETANJA U HE "BAJINA BAŠTA"

Polazna osnova pri izvođenju matematičkog modela bila je jednopolna električna šema SPa u Hidroelektranama "Bajina Bašta" [7] koja se, nakon uprošćenja, može svesti na ekvivalentnu šemu



Slika 1. Uprošćena jednopolna električna šema sinhronog pokretanja sinhronih motora

trana i detaljnog ispitivanja uslova njihovog rada. Razloge za to treba tražiti u prevelikoj složenosti ovih modela, jer se zapravo radi o sistemu velikog broja parcijalnih diferencijalnih jednačina čije rešavanje zahteva veoma obimna i složena izračunavanja [8], [9]. Zavisno od svrhe istraživanja, u velikom broju analiza mogu se izvršiti i razna uprošćenja modela što često pruža mogućnost i za njegovu linearizaciju i dodatno pojednostavljuje analizu. Međutim, ovde je zbog same prirode procesa SP, gde se brzina rotora SG (turbine) menja od nule do nominalne vrednosti, isključena svaka mogućnost linearizacije modela hidrosistema.

Ni modelovanje hidrauličke turbine nije nimalo jednostavnije jer se radi o jednom izrazito nelinearnom elementu čije je ponašanje, čak i u stacionarnom stanju, opisano kao složena implicitna funkcija osnovnih parametara i promenljivih stanja turbine i hidrosistema [8]-[10].

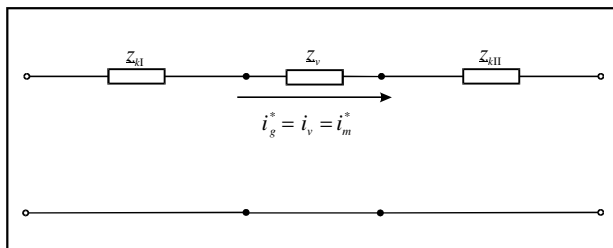
prikazanu na slici 1.

Prikazana električna šema predstavlja najopštiji slučaj SP gde su SG i MG sinhronne mašine različitih nominalnih snaga i napona tako da njihovo direktno povezivanje nije moguće. Zbog toga se povezivanje vrši preko dva transformatora (T_I i T_{II}), pomoću kojih se naponi na priključcima mašina svode na isti naponski nivo (u Hidroelektranama "Bajina Bašta" to je naponski nivo 220 kV), i odgovarajućeg veznog voda impedanse $z_v = r_v + jx_v$.

Uprkos jednostavnom izgledu električne šeme sa slike 1, nije jednostavno izvesti matematički model prikazanog sistema pogodan za numeričku integraciju. Sam način izvođenja modela je dosta komplikovan ([6]), pa ovde neće biti prikazan, već će u kratkim crtama biti izložen jedino način modelovanja karakterističnih elemenata koji je u ovom radu primenjen.

Naime, obe sinhronne mašine (SG i MG) predstavljene su dobro poznatim detaljnim matematičkim modelima [5], [6].

Električna veza između mašina modelovana je



Slika 2. Šematski prikaz električne veze mašina

na taj način što su transformatori T_I i T_{II} predstavljeni preko njihovih impedansi kratkog spoja z_{kI} i z_{kII} , a vezni vod odgovarajućom impedansom z_v (slika 2).

Mehanički (otporni) momenat MG modelovan je funkcijom oblika:

$$T_m = - (T_{mo} + c_o \cdot \omega_m^2), \quad (1)$$

dok je pogonski moment SG aproksimiran linearnom funkcijom vremena do neke ustaljene vrednosti (T_{mu}) koja treba da obezbedi da rotori obeju mašina dođu do sinhronih brzina, a zatim je smatran konstantnim, što je zapravo način modelovanja funkcije pogonskog momenta SG najčešće korišćen u literaturi [1]-[3]:

$$T_{mg} \begin{cases} \frac{T_{mu}}{t_1} \cdot t & \text{za } t < t_1 \\ T_{mu} & \text{za } t \geq t_1 \end{cases} \quad (2)$$

Tačka preloma ove krive (T_{mu} , t_1) odgovara tački kada se otvaranje otpora sprovodnog aparata turbine, koje je u praksi najčešće linearna funkcija vremena, pod uticajem ograničavača, zaustavi na konstantnoj vrednosti.

3. PARAMETRI SINHRONOG POKRETANJA U HE "BAJINA BAŠTA"

Formirani model je primenjen na primeru SP u hidroelektranama "Bajina Bašta", sa ciljem da se izvrši računarska simulacija pokretanja koje je izvedeno 20.12.1981. godine. Snimci karakterističnih veličina pri ovom pokretanju su bili dostupni, a bile su poznate i vrednosti velikog broja potrebnih parametara, dok su nepoznati parametri morali biti procenjeni. U narednom delu date su vrednosti svih parametara koji su potrebni u simulacijama.

Parametri sinhronih mašina koji su korišćeni u

Parametar:	SG	MG
Sn (MVA)	100	310
Un (kV)	15,65	11
In (kA)	3,689 14	16,270 8
n_n (o/min)	136,363 6	428,571 43
r_a (r.j.)	0,003 552 14	0,001 575 6
r_f (r.j.)	0,000 479 14	0,000 400 48
r_D (r.j.)	0,014 296	0,015 432 9
r_Q (r.j.)	0,011 805 5	0,014 858 3
x_γ (r.j.)	0,14	0,1
x_{ad} (r.j.)	0,756	1,08
$x_{f\gamma}$ (r.j.)	0,202 953	0,230 562
$x_{D\gamma}$ (r.j.)	0,096	0,087 692 3
x_{aq} (r.j.)	0,44	0,68
$x_{Q\gamma}$ (r.j.)	0,097 777 8	0,090 666 7

simulacijama prikazani su u tabeli 1 (parametri su za svaku od mašina dati u relativnim jedinicama, a svodeni su pomoću njihovih sopstvenih sistema baznih vrednosti).

Tabela 1.

Parametri mašina iz HE "Bajina Bašta"

Vrednost ukupne impedanse veze mašina korišćena u simulaciji preuzeta je iz [7]: $z_{vu} = z_{kI} + z_v + z_{kII} = (0,019 81 + j \cdot 0,507 9)$ (r.j.).

Tabulator pobude mašina podešene su na vrednosti: $U_{fg} = 1$ (r.j.), $U_{fm} = 0,8$ (r.j.).

Pri izboru parametara funkcije mehaničkog otpornog momenta MG korišćena je činjenica da kod mašina koje imaju sistem za podmazivanje rotora pomoću ulja pod pritiskom, vrednost otpornog momenta pri nominalnoj brzini obrtanja ne prelazi 5% nominalnog momenta [4], pa je uzeto $T_{mo} = 0,005$ (r.j.), $c_o = 0,035$.

Identifikacija funkcije pogonskog momenta SG (parametara T_{mu} i t_1) pri ovom eksperimentu nije mogla biti izvršena zbog nedostatka podataka. Na osnovu uobičajenog položaja ograničavača otvora sprovodnog aparata pri pokretanju određen je mogući opseg promene T_{mu} . Nekoliko numeričkih testova nakon toga bilo je dovoljno da se ustanovi koje se vrednosti parametara pri eksperimentu mogu smatrati zadovoljavajućim. Ova procena je izvršena na osnovu talasnih oblika struje statora MG, jer je u izvršenim numeričkim testovima potvrđena velika osetljivost ove struje na promenu pogonskog momenta SG. Naime, ustanovlje-

no je da se maksimum struje statora MG javlja približno u trenutku preloma funkcije pogonskog momenta SG, dok njegova vrednost direktno zavisi od maksimuma momenta T_{mu} . Na taj način procenjene su vrednosti $T_{mu} = 0,5$ (r.j.) i $t_1 = 75$ (s) koje su korišćene u simulacijama.

4. ODREĐIVANJE FUNKCIJE POGONSKOG MOMENTA STARTNOG GENERATORA

Prema osnovnoj ideji rada, do oblika funkcije pogonskog momenta SG treba doći poređenjem rezultata izvršenih simulacija na računaru sa eksperimentalnim snimcima pokretanja. Pri tome je, zbog pomenute velike osetljivosti struja statora mašina na promenu pogonskog momenta, najpogodnije najpre prikazati ove veličine. U tom smislu, na slici 3 je prikazan snimak struje statora MG snimljen u toku pomenutog eksperimenta (zbog lošeg kvaliteta originalnog snimka prilikom njegove tehničke obrade došlo je do izvesnih malih odstupanja od originala, ali ona nemaju značajniji uticaj na predstojeću analizu). Odgovarajući oblik vremenske promene struje statora MG, dobijen modelovanjem ovog eksperimenata, prikazan je na slici 4.

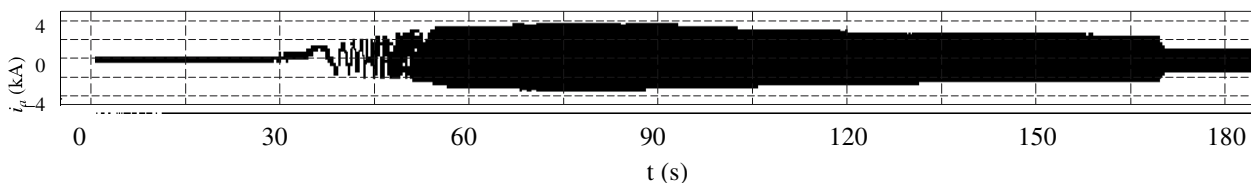
Na osnovu prikazanih grafika može se zaključiti da se struja statora MG dobijena simulacijom, u prvih 75 s menja po sličnom zakonu kao u eksperimentu, dok se nakon toga javlja značajno odstupanje. Naime, očigledno je da amplituda struje statora dobijene simulacijom (slika 4) ostaje približno

konstantna nakon 75. sekunde od početka pokretanja, što ne odgovara realnom stanju (slika 3). Prethodni zaključak nedvosmisleno ukazuje na to da način modelovanja funkcije pogonskog momenta SG pomoću izraza (2) nije zadovoljavajući. Iz razloga što amplituda struje prikazane na slici 4 "prati" promenu pogonskog momenta SG, prema obliku realne struje (slika 3) može se zaključiti da nakon dostizanja otvora sprovodnog aparata koji odgovara momentu, stvarni pogonski moment SG opada sa porastom brzine obrtanja rotora. U tom smislu, na osnovu oblika anvelope struje sa slike 3 može se uvesti polinomska aproksimacija momenta. Ako deo funkcije pogonskog momenta, koji se na osovini SG ima za vreme otvaranja otvora sprovodnog aparata ostane isti kao i u prethodnom slučaju, funkcija promene pogonskog momenta SG sada ima oblik:

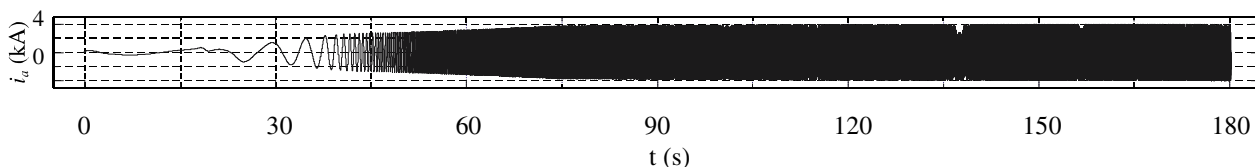
$$T_{mg} = \begin{cases} \frac{T_{mu}}{t_1} t & \text{za } t < t_1 \\ T_{mu} - c(\omega_g - \omega_{pr}) - c_1(\omega_g - \omega_{pr})^2 & \text{za } t \geq t_1 \end{cases} \quad (3)$$

gde su c i c_1 konstante, a ω_{pr} vrednost brzine obrtanja rotora SG u trenutku postizanja otvora sprovodnog aparata određenog ograničavačem.

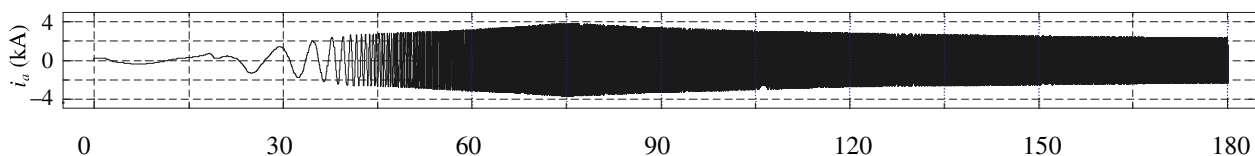
Primenom ovakvog pristupa, odnosno uvrštavanjem poslednjeg izraza u matematički model sistema umesto izraza (2) i usvajanjem prvog stepe-



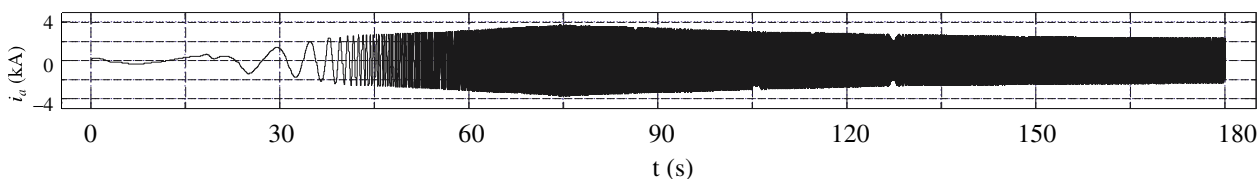
Slika 3. Vremenska promena struje statora MG (eksperiment)



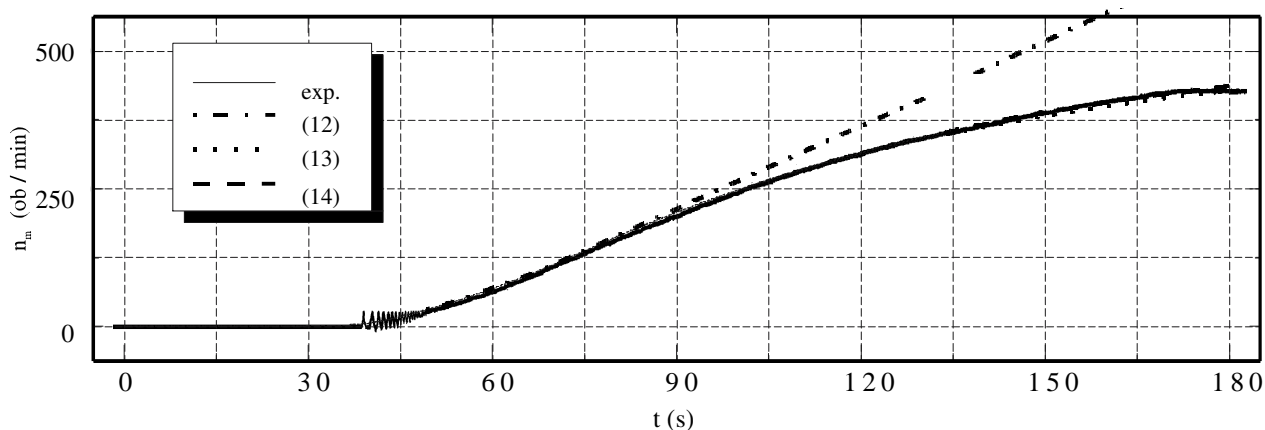
Slika 4. Vremenska promena struje statora MG ($T_{mu} = 0,5$ (r.j.), $t_1 = 75$ (s))



Slika 5. Vremenska promena struje statora MG ($T_{mu} = 0,5$ (r.j.), $t_1 = 75$ (s), $c = 0,5$)



Slika 6. Vremenska promena struje statora MG ($T_{mu} = 0,5$ (r.j.), $t_1 = 75$ (s), $c = 0,45$, $c_1 = 0,04$)



Slika 7. Vremenska promena brzina rotora MG u simulacijama i eksperimentu

na polinoma, dobija se talasni oblik struje statora MG prikazan na slici 5. Vrednosti parametara kojima je opisana funkcija pogonskog momenta SG, u ovom slučaju su: $T_{mu} = 0,5$ (r.j.), $t_1 = 75$ (s), $c = 0,5$. Vrednost koeficijenta c je odabrana na osnovu nekoliko numeričkih eksperimenata koji su izvršeni sa ciljem da se dobijeni rezultati, što je moguće više, približe realnim. Ostalim parametrima nisu promenjene vrednosti u odnosu na prethodni primer.

Na isti način određeni su i parametri funkcije pogonskog momenta SG kada je ona prikazana polinomom drugog stepena. Za $T_{mu} = 0,5$ (r.j.), $t_1 = 75$ (s), $c = 0,45$, $c_1 = 0,04$, dobijen je talasni oblik struje statora MG prikazan na slici 6.

Očigledno, sada je poklapanje struje statora sa eksperimentalnim rezultatima daleko veće. Značajnije odstupanje javlja se jedino u poslednjih desetak sekundi zaletanja (amplituda realne struje se smanjuje) i posledica je uključivanja turbinskog regulatora. Kako on nije modelovan prilikom izvođenja matematičkog modela sistema, to ovde podudaranja rezultata ne treba ni očekivati.

U prilog prethodnom razmatranju svedoči i slika 7 na kojoj je prikazano poređenje brzina rotora MG dobijenih opisanim simulacijama sa stvarnom brzinom snimljenom u eksperimentu. Sa slike se može uočiti da u slučaju modelovanja pogonskog momenta SG pomoću izraza (2), već oko osamdesete sekunde zaletanja dolazi do odstupanja brzine rotora dobijene simulacijom (kriva označena sa 12)

od stvarnog oblika, a sa vremenom ono postaje sve značajnije, što je samo još jedna potvrda da ovaj izraz ne predstavlja zadovoljavajuću aproksimaciju pogonskog momenta SG. Za razliku od toga, upotrebom izraza (3) i usvajanjem prvog stepena polinoma (linearna aproksimacija) ima se gotovo identično poklapanje simulacije i eksperimenta otprilike do 145. sekunde zaletanja, kada brzina dobijena simulacijom postaje nešto manja od realne (kriva 13). Primena, pak, drugog stepena polinoma dovodi do toga da se brzina rotora MG dobijena simulacijom odvoji od realne tek nakon 170. sekunde zaletanja (kriva 14), što odgovara realnosti, jer je u tom delu zbog uticaja turbinskog regulatora brzina u eksperimentu smanjena u odnosu na vrednosti koje bi se imale da nije došlo do njegovog uključivanja. Prikazani rezultati najbolja su potvrda prethodno uvedenih pretpostavki.

5. ZAKLJUČAK

U radu je predložen jedan efikasan metod za približno određivanje funkcije pogonskog momenta SG pri SPSM. Za formulaciju metoda koriste se snimci karakterističnih veličina pri realnom pokretanju. Metod je zasnovan na ideji da se iskoristi velika osetljivost struje statora obeju mašina koje učestvuju u pokretanju na promenu funkcije pogonskog momenta SG. U tom smislu, u radu je pokazano da se amplitude struja statora mašina prilikom pokretanja menjaju po sličnom zakonu kao i pogonski mo-

ment SG, što je omogućilo da se na osnovu anvelopa realnih struja izvrši identifikacija oblika pogonskog momenta.

Formiran je detaljan matematički model SP, a njegovom primenom na konkretnom primeru SP u Hidroelektranama "Bajina Bašta" je pokazano da način modelovanja funkcije pogonskog momenta SG koji se najčešće koristi u literaturi, ne predstavlja zadovoljavajuću aproksimaciju.

Takođe je demonstrirano da polinomska aproksimacija pogonskog momenta SG, koja je predložena u radu, predstavlja veoma dobro rešenje za modelovanje ove funkcije u studijama SPSM. Za vrednosti stepena polinoma 1 i 2 izvršena je i identifikacija ovih funkcija u slučaju pomenutog eksperimentalnog pokretanja. Njihovom primenom u modelu SP dobijeno je veoma dobro poklapanje rezultata simulacija sa eksperimentalnim rezultatima, što je najbolja potvrda da nema potrebe ići sa velikim brojem članova polinoma. Na ovaj način ne dolazi do značajnijeg komplikovanja matematičkog modela, ili produžetka vremena potrebnog za računarsku simulaciju.

Na kraju treba istaći da se na ovaj način otvara mogućnost da se, u daljim istraživanjima, bez modelovanja turbine i hidrosistema, dođe i do zavisnosti pogonskog momenta SG od zakona otvaranja sprovodnog aparata. Ovim bi se omogućilo i uključivanje modela turbinskog regulatora u model sistema.

6. LITERATURA

- [1] Concordia C., Crary S. B., Kilbourne C. E., and Weygandt C. N., SYNCHRONOUS STARTING OF GENERATOR AND MOTOR, *Transaction AIEE*, Vol. 64, September 1945.
- [2] Concordia C., Brown P. G., Miller W. J., and Wuosmaa L., SYNCHRONOUS STARTING OF MOTOR FROM GENERATOR OF SMALL CAPACITY, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-86, No. 10, pp.1215-1225, October 1967.
- [3] Shoyama E., SYNCHRONOUS STARTING OF GENERATOR-MOTOR UNITS AT PUMPED-STORAGE POWER STATIONS, *Hitachi Review*, Vol. 17, No. 1, pp. 2-7, 1968.
- [4] Fitzgerald J. P., Groscup G. W., Cooper E. A., Byerly R. T., and Whitney E. C., SYNCHRONOUS STARTING OF SENECA PUMPED STORAGE PLANT, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS*, Vol. PAS-88, No. 4, pp. 307-315, April 1969.
- [5] Hammons T. J. and Loughran J., STARTING METHODS FOR GENERATOR/MOTOR UNITS EMPLOYED IN PUMPED-STORAGE STATIONS, *Proceedings of IEE*, Vol. 117, No. 9, pp. 1829-1840 September 1970.
- [6] Stajić Z. P., TEORIJSKA I PRAKTIČNA RAZMATRANJA SINHRONOG POKRETANJA SINHRONIH MAŠINA U DVOMAŠINSKIM I TROMAŠINSKIM SISTEMIMA, Doktorska disertacija, Elektronski fakultet u Nišu, 2001.
- [7] REPORT OF ANALYSES RESULTS OF SYNCHRONOUS STARTING FOR BAJINA BAŠTA PUMPED STORAGE, TT-501016, Toshiba, October 16, 1975.
- [8] Čalović M. S., REGULACIJA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, TOM-1, Vizartis, Beograd, 1997.
- [9] Obradović D., Arnautović D., Pejović S., and Gajić A., MATHEMATICAL MODELING OF TRANSIENT REGIMES IN MULTI-UNIT HYDRO POWER PLANTS, *IAHR 14th Symposium*, Trondheim, 1988.
- [10] Campos Barros J. G., Saidel M. A., Ingram L., Westphalen M., ADJUSTABLE SPEED OPERATION OF HYDROELECTRIC TURBINE GENER-

Rad je primljen u uredništvo 11. 10. 2001. godine

Preventivna kontrola i održavanje regulacionih sklopki energetskih transformatora

Stručni rad
UDK: 621.316.7; 621.316.57; 621.314

Rezime:

U uvodnom izlaganju su prikazani razlozi primene transformatora sa regulacionim sklopkama i konsekvence koje to ima na otkaze i održavanje ovih transformatora. Zatim su prikazane konstruktivne osobenosti sklopki i transformatora koji ih poseduju, uz kratak istorijat razvoja sklopki. Nabrojane su metode preventivne kontrole transformatora i reperkusije prisustva sklopke, a glavni akcenat je na metodama preventivne kontrole sklopki (ilustrovano primerima iz prakse) i njihovom održavanju.

Ključne reči: *regulaciona sklopka, preventivna kontrola, merenje otpora, gasna hromatografija, održavanje*

Abstract:

PREVENTIVE CONTROL AND MAINTENANCE OF REGULATING SWITCHES ON POWER TRANSFORMERS

The paper deals with the ideal of application of transformers with on-load tap changers (OLTC) and consequences thereof on outages and maintenance of these transformers. Construction characteristics of OLTC and transformers are also shown, with a short background of OLTC development. Methods of preventive checkup of transformers are listed along with the repercussions of the presence of OLTC, the main accent being on the methods of preventive OLTC checkup (illustrated by examples from the practice) and their maintenance.

Key words: *on-load tap changers (OLTC), preventive checkup, resistance measurement, gas chromatography, maintenance*

1. UVOD

Postoje dva vida regulacije napona u elektroenergetici: održavanje konstantnog napona koji se isporučuje potrošačima (što je jedan od ključnih zahteva u pogledu kvaliteta električne energije) ili promena napona u skladu sa potrebama specifičnih potrošača (elektrolučne peći, postrojenja za elektrolizu i neke druge grane hemijske industrije itd.). Na samom početku razvoja elektroenergetike, u

malim lokalnim sistemima, stalan napon je postizan isključivo regulacijom pobude generatora. Sa širenjem lokalnih sistema i njihovim povezivanjem to više nije bilo moguće, pa se javlja potreba da se u regulaciju napona uključe i energetski transformatori (ET), pri čemu su korišćene dve mogućnosti: regulacija u beznaponskom stanju i regulacija pod naponom i opterećenjem pomoću regulacionih sklopki (RS). Ponekad se u tome i preteralo, o čemu svedoči pogrešna i štetna praksa primene pre-

bacača za regulaciju u beznaponskom stanju kod velikih blok-transformatora u nekim termoelektranama (TE). Oni su uvećali cenu ET i uneli u njih slabo mesto, a da od puštanja u rad decenijama nisu korišćeni niti će ikada biti, za razliku od prebacača i RS kod ET prenosne i distributivne mreže, čije prisustvo je opravdano i logično, kao i kod napajanja pomenutih specijalnih industrijskih potrošača.

Imajući napred izneto u vidu, jasno je da se u eksploataciji nalazi značajan broj RS i da njihova preventivna kontrola i održavanje zaslužuju pažnju, jer iskustvo pokazuje da je veliki broj otkaza ET povezan sa RS [1,2], da nastali kvarovi često imaju teške posledice i zahtevaju skupu i dugotrajnu opravku, a i da je održavanje relativno skupo. Tvrdi se da više od 50 % cene održavanja ET otpada na RS [1].

Sniženje pouzdanosti rada ET sa RS potiče usled povećanja broja kontakata i spojeva na kojima uvećani prelazni otpori mogu dovesti do lokalnih pregrevanja, a na to se nadovezuje i činjenica da takav ET prestaje da bude čisto statički aparat, bez pokretnih delova.

2. KONSTRUKTIVNE OSOBENOSTI REGULACIONIH SKLOPKI I ENERGETSKIH TRANSFORMATORA KOJI IH POSEDUJU

Postoje razni tipovi i konstrukcije RS. Zalaženje u detalje izlazi van okvira ovog rada i biće izloženi samo oni pojmovi koji su bitni za održavanje i preventivnu kontrolu.

Princip regulacije napona se zasniva na promeni odnosa transformacije menjanjem broja zavojaka jednog od namotaja. Zbog manjih struja, RS se normalno ugrađuje na strani višeg napona ET. Postoje jednofazne RS (npr. za ET u železničkim EVP), trofazne RS (za ugradnju u zvezdište trofaznog ET) i grupe od 3 spregnute jednofazne RS, sa zajedničkim pogonskim mehanizmom (za trofazne autotransformatore ili ET sa namotajem koji je spregnut u trougao, a izvodi za regulaciju su na kraju ili na sredini namotaja).

Kada je prisutna RS, namotaj višeg napona je podeljen na 2 dela: osnovni i regulacioni. Dodatno, regulacioni namotaj može biti podeljen na stepen grube i fine regulacije. Razlog za deobu namotaja višeg napona na deo bez izvoda i deo sa izvodima je izbegavanje nesimetrije namotaja višeg i nižeg napona po visini, koja bi mogla da dovede do smanjenja izdržljivosti prema silama usled kratkih spojeva.

Dva bitna konstruktivna detalja koji prate prisustvo RS su: (a) postojanje neke vrste impedanse (koja se naziva impedansa premošćenja), čija je uloga da spreči kratko spajanje zavojaka regulacionog namotaja, i (b) dvostruko strujno kolo, što

omogućava da se struja prenosi jednim kolom dok se u drugom pokretni kontakt premešta u sledeću poziciju.

Impedansa premošćenja može biti prigušnica ili otpornik. Prednost otpornika je što daje povoljnije uslove prekidanja struje, odnosno kraće trajanje luka i duži radni vek kontakata.

RS se sastoji iz:

- a) biračkog dela, koji služi za biranje izvoda i konstruisan je da provodi struju, ali ne i da je prekida i uključuje, tako da pri njegovom radu normalno nema luka ili varničenja, pa se smešta u glavni sud ET;
- b) prekidačkog dela, koji provodi, prekida i uključuje struju, što je skopčano sa pojavom luka i karbonizacije ulja, pa je neophodno da bude u zasebnom sudu, koji je zaptiven prema glavnom sudu ET;
- c) upravljačkog ormarića RS sa motornim pogonom i prenosnim mehanizmom.

Prekidački deo ima zaseban konzervator ili odvojen odeljak u konzervatoru, kao i svoj gasni relej (odnosno 3 releja za slučaj 3 spregnute monofazne RS).

Kod užeg opsega regulacije napona primenjuje se linearna regulacija, koja daje najviše 18 vrednosti napona. Ako je potreban širi opseg regulacije, primenjuje se regulacija sa inverzijom regulacionog namotaja ili grubo-fina regulacija. Kod njih se pomoću predbirača (koji samo provodi struju, a ne uključuje je ili prekida) isti kontakti birača jednom koriste za sniženje, a drugi put za povišenje napona duž celog opsega regulacije.

3. ISTORIJSKI OSVRT

Kod prvih RS razdvajanje kontakata je bilo prilično sporo, pa je luk trajao više poluperioda. Zbog rizika da otkáže pogonski mehanizam i da proces prelaza iz jedne pozicije u drugu ne bude dovršen, korišćene su RS sa prigušnicom, koja se može trajno strujno opteretiti – za razliku od otpornika, koji struju može prenositi samo ograničeno vreme, zbog grejanja usled džulovskih gubitaka. To je rezultiralo skraćanjem radnog veka kontakata, koji su kod prvih RS bili od čistog bakra.

Danas se koriste kvalitetniji materijali za izradu kontakata. RS su brze, sa otpornicima. Po pravilu, one prekidaju luk pri prvom prolazu struje kroz nulu, što daje znatno duži vek kontakata. Naravno, otpornici su i dalje predviđeni samo za kratkotrajno opterećenje, a usavršeni pogonski mehanizmi čine rizik od njihovog oštećenja zanemarljivim, pošto otpornik ostaje u kolu svega nekoliko ms. Kod brzih otporničkih RS duži je i radni vek

ulja, naročito ako je u prekidačkom delu RS ugrađen filter za ulje.

4. PREVENTIVNA KONTROLA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA I REPERKUSIJE PRISUSTVA REGULACIONIH SKLOPKI

Uprkos velikom značaju preventivne kontrole ET, ne postoji, nažalost, odgovarajuća tehnička regulativa, koja propisuje merne metode, karakteristike primenjene merne opreme, redosled i postupak pojedinih ispitivanja, merne šeme i kriterijume za obradu i ocenu rezultata ispitivanja. Zato treba istaći da samo kompleksan program ispitivanja omogućava celovito i potpuno sagledavanje stanja ET i uspešno i blagovremeno otkrivanje kvarova. Uz tendenciju daljeg širenja i usavršavanja, trenutno takav program kod nas obuhvata:

- Merenje otpora izolacije, uz određivanje polarizacionih indeksa,
- Merenje faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta,
- Merenje induktivnosti usled rasipanja,
- Merenje struja i gubitaka praznog hoda pri niskom naponu,
- Merenje omskih otpora namotaja,
- Gasnohromatografsku (GH) kontrolu sadržaja rastvorenih gasova u ulju,
- Zasebno merenje faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta provodnih izolatora,
- Ispitivanje električnih, fizičkih i hemijskih karakteristika ulja glavnog suda ET.

Od navedenih metoda, samo rezultati zadnje dve ne trpe nikakav uticaj usled prisustva RS. Taj uticaj na rezultate merenja otpora izolacije, faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta objašnjen je ranije [3]. Induktivnost usled rasipanja, struje i gubici praznog hoda i rezultati merenja omskih otpora namotaja zavise od pozicije RS pri kojoj se vrši merenje. Zato bi induktivnost usled rasipanja, struje i gubitke praznog hoda trebalo meriti u oba krajnja i srednjem položaju RS, dok merenja omskih otpora namotaja treba vršiti u svim položajima.

Uticaj na GH analizu sadržaja rastvorenih gasova u ulju glavnog suda ET može se javiti ukoliko sud prekidačkog dela nije dobro zaptiven (propis predviđa ispitivanje na pritisak i vakuum kao komadno ispitivanje za nove RS [4]) ili ako konzervator nije potpuno pregrađen nepropusnom (metalnom) pregradom. Indikacija o postojanju porozne membrane (koja sprečava samo prolaz čađi, ali ne i difuziju gasova) je prisustvo samo jednog indikatora nivoa ulja na konzervatoru.

Gasovi iz RS naročito utiču na koncentracije acetilena (C_2H_2) i vodonika (H_2) u glavnom sudu, ali se u slučaju lokalnog pregrevanja u RS mogu pojaviti u glavnom sudu i karakteristični produkti toplotnih kvarova u ulju.

5. METODE PREVENTIVNE KONTROLE REGULACIONIH SKLOPKI

Kao što smo videli, prisustvo RS utiče na rezultate više metoda preventivne kontrole ET, ali samo kod 2 metode postoji veza između ispoljavanja uticaja RS na dobijene rezultate i njenog stanja. To su merenje omskih otpora namotaja i GH kontrola. Obe služe za utvrđivanje pogoršanja stanja kontakata RS, što dovodi do lokalnih pregrevanja. Pritom treba istaći da je dugogodišnje iskustvo pokazalo da je **merenje omskih otpora daleko osefljivija metoda za otkrivanje pogoršanja stanja RS od gasne hromatografije, a nezamenljivo u slučaju potpuno odvojene RS od glavnog suda** (tj. sa zasebnim konzervatorima ili potpuno hermetičkom podelom konzervatora na 2 dela).

Kada je pre oko četvrt veka gasna hromatografija naglo ušla u modu, dajući izvanredne rezultate, bili smo skloni da precenimo njene mogućnosti. Smatralo se da neka od dotle uobičajenih ispitivanja gube značaj u redovnoj preventivnoj kontroli i da ih ubuduće treba tretirati samo kao dopunske metode, koje se primenjuju u cilju preciznijeg određivanja prirode i mesta kvara koji je otkrila gasna hromatografija, a da su nepotrebne sve dok ona daje dijagnozu normalnog stanja. I prvopotpisani od autora je iznosio takvo gledište za merenje omskih otpora namotaja, ali je u svetlu naknadno stečenih iskustava došao do zaključka da mora delimično da revidira svoj stav. Smatrajući i dalje da je merenje omskih otpora namotaja nepotrebno kao redovno profilaktičko ispitivanje za ET bez RS, sada se zalaže da se ono **obavezno izvodi svake četvrte godine kod ET sa RS, kako predviđaju propisi JUGEL [5]**. S druge strane, GH kontrola sadržaja rastvorenih gasova u ulju RS ne spada u domen redovne kontrole i vrši se samo izuzetno, kada postoje određeni razlozi za nju.

6. PRIMERI

6.1 Energetskih transformator sopstvene potrošnje bloka, 15 MVA, 13,8/6,3 kV/kV, Yy0

Prvu indikaciju prisustva kvara toplotne prirode dalo je merenje omskih otpora namotaja transformatora 08.10.1997. godine (tabela 1). Zapaža se da razlika između izmerenih otpora pri mernim spojevima A-B i B-C s jedne strane i A-C sa druge strane enormno prelazi uobičajenu granicu od 2 %,

kao i da se povećana vrednost dobija za 2 spoja kojima je obuhvaćena faza B. Posle višestrukog premeštanja RS kroz sve pozicije radi mehaničkog čišćenja kontakata, otpori u spoju A-B su nešto sniženi, (zadnja kolona tabele 1) ali su i dalje ostali nedopustivo visoki u odnosu na spoj A-C. Po GH kontroli 1996. godine (tabela 2), ET je ocenjen kao ispravan. Treba imati u vidu da je razvoj kvarova toplotne prirode znatno sporiji od kvarova električne prirode, tako da bi merenje omskih otpora namotaja, da je obavljeno 1996. godine, verovatno otkrilo kvar pre GH ispitivanja.

Posle GH ispitivanja 1997. godine ET je jedno vreme bio van pogona; 2000. je ponovo uključen.

Prva pretpostavka o mestu kvara na donjem priključku provodnog izolatora faze B je otpala posle spuštanja nivoa ulja i vizuelne kontrole, pa je sumnja pala na prekidački kontakt RS faze B. Zato je ispitan sadržaj gasova u RS sve tri faze, što je pokazalo da su u njima, kao i u glavnom sudu, dominantni gasovi etilen (C_2H_4), metan (CH_4) i etan (C_2H_6), da su njihove koncentracije najveće u fazi B, uz šifru 022, koja označava toplotni kvar sa temperaturom preko 700, a možda i preko 1000 °C.

Tabela 1.

Rezultati merenja omskih otpora namotaja 13,8 kV ($m\Omega$) i najveća razlika među spojevima (%)

Poz. RS	A-B	A-C	B-C	$\Delta R/R$	A-B
1	85,97	65,67	81,02	30,9	79,85
2	83,48	63,03	77,20	32,4	78,89
3	79,90	60,91	75,46	31,2	77,01
4	77,31	60,14	74,38	28,5	76,01
5	77,37	59,52	72,84	30,0	74,28
6	74,45	57,13	72,12	30,3	73,11
7	77,36	56,00	70,00	38,1	71,44
8	72,29	54,48	69,71	32,7	70,38
9	76,79	53,14	67,29	44,5	68,38
10	76,22	52,57	67,38	45,0	67,71
11	79,81	53,91	66,86	48,1	65,71

6.2 Energetski transformator 36 MVA, 15/6,3/6,3kv/kV/kV, YNd5d5

Tvrđnju o sporom razvoju kvara toplotne prirode dokazuje sledeći primer, kod kojeg se opet radi o ET sopstvene potrošnje bloka. Rezultati njegove GH kontrole su dati u tabeli 3, a merenja omskih otpora namotaja u tabeli 4. Red veličine normalnih koncentracija gasova u ulju kod ovog ET daju rezultati ispitivanja 1979. i 2000. g.

Od šifre 001 (< 150 °C) u 1983. godini, u naredne 4 godine je preko 020 (150-300 °C) nastala 021 (300-700 °C). U 1983. godini je zamenjeno ulje RS i izvršena degazacija ulja glavnog suda, ali bez sanacije kontakata. Dalji rast koncentracija gasova kvara je doveo do otvaranja 1984. godine, kada je nađeno malo gara na priključcima provodnih izolatora, koji su pritegnuti, a ulje degazirano. Nastavljen rast koncentracija gasova doveo je do opravke sklopke 1987. godine, posle čega su rezultati GH stalno normalni.

7. ODRŽAVANJE REGULACIONIH SKLOPKI

Održavanje podrazumeva tri vrste aktivnosti: preglede, revizije i remonte. Pregledi RS se izvode u normalnom pogonu jednom nedeljno i obuhvataju proveru odsustva curenja ulja iz RS i pregled pogonskog mehanizma i grejača ormarića RS. Revizije i remontu se obavljaju u beznaponskom stanju.

Pod revizijom se podrazumeva otklanjanje manjih nedostataka, koji su utvrđeni pregledima, odnosno redovni radovi na održavanju u skladu sa uputstvima proizvođača. Revizije RS se obavljaju jednom godišnje, i to revizija pogonskog mehanizma, provera funkcionalnosti, ispitivanje zaštita RS, električne i mehaničke blokade, kao i provera signalizacije RS.

Remonti RS obuhvataju radove većeg obima, tj. veće opravke i zamenu dotrajalih delova. Po napred navedenom propisu, vrše se svakih 5 godina

Tabela 2.

Rezultati gasnohromatskih analiza energetskih transformatora 15 MVA

Datum	Uzorak	Gasovi (ppm)							IEC kod
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	
08.08.1996.	D	53	14	14	100	3	665	3 151	–
20.10.1997.	D	118	483	18	1 094	183	718	3 580	022
21.02.2000.	D	97	443	27	1 299	272	517	2 760	022
18.08.2000.	D	91	596	13	1 290	296	517	2 339	022
16.11.2000.	D	168	1 160	31	2 628	578	793	4 014	022
14.02.2001.	D	167	1 132	55	2 619	500	651	3 438	022
22.02.2001.	RS/A	6 949	18 622	2 505	21 163	5 806	818	4 566	122
	RS/B	7 563	29 534	741	34 923	11 837	587	4 013	022
	RS/C	7 002	20 305	3 256	23 125	6 391	842	4 925	122

Tabela 3.

Rezultati gasnohromatskih analiza energetskih transformatora 36 MVA, 15/6,3/6,3 kV/kV/kV

Datum	Uzorak	Gasovi (ppm)							IEC kod
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	
03.05.1979.	D	47	5	0	14	9	230	1 120	–
22.08.1983.	D	293	211	0	137	95	633	2 790	001
05.05.1984.	D	169	465	0	90	229	656	1 846	020
12.1984.	D	0	123	0	25	54	227	993	–
01.04.1985.	D	57	148	0	48	76	429	1 404	020
05.1985.	RS/L	13 072	1 223	10 705	3 304	232	351	4 864	212
	RS/D	8 477	728	9 222	1 572	132	312	3 232	212
04.04.1986.	D	127	288	0	117	114	461	1 809	021
23.12.1986.	D	160	674	0	319	254	605	2 284	021
02.1987.	D	267	977	0	678	419	701	3 100	021
23.02.2000.	D	20	3	0	12	2	210	1 700	–

ili po preporukama njihovih proizvođača, a obuhvataju:

- Remont pogonskog mehanizma;
- Čišćenje i pregled filtera za ulje;
- Zamenu ulja u teretnoj preklopci;
- Remont teretne preklopke, prenosnog mehanizma i mehanizma opruge, kontakata, otpornika i izolacionog cilindra teretne preklopke; Proveru funkcionalnosti, ispitivanje zaštita i blokada;
- Proveru signalizacije.

Tabela 4.

Omski otpori namotaja 15 kV (mΩ)
i najveća razlika među spojevima (%)

Poz.RS	A-B	A-C	B-C	ΔR/R
1	11,818	11,834	11,570	2,3
2	13,732	11,531	11,325	21,3
3	11,605	11,472	11,258	3,1
4	13,441	11,208	11,047	21,7
5	11,217	11,076	10,913	2,8
6	13,175	10,963	10,797	22,0
7	10,894	10,811	10,631	2,5
8	12,738	10,604	10,432	22,1
9	10,608	10,566	10,432	1,7
10	12,000	10,019	9,900	21,2
11	10,610	10,566	10,665	0,9

Propisima nije predviđeno, ali smatramo da je korisno pridržavati se prakse koju predviđa jedan proizvođač RS [7], a sastoji se u proterivanju RS kroz sve pozicije 3 puta od prvog do krajnjeg polo-

žaja i obratno, da bi se kontakti pročistili od skrame oksida, posle svakog dužeg isključenja transformatora, a pre ponovnog uključenja, kao i jednom u pola godine, ako RS dugotrajno radi u jednom položaju.

Uputstva proizvođača daju različite rokove za remont RS, u zavisnosti od tipa, naponskog nivoa, prosečne struje koja se prekida itd. (od 2 do 10 godina, odnosno od 10 000 do 100 000 operacija).

8. NOVE TENDENCIJE U PREVENTIVNOJ KONTROLI REGULACIONIH SKLOPKI

U preventivnoj kontroli elektroenergetske opreme sve više se koriste metode kontinualne kontrole u pogonu (on-line monitoring), što je slučaj i kod RS, kod kojih omogućavaju rano otkrivanje problema sa stanjem kontakata i mehaničkih problema.

Pod normalnim radnim uslovima, temperatura ulja glavnog suda je viša od temperature ulja RS. Zbog male količine ulja u sudu RS, povećani gubici koje prouzrokuju loši kontakti se mogu otkriti po višoj temperaturi ulja RS [1, 8].

Mehanički problemi obično nastaju na oprugama, ležajevima, vratilima i pogonskim mehanizmima. Mnogi od njih se mogu otkriti praćenjem struje i aktivne snage pogonskog motora [1, 8].

Usavršene metode preventivne kontrole RS bi mogle omogućiti prelaz na savremeniji i znatno ekonomičniji način njihovog održavanja – održavanje po stanju.

9. ZAKLJUČAK

Razvijene elektroprivrede sve više teže ka usavršavanju metoda preventivne kontrole, radi sprečavanja havarija, produženja radnog veka i optimizacije održavanja opreme, a sve u cilju povećanja pouzdanosti rada i smanjenja troškova. U okviru toga, pažnja se posvećuje i RS. Pored metoda koje već primenjujemo (merenje omskih otpora namotaja i GH), vredi razmišljati o ugradnji termometara za ulje RS, kao jeftinom rešenju za kontrolu stanja njihovih kontakata. Kod savremenih sistema on-line monitoringa ET, uz praćenje sadržaja gasova i vlage u ulju, detekciju parcijalnih pražnjenja ultrazvučnom i električnim metodama, prati se i stanje RS merenjem temperature ulja i struje, odnosno aktivne snage pogonskog motora. Cena jeftinijih sistema za monitoring ET se kreće oko 1-2 %, a kod skupljih i do 6 % cene novog ET [1], pa bi zasad njihova primena mogla da se smatra neekonomičnom u našim uslovima, osim kod najvećih i najvažnijih ET u sistemu. Međutim, ugradnja termometara za ulje RS bi predstavljala beznačajan trošak, dok bi znatno pomogla preventivnu kontrolu RS.

10. LITERATURA

- [1] P. Boss, P. Lorin, A. Viscardi, J. W. Harley, J. Isecke: ECONOMICAL ASPECTS AND PRACTICAL EXPERIENCES OF POWER TRANS-

FORMER ON-LINE MONITORING

CIGRE Session 2000 (Paris), R. 12-202

- [2] CIGRE WG 12.05: AN INTERNATIONAL SURVEY ON FAILURES OF LARGE POWER TRANSFORMERS IN SERVICE
Electra No. 88, januar 1983
- [3] Lj. Nikolić: PROBLEMATIKA VEZANA ZA ELEKTRIČNA ISPITIVANJA IZOLACIONOG SISTEMA I ZA GASNOHROMATOGRAFSKU ANALIZU TRANSFORMATORSKOG ULJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA SA REGULACIONOM SKLOPKOM 23. Savetovanje JUKO CIGRE, 1997, R. 12-03
- [4] JUS N.H1.214 (1990): REGULACIONE PREKLOPKE ZA ENERGETSKE TRANSFORMATORE, TAČKA 9
- [5] GSE 78/91: PRAVILNIK O ODRŽAVANJU ELEKTROENERGETSKIH POSTROJENJA PRENOSNE MREŽE JUGOSLAVIJE, 2. izdanje, Beograd, 1991
- [6] JUS IEC 599 (1994): INTERPRETACIJA ANALIZA GASOVA U TRANSFORMATORIMA I DRUGOJ ULJEM PUNJENOJ OPREMI U POGONU
- [7] PEREKLUČAJUŠČEJE USTROJSTVO TIPRA RNT-13; TEHNIČESKOJE OPISANIJE I INSTRUKCIJA PO EKSPLUATACIJI
OVB 463.229-70 TO
- [8] S. Tenbohlen et al: ENHANCED DIAGNOSIS OF POWER TRANSFORMERS USING ON-AND OFF-LINE METHODS: RESULTS, EXAMPLES AND FUTURE TRENDS
CIGRE Session 2000 (Paris), R 12-204

Rad je primljen u uredništvo 11. 10. 2001. godine

Razvoj prekidnog elementa SF₆ prekidača – gasodinamički aspekt

Stručni rad
UDK: 621.316.57

Rezime:

U radu je prikazan koncept "softverskog prototipa" u razvoju visokonaponskih prekidača za metalom oklopljeno, gasom izolovano postrojenje. Analize se odnose na gasodinamički aspekt razvoja prekidača. Prikazana je verifikacija tranzijentnog modela strujanja gasa bez, i u prisustvu električnog luka u prekidnom elementu. U drugom delu rada prikazani su rezultati primene modela u razvoju novog prekidnog elementa.

Ključne reči: prekidač, prekidni element, električni luk, porast pritiska

Abstract:

DEVELOPMENT OF SF₆ INTERRUPTER - GAS FLOW ANALYSIS

The paper deals with the "software prototype" concept in the development of high voltage fog SF₆ gas insulated metal - clad switchgear. The analyses refer to the gas flow aspect of circuit breaker development. The verification of transient gas flow modeling without and in the presence of electric arc in the interrupter is presented. In the second part of the paper the results of model application in the development of new type interrupter are shown.

Key words: circuit breaker, interrupter, electric arc, pressure build up

1. UVOD

Tradicionalni koncept sekvencijalnog projektovanja visokonaponskih prekidača je prevaziđen. On je podrazumevao pet faza da bi se došlo do gotovog proizvoda - konstruisanje, izradu prototipa, ispitivanje prototipa, analizu rezultata i, u zavisnosti od rezultata, povratak na prvi korak, sve do konačnog, zadovoljavajućeg rešenja. Prototipova je bilo više, pa je razvoj prekidača bio skup.

Koncept softverskog prototipa podrazumeva upotrebu sopstvenog i komercijalnog softvera sa ciljem da se izvrše što detaljnije numeričke simulacije procesa u prekidaču, kako bi se broj prototipova u idealnom slučaju sveo na jedan. Na taj način se znatno skraćuje vreme projektovanja, umanjuju greške u dokumentaciji i pojeftinjuje razvoj prekidača.

Postoji više procesa koje odvojeno ili zajedno treba analizirati:

- gasodinamički procesi,
- dielektrična čvrstoća,
- kinematika i dinamika pogona i poluzja, i
- ponašanje prekidača u mreži.

U ovom radu su analizirani jedino gasodinamički procesi.

Autokompresioni princip je decenijama uspešno korišćen u prekidačima visokog napona. Klasični potisni prekidači natpritisak u kompresionom prostoru stvaraju zahvaljujući pogonskom mehanizmu. Međutim, pokazalo se da su zahtevi koji se postavljaju mehanizmu sve teži, što je bio razlog za traženje alternativnih rešenja. Jedno od rešenja je bila upotreba pojačanog toplotnog dejstva luka koji, zbog termodinamičkog začepljenja, zagreva gas u kompresionom prostoru. Nažalost, sa ovim se ne sme preterati, jer previše zagrejan gas ne može uspešno da ugasi luk. Zbog toga je upotreba luka za povećanje pritiska i smanjenje pogonske energije uvek bila izazov za konstruktore. U ovom radu je analizirana upravo upotreba luka za povećanje pritiska u kompresionom prostoru.

Drugi važan režim rada prekidača je operacija otvaranja, kada nema luka. Ona je bitna iz dva razloga:

- otporna sila usled pritiska je najmanja, pa ovaj režim diktira izbor uljne kočnice, kojom se zaustavljaju pokretni delovi prekidača, i
- procesi prekidanja malih struja spadaju u ovaj režim – nema začepljenja mlaznika jer je prečnik luka relativno mali.

Koncept softverskog prototipa je u ovom radu zastupljen sa njegove dve faze, sve do izrade prototipa:

- verifikacija modela strujanja gasa, i
- upotreba modela za razvoj novog prekidnog elementa.

2. ANALIZA GASODINAMIČKIH PROCESA U PREKIDNOM ELEMENTU

Ova analiza je najpre izvršena na elementu prekidača sa dvostranim oduvavanjem za koji se raspolagalo rezultatima ispitivanja. Analizirani su procesi pri operacijama otvaranja i prekidanja struja kratkih spojeva. Trajanje luka je bilo od 10 – 23 ms. Struja je simetrična, efektivne vrednosti 40 kA, a prekidač ju je uspešno prekinuo u svim pomenutim slučajevima.

Skica prekidnog elementa i matematički modeli su već prikazani javnosti, pa ovde neće biti opisivani. Mogu se pronaći u literaturi datoj na kraju rada. Korišćena su dva modela:

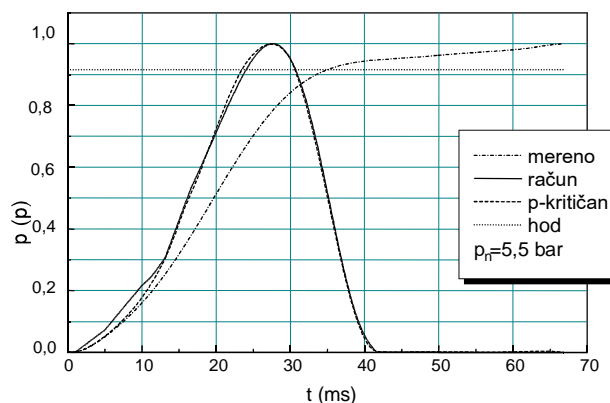
- jednodimenzioni model strujanja gasa, zasnovan na teoriji isticanja kroz male otvore.

SF₆ gas je tretiran kao realan, a luk je definisan jednostavnim modelom, zasnovanom na idejama u [2] i [3],

- dvodimenzioni model strujanja hladnog gasa, zasnovan na jednačinama numeričke dinamike fluida. Model je razvijen dodavanjem modula u komercijalni program numeričke dinamike fluida.

Dvodimenzioni model je modifikovan, tako da se pri procesu kompresije uvažava realna kriva hoda kontakta. Kao rezultat se dobijaju sve gasodinamičke karakteristike relevantne za konstrukciju prekidnog elementa. To su, pre svega, pritisak, maseni protok, karakter strujanja i udarni talasi.

Na slici 1 su prikazani pritisak i kriva hoda. Slaganje između izračunate i izmerene vrednosti je sasvim zadovoljavajuće. Nadzvučno strujanje, je, ostvareno u toku oko 7 ms.

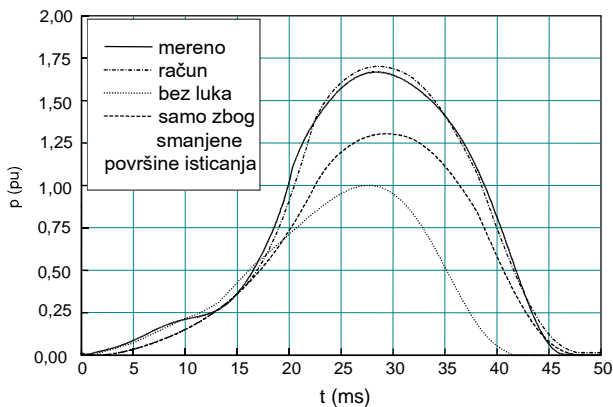


Slika 1. Pritisak i hod, bez luka

Usled električnog luka raste pritisak u kompresionom prostoru iz dva razloga:

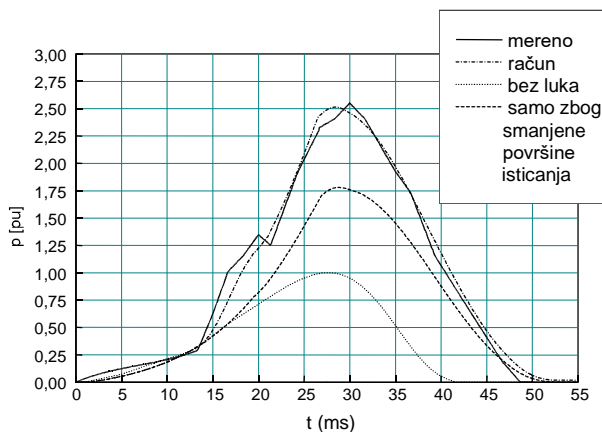
- smanjuje se površina kroz koju ističe gas, jer je maseni protok kroz luk veoma mali. Razlog je izuzetno mala gustina plazme, i
- u trenucima kada luk zatvori grlo mlaznika, nastaje termodinamičko začepljenje. Jedan deo toplote luka se predaje gasu u kompresionom cilindru. Gas se zagreva, pritisak raste, a u trenucima kada struja padne ispod određene vrednosti, mlaznik se otvara i gas normalno ističe iz kompresionog cilindra.

Na slici 2 su razdvojeni ti efekti. Prikazani su meren i izračunat pritisak za trajanje luka 10 ms. Slaganje je zadovoljavajuće. Na slici su prikazani i pritisak kada nema luka, koji je referentna vrednost (1 pu), kao i pritisak koji bi postojao da nema termodinamičkog začepljenja. Vidi se da je za konstrukciju ovog prekidača korišćeno začepljenje grla mlaznika u ograničenom stepenu. Maksimalna vrednost pritiska je za oko 70 % viša nego kada nema luka.



Slika 2. Pritisci za trajanje luka 10 ms

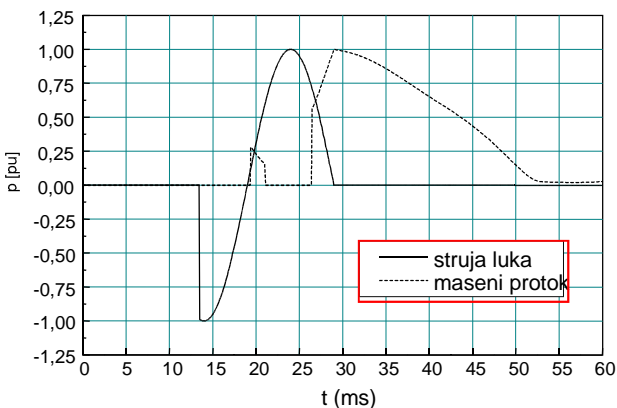
Na slici 3 su prikazane iste krive za trajanje luka 15 ms.



Slika 3. Pritisci za trajanje luka 15 ms

I u ovom slučaju je efekat isti kao sa lukom 10 ms – oko polovine porasta pritiska je usled smanjenja površine isticanja zbog luka, a polovina od toplotnog dejstva luka. Maksimalna vrednost pritiska je oko 2,5 puta veća nego kada nema luka.

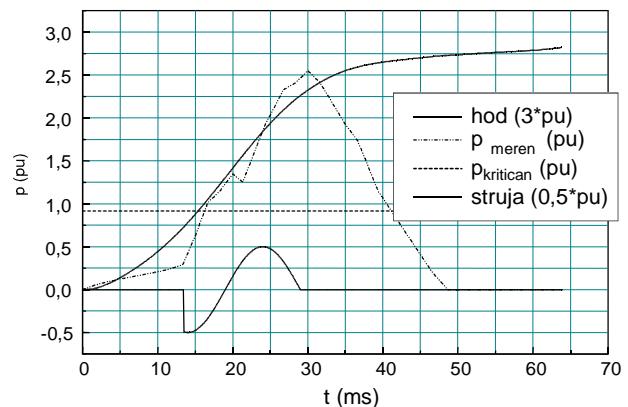
Na slici 4 su prikazani struja i maseni protok za trajanje luka 15 ms.



Slika 4. Struja i maseni protok za trajanje luka 15 ms

Vidi se da maseni protok u prvoj strujnoj nuli ima malu vrednost, što je jedan od ključnih faktora gašenju luka. U drugoj nuli maseni protok ima svoju punu vrednost, pa je gašenje omogućeno. U analizi je određena i vrednost masenog protoka pri uspešnom gašenju luka. To je važan kriterijum za nove konstrukcije prekidnog elementa. Osim toga, slika pokazuje da dovoljno veliki maseni protok traje relativno dugo, što ukazuje na kvalitet konstrukcije prekidača.

Slika 5 pokazuje pritisak, kritičan pritisak i krivu hoda kontakta.



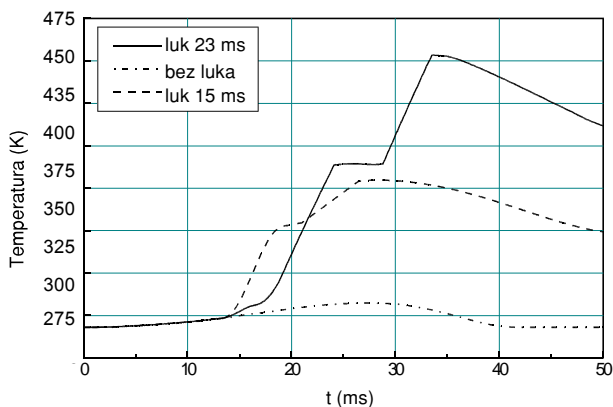
Slika 5. Pritisak i hod za trajanje luka 15 ms

Slika pokazuje da uslovi za nadzvučno strujanje postoje u periodu od 16,5 ms do 42 ms. Luk traje do 29 ms, a nadzvučno strujanje je moguće još čitavih 13 ms, što je veoma važno, jer postoje povoljni uslovi za odnošenje rezidualne plazme. Na ovaj način konstruktor može da proveri ispravnost rešenja jer je ostvarivanje nadzvučnog strujanja u određenom vremenskom periodu veoma važno. Uostalom, zbog toga se koristi Lavalov mlaznik.

Luk se može upotrebiti za povišenje pritiska u prekidnom elementu. To je urađeno i kod ove konstrukcije. Veća upotreba luka dovela je do razvoja tzv. "self-blast" prekidača. Kod njih je efekat luka dominantan. Međutim, oni su veoma pogodni za srednje napone jer je prelazni povratni napon kod njih niži nego na višim naponima. Problem je u tome što su na visokim naponima prelazni povratni naponi veći, pa su uslovi za gašenje luka nepovoljniji. U trenucima strujne nule ističe zagrejan gas. Ukoliko je on preterano zagrejan, lakše nastaje proboj, jer se usled električnog polja između kontakata u toplom gasu elektroni lako ubrzaju zbog povećane termičke energije. Zbog toga je u literaturi pomenuto da u ovim slučajevima temperatura gasa u kompresionom cilindru ne treba da pređe 1 000 K.

Model korišćen za analize prikazane u ovom radu omogućava i izračunavanje srednje tempera-

ture gasa u cilindru. Pretpostavljeno je trenutno mešanje toplog i hladnog gasa. Na slici 6 su prikazane temperature u cilindru za tri slučaja.



Slika 6. Temperatura u cilindru

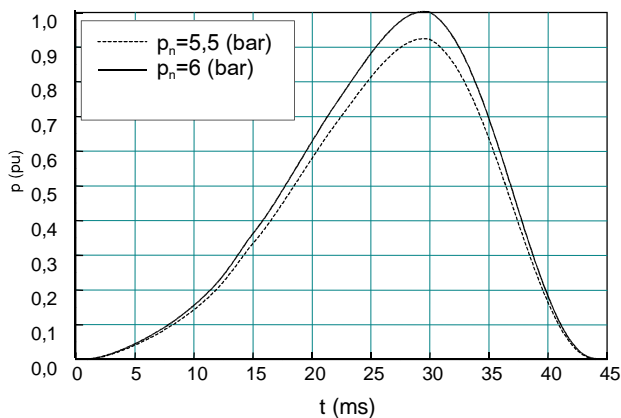
Najviša temperatura se dostiže pri najdužem trajanju luka i iznosi oko 450 K. Ovo je dobra orijentacija za konstruktora koji se odlučuje za upotrebu luka za povišenje pritiska.

3. PRORAČUN PORASTA PRITISKA U PREKIDNOM ELEMENTU NOVE KONSTRUKCIJE

Porast pritiska u kompresionom prostoru je veoma važan u konstrukciji prekidnog elementa iz dva razloga:

- od njega zavisi uspešnost prekidanja, i
- predstavlja otpornu silu za pogonski mehanizam.

Prekidni element koji je trebalo razviti je sa povećanim tehničkim zahtevima od elementa koji je analiziran u prethodnom delu rada. Zbog toga je za njega trebalo uraditi simulaciju gasodinamičkih procesa.

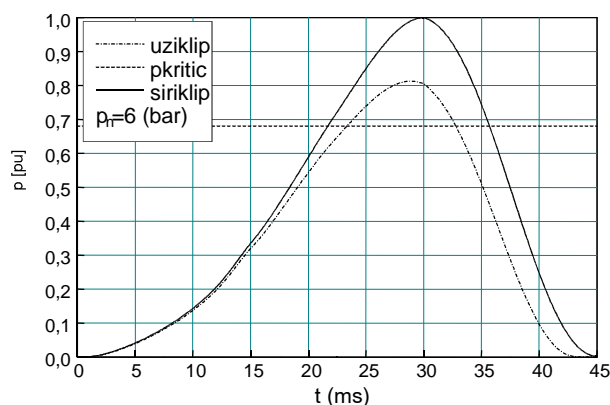


Slika 7. Uticaj naznačenog pritiska

Na slici 7 je prikazan uticaj povećanja naznačene vrednosti pritiska u prekidaču. Analizirani su pritisci od 550 000 Pa i 600 000 Pa.

Porast naznačenog pritiska od oko 9 % izaziva, za istu geometriju, porast maksimalnog pritiska od 8,4 %. To je razumljivo, budući da višem naznačenom pritisku odgovara veća masa gasa u cilindru. Za novi prekidni element je odabran povećan pritisak, iako se otporna sila povećava.

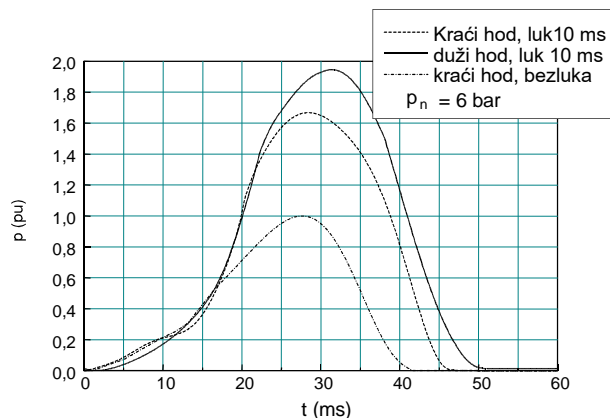
Uticaj povećanog poprečnog preseka klipa je prikazan na slici 8.



Slika 8. Uticaj povećanog preseka klipa

Presek je povećan za 15,5 %. Njemu odgovara povećanje maksimalne vrednosti pritiska od 23 %. Međutim, povećan pritisak je povoljan, osim za mehanizam, jer je trajanje uslova za nadzvučno strujanje produženo za 5 ms.

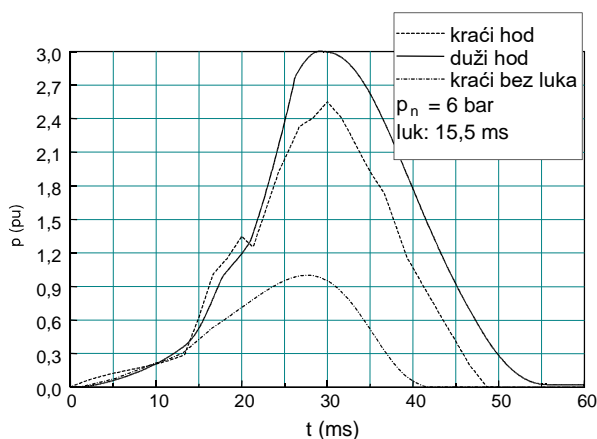
Zbog povećanih dielektričnih naprežanja, bilo je neophodno povećati hod kontakta za oko 15,4 % u odnosu na onaj koji je analiziran u prethodnom delu rada. Uticaj veće brzine na porast pritiska u cilindru za trajanje luka od 10 ms prikazan je na slici 9.



Slika 9. Uticaj hoda kontakta na povećanje pritiska za trajanje luka 10 ms

Slika pokazuje da povećanju brzine kontakta od 15,4 % odgovara povećanje maksimalne vrednosti pritiska od 16,6 %. Referentnu vrednost predstavlja pritisak za prekidač sa kraćim hodom, analiziran u prethodnom delu rada. Kriva u sredini odgovara prekidaču sa kraćim hodom i lukom od 10 ms.

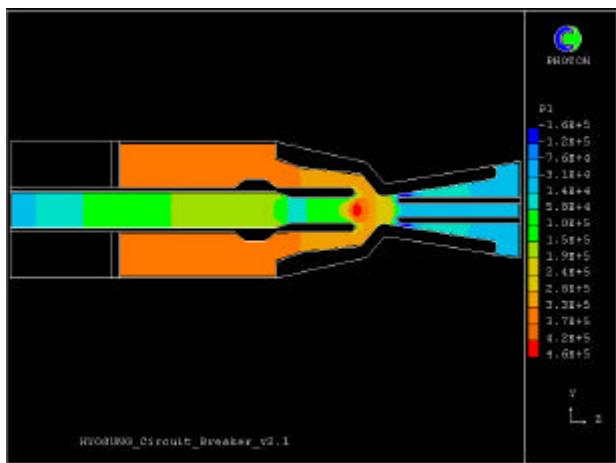
Na slici 10 su prikazani isti pritisci za trajanje luka od 15 ms.



Slika 10. Uticaj hoda za luk trajanja 15 ms

U ovom slučaju je, zbog dužeg trajanja luka, maksimalni pritisak još viši. Porast pritiska u odnosu na slučaj kada je brzina manja iznosi 17,6 %. Osim toga, isticanje gasa duže traje.

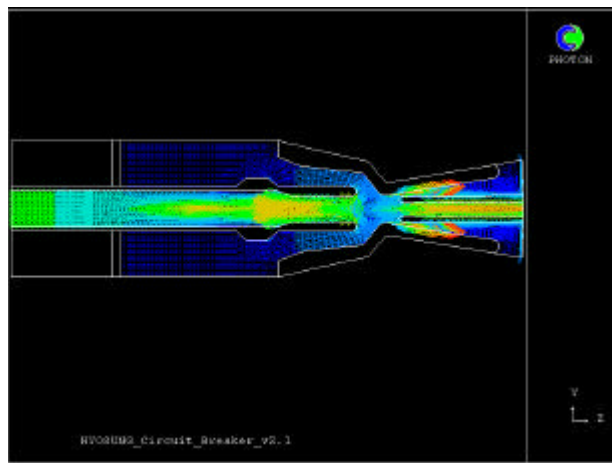
Dvodimenzionim modelom je analizirano strujanje gasa u prekidnom elementu. Na slici 11 je prikazana dvodimenziona slika polja pritiska.



Slika 11. Polje pritiska

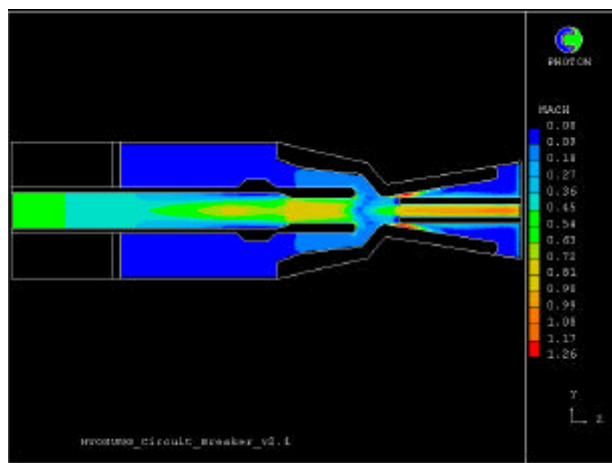
Na slici 12 je prikazano brzinsko polje. Ova slika je važna zbog toga što može da ukaže na neregularna strujanja u prekidnom elementu, što sma-

njuje prekidnu moć. U ovom prekidnom elementu očigledno nema takvog vrtložnog strujanja.



Slika 12. Brzinsko polje

Slika 13 pokazuje detaljnu raspodelu Mahovog broja, koji je veoma važan za efikasno strujanje.



Slika 13. Mahov broj

4. ZAKLJUČAK

Upotrebom jedno- i dvodimenzionog modela strujanja gasa bez, i u prisustvu luka, za konkretnu konstrukciju prekidača došlo se do sledećih zaključaka:

- Porast naznačenog pritiska od oko 9 % izaziva, za istu geometriju, porast maksimalnog pritiska od 8,4 %.
- Povećanje poprečnog preseka klipa od 15,5 % izaziva povećanje maksimalne vrednosti pritiska od 23 %.

– Povećanje brzine kontakta za oko 15 %, pri istim ostalim uslovima, izaziva povećanje pritiska od 16,6 % za trajanje luka 10 ms, a 17,6 % za luk koji traje 15 ms. Mnogobrojne analize su pokazale da pritisak, osim od luka, veoma zavisi od hoda kontakta. Zavisnost je, uglavnom, približno proporcionalna.

Model omogućava da se dobije uvid u sve gasodinamičke parametre potrebne za konstruisanje prekidnog elementa. Model je upotrebljen za razvoj novog prekidnog elementa prekidača za metalom oklopljeno postrojenje.

5. LITERATURA

- [1] S. Stojković: MATEMATIČKO MODELOVANJE LUKA POTISNIH SF₆ PREKIDAČA U USLOVIMA MOGUĆEG TERMIČKOG PROBOJA, doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Čačak, 1997. god.
- [2] H. J. Schotzau, F. Kneubuhl: PHYSICS AND TECHNIQUES OF SF₆ ARC PLASMAS IN CIRCUIT BREAKERS, VDI-Verlag, Diseldorf, 1989, str. 108-116.
- [3] Y. Yoshioka, M. Tsukushi, K. Natsui: METHOD AND APPLICATION OF A THEORETICAL CALCULATION FOR ON-LOAD PRESSURE RISES IN PUFFER TYPE GAS CIRCUIT BREAKERS, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No 3 May/June 1979.
- [4] S. Stojković, Ž. Stevanović: NUMERICAL MODELING OF ARC-FLOW INTERACTION IN HIGH-VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS, XIIIth Symposium on Physics of Switching Arc, Volume I: Contributed Papers, September 7-11, 1998, Brno, Češka, str. 21-24.
- [5] S. Stojković: TWO-DIMENSIONAL CALCULATIONS OF ARC-FLOW INTERACTION IN CIRCUIT-BREAKERS, Second International Power System Conference, Temišvar, Novembar 20-21 1997. str. 48-53,
- [6] S. Stojković, A. Veličković, Ž. Stevanović: TEORETSKO I EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE GASNE STRUJE U MLAZNIKU VISOKONAPONSKIH PREKIDAČA, JUKO Cigre, Herceg Novi, 25-30. maj 1997. god., referat 13-02,
- [7] S. Stojković, A. Veličković: UTICAJ LUKA POTISNIH PREKIDAČA NA PRITISAK I BRZINU KONTAKTA, JUKO Cigre, Herceg Novi, 25-30. maj 1997. god., referat 13-03.

Rad je primljen u uredništvo 11. 10. 2001. godine

Fuzzy regulator pobude sinhronog generatora

Stručni rad
UDK: 621.316.7; 621.316.322

Rezime:

Fuzzy upravljanje danas sve češće predstavlja uspešnu alternativu klasičnom upravljanju posebno u slučajevima kada se objekt upravljanja opisuje nelinearnim, matematičkim modelom ili se čak matematički model uopšte ne može postaviti. U poređenju sa ostalim nelinearnim zakonima upravljanja prednost Fuzzy regulacije sastoji se u tome što zahteva slabije numeričke resurse, a fleksibilna struktura samog regulatora omogućava vrlo jednostavnu i brzu nadogradnju funkcija.

U radu su prikazani projektovanje i primena Fuzzy upravljanja u problemu automatske regulacije napona sinhronog generatora u smislu ostvarenja osnovne funkcije regulatora pobude sinhronog generatora i održavanje napona na njegovim sabirnicama na zadatom nivou. Rezultati primene pokazani su na laboratorijskom 2 kW sinhronom generatoru.

Ključne reči: regulator napona - sinhroni generator - Fuzzy regulator

Abstract:

FUZZY LOGIC CONTROLLERS OF SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION

Fuzzy logic controllers are rapidly becoming a viable alternative for classical controllers. The application of fuzzy logic controllers appears to be the most suitable one, whenever a mathematical model is not available or requires too complex numerical calculations during the real-time operation. Compared to the other nonlinear control laws, fuzzy logic controllers are robust and have relatively low computational requirements and flexible structure of the controller itself enables very simple and fast enhancement of functions.

This paper presents the design and implementation of the synchronous generator fuzzy logic based automatic voltage regulator, which functions to maintain the terminal voltage of the synchronous machine at a predetermined value. The fuzzy logic controller was implemented for a laboratory 2 KW synchronous generator.

Key words: voltage controller, synchronous generator, Fuzzy controller

1. UVOD

U elektroenergetskom sistemu Srbije automatski regulatori napona sinhronih mašina, koji su u upotrebi, realizovani su kao elektromehanički,

elektronski i tek poslednjih godina kao mikroprocesorski uređaji. Prilikom projektovanja elektronskih (analognih) regulatora, za modelovanje sistema regulacije pobude sinhronog generatora, korišćeni su modeli generatora i budilice različite slo-

ženosti. Dobijeni rezultati bili su dobri ali su često pojedini parametri regulatora napona podešavani tek u pogonu. Međutim zbog nelinearne prirode sistema, u praktičnom radu pokazalo se da je često jedino rešenje za postizanje stabilne regulacije, u svim režimima rada, usporenje procesa regulacije.

Metod koji omogućava zaobilazanje korišćenja glomaznog, nelinearnog modela sinhronog generatora i budilice, zasnovan je na fuzzy logici. Upravljanje pomoću fuzzy kontrolera je upravljanje zasnovano na oponašanju ljudskog zaključivanja i korišćenju kako inženjerskog iskustva tako i prakse i eksperimentalnih rezultata. Zbog toga fuzzy kontroleri nalaze sve širu primenu tamo, gde se dosad koristilo isključivo klasično upravljanje.

2. FUZZY REGULATOR NAPONA SINHRONOG GENERATORA

2.1 Osnovna struktura fuzzy regulatora

Na slici 1 prikazan je Fuzzy regulator koji se u svojoj osnovnoj konfiguraciji sastoji iz sledećih celina [1]:

- Fazifikator u okviru koga se meri, čita i skalira promenljiva upravljanja, a potom se izmerene numeričke vrednosti prevode u odgovarajuće „opisne“ (fuzzy) promenljive pomoću funkcija pripadnosti.
- Baza pravila i mehanizam zaključivanja predstavlja srž Fuzzy regulatora jer definišu funkcije pripadnosti za ulazne i izlazne promenljive, potrebna pravila između fuzzy promenljivih kojima se ostvaruje proces upravljanja i fuzzy upravljački algoritam.
- Defazifikator na osnovu rezultata fuzzy upravljačkog algoritma definiše odgovarajuću numeričku izlaznu vrednost.

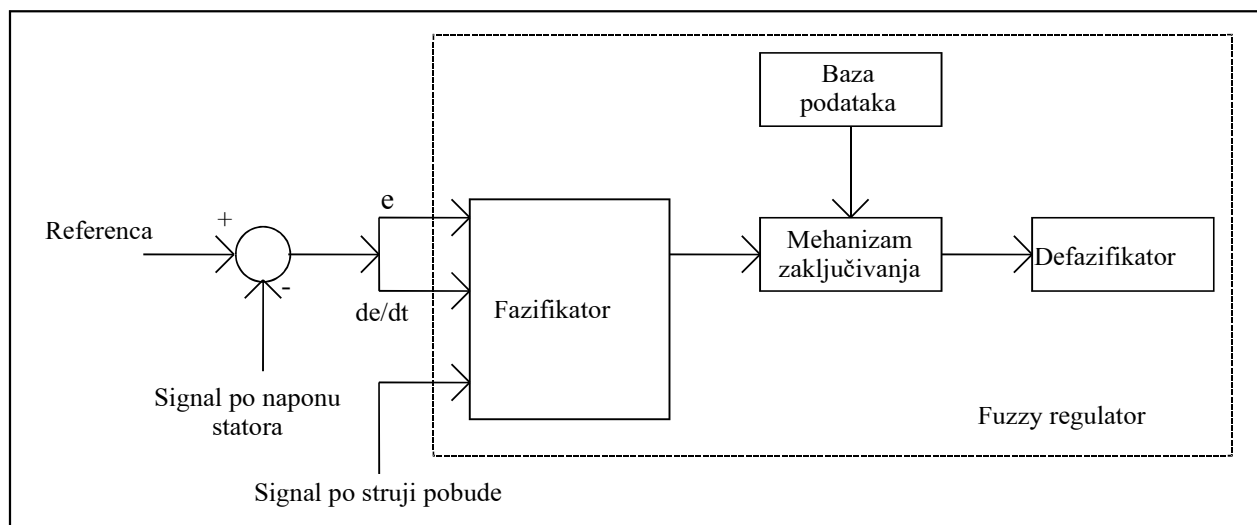
Projektovanje Fuzy regulatora vrši se u pet koraka [2]:

- izbor upravljačkih promenljivih,
- fazifikacija ulaza,
- definisanje fuzzy pravila,
- agregacija,
- defazifikacija.

Upravljačke promenljive određuje sama priroda procesa kojim se upravlja. Najčešće se koriste greška izlaza i izvod ili integral date greške.

U procesu fazifikacije [3] se vrši pretvaranje numeričke promenljive u „fuzzy“ opisnu promenljivu. Svaka fuzzy promenljiva definisana je na određenom opsegu vrednosti. Opseg vrednosti svake fuzzy promenljive deli se na više skupova koji se međusobno preklapaju. Svakom tom skupu se dodeljuje funkcija pripadnosti koja prevodi numeričke vrednosti u „opisne“. Fazifikacija ulaza podrazumeva određivanje za datu numeričku ulaznu promenljivu stepena pripadnosti svakom od odgovarajućih fuzzy skupova. Stepenn pripadnosti uzima vrednost između 0 i 1 i određen je funkcijom pripadnosti.

Fuzzy pravila određuju zakone upravljanja. Sama pravila mogu se generisati na više načina. Mogu biti rezultat iskustva eksperata, mogu biti zasnovana na poznavanju dinamičkog ponašanja sistema koji se kontroliše, a ponekad se neuralne mreže obučavaju da same generišu ova pravila. Daju se u „fuzzy“ (opisnoj) formi npr. „**Ako je** greška pozitivna-velika **i** izvod greške pozitivno-veliki **onda je** izlaz pozitivno-mali“. Fuzzy pravila preslikavaju ulazne fuzzy skupove na izlazni fuzzy skup. Kako ulazna promenljiva pripada pojedinim ulaznim fuzzy skupovima sa određenim stepenom pripadnosti, to se i izlazna funkcija pripadnosti, koja je datim pravilom aktivirana, mora skalirati.



Slika 1. Struktura fuzzy regulatora

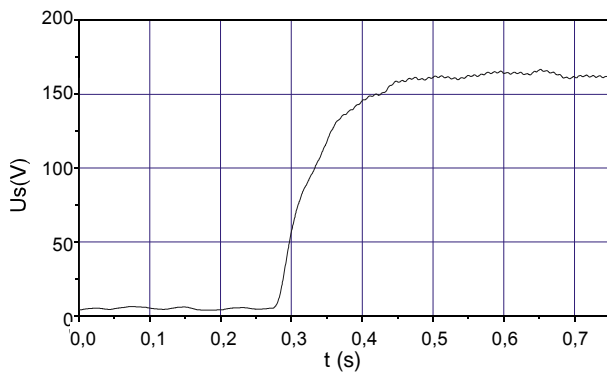
Pošto je donošenje odluka za dati ulaz zasnovano na testiranju svih pravila, rezultati pojedinih pravila se moraju na neki način udružiti. Agregacija je proces u kome se, fuzzy skupovi koji predstavljaju izlaze iz svih pravila, udružuju u jedan skup. Proces agregacije se vrši samo jednom i to pre procesa defazifikacije. Izlaz iz procesa agregacije je jedan fuzzy skup koji predstavlja izlaznu fuzzy promenljivu.

Ulaz u proces defazifikacije je fuzzy skup dobijen procesom agregacije, a izlaz jedna numerička vrednost. Procesom defazifikacije se fuzzy vrednosti izlazne promenljive dodeljuje numerička vrednost. Ta vrednost se bira ili kao vrednost kojoj odgovara najveći stepen pripadnosti ili kao odgovarajuća koordinata centra gravitacije izlaznog skupa. Ovako dobijena numerička veličina predstavlja komandni signal za proces kojim se upravlja.

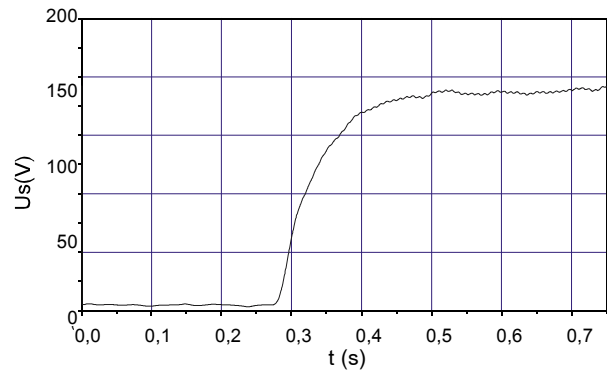
2.2 Sinhrona mašina kao objekt upravljanja

Obzirom da je sinhrona mašina nelinearni objekt upravljanja neophodno je projektovati nelinearni zakon upravljanja. Struktura fuzzy regulatora omogućava da se, korišćenjem fuzzy sintakse, opisnim putem modeluje nelinearni zakon upravljanja koji će kompezovati nelinearnost same mašine. Priroda nelinearnosti sinhronne mašine, bez ulaženja u kompletan model sinhronne mašine, detektovana je snimanjem odziva amplitude statorskog napona mašine na step poremećaj pobudnog napona. Odzivi za različite vrednosti pobudnog napona su dati na slikama 2, 3, 4, 5. Važno je napomenuti da je vrednost pobudnog napona uvek menjana za isti korak.

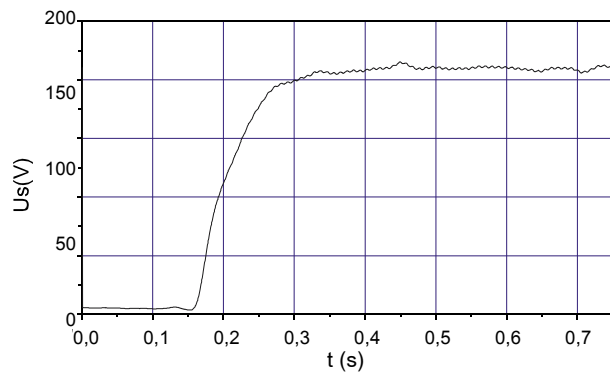
Na odzivima je primetna promena statičkog pojačanja kao i promena u brzini odziva pri povećanju pobudne struje generatora. Pri promenama pobudne struje u koracima od po 0,3 A, skokovi statorskog napona su iznosili 30 V do vrednosti statorskog napona 200 V. Zatim su zbog zasićenja pri istim koracima pobudne struje promene napona



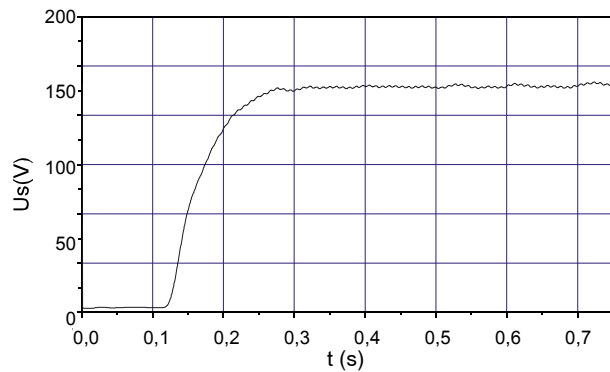
Slika 2. Pobuđivanje generatora do praznog hoda (160 V) bez povratne sprege



Slika 3. Pobuđivanje generatora do praznog hoda (190 V) bez povratne sprege



Slika 4. Pobuđivanje generatora do praznog hoda (210 V) bez povratne sprege



Slika 5. Pobuđivanje generatora do praznog hoda (230 V) bez povratne sprege

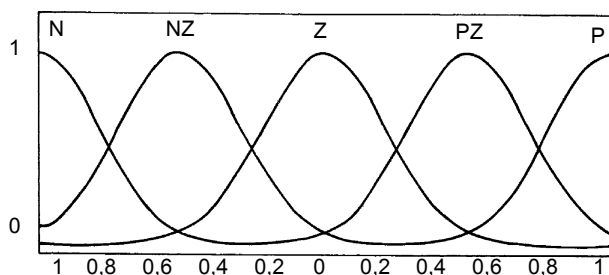
iznosile 20 V. Brzina odziva se pri povećanju struje rotora od 1,8 A do 4,5 A smanjivala od 0,15 s do 0,08 s.

2.3 Fuzzy regulator napona sinhronog generatora sa greškom napona statora i njenim izvodom kao ulazima

Izbor ulaznih promenljivih izvršen je s obzirom na osnovnu funkciju regulatora pobude sinhronog generatora, održavanje napona na njegovim sabirnicama na zadatom nivou promenom struje

kroz pobudni namotaj. Kao ulazne veličine u Fuzzy regulator izabrane su greška statorskog napona u odnosu na referentni signal $e(t)$ i izvod signala greške $de(t)/dt$ dok izlazna promenljiva predstavlja komandni signal – napon pobude.

Na slici 6 prikazane su funkcije pripadnosti ulaznih signala. Svakoј funkciji pripadnosti dato je ime koje odgovara opsegu ulazne veličine na kome je odgovarajuća funkcija pripadnosti definisana: „n” – negativna greška, „nz” – mala negativna greška, „z” – nulta greška, „pz” – mala pozitivna greška, „p” – pozitivna greška.



Slika 6. Funkcije pripadnosti signala $e(t)$ i $de(t)/dt$

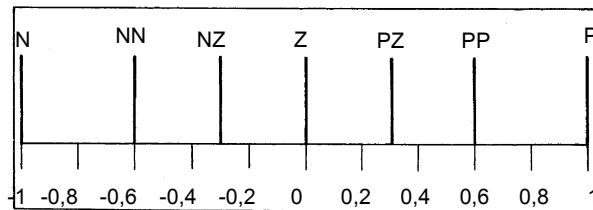
Sledeći korak je bio sintetisanje matrice pravila radi ostvarivanja zakona upravljanja. Početna ideja je bila da se realizuje Fuzzy regulator koji će za dato opterećenje imati takvu funkciju prenosa da pri velikim greškama statorskog napona ekvivalentno pojačanje signala greške bude veće čime se obezbeđuje veća brzina odziva s jedne strane i znatno smanjuje preskok sa druge [4]. Na osnovu prethodnog razmišljanja napisana je matrica pravila data u tabeli 1. Radi dobijanja nulte greške stacionarnog stanja iza regulatora je dodato integralno dejstvo.

Tabela 1.

Matrica pravila

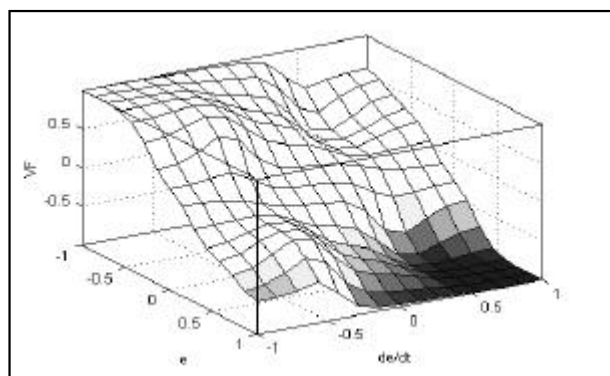
		e(v)				
		n	nz	z	pz	p
de (v)/ /dt	n	p	p	pz	nz	nn
	nz		p		z	
	z	p	pp	z	nn	n
	pz			z		n
	p	pp	pz	nz	n	n

Izlazne funkcije pripadnosti (slika 7) su tipa konstante [5] u literaturi poznate kao „singleton”-i. Pošto je izlazna fuzzy promenljiva data jednim fuzzy skupom koji se dobija kao rezultat procesa agregacije, da bi se dobila numerička vrednost te promenljive neophodno je izvršiti defazifikaciju.



Slika 7. Funkcije pripadnosti izlaznog signala

Za funkcije pripadnosti tipa konstanta vrednost izlazne promenljive se određuje kao usrednjena težina izlaznih „singleton-a” čime se znatno poboljšava efikasnost procesa defazifikacije jer se izbegavanjem integralenja, znatno pojednostavljuje i ubrzava samo računanje. Karakteristična površina izlazne promenljive prikazana je na slici 8.

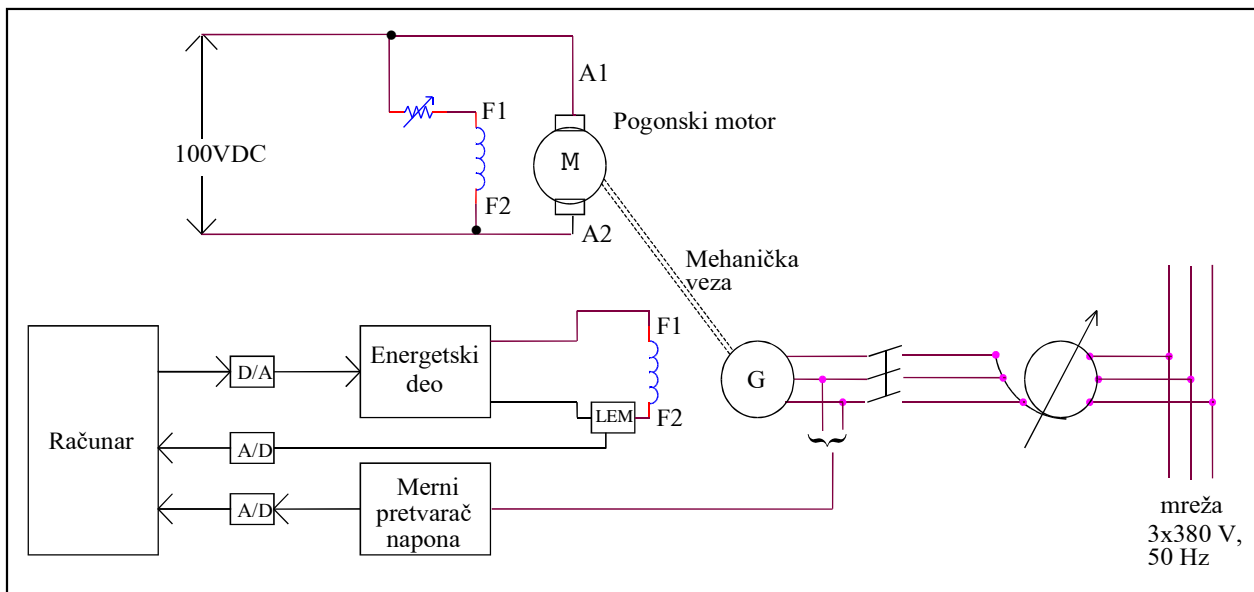


Slika 8. Karakteristična površina izlazne promenljive

2.4 Praktična realizacija

Eksperimentalna provera Fuzzy regulatora pobude izvršena je na trofaznom sinhronom generatoru snage 2 kW, 1 000 ob/min. Pogon generatora obezbeđen je pomoću jednosmernog motora (220 V, 11 A, 1,8 kW, 950 ob/min) koji je pobuđivan nereguliranim jednosmernim naponskim izvorom.

Upravljački deo Fuzzy regulatora realizovan je korišćenjem računara Pentium II 377 MHz, akvizicione karte ED 429 i softvera za upravljanje u realnom vremenu. Softver je napisan u programskom jeziku „C”. Perioda odabiranja regulacione petlje je 500 μs. Akviziciona karta poseduje 12-bitni AD-ulaz koji meri u opsegu $-10 \div +10$ VDC kao i 12-bitni DA izlaz koji generiše komandni naponski signal u opsegu $-10 \div +10$ VDC. Ulaz u AD kartu je naponski signal čije je prilagođenje izvršeno pomoću naponskog transformatora 380/10 V/V, ispravljačkog stepena i niskopropusnog pasivnog RC filtra prvog reda koji služi za filtriranje visokofrekventnog šuma. Ulaz u računar je sada ispravljeni napon statora generatora. Proračun srednje vrednosti ispravljenog napona se vrši digitalnom filtra-

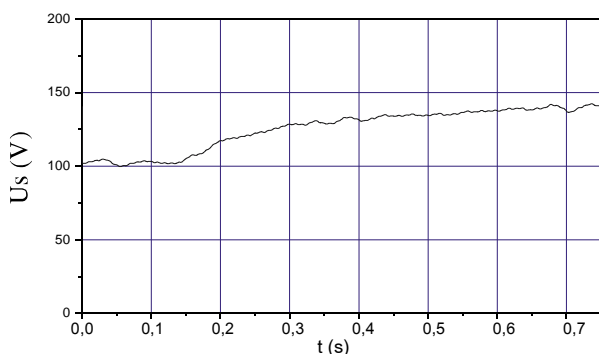


Slika 9. Praktična primena fuzzy regulatora napona sinhronog generatora

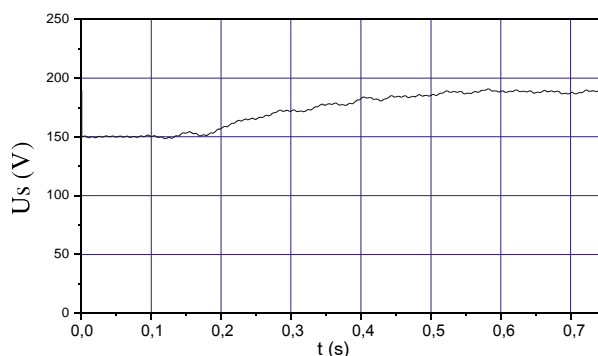
cijom korišćenjem niskopropusnog Chebyshev-ljevog filtra trećeg reda propusnog opsega 50 Hz.

Komandni naponski izlaz D/A konvertora se vodi na ulaz jednosmernog pojačavača snage čiji je izlazni stepen vezan u kolo pobude sinhronog generatora. Pojačavač snage se sastoji iz dva stepena: u prvom stepenu se generiše odgovarajući PWM signal, a u drugom se vrši pojačanje snage. Galvanska izolacija je izvršena pomoću optokaplera. Regulisanje napona pobude sinhronog generatora vrši sa pomoću BUCK konvertora realizovanog sa IGBT tranzistorom.

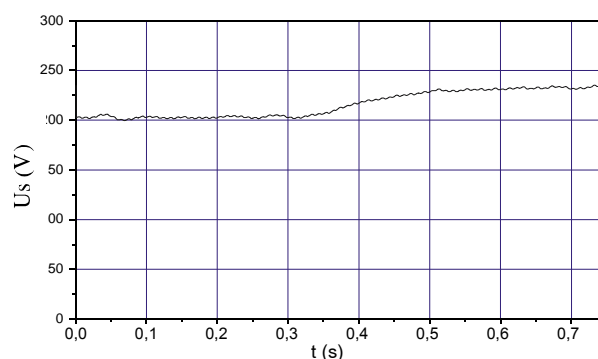
Na slikama 10, 11 i 12, prikazani su odzivi sistema na step poremećaj kada je generator radio na mreži. Analizom odziva sistema sa primenjenim Fuzzy regulatorom jasno se uočava da je dobijeni odziv sistema bez preskoka ali sa različitim brzinama u različitim radnim režimima. To pokazuje da ukoliko želimo da postignemo i da se sistem indentično ponaša u različitim režimima, potrebno je izmeniti strukturu samog regulatora.



Slika 10. Odziv generatora na step poremećaj pri početnoj vrednosti napona statora 100 V



Slika 11. Odziv generatora na step poremećaj pri početnoj vrednosti napona statora 150 V



Slika 12. Odziv generatora na step poremećaj pri početnoj vrednosti napona statora 200 V

Uočljivo je, na osnovu prethodnog oglada sa sinhronom mašinom, da se struja pobude može koristiti kao signal na osnovu koga je moguće kvantifikovati nelinearnost sinhronne mašine. Snimci odziva same sinhronne mašine na step poremećaj bez

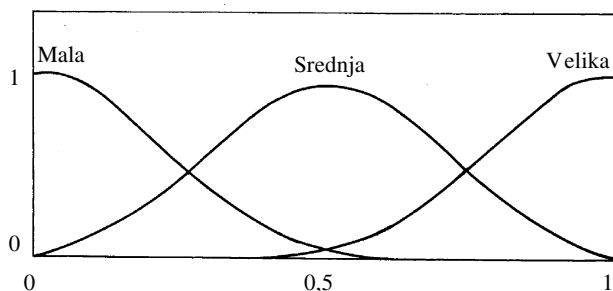
regulatora, kao i odzivi sa Fuzzy regulatorom realizovanim sa dva ulaza, daju sledeće smernice:

- Pošto je pri malim pobudnim strujama brzina odziva manja to je potrebno povećati pojačanje Fuzzy regulatora pri nižim vrednostima pobude.
- Takođe je potrebno povećati pojačanje Fuzzy regulatora pri visokim strujama pobude zbog pojave zasićenja.

2.5 Fuzzy regulator sa strujom pobude generatora kao dodatnim ulazom

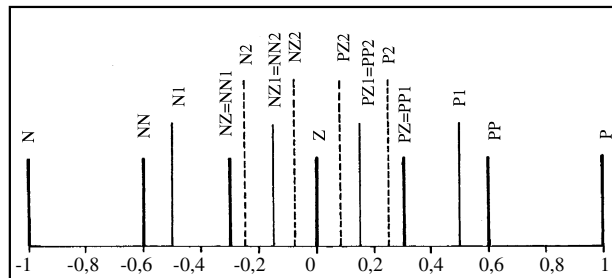
Struja pobude je uvedena u Fuzzy regulator kao dodatni ulaz. Struja pobude meri se LEM modulom i u računar se uvodi kao naponski signal. S obzirom na to da je oblik odziva identičan i bez preskoka pri različitim vrednostima pobudnih struja, potrebno je uticaj struje pobude u regulaciju uvesti tako da se reflektuje samo kao promena ukupnog pojačanja Fuzzy regulatora, pri čemu se oblik nelinearnosti ne menja. Sama struktura Fuzzy regulatora omogućava elegantno ostvarivanje ove ideje proširenjem prethodne strukture. Promena pojačanja Fuzzy regulatora postiže se promenom širine opsega izlazne promenljive, pri čemu je neophodno očuvati međusobni relativni položaj izlaznih funkcija pripadnosti. Struktura Fuzzy regulatora promenjena je na sledeći način:

- Kao treći ulaz u regulator dodata je struja pobude.
- Struji pobude su dodeljene tri funkcije pripadnosti raspoređene kao na slici 13 sa nazivima mala, srednja, velika.

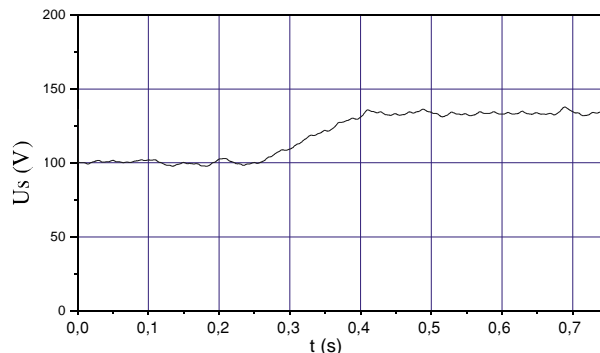


Slika 13. Funkcije pripadnosti ulazne promenljive I_f

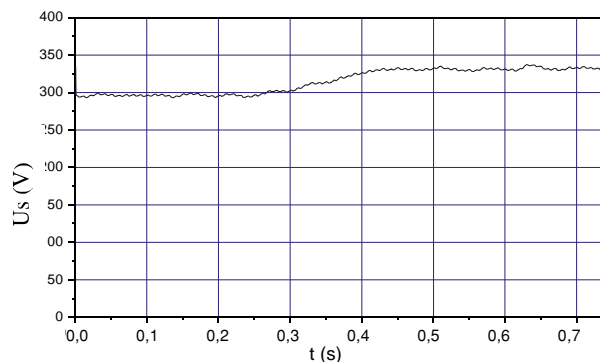
- Fuzzy pravila generisana su na sledeći način : u zavisnosti od veličine struje pobude aktivira se jedna od tri matrice pravila koje su po strukturi identične matrici pravila Fuzzy regulatora sa dva ulaza samo se bira željeni izlazni opseg.
- Izlaznom signalu dodate su nove diskretne funkcije pripadnosti. Te nove funkcije pripadnosti raspoređene su tako da predstavljaju skaliran početni opseg (slika 14), a u skladu sa matricama pravila.



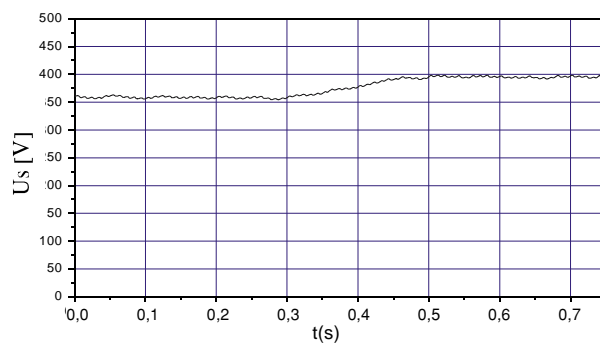
Slika 14. Funkcije pripadnosti izlazne promenljive regulatora



Slika 15. Odziv generatora na step poremećaj pri početnoj vrednosti napona statora 100 V



Slika 16. Odziv generatora na step poremećaj pri početnoj vrednosti napona statora 300 V



Slika 17. Odziv generatora na step poremećaj pri početnoj vrednosti napona statora 350 V

Novi Fuzzy regulator takođe je eksperimentalno proveren. Odzivi sistema su prikazani na slikama 15, 16 i 17. Na osnovu odziva datim na slikama može se zaključiti da je primenom Fuzzy regulatora napona sinhronog generatora proširenog dodatnim ulazom po struji pobude postignut željeni efekat – kompenzovana je nelinearnost sinhronog generatora čime je omogućeno da sistem ima istu brzinu odziva u svim režimima rada.

3. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana primena Fuzzy logike u projektovanju regulatora napona sinhronog generatora radi postizanja što veće brzine reagovanja na pobudu određenim ulaznim signalom, sa što manjim preskokom.

Nelinearnost mašine detektovana je snimanjem odziva na step poremećaj i na osnovu tako detektovane nelinearnosti sintetisan je fuzzy regulator sa greškom napona statora i njenim izvodom kao ulaznim promenljivima. Na osnovu odziva je utvrđena potreba da se, radi dobijanja jednakog odziva u svim radnim režimima, kao dodatni ulazni signal uvede struja pobude. Fleksibilnost strukture Fuzzy regulatora omogućava da se uticaj struje pobude u procesu regulacije reflektuje isključivo kroz promenu ukupnog pojačanja Fuzzy regulatora. Dobijeni

odzivi pokazuju da je postignut stabilan, dovoljno brz odziv, robustan pri svim opterećenjima. Na snimcima reagovanja je takođe uočljivo da ukoliko uopšte postoji preskok, isti je minimalan, što predstavlja još jednu značajnu prednost postignutu primenom Fuzzy regulatora.

4. LITERATURA

- [1] Brock j. LaMeres, M. Hashem Nehrir, FUZZY LOGIC BASED VOLTAGE CONTROLLER FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR, IEEE Computer Applications in Power, April 1999
- [2] Abulr. Hasan, Thomas S. Martis, A.H.M. Sadrul, DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A FUZZY CONTROLLER BASED AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR, IEEE Transactions on Energy Conversion, September, 1994.
- [3] D. Teodorović, UVOD U TEORIJU FUZZY SKUPOVA I PRIMENE U SAOBRAĆAJU, Beograd.
- [4] E. Handschin, W. Hoffmann, F. Reyer, Th. Stephanblome, U. Schluckling, D. Westermann, S. S. Ahmed, A NEW METHOD OF EXCITATION CONTROL BASED ON FUZZY SET THEORY, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 9, No.1, February 1994.
- [5] M. Sugeno, INDUSTRIAL APPLICATIONS OF FUZZY CONTROL, Elsevier Science, Pub. Co., 1985.

Rad je primljen u uredništvo 11. 10. 2001. godine

Dragan Filipović

Snimanje brzog naponskog tranzijenta u tečnim izolatorima tomografskim postupkom

Stručni rad
UDK: 621.315.615

Rezime:

U radu se razmatra komparativni postupak verifikacije eksperimentalnog i numeričkog metoda za određivanje električnog polja brzog prenaponskog talasa u uljnoj izolaciji. Eksperimentalni postupak se zasniva na tomografskoj metodi i Kerrovom efektu. Numerički postupak se zasniva na primeni metode konačnih razlika. Dobijeni rezultati omogućavaju pouzdano dimenzionisanje izolacije visokonaponskih distributivnih transformatora.

Ključne reči: koordinacija izolacije, laserska tomografija, Kerrov efekat, metod konačnih razlika

Abstract:

**RECORDING OF FAST VOLTAGE TRANSIENT
IN LIQUID INSULATORS BY MEANS OF TOMOGRAPHIC PROCEDURE**

The paper deals with the comparative procedure of verification of experimental and numeric method for determination of fast overvoltage wave electric field in oil insulation. The experimental procedure is based on the tomographic method and Kerr effect. The numeric procedure is based on the application of the final difference method. The obtained results enable reliable dimensioning of isolation of high-voltage distribution transformers.

Key words: insulation coordination, laser tomography, Kerr effect, final difference method

1. UVOD

Rad električne opreme u uslovima sve veće elektromagnetne kontaminacije aktuelizira pitanje pouzdanog dimenzionisanja izolacije. Ovaj problem je od posebnog značaja u slučaju visokonaponske opreme instalisane u energetskom sistemu i elektronskih komponenata u sklopu upravljačko-mernih sistema. Rešavanje pomenutih problema odvija se u dvema odvojenim, ali srodnim oblastima, to jest oblastima koordinacije izolacije na visokonaponskom i niskonaponskom nivou [1,2].

Koordinacija izolacije na visokonaponskom nivou, podrazumeva izbor i dimenzionisanje izolacije visokonaponske opreme tako da ona, uz odgovarajuće mere zaštite, pouzdano funkcioniše u uslovima eksploatacije. Ovaj problem bio bi lako rešiv kada bi visokonaponska oprema u uslovima eksploatacije bila izložena samo nominalnim naponima. Međutim, pored nominalnih radnih napona, u energetskom sistemu se javljaju, takođe, prenaponski talasi, različitih oblika i amplituda, koji se po njemu kreću i višestruko reflektuju. Od njih posebnu opasnost, za instalisanu visokonaponsku op-

Mr Dragan Filipović, dipl. el. ing. Kraft R&D, Dept. Strategic Inovation Research, Glenview, USA

remu, predstavljaju, takozvani, brzi prenaponi nastali u energetsom sistemu sklopnim operacijama u metalom oklopljenim SF₆ gasom izolovanim postrojenjima ili indukovani elektromagnetnim poljem nuklearne eksplozije izvršene u višim slojevima atmosfere. Ovaj drugi tip brzih prenaponskih talasa u energetskim sistemima predstavlja, srećom, za sada, samo hipotetičnu mogućnost [3,4].

Prenaponska zaštita, za koju smo rekli da je integralni deo koordinacije izolacije, često nedovoljno brzo reaguje da bi sprečila prenapone nanosekundne brzine da prođu u štice visokonaponsku opremu. Kada se to jednom dogodi prenaponski talas može, naponski, prouzrokovati od delimičnog funkcionalnog oštećenja do potpunog uništenja posmatrane opreme.

Posebno osetljiv deo elektroenergetskog sistema na pojavu brzih prenapona su distributivni energetski transformatori. Sama identifikacija ponašanja distributivnog energetskog transformatora je izuzetno komplikovana. Primena metode "pokušaj - greška - korekcija" nije prihvatljiv pošto je skup, nepraktičan i dugotrajan. Međutim, on se ipak odomaćio ali samo za izrade velikih serija distributivnih energetskih transformatora uz akceptiranje nedovoljno pouzdanih rezultata.

Drugi, prenaponskoj zaštiti alternativni, metod obezbeđivanja distributivnih energetskih transformatora od dejstva brzih prenapona koji se sastoji od predimenzionisanja izolacije je takođe manjkav. Naime iako bi ovaj metod, na prvi pogled, dao univerzalno rešenje on uopšte ne mora biti uspešan kada je u pitanju naponsko opterećenje impulsima velike brzine u transformatorima. Razlog za tu konstataciju leži u veoma neravnomernoj raspodeli potencijala u slučaju složenih i heterogenih izolacionih sistema i pojava visokih potencijalnih razlika između fizički bliskih tačaka koje se razmatraju. Dakle, iako se radi o veoma sličnim izolacionim strukturama (dimenzionalno, identični izolacioni materijali, identičan postupak proizvodnje itd.) u većini slučajeva jednostavno ne postoji uniformnost raspodele potencijala čak ni u slučaju istog tipa distributivnih energetskih transformatora.

Dodatnu komplikaciju predstavlja i sama priroda izolatora. Naime ulja, koja se koriste kao tečni izolator u distributivnim energetskim transformatorima, zbog prisustva vlage ili gasova u rastvorenom stanju čak i veoma malim zapreminskim odnosima, reda ppm, znatno menjaju izolaciona svojstva. Ovome treba dodati i moguće probleme koji se mogu pojaviti radi strujanja izolacionog ulja (forsirane cirkulacije transformatorskih ulja kod energetskih transformatora radi hlađenja) koje dovodi do pojave statičkog naelektrisanja i značajne izmene izolacione sisteme. Na sreću, efekti strujanja

i provodljivosti tečnog dielektrika relativno malo utiču na ponašanje izolacionih sistema kada su oni izloženi naponskim impulsima nanosekundnog trajanja.

Imajući u vidu prethodno iznesene činjenice, jasno je da je, u fazi projektovanja i eksploatacije visokonaponskih distributivnih transformatora, poznavanje ponašanja njihove izolacije pod dejstvom brzih prenapona od izuzetnog značaja. Kao metod određivanja uticaja brzih prenaponskih talasa na tečnu izolaciju distributivnih energetskih transformatora nameće se ili numerički simulacioni postupak ili eksperimentalni postupak. Numerička simulacija jednokratnih impulsnih pojava nedefinisanog oblika je nedeterminisana radi njene stohastične prirode, a klasični merni postupak kapacitivnog sprežanja ograničeno primenljiv. Stoga se u ovome radu opredeljujemo da prikažemo jedan, novi koncept mernog postupka kojim se eliminiše najveći broj ovih nedostataka i koji je primenljiv za meritornu verifikaciju numeričkog postupka.

2. KLASIČNI POSTUPAK ODREĐIVANJA BRZO PROMENLJIVOG ELEKTRIČNOG POLJA U TEČNIM IZOLATORIMA

Klasični postupak određivanja električnog polja u tečnim izolatorima sastoji se u poznatom postupku kapacitivnog sprežanja kapacitivnom sondom u formi kompenzovanog razdelnika napona. U slučaju brzopromenljivih električnih polja, izazvanih brzim naponskim impulsima koji simuliraju brze prenaponske talase, određivanje električnog polja u tečnim izolatorima metodom kapacitivnog sprežanja ima problema [5,6,7].

- Prvi problem se sastoji u jednostavnoj činjenici da ne postoji dovoljno poznavanja niza fizičkih i dielektričnih osobina izolacionih sistema kada su izloženi naponskim impulsima veoma kratkog trajanja. Ovo postaje još izraženije zbog činjenice da višestruka izlaganja izolacionih sistema naponskim impulsima u mnogim slučajevima izazivaju hemijske promene i trajnu degradaciju dielektričnih svojstava samih izolacionih sistema. Razvrstavanje i sistematizovanje uticaja naponskih impulsa veoma kratkog trajanja na degradaciju elemenata izolacionih sistema predstavlja veoma ozbiljan zahvat s obzirom na raznorodnost materijala i niz specifičnosti vezanih za amplitudu naponskog impulsa, njegovo trajanje i brzinu promene.

- Drugi, ne manje značajan, problem, leži u činjenici da svi klasični merni postupci unose nedopustivu deformaciju merne veličine, zbog inherentnog kapaciteta samog mernog sistema. Smanjivanje dimenzija senzora merne sonde i primena spe-

cijalnih materijala [5,6] mogu da pomognu da se uticaj merne opreme na samu pojavu koja se meri nešto umanjiti, ali se jednostavno ne može mnogo učiniti kada je brzina naponskog impulsa reda nanosekunde.

– Treće, postoji problem indukovanih napona (smetnji) u mernom kolu – problem koji je neodvojivo vezan za klasičnu mernu opremu gde se merna veličina prenosi metalnim provodnicima (galvanskom vezom). Uticaj ovih indukovanih napona se može značajno umanjiti ali ne i eliminisati. Treba imati u vidu da je amplituda indukovanih napona proporcionalna brzini promene elektromagnetnog polja. Usled toga se i najkraće žičane strukture ponašaju kao antene prilikom njihovog prijema, odnosno kao vodovi prilikom njihovog prenosa. Dakle i pored toga što se vrši oklapanje mernih sistema i koristi se koaksijalni koncept, gde god je to moguće, neminovno se unosi greška pri merenjima impulsnim naponima frekvencija preko 100 MHz.

Ne treba zanemariti ni činjenicu da je generisanje potpuno identičnih naponskih impulsa visokonaponskim generatorima takođe ozbiljan zahtev s obzirom na inherentne osobine samih generatora što takođe neminovno doprinosi nepouzdanosti mernog postupka [8].

Zaključak se sam nameće. Klasičnim postupkom i klasičnom mernom aparaturom nije moguće postići zadovoljavajuću pouzdanost i verodostojnu interpretaciju rezultata merenja raspodele potencijala naponskih impulsa veoma kratkog trajanja. Svi navedeni razlozi navode na potrebu za razvojem alternativnog mernog sistema kojim bi se izbegla ograničenja klasičnih mernih sistema. Ovde pomenuto rešenje se sastoji u primeni laserske tomografije.

3. TOMOGRAFSKI POSTUPAK ODREĐIVANJA ELEKTRIČNOG POLJA U TEČNIM IZOLATORIMA

Cilj ovoga rada je da se promovise, testira i verifikuje jedan novi eksperimentalni pravac visokonaponskog istraživanja električnog polja u tečnim dielektricima. Osnovna ideja je u primeni postupka laserske tomografije.

Laserska tomografija je veoma privlačna alternativa na polju visokonaponskih merenja brzopromenljivih električnih veličina. Sam pojam tomografije je nastao u medicinskim naukama i predstavlja radiološki metod za dobijanje slika unutrašnje strukture objekta fokusiranjem na specifične ravni unutar njega [9]. Pošto se laserski snop upotrebljava kao nosilac informacija o merenoj veličini, ostvaruju se preduslovi da se veoma osetljiva merenja sprovedu bez uticaja na veličinu koja se proučava. Ova činjenica je izuzetno bitna kod proučava-

vanja svih onih veličina koje poseduju visoke frekvencije i mogu biti poremećene samim mernim postupkom ili mernom aparaturom.

Laserska tomografija je klasični tomografski postupak zasnovan na Kerrovom elektrooptičkom efektu. Kerrov elektrooptički efekat predstavlja pojavu dvojnog prelamanja svetlosti u jakim stacionarnim električnim poljima. Pri pojavi Kerrovog efekta razlika indeksa prelamanja, razlika optičkih puteva i fazna razlika nastalih, dvojno prelomljenih, talasa svetlosti zavise od kvadrata jačine električnog polja. To omogućava da se merenjem jedne od tih veličina odredi električno polje ili obrnuto. Ova osobina rezultira nizom relativnih prednosti metoda određivanja električnog polja baziranog na laserskoj tomografiji [10,11]:

- Praktično ne postoji interakcija između merne opreme i električnog polja. Ako se ovome doda činjenica da je laserski snop veoma uzak, postaje jasno da dimenzija sistema koji se proučava ne predstavlja značajan faktor kod primene ove metode. Ovo je naročito bitno kod procene da li je laserska tomografija primenjiva za proučavanje sredjenaponskih aparata i uređaja.
- Kerrov elektrooptički efekat ima veoma kratko vreme odziva, te je moguće ovaj pristup koristiti kod naponskih impulsa koji poseduju izuzetno visoke brzine promene ili kratko trajanje.
- Tečni dielektrici imaju visoke vrednosti probojnih napona ako je trajanje naponskih impulsa kratko. Ova činjenica je veoma bitna za povećanje tačnosti merne metode, pa se mogu primenjivati veoma visoke vrednosti naponskih impulsa bez opasnosti da dođe do električnog proboja.
- Kod minijaturnih elektrodnih sistema postoje određeni problemi jer je efekat promene ugla polarizacije laserskog zraka kumulativni i zavisi od dužine međuelektrodnog prostora u kome se oseća dejstvo električnog polja. Iz ovoga indirektno proizilazi i zaključak da se primenom dovoljno visokih amplituda naponskog impulsa može ostvariti zadovoljavajuća tačnost i kod dimenziono malih elektroda.

Naravno postoje i određena ograničenja predložene metode:

- Kerrov efekat postoji samo u slučajevima kada postoji komponenta polja koja je perpendikularna na pravac prostiranja polarizovane svetlosti. Drugim rečima, za bilo kakvu strukturu električnog polja u prostoru Kerrov efekat uzrokuje samo projekciju vektora električnog polja koja je okomita na pravac prostiranja laserskog snopa. Ovo je ujedno i najvažniji nedostatak metode koji ograničava njenu primenu u svim slučajevima.

- Sve tomografske metode podrazumevaju da postoji neometan pristup strukturi koja se analizira sa svih strana. To, naravno, u nizu elektrodnih sistema to jednostavno nije moguće, pa se može računati na značajne greške u rekonstrukciji nepoznatog polja ako se u numeričkoj rekonstrukciji nepoznate strukture izostave projekcije koje odgovaraju prozračivanju iz određenih uglova.
- Ukoliko se optička komponenta nalazi izvan posude u kojoj se nalazi elektrodni sistem koji se analizira tada transparentnost zidova posude mora biti visoka i uniformna.
- Radi izuzetno male Kerrove konstante transformatorskog ulja neophodno je da se relativno precizno generiše impulsno električno polje od nekoliko desetina kV/mm.
- Problemi sa vibracijama mogu izazvati izvesnu nestabilnost rezultata merenja i njihovo rasipanje, ali se primenom specijalnih antivibracionih optičkih klupa i usrednjavanjem rezultata merenja, navedeni problemi uglavnom svode u prihvatljive okvire.
- Neophodno je da se koriste veoma čisti transparentni dielektrici i kvalitetni transparentni materijali za posudu u kojoj se ispitivani elektrodni sistem nalazi

4. MERNJA OPREMA

Osnovna primena predložene eksperimentalne metode je da se identifikuju i verifikuju relevantni fizički parametri visokonaponskih uređaja bez obzira na složenost konstrukcije i brzinu promene upadnog naponskog impulsa. Kada je postignuta zadovoljavajuća tačnost pri identifikaciji parametara razmatranog sistema, otvara se put za verodostojnu numeričku, eksperimentalno proverljivu, analizu raspodele potencijala. Krajnji cilj je da se optimizira konstrukcija i poveća pouzdanost rada sistema izolovanih uljem pod dejstvom brzih naponskih promena i visoke amplitude.

1. Izolacioni transformator: Namena ovoga transformatora je da se niskonaponska merna kola kao i visokonaponski deo opreme galvaniski odvoje od napona napajanja.

2. Regulacioni transformator: Snaga ovoga autotransformatora je 1 kVA, a primarni napon 220 V/ 50 Hz.

3. Visokonaponski transformator: Služi za pozivanje primarnog napona do 200 kV/ 50 Hz.

4. Visokonaponska dioda: Ispravlja visoki napon da bi njime punila visokonaponski koaksijalni kabl.

5. Otpornik za ograničenje struje: Služi da ograniči struju kroz sekundarni namotaj visokona-

ponskog transformatora prilikom pražnjenja kablovskog generatora.

6. Varničar: U suštini ima ulogu prekidača i služi da se elektrostatička energija skoncentrisana u koaksijalnom kablju prenese na vodeni otpornik kao i sve elemente koji su galvaniski povezani sa varničarem.

7. Koaksijalni vodeni otpornik: Namena ovoga otpornika je da se kablovski generator završi sa karakterističnom impedansom samog kabla.

8. Strujna merna sonda: Služi za merenje struje na izlazu iz kablovskog generatora čime se izbegava merenje napona na samoj Kerrovoj ćeliji.

9. Sistem za translaciju Kerrove ćelije: Služi za pomeranje Kerrove ćelije čime je izbegnuto pomeranje optičkog sistema.

10. Optički prijemnik: Služi za optičko - električnu konverziju prijemnog optičkog signala.

11. Digitalni osciloskop: Korišćen je dvokanalni digitalni osciloskop izuzetno visokih performansi.

12. PC računar: Korišćen za trajno memorisanje aktuelnih podataka iz digitalnog osciloskopa kao i za numeričko procesiranje podataka

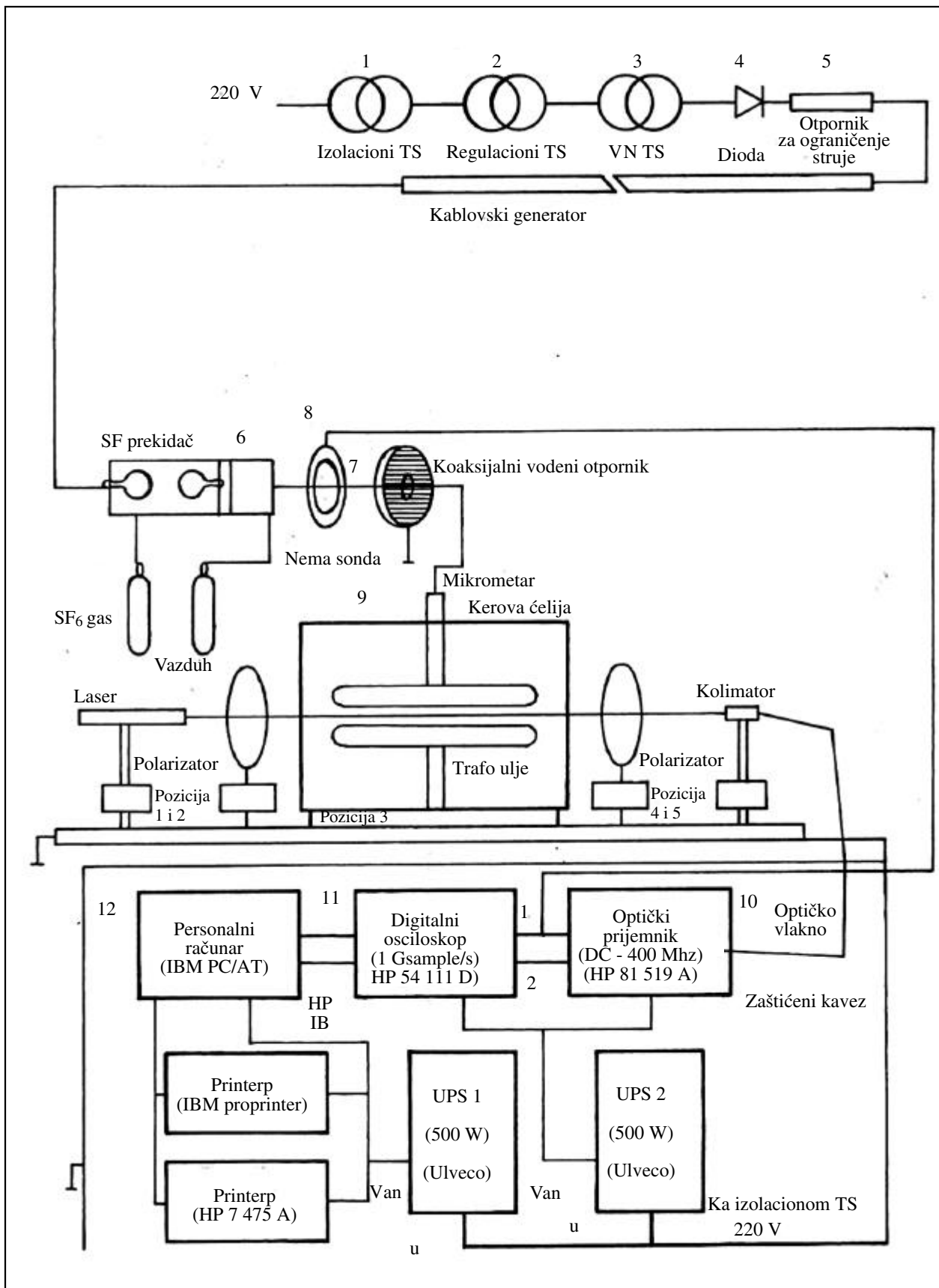
Rezultati tomografskog postupka za određivanje digitalnog osciloskopa kao i za numeričko procesiranje podataka električnog polja su, standardno, dati u matricnom obliku gde vrste i kolone određuju pozicije u kojima je električno polje rekonstruisano. Vrednosti elemenata na taj način dobijenih matrica predstavljaju odgovarajuće vrednosti električnog polja za posmatranu ravan. Kako je osnovna ideja ovoga rada ispitivanje mogućnosti eksperimentalne verifikacije rezultata proračuna električnog polja metodom konačnih razlika dimenzije tomografske matrice i numeričke matrice konačnih razlika su uzimane iste za posmatranu ravan.

5. REZULTATI DOBIJENI ZA OSNOSIMETRIČNI SISTEM

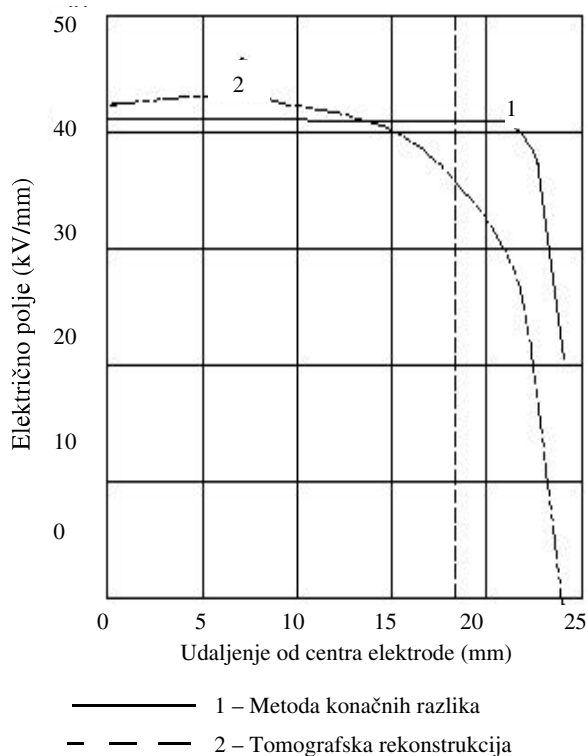
Na slici 2 su grafički predstavljene dve krive za osnosimetrični elektrodni sistem 1 - numerički izračunata vrednost električnog polja u funkciji udaljenja od centra elektrode dobijena metodom konačnih razlika i 2 - eksperimentalna kriva dobijena opisanim eksperimentalnim postupkom.

6. ZAKLJUČAK

S obzirom da se radi o osnosimetričnom elektrodnom sistemu sa konstantnim rastojanjem između elektroda može se tvrditi da je električno polje između elektroda homogeno. Predložena eksperimentalna metoda ima određena odstupanja u odnosu na proračunatu krivu dobijenu metodom konačnih raz-



Slika 1. Šema mernog sistema korišćenog u radu



Slika 2. Simetrični elektrodni sistem: Upoređenje metode konačnih razlika i metode bazirane na laserskoj tomografiji

lika. Ovo odstupanje je direktna posledica činjenice da je prilikom tomografske rekonstrukcije korišćena gruba matrica malih dimenzija. Iz ove kratke analize jasno se uviđa neophodnost da se u eksperimentalnom postupku koristi daleko veći broj eksperimenata. Međutim, možemo zaključiti da i pored ovog nedostatka postoji opravdanost uvođenja laserskog tomografskog postupka za određivanje električnog polja u tečnim izolatorima.

7. LITERATURA

- [1] Boeck W., Witzmann R., Main INFLUENCES ON THE FAST TRANSIENT DEVELOPMENT IN GAS INSULATED SUBSTATIONS, 5-th ISH, Braunschweig 1986, paper 12.01.
- [2] P. Osmokrović, I. Krivokapić, D. Matijašević, N. Kartalović - STABILITY OF THE GAS FILLED SURGE ARRESTERS CHARACTERISTICS UNDER SERVICE CONDITIONS - IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, Vol.11, No.1, pp. 260 - 266.
- [3] Meppelink J., FESER VERY FAST TRANSIENTS IN GIS, IEEE - PES Winter Meeting New York 1988.
- [4] King R.W.P., Blayer D. J., THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN A EMP - SIMULATOR AT HIGH FREQUENCY, IEEE Trans. Electromagn. Compat., EMC -21 1987, pp 32 - 39.
- [5] P. Osmokrović, D. Petković, O. Marković - MEASURING PROBE FOR FAST TRANSIENT MONITORING IN GAS - INSULATED SUBSTATIONS - IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1997, Vol.46, No.1, pp 36 -45
- [6] P. Osmokrović, D. Petković, O. Marković, N. Kartalović, Đ. Vukić - MEASURING SYSTEM FOR FAST TRANSIENT MONITORING IN GAS - INSULATED SUBSTATIONS - VDE, ETEP, 1997, Vol.7, No. 3, pp. 165 - 172
- [7] R. E. Rebner, R. A. Malewski, E. C. Cassidy, OPTICAL METHODS OF ELECTRICAL MEASUREMENTS AT HIGH VOLTAGE LEVELS, Proceedings of IEEE, Vol. 65, No. 11, Nov. 1977.
- [8] A. Schwab, HOCHSPANNUNGSMEßTECHNIK, Springer Verlag 1981.
- [9] ENCICLOPEDIA BRITANICA
- [10] H.K. Aben, KERR EFFECT TOMOGRAPHY FOR GENERAL AXISYMMETRIC FIELD, Applied Optics, Vol. 26, No.14, July 1987
- [11] T. Maeno, T. Takada, ELECTRIC FIELD MEASUREMENT IN LIQUID DIELECTRIC USING A COMBINATION OF AC VOLTAGE MODULATION AND SMALL RETARDATION ANGLE, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Volume. EI 22, Nov. 4, August 1987.

Rad je primljen u uredništvo 11. 10. 2001. godine

Aleksandra Popovac-Damljanović,
Stojan Nikolajević, Zvonko Mitrović

Metode transpozicije metalnih plašteva visokonaponskih kablova

Stručni rad
UDK: 621.315.22; 679.743.4; 679.743.6.

Rezime:

U referatu se analiziraju metode transpozicije metalnih plašteva jednožilnih kablova priključenih na nazemni napon. Praksa je pokazala da je veoma važno utvrditi način spajanja jednožilnih kablova, kako bi se pojavila cirkulacionih struja kroz metalni plašt kablova a samim tim i toplotni gubici smanjili. U radu se opisuju sledeće metode: metoda povezivanja i uzemljenja metalnih plašteva kablova u jednoj tački (single-point bonding of screens), metoda povezivanja i uzemljenja metalnih plašteva na krajevima (both-ends bonding of screens) i metoda transpozicije metalnih plašteva kablova (cross-bonding of screens).

Ključne reči: jednožilni kablovi, metalni plašt, transpozicija plašteva – cross-bonding, gubici u metalnim plaštevima

Abstract:

TRANSPOSITION OF METAL JACKETS OF HIGH-VOLTAGE CABLES

The paper deals with methods of transposition of single-wired metal jackets connected to alternating voltage. Practice has proved that it is very important to establish a way of connecting single-wired cables in order to reduce the phenomenon of circulation currents through metal jackets of cables and thereby thermal losses as well. The paper deals with the following methods: method of single point bonding of screens, method of both-ends bonding of screens and method of cross-bonding of screens.

Key words: single-wired cables, metal jacket, transposition of jackets-cross-bonding, losses in metal jackets

1. UVOD

Električne gubitke u kablovima čine: gubici u provodniku, gubici u metalnim plaštevima, gubici u metalnoj mehaničkoj zaštiti i dielektrični gubici.

Gubitke u metalnom plaštu prouzrokuju: cirkulacione i viorne struje. Gubici usled cirkulacionih struja postoje samo kod jednožilnih kablova. Ove struje teku duž metalnog plašta i zatvaraju se preko zemlje. Gubici usled viornih struja se u većini slučajeva mogu zanemariti (plaštevima su od nemagnetnih materijala). Gubici usled cirkulacionih

struja u metalnim plaštevima dovode do smanjenja dozvoljenog strujnog opterećenja kablovskog voda i opadaju sa porastom otpora plašta.

Kod polaganja jednožilnih kablova u formaciji deteline, *trefoil formation*, cirkulacione struje su manje, ali je veće zagrevanje kablova zbog međusobne blizine pa je i dozvoljeno strujno opterećenje manje. Pri polaganju kablova u ravni, *flat formation*, cirkulacione struje su veće, ali je međusobni toplotni uticaj manji.

Neke od metoda za smanjenje cirkulacionih struja opisać će se u ovom referatu.

Mr Aleksandra Popovac-Damljanović, dipl. ing., prof. dr Stojan Nikolajević,
– "EPS" JP "Elektrodistribucija", 11000 Beograd, Gospodar Jevremova 28
Zvonko Mitrović, dipl.ing.el.– Fabrika kablova "Jagodina", 35000 Jagodina

2. METODE TRANSPOZICIJE METALNIH PLAŠTEVA VN KABLOVA

Strujno opterećenje kablova u trofaznom sistemu može se prikazati sledećim jednačinama:

$$\underline{I}_1 = -(\underline{I}_2 + \underline{I}_3)$$

$$\underline{I}_2 = -(\underline{I}_1 + \underline{I}_3)$$

$$\underline{I}_3 = -(\underline{I}_1 + \underline{I}_2)$$

Struja kroz metalni plašt je:

$$\underline{I}_{sc1} = -(\underline{I}_{sc2} + \underline{I}_{sc3})$$

$$\underline{I}_{sc2} = -(\underline{I}_{sc1} + \underline{I}_{sc3})$$

$$\underline{I}_{sc3} = -(\underline{I}_{sc1} + \underline{I}_{sc2})$$

Indukovani napon na metalnom plaštu se može izraziti sledećom formulom:

$$\underline{V}_{sc1} = \underline{I}_{sc1} R_{sc} - j\omega M_{12}(\underline{I}_2 + \underline{I}_{sc2}) - j\omega M_{13}(\underline{I}_3 + \underline{I}_{sc3})$$

$$\underline{V}_{sc2} = \underline{I}_{sc2} R_{sc} - j\omega M_{12}(\underline{I}_1 + \underline{I}_{sc1}) - j\omega M_{23}(\underline{I}_3 + \underline{I}_{sc3})$$

$$\underline{V}_{sc3} = \underline{I}_{sc3} R_{sc} - j\omega M_{12}(\underline{I}_1 + \underline{I}_{sc1}) - j\omega M_{23}(\underline{I}_2 + \underline{I}_{sc2})$$

gde je:

$$\omega = 2\pi f, f = 50 \text{ Hz,}$$

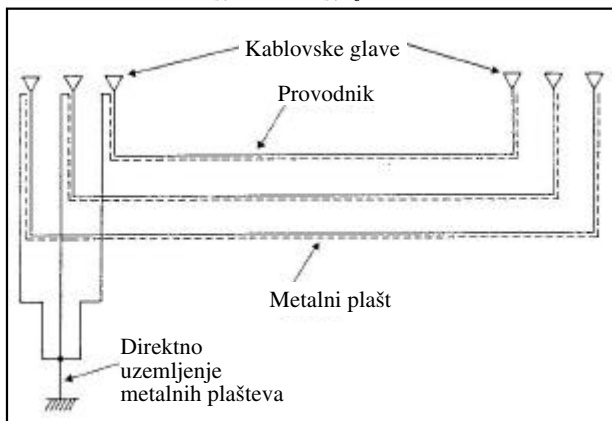
M – međusobna induktivnost između provodnika kablova i metalnog plašta susjednog kablova (H/m)

R_{sc} – otpornost plašta (Ω/m).

Single-point bonding of screens, predstavlja metodu povezivanja metalnih plašteva kablova na jednom kraju kablova i njihovog uzemljivanja, kao što je prikazano na slici 1.

Kod polaganja kablova u formaciji deteline struja kroz metalni plašt je:

$$\underline{I}_{sc} = 0, \text{ a } \underline{V}_{sc} = j\omega M \underline{I}$$



Slika 1. Povezivanje i uzemljenje metalnih plašteva na jednom kraju

Kada su jednožilni kablovi položeni u ravni, struja kroz metalni plašt je nula, a indukovani naponi su:

$$\underline{V}_{sc1} = -j\omega M_{12} \underline{I}_2 - j\omega M_{13} \underline{I}_3$$

$$\underline{V}_{sc2} = -j\omega M_{12} \underline{I}_2$$

$$\underline{V}_{sc3} = -j\omega M_{13} \underline{I}_1 - j\omega M_{12} \underline{I}_2$$

Indukovani naponi su proporcionalni dužini kablova.

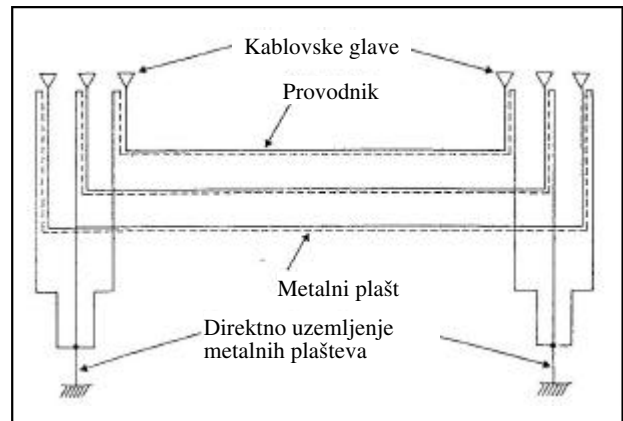
Druga i najčešće korišćena metoda, *both-ends bonding of screens*, je metoda povezivanja metalnih plašteva na krajevima kablova i uzemljivanja, slika 2.

Izrazi za struju kroz metalni plašt i indukovani napon prikazani su sledećim formulama i to:

– polaganje kablova u formaciji deteline:

$$\underline{V}_{sc1} = \underline{V}_{sc2} = \underline{V}_{sc3} = 0$$

$$\underline{I}_{sc1} = \underline{I}_{sc2} = \underline{I}_{sc3} = \underline{I}_{sc}$$



Slika 2. Povezivanje i uzemljenje metalnih plašteva na oba kraja

$$\underline{I}_{sc} = \underline{I} \frac{-j\omega M}{R_{sc} + j\omega M}$$

– polaganje kablova u ravni:

$$\underline{V}_{sc1} = \underline{V}_{sc2} = \underline{V}_{sc3}$$

Indukovani napon se izračunava na osnovu prethodnih jednačina.

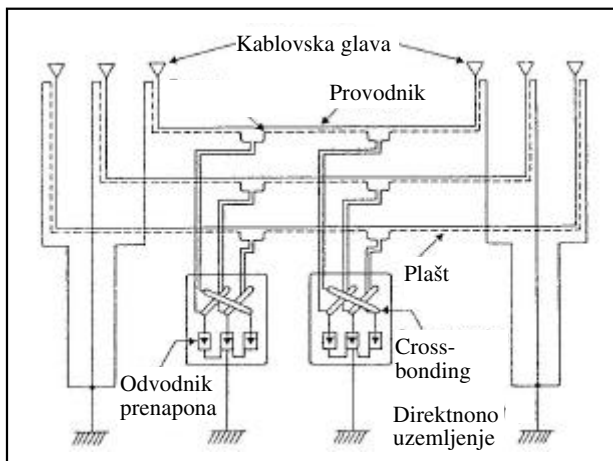
Kod visokonaponskih kablova ove cirkulacione struje su visoke i mogu dostići skoro i do jedne trećine dozvoljenog strujnog opterećenja kablova. Zato se najčešće primenjuje metoda transpozicije plašteva kablova, *cross-bonding*, slika 3.

Kod primene ove metode takođe, se posebno razmatra polaganje kablova u formaciji deteline, a

posebno polaganje kablova u ravni. Zajedničko je da se kod formiranja električnih kola od metalnih plašteva, ukrštanje izvrši tako da ukupna struja u svakom električnom kolu bude jednaka nuli ili da teži nuli. Prvo električno kolo povezuje metalni plašt prve sekcije kabla prve faze sa metalnim plaštom druge sekcije kabla druge faze i treće sekcije kabla treće faze. Drugo električno kolo povezuje metalni plašt prve sekcije kabla druge faze sa drugom sekcijom kabla prve faze i trećom sekcijom kabla druge faze. Treće električno kolo povezuje metalni plašt prve sekcije kabla treće faze sa drugom sekcijom kabla prve faze i trećom sekcijom kabla druge faze.

Kod primene ove metode zahteva se da broj deonica bude deljiv sa tri. Takođe, zahteva se primena posebnih spojnic, nazvanih izolacione spojnice koje se ugrađuju na mesta gde se vrši transpozicija metalnih plašteva.

Napon na krajevima je:



Slika 3. Transpozicija metalnih plašteva

$$\underline{U}_1 = I_1 \underline{U}_x + I_2 \underline{U}_y + I_3 \underline{U}_z \quad \underline{U}_y = jX_A I_1$$

$$\underline{U}_2 = I_1 \underline{U}_y + I_2 \underline{U}_z + I_3 \underline{U}_x \quad \underline{U}_y = jX_B I_2$$

$$\underline{U}_3 = I_1 \underline{U}_z + I_2 \underline{U}_x + I_3 \underline{U}_y \quad \underline{U}_z = jX_C I_3$$

gde je:

l_1, l_2, l_3 – dužina sekcije (m)

I_1, I_2, I_3 – struje provodnika faze I,II,III (A)

X_A, X_B, X_C – reaktansa plašta (Ω/m).

Impedansa električnog kola X,Y i Z je:

$$\underline{Z}_x = I_1 (R_{sc} + jX_A) + I_2 (R_{sc} + jX_B) + I_3 (R_{sc} + jX_C)$$

$$\underline{Z}_y = I_1 (R_{sc} + jX_B) + I_2 (R_{sc} + jX_C) + I_3 (R_{sc} + jX_A)$$

$$\underline{Z}_z = I_1 (R_{sc} + jX_C) + I_2 (R_{sc} + jX_A) + I_3 (R_{sc} + jX_B)$$

Struja kroz metalni plašt se izračunava prema formuli $\underline{I}_{sc} = \underline{U}/\underline{Z}$.

$$\underline{I}_{sc} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{\frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln 2}{3R_{sc} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left(3 \ln \frac{d}{r_{sc}} + \ln 2 \right)} I$$

Kod polaganja kablova u formaciji deteline u slučaju kada je:

$$X_A = X_B = X_C, \quad X = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r_{sc}}$$

$$i \quad l_1 = l_2 = l_3 = l,$$

struja kroz metalni plašt i napon je nula.

Međutim, ovakav slučaj u praksi nije moguće sasvim izvesti s obzirom da dužine sve tri deonice kablovskog voda nisu identične zbog postojanja i ukrštanja sa raznim drugim podzemnim instalacijama.

Kod polaganja kablova u ravni vrednost struje kroz metalni plašt zavisi od vrednosti struje provodnika, dužine kablova i međusobnog rastojanja i izračunava se prema sledećim jednačinama:

$$X_A = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{r_{sc}} + 0,5 \ln 2 - j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln 2 \right),$$

$$X_B = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{r_{sc}} \right),$$

$$X_C = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{r_{sc}} + 0,5 \ln 2 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln 2 \right),$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \underline{U}_3 = \underline{U}$$

Indukovani napon je:

$$\underline{U} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \underline{I} \cdot l \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln 2$$

Struja kroz metalni plašt se izračunava:

$$\underline{I}_{sc} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln 2}{3 \ln \frac{d}{r_{sc}} + \ln 2}$$

3. PRIMER PRORAČUNA

Proračun cirkulacionih struja urađen je na primeru kablovskog voda tipa XHE 49-A 1×1 000/95 mm² 110 kV. Posmatrani su jednožilni kablovi položeni u formaciji deteline sa povezanim i uzemljenim metalnim plaštevima na krajevima kablovskog voda. Rezultati proračuna prikazani su na slici 4.

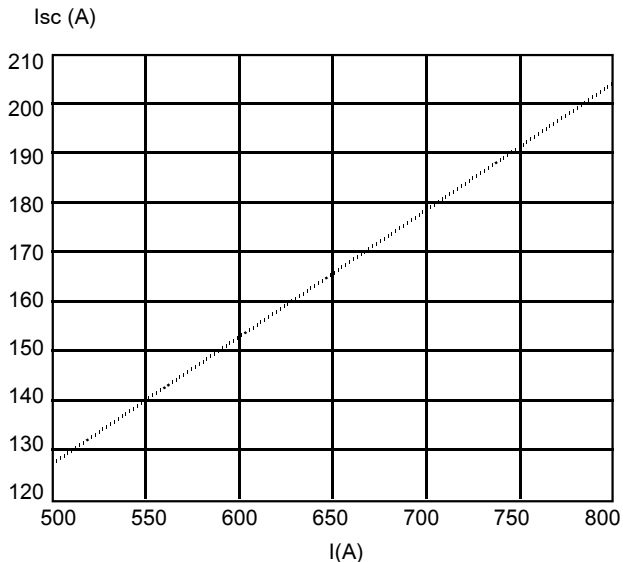
Na osnovu rezultata zaključuje se da vrednosti struja kroz metalni plašt zavise od struje provodnika, dužine kabla i međusobnog rastojanja i da mo-

gu dostići vrednosti i do jedne trećine dozvoljenog strujnog opterećenja.

Primenom cross-bondinga, deonica od 2,377 km se podeli na približno tri jednaka dela:

$$l_1=772 \text{ m}, l_2=820 \text{ m i } l_3=785 \text{ m.}$$

Rezultati proračuna dati su u tabeli 1.



Slika 4. Struja metalnog plašta u funkciji struje provodnika za slučaj povezivanja i uzemljenja plašteva kablova na krajevima

Tabela 1.

I(A)	600	800	1 000	1 200
I_{sc1} (A)	5,3	7,1	8,8	10,6
I_{sc2} (A)	5,7	7,6	9,5	11,4
I_{sc3} (A)	5,7	7,6	9,5	11,5

Proračun gubitaka urađen je na primeru kabla XHE 49-A 1x1 000/95 mm² 110 kV koji je opterećen naznačenom strujom od 785 A. Struktura gubitaka prikazana je u narednim tabelama 2 i 3.

Tabela 2.

Metalni plaševi uzemljeni na oba kraja		
Gubici (W/m)	Trefoil formacija	Flat formacija
W _c	25.10	24.40

W _{sc}	8.60	37.00
W _d	0.26	0.26
W _{uk}	102,00	185,00

gde su:

W_c – gubici u provodniku, po fazi

W_{sc} – gubici u metalnom plaštu, po fazi

W_d – dielektrični gubici, po fazi

W_{uk} – ukupni gubici sistema za sve tri faze

Tabela 3.

Primena transpozicije metalnih plašteva cross-bonding		
Gubici W/m	Trefoil formacija	Flat formacija
W _c	25,10	24,40
W _{sc}	2,20	0,60
W _d	0,26	0,26
W _{uk}	83,00	76,00

Vidi se da su ukupni gubici u slučaju polaganja kablova u formaciji deteline sa plaštevima uzemljenim na oba kraja veći za 34% od gubitaka kod kablova položenih u ravni i izvršenom transpozicijom plašteva.

4. ZAKLJUČAK

Na vrednost cirkulacione struje utiču pre svega struja provodnika, dužina kablovskog voda i međusobno rastojanje između kablova. Veoma važno je u fazi projektovanja kablovskog voda izvršiti pravilan izbor načina povezivanja metalnih plašteva kablova kako bi se gubici smanjili i povećala propusna moć kablovskog voda. Jedan od najčešće primenjenih načina u praksi je metoda transpozicije metalnih plašteva ili cross-bonding. Kod polaganja kablova u formaciji deteline može se postići da vrednost struje bude što manja, približno nula. Na smanjenje cirkulacione struje kod polaganja kablova u ravni međusobno rastojanje je ključni parametar čijom se varijacijom postiže svođenje cirkulacionih struja na minimalnu vrednost a samim tim i gubitaka.

5. LITERATURA

- [1] S. Y. King, N. A. Halfter, UNDERGROUND POWER CABLES, Longman, London, 1982.
- [2] Brockbank, R. A. and Webb, J. K., SHEATH AND ARMOUR LOSSES IN SINGLE CORE CABLES FOR SINGLE PHASE AND THREE PHASE TRANSMISSION, Jour. IEE, 67, 1929, p. 337
- [3] IEC 287-1-1, 1994.
- [4] Katalozi proizvođača kablova i kablovskog pribora.

Mogućnost sanacije dalekovoda 110 kV Stolac – Bileća

Na armirano - betonskim stubovima tipa „Šperac”

Stručni rad
UDK: 621.315.1

Rezime:

Na teritoriji istočne Hercegovine javila se potreba za sanacijom 110 kV dalekovoda na armirano-betonskim stubovima tipa „Šperac”. Predmetna sanacija u građevinskom delu podrazumeva sanaciju svih vidova oštećenja stubova kao i njihovu zaštitu. U radu će biti opisan program istražnih radova, pregled i način ispitivanja armirano-betonskih stubova. U elektromontažnom delu rad obuhvata zamenu provodnika, zaštitnog užeta, izolatorskih lanaca, spojne opreme, rešenje novih elemenata zavešenja na stubovima, ugradnju prigušivača, kao i prilagodjenje stubova za primenu užeta sa optičkim vlaknom.

Ključne reči: armirano betonski stub (AB stub), marka betona, armatura, nosivost stuba, zavešenje, zaštitno uže sa optičkim vlaknom

Abstract:

POSSIBILITY OF REFURBISHMENT OF 110 kV TRANSMISSION LINE STOLAC - BILEĆA ON REINFORCED-CONCRETE POLES TYPE "ŠPERAC"

On the territory of east Herzegovina there was a need for refurbishment of 110 kV transmission line on reinforced-concrete poles type "Šperac". The said refurbishment in the construction part assumes refurbishment of all forms of pole damage, as well as their protection. The paper deals with the programme of research work, check-up and mode of reinforced-concrete poles testing. In the part concerning electrical and erection works, the paper deals with replacement of conductors, earthing conductor, pin strings, interconnection equipment, solution of new elements of suspensions on poles, installation of dampers, as well as adaptation of poles to application of wire with optical fibre.

Key words: reinforced-concrete pole, concrete trademark, reinforcement, carrying capacity of pole, suspension, earthing conductor with optical fibre

1. UVOD

Dalekovod 110 kV Mostar - Nikšić izgrađen je pre 50 godina da bi se omogućilo snabdevanje električnom energijom industrijskog basena u Nikšićkom polju, južne Dalmacije i istočne Hercegovine.

Iz tehničkih razloga pomenuti dalekovod je, nešto kasnije, uveden u TS Bileća tako da su nastala dva nova dalekovoda: DV 110 kV Mostar - Bileća (na teritoriji bivše BiH) i DV 110 kV Bileća - Nikšić (većim delom na teritoriji Crne Gore).

Posle najnovijih ratnih dejstava i teritorijalnog razgraničenja deonica DV 110 kV Mostar - Bileća, od Mostara do stuba broj 154, pripala je MH Federaciji dok je deonica od stuba broj 154 do stuba broj 319 (TS Bileća) pripala Republici Srpskoj.

Kako bi se omogućilo sigurnije napajanje električnom energijom područja opština Ljubinje, Berkovići kao i veza sa budućom HE Dabar, javila se potreba za sanacijom DV 110 kV Mostar - Bileća, na teritoriji Republike Srpske (od stuba broj 154 do TS Bileća). Sanacija je neophodna, jer je u toku ratnih dejstava na predmetnom dalekovodu došlo do oštećenja betonskih stubova, spojne opreme, izolatora kao i do prekida i demontaže provodnika i zaštitnog užeta.

2. ISTRAŽNI RADOVI

Obnova dalekovoda, u smislu zamene provodnika i opreme, pored ostalog, zahteva i utvrđivanje stanja armirano-betonskih stubova. Sam karakter stanja stubova u trasi načinjen za nova opterećenja prema tabeli sila, daje realnu osnovu za iskaz i odgovor o tehničkoj mogućnosti ulaska u pomenuto angažovanje oko zamene provodnika i opreme.

S obzirom na prethodno posmatrani eksploatacioni period i činjenice o neraspologanju sa tehničkom dokumentacijom istražni radovi oko utvr-

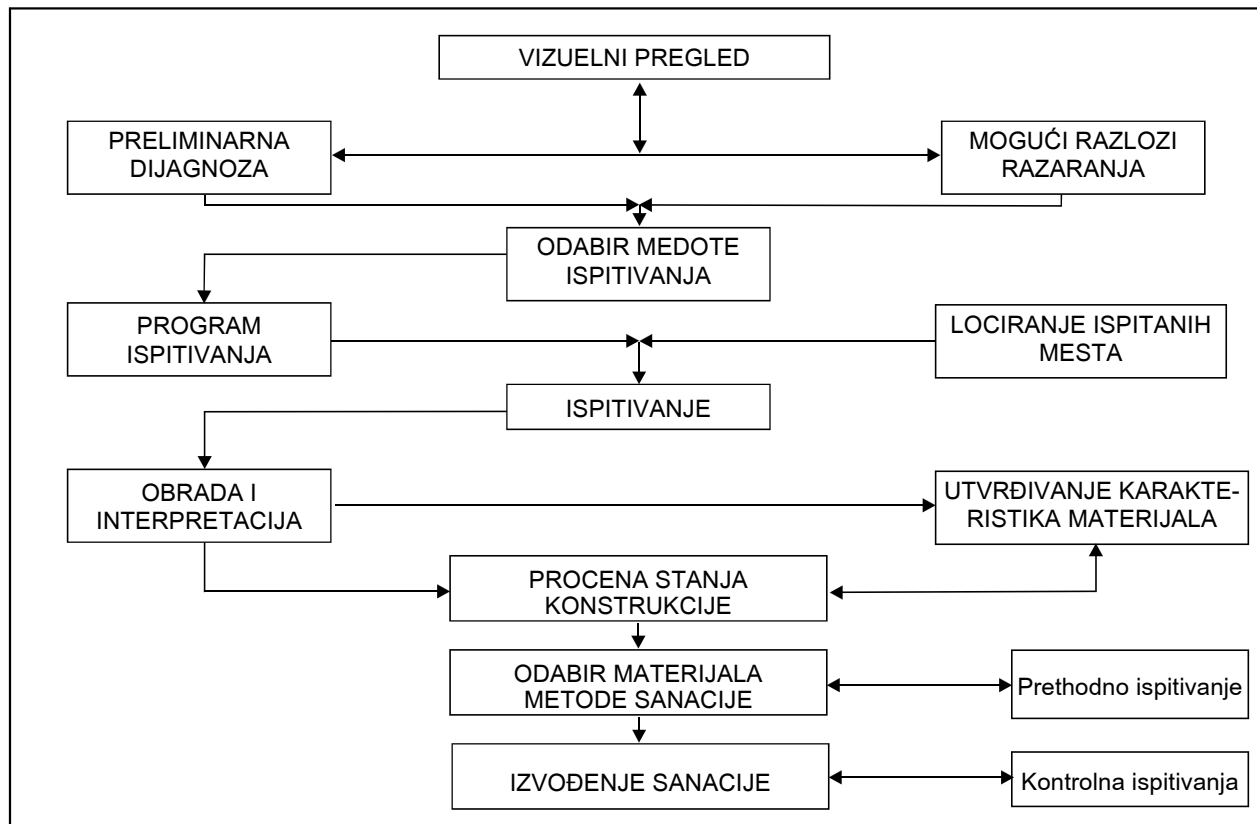
đivanja stanja stubova i njihove nosivosti praktično su neizostavni.

Armirano-betonski stubovi u opštem smislu, kao noseći konstruktivni elementi u sistemu prenosa električne energije, tokom eksploatacije su izloženi različitim vrstama opterećenja. Polazeći od činjenice da niz opterećenja koja se javljaju nemaju stalan karakter u pogledu intenziteta, pravca i smera, nameće se kompleksnost problema po pitanju njihovog ispitivanja i utvrđivanja nosivosti.

U konkretnom slučaju, deonicu dalekovoda predviđenu za zamenu provodnika i opreme tj. stubove koji sačinjavaju trasu u prvom redu treba posmatrati kao zasebne konstruktivne elemente a zatim kao integralni deo svih elemenata u zateznom polju i celoj deonici.

Sagledavajući konstrukciju stuba u statičkom smislu, može se reći da su to izuzetno vitki nosači uklješteni u betonske temelje a opterećeni prvenstveno na savijanje u svim pravcima. Takav tip konstrukcija na kojima se opterećenja javljaju u svim pravcima i različitim intenzitetima zaslužuju posebnu pažnju, a što je i predviđeno Tehničkim normativima za beton i armirani beton. Važnost istražnih radova u ovom slučaju je suvišno i napominjati.

Imajući u vidu složenost problema i neophodnost poštovanja Tehničkih uslova, došlo se do konačnog programa istražnih radova na AB stubovima.



Slika 1. Blok šema osnovnog pristupa ispitivanju i sanaciji armirano-betonskih stubova

Programom je predviđeno sledeće:

- utvrđivanje geometrijskih karakteristika stubova i konzola i raščlanjenje tipizacije stubova,
- utvrđivanje vrste ugrađene armature, načina armiranja, toka i rasporeda armature po presecima,
- utvrđivanje opšteg stanja stubova po pitanju oštećenja tokom izrade i eksploatacije (mehanička oštećenja, korozija materijala, stanje veze stubova sa konzolama),
- ispitivanje pritiskne čvrstoće betona u stubovima i određivanje prihvatljive računске čvrstoće betona proračunskih modela,
- ispitivanje fizičko-mehaničkih karakteristika ugrađene armature,
- utvrđivanje nosivosti stubova tj. računska analiza nosivosti svih tipova stubova na osnovu utvrđenih karakteristika betona i armature prema definisanim slučajevima novih eksploatacionih opterećenja.

Važno je dakle zaključiti da je navedeni program istražnih radova nastao kao produkt zajedničkog rada stručnog tima angažovanog oko obnavljanja dalekovoda u Republici Srpskoj, a koji ne odstupa od osnovnog principa i pristupa ispitivanju i sanaciji, gde je isti prikazan kao blok šema, (slika 1).

3. NAČIN ISPITIVANJA

Radi boljeg shvatanja i pojašnjenja metodologije kojom se dobijaju traženi parametri, ukratko se prikazuje i način ispitivanja:

a) Utvrđivanje geometrijskih karakteristika stubova vrši se merenjem na licu mesta poprečnog preseka u korenu, na mestima konzola i vrhu, te svih bitnih elemenata vezanih za geometriju preseka po nivoima i po visini stabla stuba. Kod konzola se takođe merenjem definišu geometrijske karakteristike.

b) Utvrđivanje oštećenja stubova svih vidova i njihovog lokaliteta vrši se detaljnim pregledom svakog stuba sa evidencijom u zapisniku u kojem je naznačen broj oštećenog stuba, vrste oštećenja, njihova pojava i lokalitet, te ostali potrebni elementi koji su vezani za oštećenja. Ujedno se i vrši pregled konzola.

c) Utvrđivanje načina armiranja, vrste i broja upotrebljenih šipki glatke ili rebraste armature, kao i toka armature po visini vrši se "profometrom"-aparaturom namenjenom u tu svrhu i otvaranjem poprečnog preseka sa dve susedne strane.

d) Utvrđivanje čvrstoće betona stubova vrši se kombinovanom metodom tj. metodom Shmitovog čekića (sklerometrisanje) i vađenjem uzoraka (kernovi) iz konstrukcije. Funkcionalna zavisnost čvrstoće betona dobijene ispitivanjem vađenih uzora-

ka i vrednosti odskoka sklerometra na mestu vađenja uzorka, daje mogućnost određivanja prihvatljive računске čvrstoće betona svakog stuba u trasi dalekovoda. Sklerometrisanje svakog stuba vrši se u minimalno tri nivoa duž stabla stuba. Podaci sklerometrisanja svakog stuba po nivoima sprovode se na terenu i upisuju u zapisnik. Vađenje uzoraka (kernova) iz konstrukcije sprovodi se u optimalnoj radnoj visini iznad temelja, na betonskim stubovima različitih čvrstoća u opsegu očekivane čvrstoće betona od marke betona MB-20 pa naviše. Pokrivanjem različitih čvrstoća betona u pomenutom opsegu na planiranom broju uzoraka i nakon njihovog ispitivanja dobija se realna osnova za iskaz uporednih čvrstoća ostalih stubova.

e) Utvrđivanje fizičko-mehaničkih karakteristika ugrađene armature vrši se na uzorcima vađenim iz konstrukcije i to glavne armature. Fizičko-mehaničke karakteristike koje se razmatraju na uzorcima svakako su granica velikih izduženja i granica kidanja ugrađenog čelika. Sva ispitivanja vrše se na standardnim epruvetama definisanog oblika u skladu sa JUS-om.

f) Računska analiza AB stubova vrši se na jednom stubu u okviru tipske grupacije, odnosno od svakog tipa stuba po jedna računska analiza. U računsku analizu svakako da su uvršteni elementi istražnih radova po pitanju čvrstoće betona, karakteristika armature i max uticaji za evidentne slučajevne opterećenja. Bitno je naglasiti sledeće: da se proračunskoj analizi može pristupiti samo nakon utvrđenih i definisanih ulaznih parametara proračunskog modela. U analizi se, pored najopterećenijih stubova mora utvrditi i nosivost stubova sa ustanovljenom minimalnom čvrstoćom betona.

4. PROGRAM PROJEKTOVANJA SANACIJE

Predmetna sanacija u elektro-montažnom delu predviđa zamenu provodnika, zaštitnog užeta, spojne opreme, izolatora i ugradnju prigušivača vibracija.

Umesto postojećeg bakarnog provodnika Cu 120 mm², koji se sastoji od 19 žica prečnika 2,8 mm, prema Projektnom zadatku primenjen je alučelični provodnik Al/Č 150/25 mm² koji je po JUS-u N.C1.351.

Detaljnou analizom izabrano je maksimalno dozvoljeno naprezanje provodnika na istezanje pri najnepovoljnijim uslovima na temperaturi -5 °C i sa predviđenim dodatnim opterećenjem od leda $1,0 \times 0,18 \sqrt{d}$ da N/m.

Staro čelično zaštitno uže Č II 50 mm², koje se sastoji od 19 žica prečnika 1,8 mm, zamenjeno je zaštitnim užetom sa optičkim vlaknom ASLH-Db AA/ACS 51/21-5.5. Ovo novo zaštitno uže odabra-

no je tako da prema karakteristikama bude najpribližnije postojećem užetu od čelika. Pri određivanju maksimalnog naprezanja užeta vođeno je računa da njegov koeficijent sigurnosti bude veći od koeficijenta sigurnosti provodnika a ugib na temperaturi od 0°- 40 °C manji za oko 10 % od ugiba provodnika.

Pošto nije sačuvana tehnička dokumentacija koja se odnosi na postojeće AB stubove bilo je neophodno merenjem odrediti konkretne dimenzije glava stubova. U tu svrhu izvršeno je geodetsko snimanje svih stubova.

Dobijene vrednosti variraju za različite stubove istog tipa što je i očekivano s obzirom na to da se konzole direktno ubetoniravaju na stablo stuba.

Na osnovu upoređivanja dobijenih podataka a vodeći računa o najmanjim dužinama konzola i rastojanjima između njih došlo se do reprezentativne glave stuba za svaki tip.

Kontrola razmaka provodnika i zaštitnog užeta izvršena je za sve tipove stubova a za dobijene klimatske uslove (dobijene od SHMZ) i primenjena maksimalna dozvoljena naprezanja užadi. Kontrola je izvršena za raspone veće od onih koji se pojavljuju na predmetnom dalekovodu.

Kontrola razmaka provodnika izvršena je i za kombinacije pojedinih tipova stubova i to za kritična mesta gde je dužina raspona veća od maksimalnog električnog raspona pa su na donjim konzolama nosećih stubova predviđeni produživači da bi se postigli sigurnosni razmaci veći od propisanih.

Analizom uporednih tabela nosećih stubova prema gravitacionim i srednjim rasponima kao i tabela zateznih stubova odabrani su karakteristični predstavnici svih tipova betonskih stubova za koje treba uraditi statičke provere.

Uporednom analizom tabela sila za postojeće stanje (postojeći provodnik i zaštitno uže) sa tabelama sila za novoprojektovano stanje (novi provodnik i zaštitno uže) za svaki konkretan stub može se videti da vrednosti sila za novoprojektovano stanje odgovaraju vrednostima sila za postojeće stanje. Znači da se opterećenje stubova posle predmetne sanacije neće pogoršati što je bila i osnovna ideja pri izradi projektne dokumentacije.

Na osnovu terenskih i laboratorijskih istraživanja kao i urađenih tabela sila za novoprojektovane uslove izvršena je statička kontrola nosivosti stubova.

U proračun nosivosti stubova po karakterističnim presecima ušlo se sa ispitanom markom betona MB 30 i armaturom čija je granica velikih izduženja $\delta_v = 30 \text{ kN/cm}^2$. Analizom je utvrđeno da je iskorišćenost preseka stabla stuba isključivo po armaturi dok u betonu postoje znatne rezerve u naprezanjima. Proračun nosivosti preseka rađen je po

teoriji granične nosivosti. U skladu sa propisima i preporukama za AB stubove usvojen je koeficijent sigurnosti $\gamma_n = 1,80$ za promenljiva opterećenja. Na osnovu ovako sprovedenog proračuna dat je komentar svih tipova stubova u trasi.

Za noseće stubove tipa "N" visine manje od 11,75 m može se smatrati da stablo u svim presecima zadovoljava važeće propise. Za veće visine u donjem delu stabla koeficijent sigurnosti je reda veličine 1,6.

Noseći stubovi tipa "N2" su po analizi sa najnepovoljnijim koeficijentom sigurnosti, koji se u donjim presecima kreće od 1,42 do 1,8 što zavisi od visine stuba.

Imajući u vidu da je kod nosećih stubova uvek merodavan slučaj opterećenja "B" sa poprečnim dejstvom vetra, koji se u trasi javlja samo u izuzetnim slučajevima, te da su stubovi i do sada (50 godina) bili opterećeni sa istim ili nešto većim opterećenjima, predloženo je da se svi stubovi zadrže u trasi, a da se isti saniraju od različitih vidova oštećenja.

Treba napomenuti, da izuzetna opterećenja od vetra, koja se samo povremeno javljaju, ne mogu izazvati lom stuba, odnosno havariju dalekovoda. Jedino je moguće da se u nižim delovima stabla stuba pojave naprsline, zbog čega stubove treba povremeno kontrolisati i preduzimati odgovarajuće mere.

Na osnovu urađenog proračuna konstatovano je da su ugaono zatezni stubovi u potpunosti zadovoljili važeće propise, što se tiče stabla stubova.

Istražnim radovima na konzolama nije vršeno otkrivanje armature niti je utvrđivana marka betona. Upoređivanjem tabela sila za postojeće i novoprojektovano stanje može se reći da su konzole kod svih tipova stubova sada dosta povoljnije opterećene.

Na onim AB stubovima koji su zbog ratnih dejstava i usled nestručne demontaže provodnika i zaštitnog užeta vučnim vozilom oštećeni i polomljeni (vrh i konzole) predviđena je nadogradnja vrhova i konzola čelično-rešetkastom konstrukcijom.

Pošto se predmetnom sanacijom predviđa zamena provodnika i zaštitnog užeta data su rešenja novih elemenata zavešenja na stubovima kao i prilagođenja stubova za primenu užeta sa optičkim vlaknom.

Na krajevima konzola AB stubova ranije je bio ugrađen "U" stremen koji se demontira i umesto njega ugrađuju se novi elementi koji obezbeđuju zavešenje lanaca preko zastavice.

Takođe je predviđeno i povezivanje nosača zastavica sa uzemljenjem stubova na krajevima konzola.

Projektom zadatkom je, u skladu sa izabranom koordinacijom izolacije, izabran snižen stu-

panj izolacije pa su predviđeni izolatorski lanci sa zaštitnom armaturom sastavljeni od zaštitnih članaka U 120 BS.

Za pričvršćenje zaštitnog užeta sa optičkim vlaknom usvojena je spojna oprema sa preformiranim prutovima. Noseće zavešenje sastoji se od "G" nosača i specijalne noseće kleme sa neoprenskim uloškom i preformiranim prutovima. Da bi se ostvarila veza zaštitnog užeta i uzemljenja nosećeg stuba predviđena je specijalna čelična ploča koja je postolje za "G" nosač.

Zatezno zavešenje sastoji se od zateznih i podložnih preformiranih prutova i kaušn viljuške. I ovdje postoji čelična ploča prilagođena za kačenje zaštitnog užeta preko škopca koja ujedno služi za ostvarivanje veze sa uzemljenjem stuba.

Na zateznim stubovima na kojima se izvodi spajanje krajeva zaštitnog užeta optičkim vlaknom, na visini od min 4 m iznad zemlje montira se optička spojnica. Krajevi užeta se sa vrha stuba vode po konstrukciji do spojnice pomoću stezaljki koje se postavljaju na prethodno ubetoniranim čeličnim ankerima. Stezaljke se montiraju na svaka 2 m dužine užeta. Krajevi se vode, odvojeno po konstrukciji do optičke spojnice.

Postojeće uzemljenje AB stubova je zadržano ali je predviđena zamena strujnih veza sa uzemljenjem stubova obzirom da su postojeće korodirale i propale.

Za smanjenje vibracija na predmetnom dalekovodu predviđa se montaža prigušivača na vodičnicima i zaštitnom užetu.

Zbog specijalne tehnike zavešenja zaštitnog užeta sa optičkim vlaknom prigušivači se montiraju na specifičan način.

5. ZAKLJUČAK

Sanacija dalekovoda na postojećim AB stubovima, pri tome uključujući i zamenu provodnika, zaštitnog užeta i opreme, moguća je zahvaljujući savremenim materijalima za sanaciju betona.

Da bi se pristupilo sanaciji prethodno je neophodno uraditi sledeće:

– Izvršiti kompletan program istražnih radova u svim utvrđenim segmentima

– Izvršiti analizu dobijenih rezultata i utvrditi nosivost stubova

– Izraditi detaljan elaborat sanacije za sve vidove oštećenja, kao i površinsku zaštitu od agresivnih uticaja, sa izborom odgovarajućih materijala i opisima svih faza radova

Iskustvo na sanaciji predmetnog dalekovoda je potvrdilo ispravnost navedenog postupka. Postojanje velikog broja kilometara dalekovoda na armirano-betonskim stubovima na kojima se može primeniti prethodno opisani program sanacije predviđa njegovu širu primenu u budućnosti kao i eventualno usavršavanje. Kada bude urađena sanacija većeg broja dalekovoda biće moguće napraviti i kompletniju tehno-ekonomsku analizu, čime bi se i na ovaj način sagledali značaj i opravdanost ovakvih radova.

Čedomir Spaić,
Dobrivoje Dinić, Radoslav Bulatović

Izbor šeme napajanja sopstvene potrošnje transformatorskih stanica 400/x kV/kV i 220/x kV/kV sa tercijera energetskih transformatora viših naznačenih napona 420 kV i 245 kV

Stručni rad
UDK: 621.311.42; 621. 314.212

Rezime:

U radu se razmatraju osnovni principi korišćenja tercijera energetskih transformatora viših naznačenih napona 420 kV i 245 kV [1], zahtevi za pouzdano napajanje sopstvene potrošnje transformatorskih stanica viših nazivnih napona 400 kV i 220 kV sa tercijera, režim rada kada se tercijer koristi kao osnovno napajanje sopstvene potrošnje, ili je tercijer u režimu rada rezervnog napajanja, i dosadašnja praksa u kojoj postoje različita rešenja sa aspekta izbora:

– jednopolne šeme napajanja; stepena izolacije; električne zaštite; zaštite od prenapona; dispozicije visokonaponske opreme i izolovanje šinskih veza.

U radu se predlaže nova jednopolna šema sa novim rasporedom i stepenom izolacije visokonaponske opreme i zaštite od prenapona u cilju efikasnije zaštite energetskog transformatora.

Ključne reči: energetski transformator, tercijer, zaštita, prenapon, dispozicija, sopstvena potrošnja, rezervni izvor

Abstract:

SELECTION OF SUPPLY SCHEME OF OWN DEMAND OF 400/X kV/kV AND 220/X kV/kV TRANSFORMER STATIONS FROM POWER TRANSFORMER TERTIARY AT HIGHER NOMINAL VOLTAGES 420 kV AND 245 kV

The paper deals with basic principles of application of power transformer tertiary at higher nominal voltages 420 kV and 245 kV [1], requires reliable supply of own transformer station demand at higher nominal voltages 400 kV and 220 kV from tertiary, operation regime when the tertiary is used as basic supply of own demand or when the tertiary is in the operation regime of reserve supply and in view of the fact that there existed in the past practice different solutions from the aspect of selection of:

– single-pole supply scheme; insulation level; electrical protection; overvoltage protection; disposition of high-voltage equipment and insulation of rail connections.

The paper proposes a new single-pole scheme with new allocation and level of isolation of high-voltage equipment and overvoltage protection for the purpose of more efficient protection of power transformer.

Key words: power transformer, tertiary, protection, overvoltage, disposition, own demand, reserve source

1. UVOD

Korišćenje tercijernog namotaja energetskih transformatora viših naznačenih napona 420 kV i

245 kV za napajanje sopstvene potrošnje u prenosnoj mreži Srbije je često. U transformatorskim stanicama prenosne mreže ima dvadeset dva (22) a u

Čedomir Spaić, dipl. ing.; Dobrivoje Dinić, dipl. ing. – „EPS”, JP „Elektroistok”, 11000 Beograd, Knez Miloša 11, Radoslav Bulatović, dipl. ing. – „EPCG” AD, „Elektroprenos”, 81000 Podgorica, Bulevar Lenjina 2

prenosnoj mreži Crne Gore jedan (1) energetski transformator čiji se tercijer koristi za napajanje sopstvene potrošnje.

Dvadesetpetogodišnje iskustvo u korišćenju tercijernih namotaja energetskih transformatora viših naznačenih napona 420 kV i 245 kV za napajanje sopstvene potrošnje pokazalo je da je ova problematika značajna i zahteva povećanu pažnju.

Do sada su primarne veze u postrojenjima tercijera izvođene bez odgovarajuće zaštite primarnih veza od mogućih spoljnih kratkih spojeva, i bez povećanog stepena izolacije. Zbog relativno malih izolacionih rastojanja faza – faza (posebno na prekidaču) i faza – zemlja, mogući su kvarovi uzrokovani malim životinjama.

U transformatorskim stanicama u kojima se tercijer jednog od transformatora ili distributivni vod koristi kao osnovno napajanje sopstvene potrošnje, a tercijer drugog transformatora radi u režimu rezervnog napajanja, ima različitih pristupa, odnosno rešenja.

U velikom broju transformatorskih stanica postoji nož za uzemljenje jednog od temena trougla namotaja tercijera energetskog transformatora, koji se uključivao u režimu rada kada tercijer nije napajao sopstvenu potrošnju.

S obzirom na napred navedeno i na osnovu analiza dosadašnjih rešenja korišćenja tercijera za napajanje sopstvene potrošnje, u radu se daje predlog izmenjene jednopolne šeme i drugačiji prilaz izboru stepena izolacije i zaštite od prenapona i nov dispozicioni raspored visokonaponske opreme za razvod sa tercijera i predlaže izolovanje šinskih veza.

2. KORIŠĆENJE TERCIJERA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA ZA NAPAJANJE SOPSTVENE POTROŠNJE

Osnovna uloga tercijera energetskih transformatora 420/245/38 kV/kV/kV i 245/123/10,5 kV/kV/kV je stabilizacija nulte tačke i kompenzacija trećeg harmonika, a može se koristiti za napajanje sopstvene potrošnje ili priključenje prigušnica za kompenzaciju kapacitivnih opterećenja vodova.

U radu se razmatraju dve mogućnosti korišćenja tercijera energetskih transformatora za napajanje sopstvene potrošnje i to:

- sa tercijera dva energetska transformatora;
- sa tercijera jednog energetskog transformatora u kombinaciji sa distributivnom mrežom kao osnovnim ili rezervnim izvorom;
- pri tome se mora voditi računa o činjenici da se, zbog velikih snaga kratkih spojeva na tercijerima, ne dozvoljava paralelan rad dva energetska transformatora na strani tercijera, niti tercijera energetskog transformatora sa distributivnom mrežom.

U transformatorskim stanicama prenosne mreže Srbije ima dvadeset dva (22) energetska transformatora čiji se tercijer koristi za napajanje sopstvene potrošnje, od toga dva (2) višeg naznačenog napona 420 kV i dvadeset (20) višeg naznačenog napona 245 kV, a u mreži Crne Gore jedan (1) višeg naznačenog napona 245 kV.

Polazeći od navedenog i činjenice da su ovi transformatori ključni elementi elektroenergetskog sistema, visoke cene istih i drugih teškoća za slučaj potrebe za zamenom u slučaju kvara, nameće se sama po sebi potreba da rešenjima napajanja sopstvene potrošnje sa tercijera ovih transformatora treba posvetiti pažnju a pre svega:

- izboru jednopolne šeme napajanja sa tercijera;
- izboru dispozicije i električne zaštite, u cilju iznalaženja takvog rešenja koje garantuje minimalni rizik od havarije u slučaju nastanka kvara u razvodu tercijera;
- izboru stepena izolacije, u cilju sprečavanja ili bar ublažavanja kvarova od prenaponskih pojava i izboru odgovarajuće, što efikasnije zaštite od prenapona;
- komutaciji prekidača, kako na višenaponskim stranama energetskog transformatora tako i na strani tercijera;
- dispoziciji visokonaponske opreme na strani tercijera i izolovanju svih kritičnih mesta sa aspekta nedovoljnih rastojanja, kako bi se eliminisali kvarovi prouzrokovani malim životinjama.

3. IZBOR ŠEME NAPAJANJA SA TERCIJERA

Na XI i XII stručnom savetovanju CIGRE [3],[4] analizirano je nekoliko tipova jednopolnih šema i prihvaćeno je rešenje prikazano je na slici 1.

Prema jednopolnoj šemi na slici 1 u režimu rada kada jedan transformator preko svog tercijera napaja potrošače sopstvene potrošnje, isti se na tercijeru štiti:

- prenaponskom zaštitom (odvodnicima prenapona u Neptun spoju);
- zemljospojnom zaštitom pomoću prenaponskog releja priključenog na otvoreni trougao sekundara jednopolno izolovanih naponskih transformatora;
- diferencijalnom zaštitom pomoću diferencijalnog releja za energetski transformator 245/123/10,5 kV/kV/kV priključenog na sekundare strujnih transformatora 220 kV i 110 kV, tako da obuhvata kvarove na kompletnom razvodu tercijera, uključujući i kvarove sopstvene potrošnje X/0,4 kV/kV;
- prekostrujnom zaštitom tercijera.

Prema istoj šemi, drugi energetska transformator je u režimu rezervnog napajanja sopstvene potrošnje preko svog tercijera i isti se sa tercijera štiti prema tri sledeće varijante:

- a) isključen rastavljač tercijera Q9;
 - prenaponskom zaštitom (odvodnicima prenapona u Neptun spoju);
 - diferencijalnom zaštitom pomoću diferencijalnog releja priključenog na sekundare strujnih transformatora 220 kV i 110 kV tako da obuhvata kvarove do rastavljača tercijera Q9;
- b) uključen rastavljač tercijera Q9 a isključen prekidač Q0:
 - prenaponskom zaštitom (odvodnicima prenapona u Neptun spoju);
 - diferencijalnom zaštitom pomoću diferencijalnog releja priključenog na sekundare strujnih transformatora 220 kV i 110 kV tako da obuhvata kvarove do prekidača tercijera Q0;
 - zemljospojnom zaštitom pomoću prenaponskog releja priključenog na otvoreni trougao sekundara jednopolno izolovanih naponskih transformatora;
 - prekostrujnom zaštitom tercijera.
- c) uključen rastavljač tercijera Q9 i prekidač Q0 a isključeni sabirnički rastavljač Q1 i njegovi noževi za uzemljenje Q8:

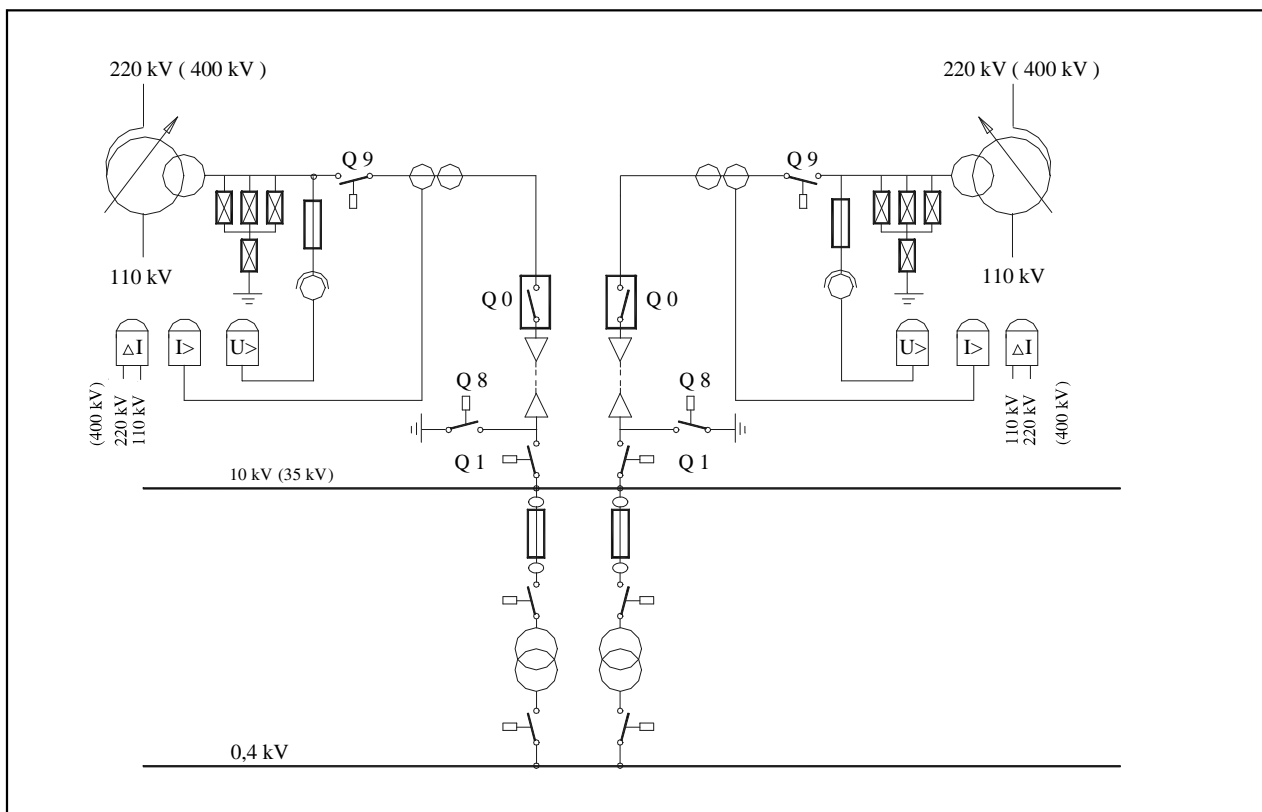
- prenaponskom zaštitom (odvodnicima prenapona u Neptun spoju);
- diferencijalnom zaštitom pomoću diferencijalnog releja priključenog na sekundare strujnih transformatora 220 kV i 110 kV, tako da obuhvata kvarove do sabirničkog rastavljača Q1 i noževa za uzemljenje Q8;
- zemljospojnom zaštitom pomoću prenaponskog releja priključenog na otvoreni trougao sekundara jednopolno izolovanih naponskih transformatora;
- prekostrujnom zaštitom tercijera.

U velikom broju objekata ugrađen je rastavljač sa nožem za uzemljenje jednog temena trougla tercijera, namotaja koji se uključivao u režimu rada kada se tercijer ne koristi za napajanje sopstvene potrošnje. U tom slučaju, odvodnici prenapona druge dve faze stalno su izloženi međufaznom naponu, pa se u tom slučaju transformator ne štiti:

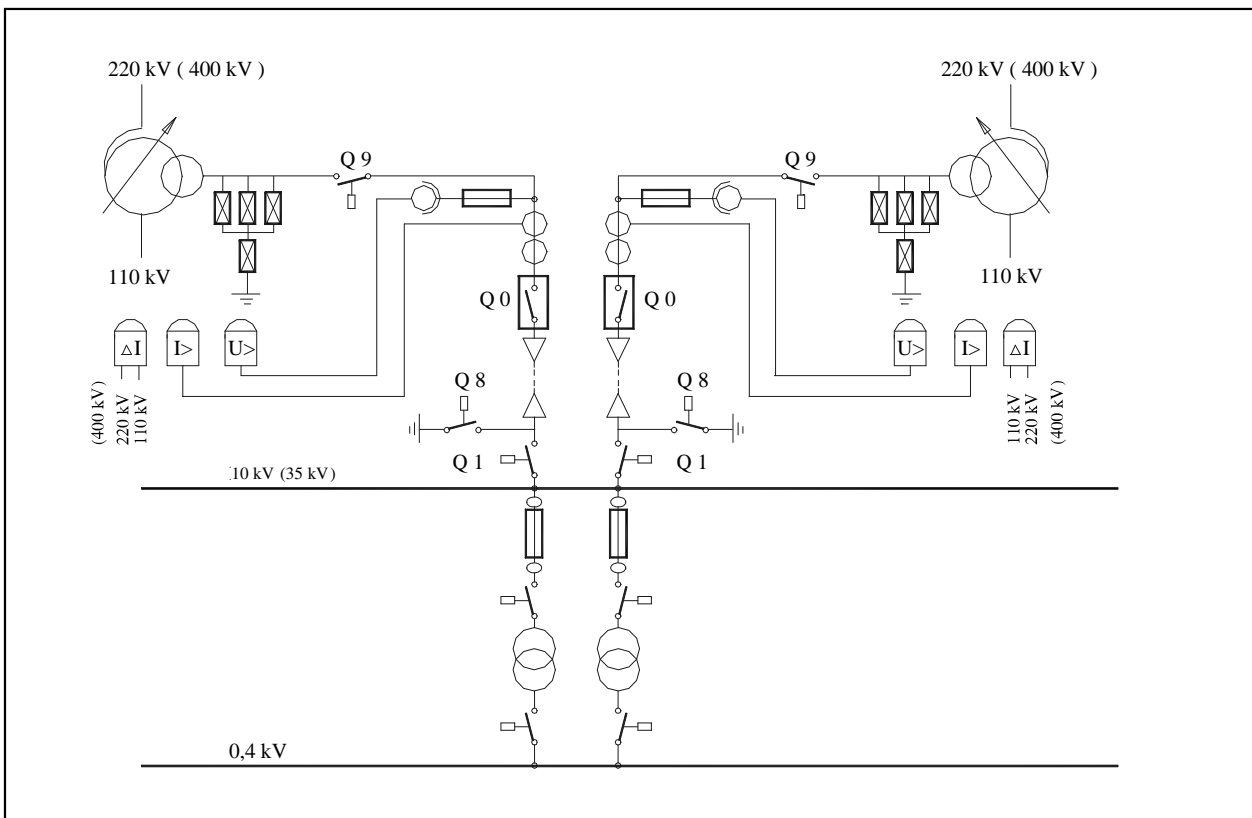
- zemljospojnom zaštitom tercijera;
- prekostrujnom zaštitom tercijera.

Iz navedenih razloga, posle analize dosadašnjih rešenja, u radu se predlaže izbor nove jednopolne šeme prikazne na slici 2, gde se jednopolno izolovani naponski transformatori postavljaju posle cink-oksidnih ZnO, a pre rastavljača tercijera Q9.

Prema predloženoj šemi na slici 2, energetska transformator koji je u režimu rezervnog napajanja



Slika 1. Jednopolna šema napajanja sopstvene potrošnje sa dva energetska transformatora

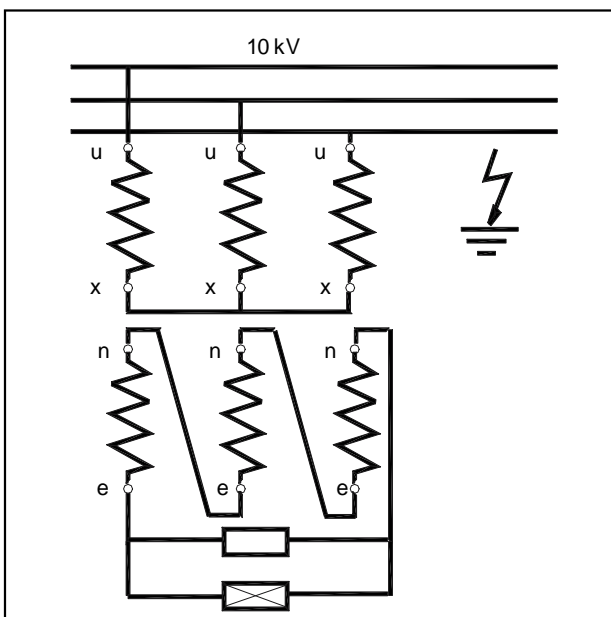


Slika 2. Predlog nove jednopolne šeme napajanja sopstvene potrošnje sa dva energetska transformatora

sopstvene potrošnje i pri isključenom rastavljaču tercijera Q9, štiti se zemljospojnom zaštitom prenaponskim relejom, jer su jednopolno izolovani naponski transformatori priključeni pre izlaznog

rastavljača, a prenaponski relej je priključen na otvoreni trougao sekundara istih.

Na slici 3 data je principijelna šema zemljospojne zaštite tercijera.



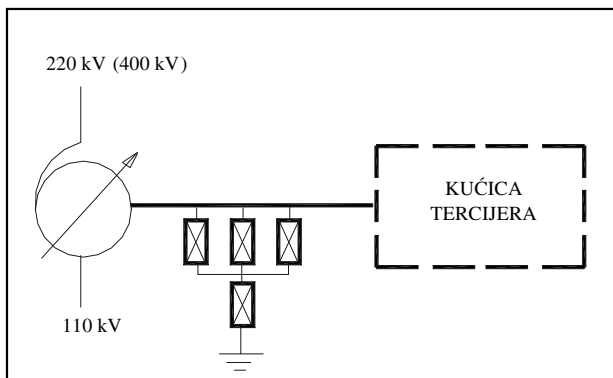
Slika 3. Principijelna šema zemljospojne zaštite tercijera

4. IZBOR STEPENA IZOLACIJE TERCIJERA I ZAŠTITE OD PRENAPONA

Veliku pažnju treba posvetiti izboru stepena izolacije, u cilju eliminisanja međufaznog kratkog spoja. Naime, oprema tercijera, počev od provodnih izolatora tercijera energetskog transformatora u celom postrojenju tercijera, za nove objekte, treba da odgovori zahtevu za uvećanim stepenom izolacije (npr. za naznačeni napon tercijera 10,5 kV stepen izolacije treba da je Si 24) [2].

Trofazni sistem je sa tercijera izolovan, naponski transformatori na tercijeru treba da su dimenzionisani za faktor napona 1,9.

Kada se tercijer koristi za napajanje sopstvene potrošnje, prenaponska zaštita je izvedena odvodnicima prenapona SiC sa magnetnim oduvavanjem luka. Međufazna i fazna izolacija tercijera štiti se odvodnicima prenapona u različitim spojevima. Preporučuje se zaštita od prenapona cink-oksindnim odvodnicima prenapona ZnO u Neptun spoju prikazana na slici 4.



Slika 4. Prenaponska zaštita odvodnicima prenapona u Neptun spoju

5. DISPOZICIJA VISOKONAPONSKE OPREME TERCIJERA I IZOLOVANJE ŠINSKIH VEZA

U toku eksploatacije došlo se do stanovišta da je neophodno posebnu pažnju posvećivati rešavanju dispozicije visokonaponske opreme na tercijeru i redovnom čišćenju iste.

Do sada su šinske veze tercijera izvođene gole. Zbog relativno malih izolacionih rastojanja faza-faza, odnosno faza - zemlja, u svim postrojenjima su mogući kvarovi uzrokovani malim životinjama. Termičko dejstvo kvara izazvanog strujama kratkog spoja i električnim lukom, kao i naprezanja od dinamičkih sila kratkog spoja mogu da budu znatni i da naprave velike štete na opremi.

Da bi se izbegli kvarovi usled ovih opasnosti u izgrađenim postrojenjima, nemačka firma Raychem je razvila proizvode koji omogućavaju naknadno izolovanje postrojenja različitih konstrukcija, čime se sprečavaju pogonski kvarovi izazvani malim životinjama. Materijal za izolaciju ispunjava sledeće zahteve:

- sprečava zemljospojeve i kratke spojeve izazvane stranim uticajima;
- mogućnost nepromenljive izolacije sa manje baznih elemenata;

- pogon pri postojanju zemljospoja u mreži tercijera, tj. nemogućnost proširenja u dvostruki zemljospoj i zaštitu od životinja u takvim uslovima;
- dug životni vek u pogledu izolacionih svojstava, erozije i izdržljivosti, na ultravioletno zračenje;
- bez negativnih dejstava na postojeći sistem (korozija, ili sprečavanje hlađenja);
- ekonomičan materijal i montaža;
- što veća zaštita od dodira;
- što lakša montaža.

6. ZAKLJUČAK

Dvadesetpetogodišnje iskustvo korišćenja tercijera za napajanje sopstvene potrošnje pokazalo je da su usvojene šeme napajanja, električna zaštita i zaštita od prenapona dali dobre rezultate. Međutim, u režimu rada transformatora, kada tercijer ne napaja sopstvenu potrošnju, već služi kao rezervni izvor sopstvene potrošnje, isti mora da bude pouzdano zaštićen, što omogućuje predloženo novo rešenje dato na slici 2 sa novim rasporedom i stepenom izolacije visokonaponske opreme i zaštitom od prenapona.

7. LITERATURA

- [1] TEHNIČKE PREPORUKE ZA ZAŠTITU TERCIJERA TRANSFORMATORA 400/220 kV/kV I 400/110 kV/kV OD PRENAPONA, Granski standard elektroprivrede GSE 57/86,
- [2] Č. Spaić, Z. Nedeljković: PREDLOG ZAŠTITE TERCIJERA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA VIŠIH NAZNAČENIH NAPONA 420 kV i 245 kV KOJI SE KORISTE ZA NAPAŽANJE SOPSTVENE POTROŠNJE, KADA JE U REŽIMU RADA REZERVNOG IZVORA. Dokumentacija „Elektroistoka“.
- [3] XI STRUČNO SAVETOVANJE ELEKTROENERGETIČARA, Ohrid, 1972. godine
- [4] XII STRUČNO SAVETOVANJE ELEKTROENERGETIČARA JUGOSLAVIJE, Budva April 1975. godine, Referati 23.13; 23.04 i 23.11.

Rad je primljen u uredništvo 19. 10. 2001. godine

Dinamički model udarnih karakteristika uzemljivača dalekovodnih stubova

Rezime:

U radu je prikazan postupak formiranja dinamičkog modela uzemljivača u udarnom režimu. Modelovanje uticaja jonizacije tla se svodi na obuhvatanje fiktivnog povećanja poluprečnika elemenata uzemljivača. Predloženi model je inkorporiran u postojeći program za analizu atmosferskih prenapona, na način pogodan za inženjersku primenu. Na primerima šest tipičnih konfiguracija uzemljivača dalekovodnog stuba 400 kV, izvršena je kvantifikacija ovog fenomena u funkciji parametara atmosferskog pražnjenja, karakteristika tla i kritične jačine električnog polja. Na osnovu rezultata proračuna izveden je zaključak o stepenu redukcije naponskog naprezanja izolacije voda usled pojave jonizacije tla.

Ključne reči: vod, uzemljivač, udarna impedansa, jonizacija

Abstract:

DYNAMIC MODEL OF TRANSMISSION LINE TOWER GROUNDING CHARACTERISTICS

The paper presents a procedure of forming the dynamic model of grounding in the impulse regime. The ionization influence is modelled as the effective radius values increase. The proposed model is convenient for practical application. It is incorporated into the present lighting overvoltage computation program.

The soil ionization influence on the grounding grid impulse characteristics and lighting performance of 400 kV overhead line for various impulse current parameters, soil resistivities and magnitudes of soil ionization gradient and grounding grid configurations is illustrated.

On the basis of calculation results, a conclusion was drawn on the degree of the transmission line overvoltages reduction due to the soil ionization.

Key words: line, earthing, impact impedance, ionization

1. UVOD

Udarne karakteristike uzemljivača dalekovodnih stubova značajno utiču na godišnji broj preskoka na vodovima. Razvoj jednostavnog i dovoljno tačnog modela uzemljivača predstavlja složen zadatak. Eksperimentalna istraživanja [1,2] ukaza-

la su, da pod određenim uslovima, može doći do jonizacije tla oko uzemljivača. Ovaj nelinearan fenomen se javlja pri injektiranju udarne struje velike amplitude u uzemljivač koji se nalazi u loše provodnom tlu. Modelovanje ovog uticaja se svodi na obuhvatanje fiktivnog povećanja poluprečnika

elemenata uzemljivača [2,3]. Kvantifikacija ove promene zasniva se na poznavanju kritične jačine električnog polja pri kojoj dolazi do jonizacije tla oko uzemljivača.

U literaturi se mogu sresti dva pristupa u određivanju ovog parametra. Prema prvom pristupu [2,4], kritična jačina električnog polja zavisi od specifične otpornosti tla. Prema drugom pristupu [5,6], nema direktne korelacije između ova dva parametra, pa se predlaže konstantna minimalna vrednost kritične jačine električnog polja.

U ovom radu je dat postupak određivanja udarnih karakteristika uzemljivača na osnovu maksimalnih vrednosti struja odvođenja. Predložen je pojednostavljen postupak modelovanja jonizacije tla, koji je pogodan za inženjersku praksu. Prednost izloženog postupka se ogleda u jednostavnoj inkorporaciji modela uzemljivača u postojeći program za analizu atmosferskih prenapona [7]. Na primerima šest tipičnih konfiguracija uzemljivača dalekovodnog stuba 400 kV izvršena je kvantifikacija ovog nelinearnog fenomena u funkciji parametara atmosferskog pražnjenja, karakteristika tla i kritične jačine električnog polja.

2. MATEMATIČKI MODEL

2.1 Modelovanje uticaja jonizacije tla

Uopšteno gledano, svaki uzemljivač se može rastaviti na određen broj pravolinijskih elemenata. Na slici 1a prikazan je oblik lineičnog uzemljivača čiji element kl je modelovan T ekvivalentnom šemom (slike 1b, 1c). Oznake na slikama 1b i 1c imaju sledeće značenje: R_i - redna otpornost elementa, L_s - sopstvena induktivnost elementa, G_i - otočna provodnost elementa, C_i - otočna kapacitivnost elementa. Formiranje modela za proračun udarnih karakteristika uzemljivača u odsustvu jonizacije tla vrši se na osnovu ekvivalentne šeme prikazane na slici 1b. Parametri ove šeme su konstantni i određuju se postupkom opisanim u [8].

Električno pražnjenje u tlu oko uzemljivača nastaje kada jačina električnog polja pređe kritičnu vrednost. Uticaj formiranih visokoprovodnih kanala oko uzemljivača može se obuhvatiti fiktivnim povećanjem poluprečnika elemenata uzemljivača. Ovakva interpretacija je u saglasnosti sa rezultatima teorijskih i eksperimentalnih istraživanja. Prema rezultatima ovih istraživanja, jonizacija tla oko uzemljivača dovodi do smanjenja udarne impedanse. Promena parametara uzemljivača sa poluprečnikom dovodi do njihove strujne zavisnosti, što je simbolički prikazano strelicama na slici 1c.

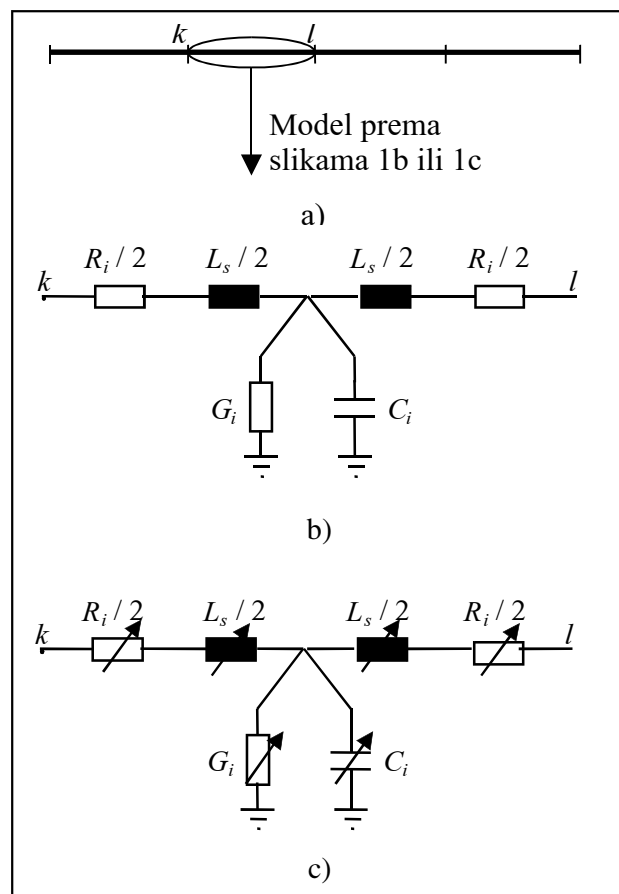
U ovom radu korišćen je postupak proračuna efektivnih poluprečnika elemenata uzemljivača.

Prema ovom postupku, prilikom određivanja efektivnog poluprečnika pravolinijskog elementa polazi se od pretpostavke da je struja odvođenja u zemlju duž razmatranog elementa približno konstantna.

Površinska gustina struje određuje se iz izraza:

$$J_i = I_{mi} / 2 \cdot \pi \cdot a_i \cdot l_i \quad (1)$$

gde su J_i - površinska gustina struje na i -tom elementu, I_{mi} - maksimalna vrednost struje odvođenja sa razmatranog elementa, a_i - stvarni poluprečnik i -tog elementa, l_i - dužina i -tog elementa. Kriteri-



jum pojave jonizacije definiše se izrazom:

Slika 1.

- a) Oblik lineičnog uzemljivača
- b) T šema sa konstantnim parametrima
- c) T šema sa strujno zavisnim parametrima

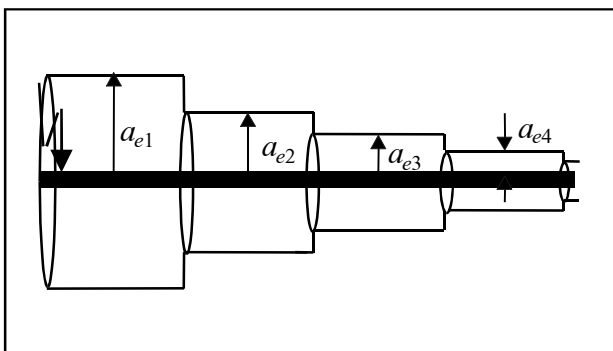
$$E_i = \rho \cdot I_{mi} / (2 \cdot p \cdot a_i \cdot l_i) \geq E_k \quad (2)$$

gde je E_k - kritična jačina električnog polja.

Efektivni poluprečnik i -tog elementa određuje se iz sledećeg izraza:

$$a_{ei} = \rho \cdot I_{mi} / (2 \cdot p \cdot l_i \cdot E_k) \quad (3)$$

Na slici 2 je prikazana promena efektivnih poluprečnika elemenata horizontalno položenog lineičnog uzemljivača za injektiran strujni impuls na njegovom kraju. Dužina svakog elementa iznosi 10 m, što dovodi do prihvatljive preciznosti i vremena trajanja proračuna [9]. Za slučaj horizontalno po-



loženg uzemljivača, osim promene efektivnog poluprečnika, dolazi i do fiktivne promene dubine polaganja.

Slika 2. Promena efektivnih poluprečnika elemenata horizontalno položenog lineičnog uzemljivača za injektiran strujni impuls na njegovom kraju

Međutim, za uobičajene dubine polaganja uzemljivača ($h = 0,5-1\text{m}$), ova promena nije od praktičnog značaja za analizu udarnih karakteristika uzemljivača [2].

U izloženom postupku je pretpostavljeno da je uzemljivač približno ekvipotencijalan. Ova pretpostavka je približno ispunjena u sledećim slučajevima:

- slučaj kratkih uzemljivača (uzemljivači dalekovodnih stubova),
- slučaj dugačkih uzemljivača koji se nalaze u tlu velike specifične otpornosti.

Analiza uticaja jonizacije tla oko dugačkih uzemljivača položenih u tlo male specifične otpornosti nije od praktičnog značaja. Zona jonizacije u ovom slučaju nije izrazita, što se može zaključiti iz (3).

2.2 Kritična jačina električnog polja

Za određivanje efektivnih poluprečnika elemenata uzemljivača potrebno je poznavati kritičnu jačinu električnog polja. U uvodnom delu je napomenuto da postoje dva pristupa u određivanju ovog parametra. U tabeli 1 su prikazani izrazi za određi-

vanje kritične jačine električnog polja i efektivnog poluprečnika prema različitim pristupima iz litera-

Pristup	Ref	E_k (kV/m)	a_{ei} (m)
$E_k=f(\rho)$	[2]	800-1 300	$\rho \cdot I_{mi} / (2 \cdot \pi \cdot l_i \cdot E_k)$
	[4]	241 $\rho^{0,215}$	$\rho^{0,785} \cdot I_{mi} / (482\pi l_i)$
$E_k=\text{const}$	[5]	400	$\rho \cdot I_{mi} / (800 \cdot \pi \cdot l_i)$
	[6]	300	$\rho \cdot I_{mi} / (600 \cdot \pi \cdot l_i)$

ture.

Tabela 1

Izrazi za određivanje E_k i a_{ei}

2.3 Tok proračuna

Primena modela uzemljivača u udarnom periodu, uz obuhvatanje efekta jonizacije, sadrži sledeće korake:

1. U prvom koraku se formira udarni model uzemljivača za slučaj bez jonizacije tla, saglasno postupku definisanom u [8].

2. Za definisan strujni impuls koji se injektira u uzemljivač, određuju se struje odvođenja sa pojedinih elemenata uzemljivača.

3. Usvaja se kritična jačina električnog polja.

4. Vršiti se provera uslova za nastanak jonizacije tla ($E_i > E_k$). Ako je ovaj uslov ispunjen, određuju se efektivni poluprečnici svih elemenata uzemljivača prema (3).

5. Za efektivne poluprečnike elemenata uzemljivača određene u prethodnom koraku, formira se matrica sopstvenih i međusobnih otpornosti prema postupku datom u [10, 11]. Na osnovu ove matrice definiše se model uzemljivača u udarnom periodu.

6. Vršiti se proračun udarne impedanse uzemljivača uz uvažavanje jonizacije tla.

7. Saglasno metodu ekvivalentnih vodova, elementi ekvivalentnih uzemljivača se zamenjuju odgovarajućim vodovima.

8. Prema postupku definisanom u [12], formira se ekvivalentna šema voda za analizu atmosferskih prenapona.

9. Primenom kompjuterskog programa [7] vršiti se procena visine napona na stubu usled prenapona atmosferskog porekla.

3. PRIMERI PRORAČUNA

3.1 Proračun udarne impedanse

Saglasno opisanom postupku izvršena je sistematska analiza uticaja jonizacije tla na udarnu impedansu uzemljivača. Analiza je izvršena na primerima šest tipičnih konfiguracija uzemljivača dalekovodnih stubova (slika 3). Pretpostavljena je dubina polaganja uzemljivača od 0,5 m, dok su prečnici elemenata 8 mm. Relativna dielektrična konstanta tla je 10.

Sa slike 3 se može zaključiti da konfiguracije

$\rho_{\Omega m}$	$R_s (\Omega)$					
	Konfiguracija					
	I	II	III	IV	V	VI
10^3	56,6	42,8	45,1	49,9	39,9	42,1
300	17,0	12,9	13,5	15,0	12,0	12,6

II, III i IV imaju jednaku ukupnu dužinu. Isti zaključak važi za konfiguracije uzemljivača V i VI. U tabeli 2 je prikazana zavisnost stacionarne otpornosti R_s od specifične otpornosti tla i konfiguracije uzemljivača.

Tabela 2

Stacionarna otpornost u funkciji specifične otpornosti tla i konfiguracije uzemljivača

Udarne impedansa uzemljivača Z se definiše izrazom:

$$Z = U / I \quad (4)$$

gde su U - maksimalna vrednost napona na mestu injektiranja, I - struja u trenutku kada napon na mestu injektiranja dostiže maksimalnu vrednost.

Za konfiguraciju uzemljivača I određena je udarna impedansa u funkciji kritične jačine električnog polja, specifične otpornosti tla i amplitude strujnog impulsa (tabela 3). Proračuni su izvršeni za strujni impuls oblika 3/30 μs . Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 3 može se zaključiti da se najniža vrednost udarne impedanse postiže za kriterijum Mousae. Za slučaj najizrazitijeg prisustva efekta jonizacije ($\rho = 1\ 000 \Omega m$, $I_m = 100\ kA$), udarna impedansa iznosi 55 % odgovarajuće vrednosti za slučaj bez jonizacije tla. Primena kriterijuma Rjabkove i Oettlea dovodi do rezultata na stranu si-

gurnosti. Može se uočiti da se dobijaju praktično iste vrednosti udarne impedanse za kriterijume CIGRE i Mousae. Iz ovog razloga, dalji proračuni će biti vršeni koristeći kriterijum CIGRE ($E_k = 400\ kV/m$).

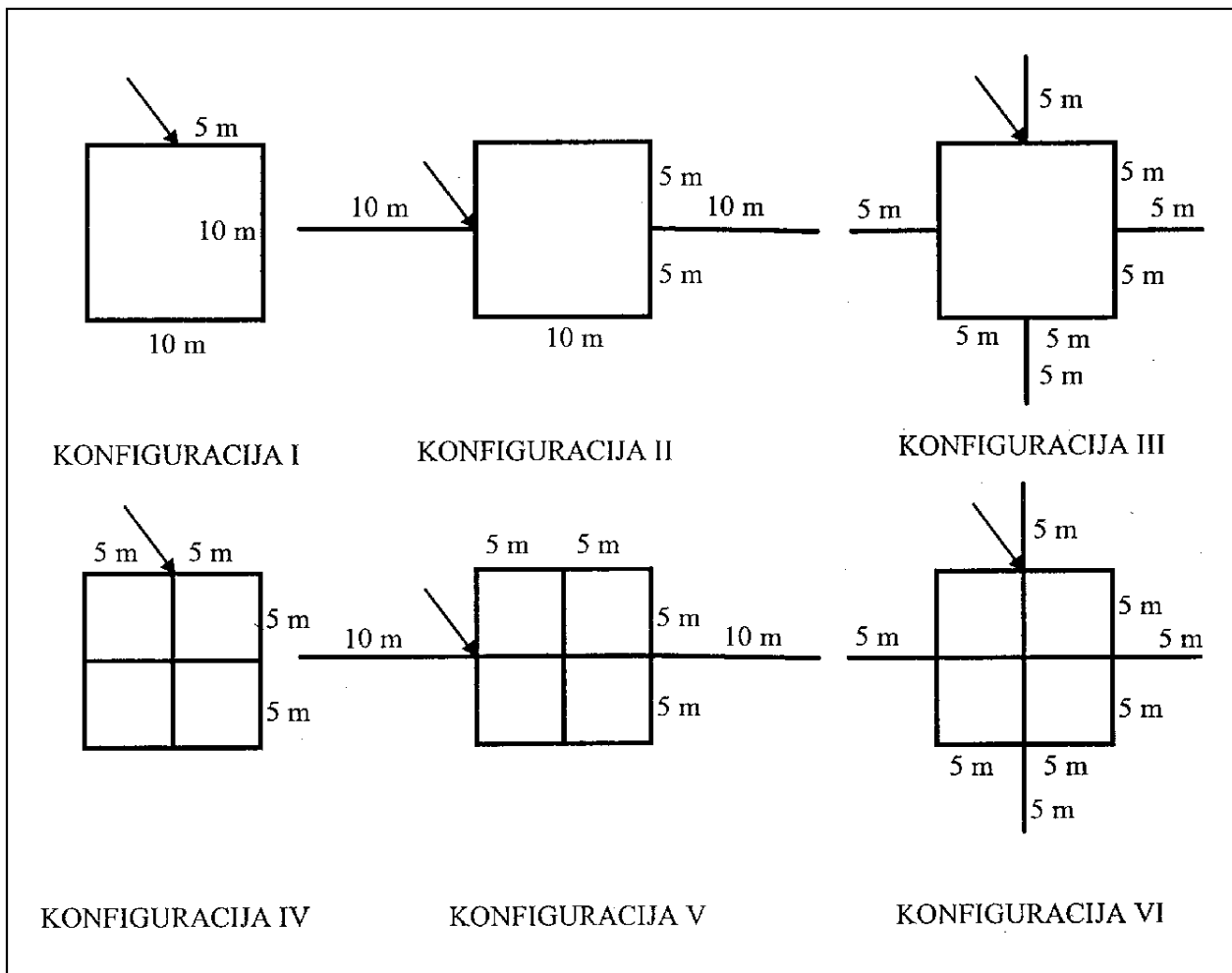
Celokupna analiza osetljivosti udarnih karakteristika je ponovljena za ostale konfiguracije prikazane na slici 3. Uočeni su slični trendovi i, stoga, rezultati tih proračuna nisu prikazani u ovom radu.

3.2 Proračun prenapona

Uticaj efekta jonizacije na visinu napona na stubu analiziran je na primeru voda nazivnog napona 400 kV, čija je ekvivalentna šema prikazana na slici 4. Simuliran je udar u vrh drugog stuba, pri čemu su analize urađene za dva granična slučaja parametara atmosferskog pražnjenja. U ovim slučajevima su korišćeni parametri atmosferskog pražnjenja čija je verovatnoća da budu premašeni 2 % (121 kA i 43 kA/ μs) odnosno 98 % (7,4 kA i 3,1 kA/ μs) [13]. Vreme trajanja talasa nema bitan uticaj na vrednost udarne impedanse, pa je u oba proračuna pretpostavljena vrednost 30 μs . Pri udaru u vrh stuba opravdano je pretpostaviti da kroz stub protiče 85% struje groma, dok se preostalih 15 % struje groma prostire po zaštitnoj užadi, postavljenoj levo i desno od mesta udara. Iz ovog razloga amplituda struje kroz drugi stub je određena kao 85 % – 121 kA \approx 100 kA i 85% 7,4 kA \approx 6 kA respektivno, za slučajeve verovatnoće od 2 % i 98 %. Za tako definisane amplitude struje određene su vrednosti udarne impedanse uzemljivača drugog stuba (grana 18 na slici 4). Kritična jačina električnog polja iznosi $E_k = 400\ kV/m$. Zbog malih struja koje teku kroz prvi i treći stub (grane 6 i 24 na slici 4), njihove udarne impedanse su modelovane stacionarnim otpornostima prema tabeli 2.

Na slici 5 su prikazani talasni oblici napona na konzoli stuba (tačka 9 na slici 4) u funkciji specifične otpornosti tla i amplitude struje groma za konfiguraciju I (slike 5a, 5b) i konfiguraciju V (slike 5c, 5d). Na osnovu grafika prikazanih na slici 5 se može zaključiti da se niže vrednosti napona postižu pri konfiguraciji V, što je posledica manje udarne impedanse ove konfiguracije u odnosu na konfiguraciju I. Takođe se može zaključiti da je, bez obzira na vrednost specifične otpornosti tla, uticaj jonizacije tla neznatan u slučajevima male amplitude struje kroz stub ($I_m = 6\ kA$).

Na slici 6 prikazana je amplituda napona u tački 9 u funkciji razmatranih konfiguracija uzemljivača i specifične otpornosti tla. Amplituda

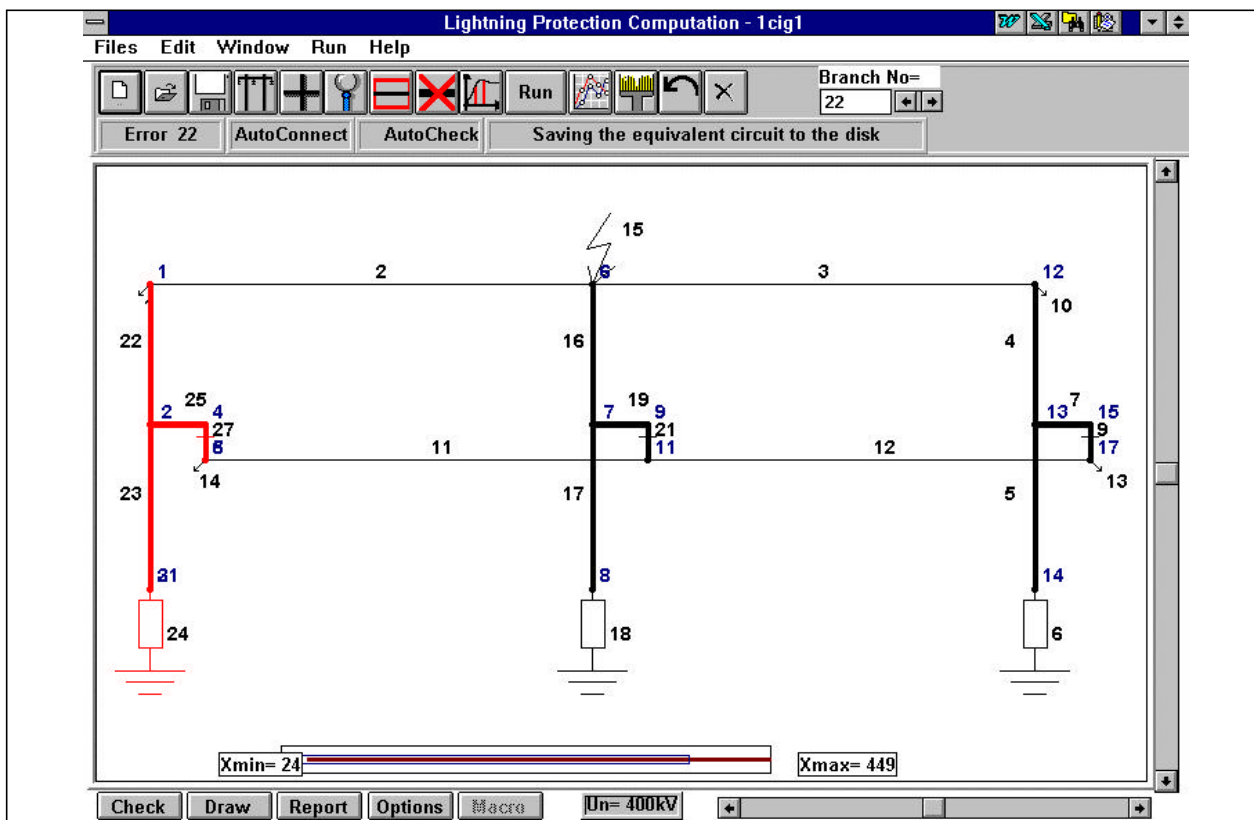


Slika 3. Analizirane tipične konfiguracije uzemljivača dalekovodnih stubova

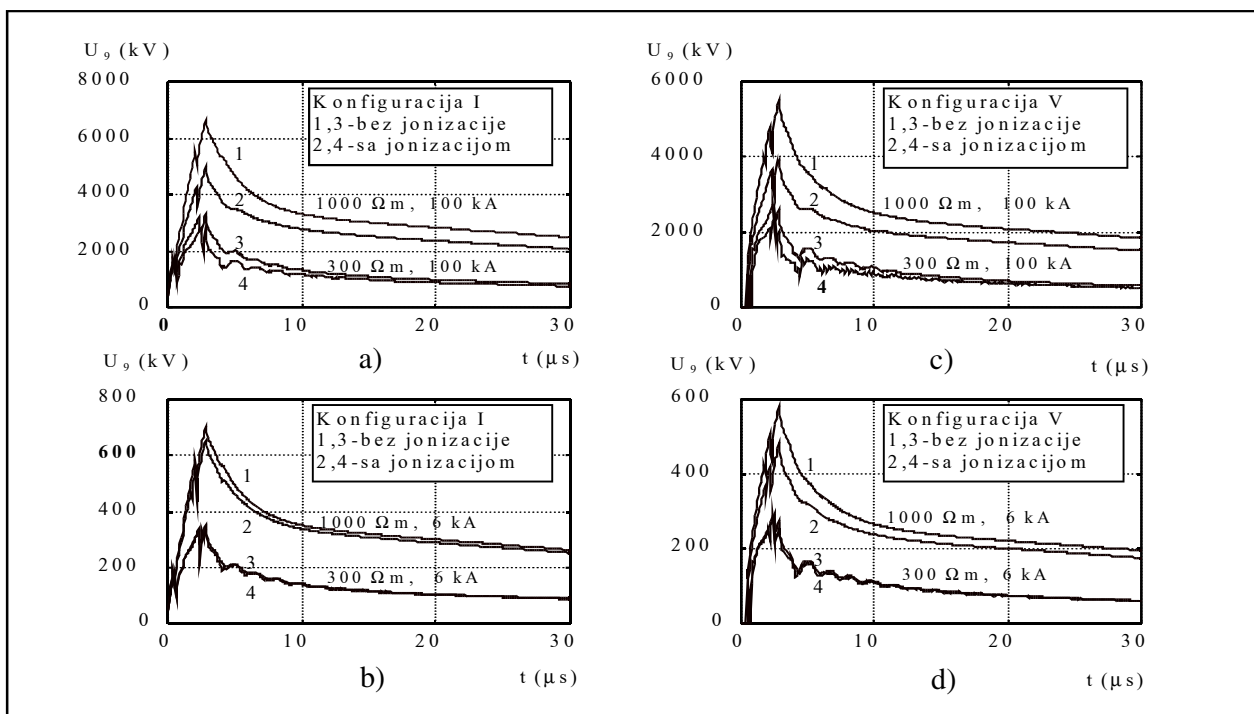
Tabela 3.

Udarne impedansa uzemljivača u funkciji kritične jačine električnog polja, specifične otpornosti tla i amplitude strujnog impulsa za konfiguraciju I i oblik strujnog impulsa 3/30 μ s

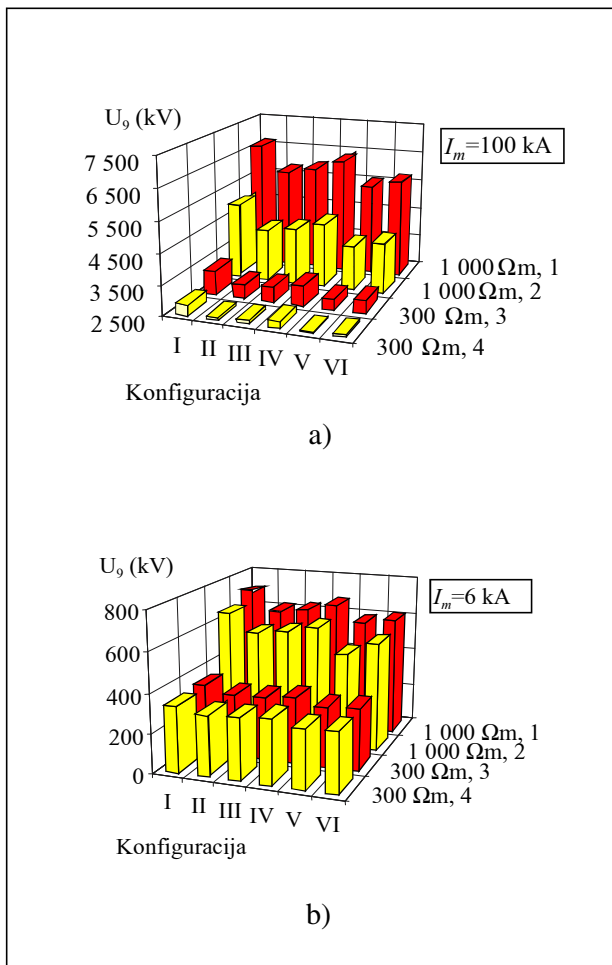
I_m (kA)	r (Wm)	Bez jonizacije	Sa jonizacijom			
		Z (Ω)	Z (Ω)			
			E_k iz [2]	E_k iz [4]	E_k iz [5]	E_k iz [6]
100	1000	55,3	39,2	37,8	31,7	29,7
100	300	16,7	13,2	12,8	11,9	11,6
100	50	3,8	3,4	3,3	3,2	3,1
10	1000	55,3	48,1	47,3	43,6	42,4
10	300	16,7	15,9	15,4	14,6	14,3



Slika 4. Ekvivalentna šema voda nazivnog napona 400 kV za analizu atmosferskih prenapona; visina stubova 25 m, dužina raspona 200 m



Slika 5. Talasni oblici napona na konzoli stuba (tačka 9. na slici 4) u funkciji specifične otpornosti tla i amplitude strujnog impulsa za $E_k=400 \text{ kV/m}$; a) konfiguracija I, $I_m=100 \text{ kA}$, b) konfiguracija I, $I_m=6 \text{ kA}$, c) konfiguracija V, $I_m=100 \text{ kA}$, d) konfiguracija V, $I_m=6 \text{ kA}$



struje kroz stub iznosi 100 kA (slika 6a) odnosno 6 kA (slika 6b). Usvojena je vrednost kritične jačine električnog polja $E_k=400$ kV/m. Oznake na slici 6 sadrže vrednosti specifične otpornosti tla i oznake primenjenog modela. Rezultati prikazani na slici 6 jasno ukazuju na oblast uticaja jonizacije tla na visinu napona za analizirane konfiguracije uzemljivača.

Slika 6. Amplituda napona na konzoli stuba (tačka 9 na slici 4) u funkciji razmatranih konfiguracija uzemljivača i specifične otpornosti tla za $E_k=400$ kV/m; a) $I_m=100$ kA, b) $I_m=6$ kA; 1,3 - model bez jonizacije; 2,4 - model sa jonizacijom

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana sistematska analiza uticaja jonizacije tla na udarne karakteristike uzemljivača i visinu napona na vodovima. Ovaj nelinearan fenomen je u osnovi ekvivalentiran povećanjem dimenzi-

ja uzemljivača. Kritična jačina električnog polja ima značajan uticaj na kvantifikaciju ovog fenomena. Prikazan postupak određivanja povećanja dimenzija uzemljivača omogućava razvoj jednostavnog i preciznog udarnog modela za proračun atmosferskih prenapona na vodovima.

Stepen redukcije prenapona na dalekovodu usled efekta jonizacije treba da bude analiziran saglasno primenjenoj konfiguraciji uzemljivača, karakteristikama tla i parametrima strujnog impulsa. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da ova redukcija prenapona ne prevazilazi 25%.

5. LITERATURA

- [1] R. Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar, EXPERIMENTAL STUDY OF TRANSIENT GROUND IMPEDANCES, IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-100, No.11, Nov. 1981, pp. 4653-4660.
- [2] E.Ja. Rjabkova, UZEMLJIVAČI U POSTROJENJIMA VISOKOG NAPONA, Energija, Moskva, 1978, (na ruskom).
- [3] C. Mazzetti, M.V. Giuseppe, IMPULSE BEHAVIOR OF GROUND ELECTRODES, IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-102, No.9, Sep. 1983, pp. 3148-3156.
- [4] E.E.Oettle, A NEW GENERAL ESTIMATION CURVE FOR PREDICTING THE IMPULSE IMPEDANCE OF CONCENTRATED EARTH ELECTRODES, IEEE Trans. on PWRD, Vol.3, No.4, Oct. 1988, pp. 2020-2029.
- [5] CIGRE WG, GUIDE TO PROCEDURES FOR ESTIMATING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES, CIGRE, Paris, Oct. 1991.
- [6] M.A. Mousa., THE SOIL IONIZATION GRADIENT ASSOCIATED WITH DISCHARGE OF HIGH CURRENTS INTO CONCENTRATED ELECTRODES, IEEE Trans. on PWRD, Vol.9, No.3, July 1994, pp. 1669-1676.
- [7] M.S. Savić, LIGHTNING OVERVOLTAGES COMPUTATION, User Manual Version 4.6, Faculty of Elec. Engineering, Belgrade, Feb. 2000.
- [8] Z. Stojković, M.S. Savić: INFLUENCE OF TRANSMISSION LINE TOWER GROUNDING IMPEDANCE TO THE LINE FLASHOVER RATE, European Trans. on Electrical Power - ETEP Vol. 9, No. 4, July/August 1999, pp.261-270.
- [9] Z. Stojković, M.S. Savić, Lj. Gerić, LOKALNI EFEKAT UDARNIH KARAKTERISTIKA UZEMLJIVAČA, Elektroprivreda, Br.3, Beograd, 2000.
- [10] J. Nahman, DIGITAL CALCULATION OF EARTHING SYSTEM IN NON-UNIFORM SOIL, Archiv für Elektro-technik, Vol. 27, 1984, No. 1, pp. 27-32.
- [11] J. Nahman., D. Salamon, EARTHING SYSTEM MODELLING BY ELEMENT AGGREGATION, IEE Proc. Pt.C, No. 1, Vol. 133, 1986, pp. 54-58.
- [12] M.S. Savić, Z. Stojković, AN EXPERT SYSTEM FOR HIGH-VOLTAGE SUBSTATION LIGHTNING PERFORMANCE ESTIMATION, IEEE

Duško Bekut,
Branislav Orešković, Milica Mirković

Procena mesta kvara u srednjenaponskim mrežama

Stručni rad
UDK: 621.311.1; 621.316

Rezime:

U radu je obrađena problematika inicijalne procene mesta kratkog spoja – kvara u srednjenaponskim mrežama. Potrebni podaci za ove analize se dobijaju merenjem pomoću brze merne jedinice postavljene u niženaponskom polju napojnog transformatora. Analizirana je primena dva pristupa za procenu mesta kvara: pristup preko merene impedanse i pristup preko merene vrednosti struja. U radu se ukratko izlažu obe metodologije, a zatim se analizira i kvalitet koji se dobija kombinovanjem oba pristupa. Izlaganja u ovom radu su ilustrovana primerima gde su za proračune korišćene podloge od realne distributivne mreže.

Ključne reči: lokacija kvara, distributivna mreža, kvar

Abstract:

ESTIMATE OF FAULTY PLACE IN MEDIUM-VOLTAGE NETWORKS

The paper deals with the problem of initial estimate of place of short-circuit (fault) in medium-voltage networks. Required data for these analyses are obtained by measurements by means of fast measure unit placed in a lower-voltage field of transformer. Application of two approaches to estimate of faulty place is analyzed: approach through measured impedance and approach through measured value of currents. The paper gives a short presentation of both methodologies and analyzes the quality obtained by combining both approaches. The presentations in this paper are illustrated by examples where data on real distribution networks are used for calculations.

Key words: localisation of fault, distribution network, fault

1. UVOD

U srednjenaponskim mrežama se kvarovi relativno često događaju i dovode do prekida napajanja potrošača. Prekid napajanja potrošača uvek predstavlja nepoželjnu situaciju za potrošače, te je potrebno preduzeti odgovarajuće mere da se što je moguće brže uspostavi ponovno napajanje. Da bi se napajanje ponovo uspostavilo potrebno je prvo izolovati mesto sa kvarom a zatim pokušati, ukoli-

ko je to moguće, obezbediti alternativno napajanje svih ili dela potrošača. U svakom slučaju prvo je neophodno locirati – inicijalno proceniti mesto sa kvarom. Ukoliko je ta procena dovoljno dobra broj manipulacija za identifikaciju se može značajno smanjiti u odnosu na metodu polovljena gde u nekim slučajevima broj manipulacija može da bude i znatan. Za lociranje se mogu koristiti razni pristupi koji zavise od resursa prekidačke opreme, tehničke opremljenosti mreže (prisustvo daljinski komando-

V. prof. dr Duško Bekut, Milica Mirković, dipl. ing. – Fakultet tehničkih nauka, 21000 Novi Sad, Fruškogorska 11
Branislav Orešković, dipl. ing. – Beočinska fabrika cementa, 21300 Beočin

vane opreme, indikatora, itd), načina uzemljenja srednjenaponske mreže, parametara mreže, itd [1,2]. U ovom radu se analizira mogućnosti primene odgovarajućeg hardverskog i softverskog rešenja za procenu mesta kvara u srednjenaponskoj mreži. Ovim pristupom se omogućuje inicijalna procena mesta kvara u srednjenaponskoj mreži uz relativno mala ulaganja. On se može primenjivati samostalno ili u kombinaciji sa drugim pristupima.

U ovom pristupu se za procenu lokacije kvara, moraju poznavati sledeći podaci: fazori napona i struja u sve tri faze u polju transformatora sa niženaponske strane i izvod na kojem se kvar desio. Na osnovu vrednosti napona i struja se prvo identifikuje tip kvara, a zatim se izračunava (određuje) modul merene struje kvara kao i vrednost merene impedanse na mestu merenja. Ta impedansa uz podatak na kojem se izvodu desio kvar predstavlja osnovu za procenu rastojanja do mesta kvara.

U drugom delu rada prvo je ukratko izložena metoda za procenu mesta kvara na osnovu merene impedanse [1,2,3], a zatim je ukratko opisana metoda u kojoj se mesto kvara procenjuje na osnovu vrednosti struje. Svaka od ove dve metode ima neke prednosti i nedostatke. U nameri da se dobiju bolji rezultati za procenu mesta kvara, na kraju ovog dela je predložena metoda u kojoj se objedinjuju prednosti obe metode i eliminišu njihovi nedostaci. U trećem delu je na primerima u kojima su korišćeni podaci od jedne realne srednjenaponske mreže analizirano više slučajeva procene mesta kvara na izvodu. Mesta kvara su apriori zadavana, a zatim su na osnovu rezultata dobijenih programom za proračun kratkih spojeva izračunavani potrebni naponi i struje i procenjivano mesto kvara. Ti rezultati su zatim upoređivani i komentarisani. Na kraju, u četvrtom i petom delu su dati zaključak i literatura, respektivno.

2. PROCENA MESTA KVARA

U ovom delu rada se ukratko izlažu metode za procenu mesta kvara na osnovu merene impedanse – impedantna metoda, zatim na osnovu vrednosti struja – strujna metoda, a izlaganje se završava metodom kojom se objedinjuju prednosti prethodna dva – kombinovana metoda.

2.1. Impedantna metoda

Poznavanje impedanse kvara Z_k koja se meri brzom mernom jedinicom u srednjenaponskom polju napojnog transformatora visoki/srednji napon omogućava da se identifikuje mesto kvara u distributivnoj mreži. Metoda koja se koristi u ovom radu je veoma jednostavna i zahteva se samo jedna brza merna jedinica po transformatoru visoki/srednji napon. Identifikacija tipa kvara kao i u kojim se

fazama dogodio kvar obavlja se na osnovu vrednosti struja (u koliko faza su struje veće od neke zadate vrednosti) i delovanja releja na odgovarajućem izvodu (kod jednopolnih kratkih spojeva struje mogu biti i manje od normalnih pogonskih struja, pa se identifikacija kvara obavlja na osnovu delovanja zemljospojnog releja, a u fazi sa kvarom struja je nešto veća nego u ostale dve faze).

Kada je identifikovan tip kvara i faza(e) sa kvarom, prelazi se na proračun merene impedanse Z_k . Ova impedansa se izračunava postupkom koji je analogan onom kod distantne zaštite [4,5]:

$$Z_k = \frac{V_f}{I_f}, \quad (1)$$

gde napon V_f i struja I_f zavise od tipa kvara. Tako je za npr. dvopolni kratak spoj između faza $L1$ i $L2$:

$$V_f = U_{L1} - U_{L2} \text{ i } I_f = I_{L1} - I_{L2}, \quad (2)$$

Za jednopolne kratke spojeve, za kratak spoj faze $L1$ sa zemljom:

$$V_f = U_{L1}, \quad (3)$$

$$I_f = I_{L1} + 3 \cdot k_0 I_0 \quad (4)$$

gde je: U_{L1} – napon faze $L1$, I_{L1} i I_0 – struja faze $L1$ odnosno nulta struja, k_0 je koeficijent zemlje:

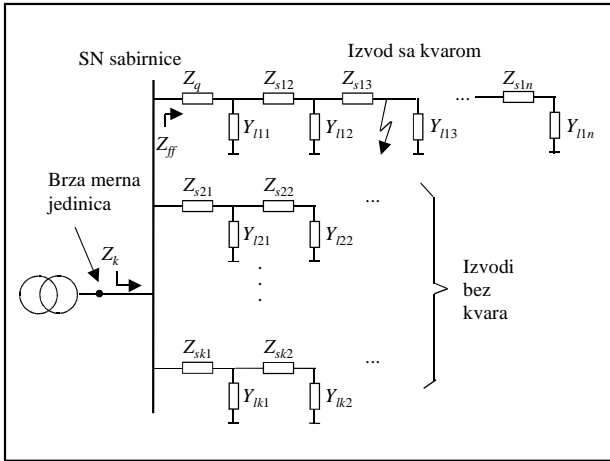
$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_d}{3Z_d}, \quad (5)$$

gde su Z_0 i Z_d podužne impedanse nultog i pozitivnog redosleda izvoda.

Pre proračuna odgovarajuće impedanse Z_k potrebno je od merenih vrednosti struja oduzeti odgovarajuće vrednosti struja režima pre kvara. Na taj način se dobija vrednost merene impedanse do mesta kvara koja odgovara merenoj impedansi u režimu praznog hoda.

Izračunata vrednost impedanse Z_k se ne može direktno iskoristiti za procenu mesta kvara pošto merena impedansa predstavlja ekvivalentnu vrednost impedanse sastavljenu od dve impedanse: impedanse Z_{ff} koja bi se merila sa glave izvoda sa kvarom ka njegovim krajevima i ekvivalentne impedanse svih ostalih izvoda bez kvara Z_{fe} – slika 1.

Na slici 1 izvodi su prikazani sa odgovarajućim π zamenskim šemama u kojima su kroz redne impedanse i očne admitanse uvaženi parametri svake od deonica i transformatora. Očne admitanse svih grana koje se susreću u jedan čvor su ekvivalentirane u jednu jedinstvenu očnu admitansu za taj čvor. Uticaj potrošača je uvažen preko struje iz režima pre kvara, koji je u potpunosti dostupan budući da se ovaj postupak



Slika 1. Prikaz transformatora sa brzom mernom jedinicom

primenjuje u okviru programskog paketa za nadzor i upravljanje distributivnom mrežom.

Neka je indeks čvora kome odgovaraju sredjenaponske sabirnice $q1$, neka je indeks grane kojoj korespondira prva deonica izvoda sa kvarom q i neka je indeks drugog kraja te grane $q2$. Tada se vrednost impedanse Z_{ff} za izvod sa kvarom izračunava na sledeći način:

$$\frac{1}{Z_{ff}} = \frac{1}{Z_k} - \frac{1}{Z_{fe}} = \frac{Z_{fe}}{\frac{Z_{fe}}{Z_k} - 1}, \quad (6)$$

pri čemu se vrednost impedanse Z_{fe} izračunava kao:

$$\frac{1}{Z_{ff}} = Y_{fe} = Y(q1) - \frac{1}{Z_g(q) + \frac{1}{Y(q2)}}, \quad (7)$$

gde je $Z_g(q)$ – impedansa grane q , dok su $Y(q1)$ i $Y(q2)$ ukupne ekvivalentne provodnosti koje se iz čvorova $q1$ odnosno $q2$ "vide" u smeru ka krajevima mreže (downstream) [3].

Poznavanje vrednosti Z_{ff} predstavlja uslov za identifikaciju deonice sa kvarom. Da bi se ta identifikacija učinila maksimalno efikasnom potrebno je napraviti korespondenciju između merene impedanse i deonice kojoj ta vrednost odgovara. U tu svrhu neophodno je izračunati vrednosti impedanse merene od početka izvoda do sabirnice na krajevima deonice izvoda. Neka su te vrednosti za j -tu deonicu označena za $Z_{ff1}(j)$ i sa $Z_{ff2}(j)$ za bliži odnosno dalji kraj deonice od napojnih sabirnice, respektivno. Proračun ovih vrednosti se odvija na sledeći način: Za prvu deonicu izvoda vrednost $Z_{ff1}(q)=0$ (po definiciji), dok je $Z_{ff2}(q)=-Z_g(q)$, gde je $Z_g(q)$ impedansa prve deonice izvoda. Oznaka – je uvedena zbog fizičkog udaljavanja od početka izvoda. Ostale vrednosti $Z_{ff1}(j)$ i $Z_{ff2}(j)$ se izračunavaju primenom sledećeg algoritma. Za primenu ovog algorit-

ma se podrazumeva da je za svaki čvor izvoda (a svakom čvoru izvoda su korespondentne odgovarajuće sabirnice na krajevima deonice tog izvoda), izračunata ekvivalentna admitansa kojom se zamenjuju delovi izvoda koji su od tih sabirnica vezani dublje u mrežu.

Proračun vrednosti $Z_{ff1}(j)$ i sa $Z_{ff2}(j)$ se bazira na izrazima koji se primenjuju kod distantne zaštite gde se vrednost "viđene" impedanse susedne deonice uzima preko koeficijenata grananja. Postupak je ilustrovan primerom sa slike 2 gde je zapažena p -ta grana u n -tom lejeru i k -ta grana u $n+1$ lejeru pri čemu su prethodno izračunate vrednosti $Z_{ff1}(p)$ i sa $Z_{ff2}(p)$. Problem koji se rešava je izračunavanje vrednosti $Z_{ff1}(k)$ i $Z_{ff2}(k)$. Za početak je potrebno izračunati vrednost Z_{ekv} primenom sledećeg izraza:

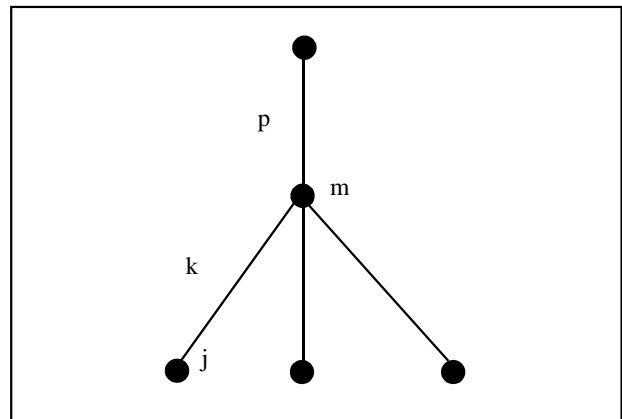
$$Z_{ekv} = \frac{1}{Y_{ekv}} = \frac{1}{Y(m) - \frac{Y(j)}{1 + Z_g(k) \cdot Y(j)}}, \quad (8)$$

odakle nije teško izračunati i odgovarajuće vrednosti $Z_{ff1}(k)$ i $Z_{ff2}(k)$:

$$Z_{ff1}(k) = \frac{Z_{ekv} Z_{ff2}(p)}{Z_{ekv} - Z_{ff2}(p)}, \quad (9)$$

$$Z_{ff2}(k) = Z_{ff1}(k) - Z_g(k). \quad (10)$$

Identifikacija deonice sa kvarom se svodi na traženje one deonice kod koje je suma imaginarnih delova impedansi Z_{ff1} i Z_{ff2} veća ili jednaka 0 i istovremeno suma imaginarnih delova impedansi Z_{ff2} i Z_{ff1} manja



Slika 2. Deo izvoda sa zapaženom p-tom i k-tom granom

ili jednaka 0. Na ovaj način se postupak procene deonice sa kvarom svodi na elementarno sabiranje i testiranje znaka dobijenog rezultata sabiranja samo za sekcije tog izvoda. Na taj način je obezbeđena visoka efikasnost ovog postupka.

Važno je napomenuti da je topologija mreže uvek poznata prilikom identifikacije deonice sa kvarom. Zato nije neophodno vršiti dodatna preračunavanja zbog npr. paralelnog rada dva transformatora jer je problem koji se rešava uvek generalnije postavljen i glasi: gde se nalazi mesto sa kvarom koji za datu topologiju mreže u srednjenaponskom polju transformatora sa brzom mernom jedinicom "daje" toliku merenu impedansu. Potrebno je naglasiti da je kod paralelnog pogona transformatora dovoljno da samo na jednom transformatoru postoji brza merna jedinica.

Vrednosti Z_{ff1} i Z_{ff2} se menja samo pri promeni uklopnog stanja u distributivnoj mreži i te vrednosti mogu biti off-line izračunate i biti spremne unapred do trenutka kada se zahteva procena mesta kvara.

Prednosti primene ove metode su u dobroj proceni mesta kvara na čisto kablovskim ili vazдушnim mrežama. Metoda je utoliko efikasnija ukoliko su struje kvarova veće. Metoda nije primenljiva u mrežama u kojima su zvezdišta transformatora izolovana. Nedostaci ove metode su vezani za relativno malu preciznost pri proceni mesta kvara na početnim deonicama izvoda. Takođe, pojavljuje se problem i kod primene na mešovitim izvodima gde je za tačan proračun na nekoj od deonica izvoda potrebno uzimati vrednost koeficijenta zemljospoja koja se menja u zavisnosti od odnosa dužina kablovskih i vazдушnih deonica od početka izvoda do mesta kvara.

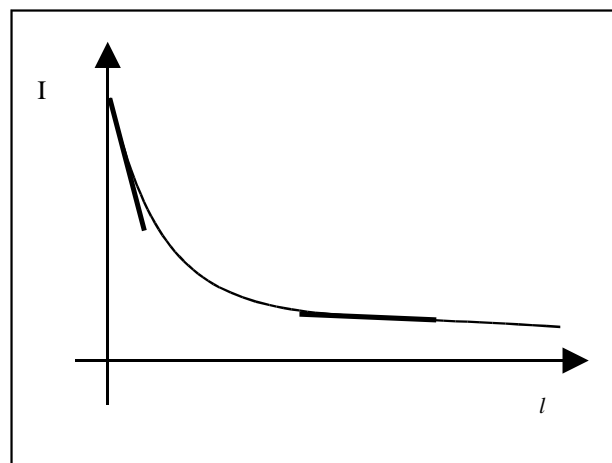
2.2. Strujna metoda

Ako je poznat tip kvara, kao i izvod na kome se dogodio kvar, a takođe ako se ima u vidu da je topologija razmatrane mreže poznata kao i režim u njoj, nije teško izračunati vrednosti struja kvara koje bi se merile brzom mernom jedinicom za bilo koje mesto kvara na izvodu. Na taj način je lako izračunati vrednosti struja duž čitavog izvoda na kome je kvar. Postoje dve nepoznate veličine: mesto kvara i otpor na mestu kvara. Moguća su dva pristupa. Prvi se zasniva na pretpostavci da se otpor na mestu kvara zanemaruje i da se procena mesta kvara izvrši samo na osnovu vrednosti struje. Neka iskustva iz primene ovakvih postupaka u realnim mrežama ukazuju da se na ovaj način mogu dobiti prilično dobri rezultati i da procena mesta kvara ne odstupi više od 500 metara [1,2]. Drugi pristup predstavlja malu modifikaciju prethodnog postupka. Na osnovu izračunate vrednosti struje za kvar bez otpora na mestu kvara se procenjuje vrednost otpora luka na mestu kvara pa se zatim ponavlja proračun sa procenjenom vrednošću luka. Tačnost ovog postupka je takođe u granicama kao za prvi. U literaturi nema podataka koji bi od ova dva postupka bio bolji, mada bi čak prvi postupak to mogao biti jer su trajni kvarovi

uglavnom praćeni manjim otporima na mestu kvara nego što je to slučaj kod prolaznih kvarova.

Prednosti ove metode su pre svega u njenoj jednostavnosti i manjim zahtevima za merenjem jer se zahtevaju samo struje. Metoda je efikasnija ako su struje kvarova veće. To se posebno odnosi na međufazne kvarove gde su struje kvarova veće. Preciznost metode je najveća na početku izvoda pošto je promena intenziteta struje sa promenom mesta kvara relativno velika – slika 3.

Na delovima izvoda koji su dalje od početka promena vrednosti struje kvara sa promenom me-



Slika 3. Promena vrednosti struje kvara sa promenom mesta kvara duž izvoda

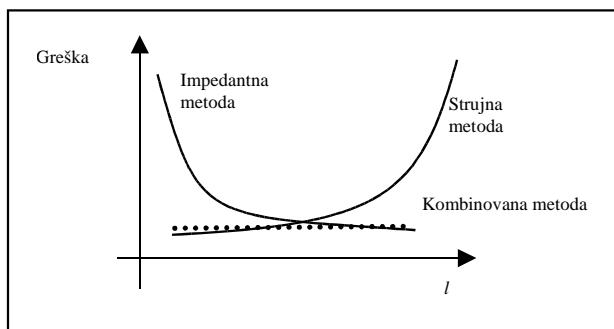
sta kvara je relativno mala pa se mesto kvara ne može precizno odrediti. Za ilustraciju ovog problema na slici 3 su povučene dve tangente istih dužina. Tangenti na početku izvoda odgovara velika promena intenziteta struje po ordinati i relativno mala promena rastojanja po apscisi. To znači da manje varijacije i netačnosti u merenju intenziteta struje neće imati za rezultate značajnije promene po apscisi. Odnosno, metoda je u ovom delu vrlo stabilna. Za razliku od ovog slučaja, kod desne tangente vrlo male varijacije u intenzitetu struje odgovaraju značajno različitim mestima na apscisi, što dalje znači da mala nepreciznost u vrednosti merene struje dovodi do značajno drugačijih rezultata. Nivo greške pri proračunima i merenjima u distributivnim mrežama je obično čak i veća nego u prenosnim mrežama. Ako se standardno smatra da je greška pri proceni parametara vodova u prenosnoj mreži oko 2 %, onda se može tvrditi da je ta greška u distributivnim mrežama sigurno veća. Realno u distributivnim mrežama ne postoji merenje parametara vodova već se tu po pravilu koriste podaci iz priručnika. Tako da se već na startu greška značajno povećava i nema opravdanja insistirati na velikoj tačnosti metode.

Nedostatak ove metode je u slaboj selektivnosti za kvarove koji su dalje od početka izvoda. Mala selektivnost je posebno izražena kod jednopolnih kvarova u mrežama uzemljenim preko male impedanse i to u slučajevima gde su struje jednopolnih kvarova svedene na vrednost od oko 300 A. U takvim mrežama se vrednost struje kvara praktično beznačajno menja sa promenom mesta kvara. Nepovoljno je i to što upravo jednopolni kvarovi čine praktično najveći deo kvarova u distributivnim mrežama.

2.3. Kombinovana metoda

Da bi se prevazišli ovi problemi predloženo je da se prethodno pomenute dve metode koriste kombinovano. Ako se ima u vidu dijagram sa slike 4. na kome je u načelu prikazana promena vrednosti greške procene mesta kvara u funkciji rastojanja od početka izvoda za obe metode. Tačkastom linijom je označena vrednost greške koja bi se dobila kada bi se identifikacija mesta kvara izvodila prema kombinovanoj metodi.

Očigledno pitanje koje se ovde postavlja je do kojeg rastojanja odnosno do koje deonice treba



Slika 4. Promena vrednosti greške kod metoda za procenu mesta kvara na izvodu

procenu izvršiti prema jednoj odnosno prema drugoj metodi. Odgovor na ovu dilemu se nalazi relativno jednostavno jer je neophodno raspolagati sa dijagramom sa slike 3 i proceniti na kojoj deonici vrednost prvog izvoda struje počinje da se značajnije približava vrednosti 0. S obzirom na veliku raznolikost parametara i dužina deonica izvoda u realnim mrežama ne može se a priori dati preporuka za tu granicu ali u najvećem broju slučajeva to odgovara rastojanju od tri do pet deonica pri čemu su deonice dužina oko 200 do 300 m.

3. REZULTATI

Za ilustraciju korišćenih metoda kao podloga je izabrana realna mreža grada Novog Sada koja se sastoji od više transformatorskih stanica 110/20/10 kV/kV/kV i 110/35/10 kV/kV/kV i preko 1 100

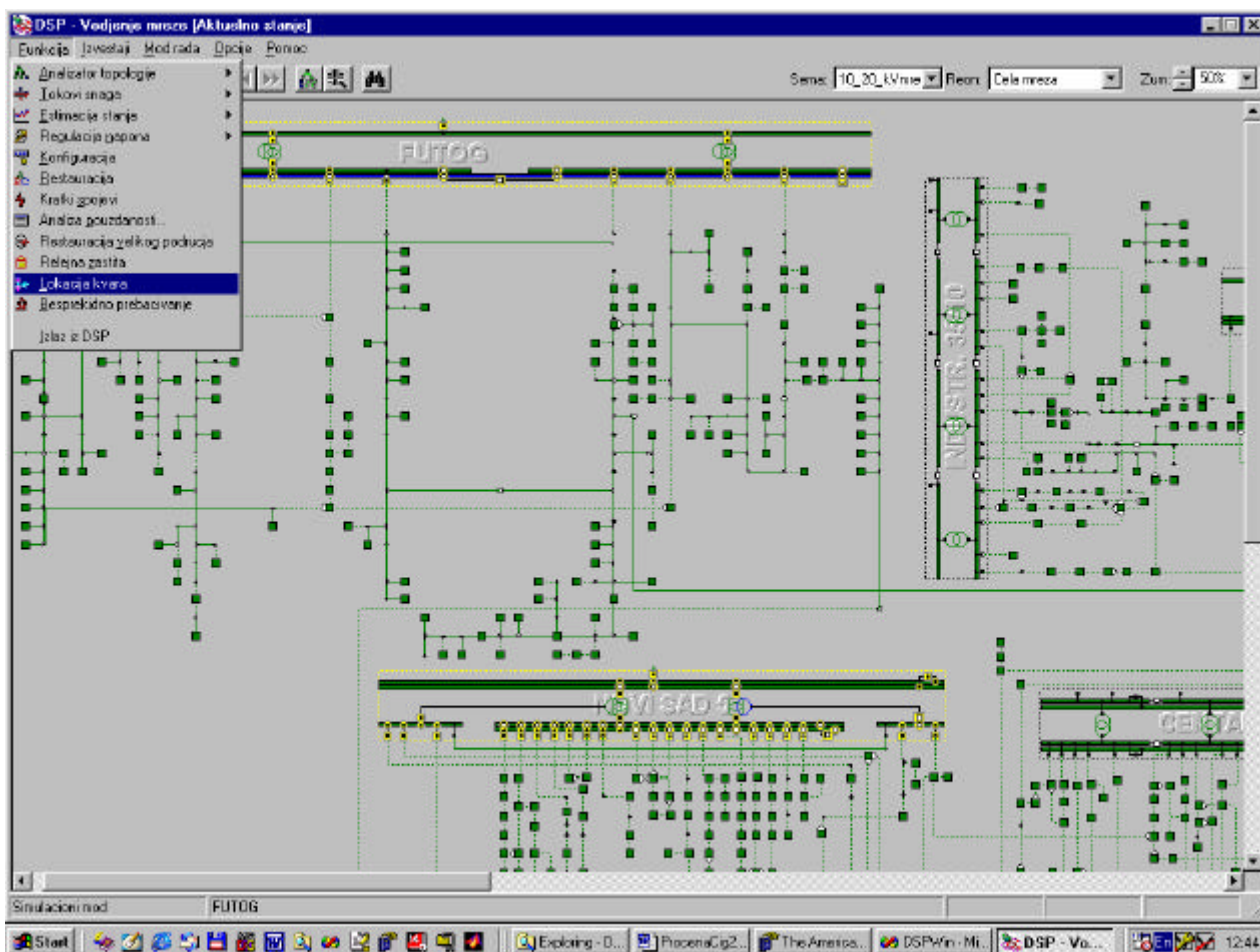
transformatorskih stanica srednji/niski napon. Analize su prikazane za jedan čisto kablovski izvod – Zapadna zona iz postrojenja Novi Sad 5 i jedan mešoviti izvod iz postrojenja Futog. Vazdušni vodovi na slici 5 su označeni punom, a kablovski isprekidanom linijom.

Primenom impedantne metode za sve četiri vrste kratkih spojeva na izvodu Zapadna zona dobijeni su dobri rezultati. Zbog nedostatka realnih merenja korišćeni su rezultati proračuna režima sa kratkim spojem kvazistacionarnim modelom. Na osnovu izračunatih vrednosti napona i struja u transformatorskom polju napojnog transformatora izračunata je vrednost merene impedanse i na osnovu nje impedantnom metodom procenjeno mesto kvara. Bez obzira na mesto i tip kvara procena mesta kvara je bila tačna – u svim slučajevima je pogođena deonica na kojoj je kvar i simuliran.

Kod primene impedantne metode na mešovitom izvodu (iz postrojenja Futog) pojavio se problem procene vrednosti koeficijenta zemljospoja. Zato su izvršeni proračuni koje bi vrednosti koeficijenta zemljospoja bile odgovarajuće s obzirom na mesto kvara budući da se sa promenom mesta kvara menja odnos vazdušnih i kablovskih deonica od mesta kvara do početka izvoda. Na osnovu rezultata proračuna se pokazalo da se vrednost koeficijenta zemlje relativno brzo ustaljuje čim se mesto kvara nalazi nešto dublje u mreži nakon nekoliko prvih deonica vrednost koeficijenta zemlje se kretala od $k_0=0,33+j0,23$ pa do $k_0=0,36+j0,26$ što su relativno male varijacije, tako da se neka srednja vrednost između ove dve može koristiti za proračune duž izvoda.

Prisustvo otpora na mestu kvara (do vrednosti od 0,5 Ω gotovo da nije uticalo na preciznost metode. Značajnije povećanje otpora na mestu kvara (5 Ω) je uticalo da se preciznost procene deonice sa kvarom značajno smanji samo kod jednopolnih kratkih spojeva – greška u proceni mesta kvara se kretala od 500 do 2 500 m. Kod primene strujne metode su praktično potvrđeni rezultati prikazani na slikama 3 i 4 pri čemu je konstatovano da je poseban problem procena mesta kvara pri jednopolnim kvarovima zbog slabe selektivnosti metode. Kod međufaznih kvarova greška procene se kretala u granicama do 500 m. Kod primene kombinovane metode je konstatovano da za najveći broj mešovitih izvoda ustaljenje koeficijenta zemljospoja nastupa nakon 3 do 5 deonica a da je otprilike tu i granica dokle se može koristiti strujna metoda. Sve ostalo važi kao što je prethodno navedeno za impedantnu i strujnu metodu.

Na osnovu svega prethodno navedenog može se konstatovati da postoje preduslovi i da se mogu očekivati dovoljno dobri rezultati kod primene kombinovane metode na realnim mrežama.



Slika 5. Razmatrana mreža

4. ZAKLJUČAK

U radu je obrađena problematika procene lokacije kvara u distributivnoj mreži. Predložena je primena postupka u kome se kombinuju prednosti dva postupka za procenu mesta kvara. Numerički eksperimenti potvrđuju da se kod razvijenog kombinovanog postupka mogu očekivati dobri rezultati u realnim mrežama. Dobijeni rezultati ukazuju da je moguće dovoljno precizno proceniti mesto kvara u distributivnoj mreži, odnosno dobiti dovoljno dobru polaznu procenu za stvarnu procenu mesta kvara u distributivnoj mreži. U prilog praktičnoj primeni ovog postupka govori činjenica da su ulaganja vezana za hardver za procenu mesta kvara praktično beznačajna, a da je kvalitet procene koja se na taj način dobija dovoljno dobar, te da se na taj način značajno može smanjiti i broj manipulacija i trajanje prekida napajanja pri identifikaciji deonice sa kvarom.

5. LITERATURA

- [1] *** FAULT MANAGEMENT IN ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS, Final report of the CIREC Working Group WG03 Fault Management, CIREC, Nice, 1999, France.
- [2] M. MSaha, F. Provoost: FAULT LOCATION IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS, CIREC, Nice, 1999, France.
- [3] D. Bekut, M. Nenin, B. Orešković: INICIJALNA PROCENA MESTA KVARA U SREDNJE NAPONSKOJ MREŽI, JUKO CIREC, H. Novi, 2000, R. 4-4.
- [4] D. Bekut: RELEJNA ZAŠTITA, Stylos, Novi Sad, 1999.
- [5] J. Zhu, D. L. Lubkerman, A. A. Girgis: AUTOMATED FAULT LOCATION AND DIAGNOSIS ON ELECTRIC POWER DISTRIBUTION FEEDERS, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 12, No.2, April 1997, pp. 801-809.

Rad je primljen u uredništvo 11. 10. 2001. godine

Analiza telekomunikacionih puteva na području Vojvodine

Stručni rad
UDK: 621.39

Rezime:

U radu je dat prikaz postojeće telekomunikacione mreže koja se koristi za potrebe SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – sistem za nadzor i akviziciju podataka) sistema na području Vojvodine. Na osnovu podataka iz SCADA baze izvršena je analiza prekida komunikacija do objekata koji su uključeni u sistem daljinskog nadgledanja na području Vojvodine. Podaci su statistički obrađeni. Dat je predlog unapređenja korišćenja ovih podataka.

Ključne reči: telekomunikacioni putevi – prekid komunikacije

Abstract:

ANALYSIS OF TELECOMMUNICATION ROUTES IN THE REGION OF VOIVODINA

The paper deals with the existing telecommunication network used for the needs of SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) system in the region of Voivodina. On the basis of data from the SCADA base, analysis is made of interruption of communications to the plants involved in the remote supervisory system in the region of Voivodina. Data are processed statistically. A proposed improved application of these data is presented.

Key words: telecommunication routes, communication interruption

1. UVOD

SCADA sistem (sistem za nadzor i akviziciju podataka) obezbeđuje nadzor, upravljanje, prikupljanje i arhiviranje podataka iz daljinskih stanica sa područja Vojvodine do nadređenih centara u Novom Sadu i Beogradu u cilju postizanja veće ekonomičnosti i sigurnosti rada elektroenergetskog sistema na području Vojvodine.

SCADA funkcije se koriste za potrebe Mrežnog regionalnog centra Novi Sad (MRC Novi Sad) i distributivno koordinacionog centra Elektrovoivodine u Novom Sadu (DC EV Novi Sad). Hijerarhijska organizacija je realizovana u tri nivoa.

– I nivo predstavlja republički dispečerski centar DC EPS u Beogradu koji upravlja mrežom

400 kV i 220 kV kao i dalekovodima 110 kV koji povezuju elektrane, mrežne centre i predstavljaju vezu sa susednim državama.

- II nivo na području Vojvodine predstavlja Mrežni regionalni centar koji upravlja dalekovodima 110 kV koji povezuju dve TS 400/220/110 kV/kV/kV i objektima 110 kV koji nisu od sistemskog značaja. Takođe postoji i koordinacioni centar Elektrovoivodine u Novom Sadu koji koordinira svim područnim distributivnim dispečerskim centrima na području Vojvodine.
- III nivo predstavlja nivo sistemskih objekata i objekata 110/x kV/kV.

2. TELEKOMUNIKACIONA MREŽA PRENOSA ZA POTREBE SISTEMA ZA NADZOR I AKVIZICIJU PODATAKA NA PODRUČJU VOJVODINE

Trenutno je u SCADA sistem centra za integracioni informacioni sistem (CIIS) Beograd – deo Novi Sad, na području Vojvodine uključeno 22 objekta. To su objekti koji pripadaju III hijerarhijskom nivou. Od toga, 5 objekata su sistemski elektroenergetski objekti (SEEO) a 17 objekata su objekti 110/x kV/kV. Prenos podataka do svih objekata je realizovan u realnom vremenu.

Na slici 1 je prikazana telekomunikaciona mreža prenosa za potrebe SCADA sistema na području Vojvodine. Do svih objekata se koriste iznajmljene PTT linije.

2.1. Formiranje podataka o događajima u sistemu

U okviru SCADA podsistema za arhiviranje, podržana je dnevna arhiva o svim događajima u sistemu. Arhiva je u ASCII formatu i sadrži tekstualni opis svih događaja nastalih u jednom danu. Jedan od događaja je i prekid kao i uspostava komunikacije sa odgovarajućim objektom.

2.2. Snimanje događaja u sistemu

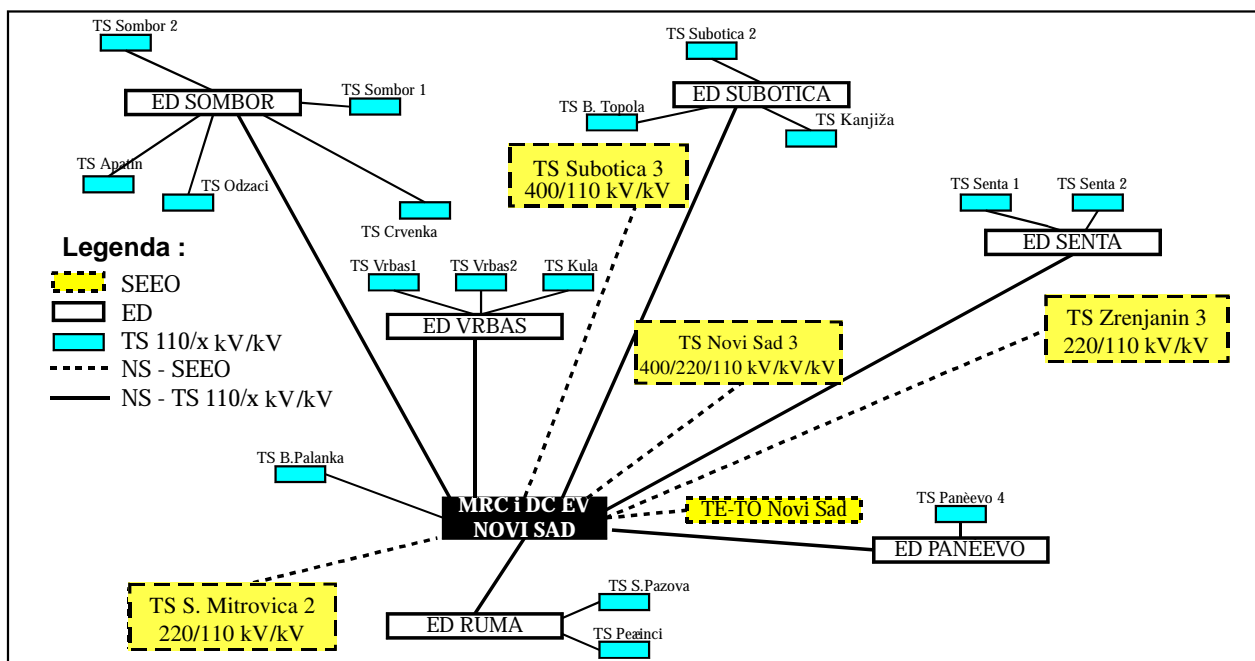
Sa snimanjem događaja u sistemu se počelo 16. 12. 1999. godine kada je realizovana II faza SCADA sistema na području Vojvodine i to na novoj hardware (HW) i software (SW) platformi. Snimanje je analizirano zaključno sa 31. 10. 2000. godine. Neki objekti su naknadno uključivani u si-

stem daljinskog nadgledanja tako da za njih ne postoje podaci za ceo interval praćenja.

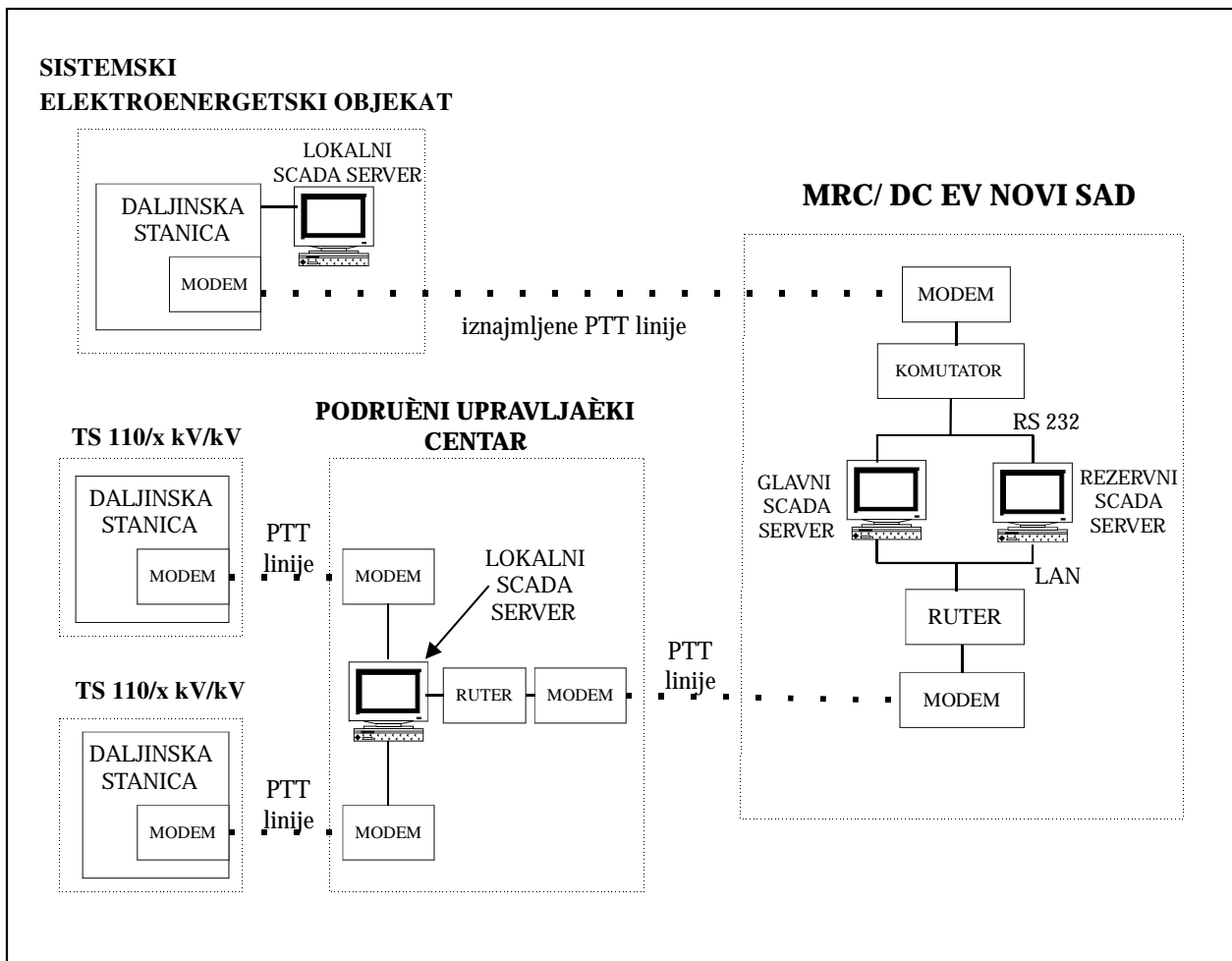
Tabela 1.

Objekti uključeni u SCADA sistem CIIS-a

IME OBJEKTA	TIP OBJEKTA	Uključenje u SCADA sistem
TS Novi Sad 3	400/220/110 kV/kV/kV	23.10.1996.
TS Subotica 3	400/110 kV/kV	18.09.1997.
TS Zrenjanin 2	220/110 kV/kV	24.06.1998.
TE-TO Novi Sad	Termo toplana	24.10.1999.
TS S.Mitrovica 2	220/110 kV/kV	15.09.2000.
TS Vrbas 1	110/35/20 kV/kV/kV	23.10.1996.
TS Vrbas 2	110/20 kV/kV	23.10.1996.
TS Kula	110/20 kV/kV	23.10.1996.
TS Subotica 2	110/20 kV/kV	20.01.2000.
TS Kanjiža	110/20 kV/kV	20.01.2000.
TS B. Topola 2	110/20 kV/kV	20.01.2000.
TS Sombor 1	110/20 kV/kV	20.01.2000.
TS Sombor 2	110/20 kV/kV	20.01.2000.
TS Odžaci	110/20 kV/kV	20.01.2000.
TS Crvenka	110/20 kV/kV	20.01.2000.
TS Apatin	110/20 kV/kV	20.01.2000.
TS Senta 1	110/35/20 kV/kV	20.01.2000.
TS Senta 2	110/20 kV/kV	20.01.2000.
TS Pančevo 4	110/20 kV/kV	26.02.2000.
TS B. Palanka 2	110/20 kV/kV	27.02.2000.
TS S. Pazova	110/20 kV/kV	28.02.2000.
TS Pećinci	110/20 kV/kV	28.02.2000.



Slika 1. Telekomunikaciona mreža prenosa za potrebe SCADA sistema na području Vojvodine



Slika 2. Prikaz tipičnih relacija između MRC i DC EV Novi Sad i sistemskih elektroenergetskih objekata i objekata TS 110/x kV/kV

U tabeli 1 je dat pregled objekata na području Vojvodine sa datumom uključivanja u tehnički sistem upravljanja (TSU).

2.3. Definicija događaja u sistemu

U okviru celog telekomunikacionog sistema prikazanog na slici 1 mogu se prepoznati dve tipične relacije: MRC i DC EV Novi Sad – SEEO i MRC i DC EV Novi Sad – TS 110/x kV/kV. Na slici 2 su prikazane blok šeme navedenih relacija.

Fizička veza od daljinske stanice u SEEO do SCADA računara u centru Novi Sad se sastoji od direktne modemske veze korišćenjem iznajmljene telefonske linije i kratkih kablovskih veza između modema i komutatora odnosno komutatora i SCADA računara. Uloga komutatora je da izvrši komutaciju podataka iz jednog pravca na dva računarska sistema.

Veza MRC i DC EV Novi Sad – TS 110/x kV/kV se može podeliti u dve deonice. Prvu deonicu fizički čini direktna modemska veza korišće-

njem iznajmljenih telefonskih linija od svake daljinske stanice do lokalnog SCADA računara u Područnom Upravljačkom Centru (PUC). Drugu deonicu čini iznajmljena telefonska linija od PUC-a do MRC i DC EV Novi Sad. Pošto se SCADA računari u ovim objektima nalaze povezani u lokalne računarske mreže osim modema postoje i odgovarajući ruteri.

Pojam prekid komunikacije definiše prekid prenosa podataka na bilo kojoj deonici u navedenim relacijama. U toku snimanja događaja u sistemu nije bilo problema u radu samih uređaja (SCADA računari, modemi i ruteri) kao i kablovskih deonica (RS 232 ili *ethernet* kablovski sistem) između samih uređaja.

Osim toga na prekid komunikacije mogu da utiču i drugi faktori kao što su : prekid napajanja na nekom od uređaja, prekidi prilikom testiranja novog sistema ili uključivanja novog objekta u sistem daljinskog nadgledanja, neplaćanja iznajmljenih telefonskih linija i slično.

U toku snimanja događaja u sistemu, od svih navedenih potencijalnih događaja koji utiču na indikaciju prekida komunikacije, pojavljivao se samo problem prekida usled puštanja objekta TS Sremska Mitrovica 2 u SCADA sistem.

Objekti tipa TS 110/x kV/kV koji su u toku snimanja saobraćaja uključeni u SCADA sistem (svi objekti osim objekti sa područja PUC Vrbas) su povezani preko iznajmljenih PTT linija koje su se već dugo vremena pre toga koristile za druge namene tako da problemi testiranja linija i mogućih indikacija prekida komunikacije usled testova nisu postojali.

Na osnovu izloženog može se smatrati da se prekid komunikacije najvećim delom odnosi na prekid telekomunikacionog kanala između objekata.

2.4. Realizacija prikupljanja podataka

Postupak formiranja podataka za analizu je sledeći:

- Za navedeni vremenski interval, podaci su skinuti sa arhivskih traka,
- Formiran je poseban katalog na kome su smeštene datoteke sa podacima,

- Realizovan je skript koji je iz sumarne datoteke kreirao datoteku sa podacima, samo o prekidima i uspostavama komunikacija. Realizovan je skript koji je kreirao 22 datoteke (za svaki objekat po jedna datoteka) sa podacima o prekidima i uspostavama komunikacija,
- Svaka datoteka je korišćenjem programa Excel posebno analizirana,
- Značajni podaci iz svake datoteke su prebačeni u novu datoteku gde je izvršena sumarna analiza.

3. ANALIZA PREKIDA KOMUNIKACIJA

Na osnovu ovih postupaka izvršena je analiza komunikacionih linija. U tabeli 2 je dat prikaz prekida komunikacije za sistemske elektroenergetske objekte a u tabeli 3 za objekte TS 110/x kV/kV na području Vojvodine.

Iz tabele 2 se može videti da raspoloživost varira u opsegu od 82 % do 95 %. Najmanja raspoloživost se odnosi na objekat TS Sremska Mitrovica 2 koji je i najskorije uključen u SCADA sistem. U početku korišćenja iznajmljenih linija, je i inače najveći broj prekida.

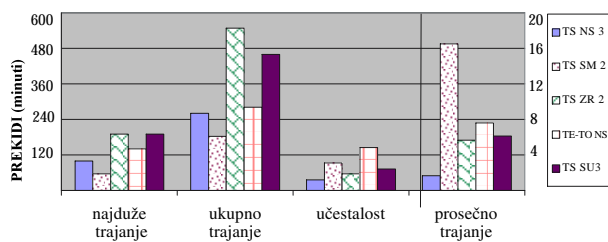
Tabela 2.

Prikaz prekida komunikacije sa sistemskim elektroenergetskim objektima na području Vojvodine

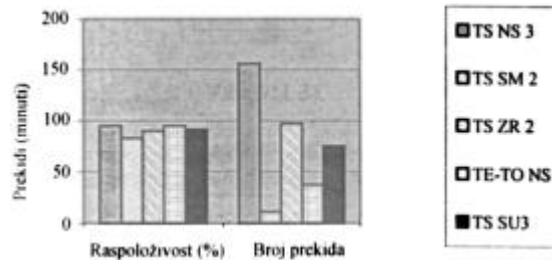
KARAKTERISTIKA	TS NS 3	TS SM 2	TS ZR 2	TE-TO NS	TS SU3	PROSEK
Broj dana praženja rada veze:	224	43	224	224	224	188
Broj sati praženja rada veze :	5 376:00:00	1 032:00:00	5 376:00:00	5 376:00:00	5 376:00:00	4 512:00:00
Ukupan broj prekida :	156	11	97	37	75	75,2
Vreme trajanja najdužeg prekida :	99:31:59	54:54:18	190:51:19	141:03:19	190:51:19	135:26:27
Interval najdužeg prekida :	15.09-19.09	04.10-06.10	19.06-27.06	24.02-01.03	19.06-27.06	
Vreme trajanja najkraćeg prekida :	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01
Ukupno trajanje svih prekida :	260:49:00	181:13:32	549:10:26	281:00:23	459:59:11	346:26:30
Prosečno trajanje prekida :	1:40:19	16:28:30	5:39:42	7:35:41	6:07:59	7:30:26
RASPOLOŽIVOST VEZE :	95,15%	82,44%	89,78%	94,77%	91,44%	90,72%
NERASPOLOŽIVOST VEZE :	4,85%	17,56%	10,22%	5,23%	8,56%	9,28%
Srednje vreme između dve pojave prekida (učestalost prekida) :	34:27:42	93:49:05	55:25:22	145:17:50	71:40:48	80:08:09
	1 dan i 10 h	3 dana 22 h	2 dana i 7 h	6 dana i 1 h	3 dana	3 dana i 8 h

- Realizovan je skript koji je od svih dnevnih datoteka događaja, kreirao jednu sumarnu datoteku za ceo vremenski interval, uz izvršeno sortiranje po datumima,

Na slikama 3 i 4 je dat grafički prikaz karakterističnih podataka iz tabele 2 koji se odnose na prekide u komunikaciji sa sistemskim elektroenergetskim objektima.



Slika 3. Prikaz vremenskog trajanja prekida za sistemske elektroenergetske objekte



Slika 4. Prikaz raspoloživosti za sistemske elektroenergetske objekte

Tabela 3.

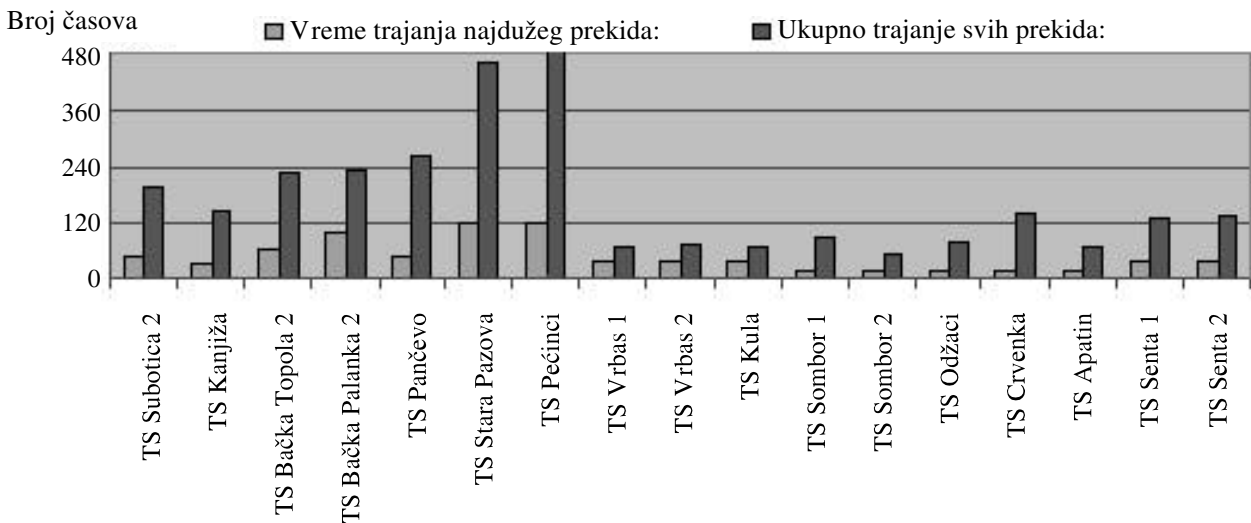
Prikaz prekida komunikacije sa objektima TS 110/x kV/kV koji su uključeni u SCADA sistem na području Vojvodine

KARAKTERISTIKA	PUC SUBOTICA			PUC NOVI SAD	PUC PANČEVO
	TS Subotica 2	TS Kanjiža	TS Bačka Topola 2	TS Bačka Palanka 2	TS Pančevo 4
Broj dana praženja rada veze:	187	187	187	151	152
Broj sati praženja rada veze :	4 488:00:00	4 488:00:00	4 488:00:00	3 624:00:00	3 648:00:00
Ukupan broj prekida :	370	399	884	3296	1034
Vreme trajanja najdužeg prekida :	50:30:28	29:52:21	62:52:13	97:43:18	50:43:59
Interval najdužeg prekida :	31.01.-02.02.	30.08.-31.08.	25.06.-28.06.	7.09.-11.09.	6.09.-08.09.
Vreme trajanja najkraćeg prekida:	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01
Ukupno trajanje svih prekida :	191:36:14	143:37:08	227:11:56	231:39:00	263:47:35
Prosečno trajanje prekida :	0:31:04	0:21:36	0:15:25	0:04:13	0:15:18
RASPOLOŽIVOST VEZE :	95,73%	96,80%	94,94%	93,61%	92,77%
NERASPOLOŽIVOST VEZE :	4,27%	3,20%	5,06%	6,39%	7,23%
Srednje vreme između dve pojave prekida (učestalost prekida) :	12:07:47 ili 12 h	11:14:53 ili 11 h	5:04:37 ili 5 h	1:05:58 ili 1h	3:31:41 ili 3,5 h

Nastavak 1 Tabele 3.

KARAKTERISTIKA	PUC RUMA		PUC VRBAS		
	TS Stara Pazova	TS Peainci	TS Vrbas 1	TS Vrbas 2	TS Kula
Broj dana praženja rada veze:	150	150	224	224	224
Broj sati praženja rada veze :	3 600:00:00	3 600:00:00	5 376:00:00	5 376:00:00	5 376:00:00
Ukupan broj prekida :	403	385	346	311	387
Vreme trajanja najdužeg prekida :	119:18:13	119:18:12	41:50:07	41:50:07	41:50:07
Interval najdužeg prekida :	14.09.-19.09	14.09.-19.09	09.09.-11.09.	09.09.-11.09.	09.09.-11.09.
Vreme trajanja najkraćeg prekida:	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01
Ukupno trajanje svih prekida :	460:19:43	513:43:00	70:48:41	74:55:01	69:35:32
Prosečno trajanje prekida :	1:08:32	1:20:04	0:12:17	0:14:27	0:10:47
RASPOLOŽIVOST VEZE :	87,21%	85,73%	98,68%	98,61%	98,71%
NERASPOLOŽIVOST VEZE :	12,79%	14,27%	1,32%	1,39%	1,29%
Srednje vreme između dve pojave prekida (učestalost prekida) :	8:55:59 ili 9 h	9:21:02 ili 9,5 h	15:32:15 ili 15,5 h	17:17:10 ili 17,3 h	13:53:29 ili 14 h

KARAKTERISTIKA	PUC SOMBOR					PUC SENTA		PROSEK
	TS Sombor 1	TS Sombor 2	TS Odžaci	TS Crvenka	TS Apatin	TS Senta 1	TS Senta 2	
Broj dana praćenja rada veze:	189	189	189	189	189	188	188	186,00
Broj sati praćenja rada veze :	4536:00:00	4536:00:00	4536:00:00	4536:00:00	4536:00:00	4512:00:00	4512:00:00	4464:00:00
Ukupan broj prekida :	10018	530	577	285	452	3873	4113	1627
Vreme trajanja najdužeg prekida :	16:25:48	16:25:52	16:25:43	17:08:09	16:25:38	41:50:07	41:50:07	44:41:08
Interval najdužeg prekida :	02.0.-03.02.	02.02.-03.02.	02.02.-03.02.	02.02.-03.02.	02.02.-03.02.	9.09.-11.09.	09.09.-11.09.	
Vreme trajanja najkraćeg prekida :	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01	0:00:01
Ukupno trajanje svih prekida :	90:11:36	52:22:49	81:26:03	139:45:32	71:16:06	126:57:23	134:25:01	162:06:18
Prosečno trajanje prekida :	0:00:32	0:05:56	0:08:28	0:29:25	0:09:28	0:01:58	0:01:58	0:17:49
RASPOLOŽIVOST VEZE :	98,01%	98,85%	98,20%	96,92%	98,43%	97,19%	97,02%	96,04%
NERASPOLOŽIVOST VEZE :	1,99%	1,15%	1,80%	3,08%	1,57%	2,81%	2,98%	3,96%
Srednje vreme između dve pojave prekida (učestalost prekida):	0:27:10 ili 0,5 h	8:33:31 ili 8,5 h	7:51:41 ili 8 h	15:54:57 ili 16 h	10:02:07 ili 10 h	1:09:54 ili 1 h	1:05:49 ili 1 h	8:07:28 ili 8 h



Slika 5. Prikaz ukupnog trajanja svih prekida i trajanja najdužeg prekida komunikacija za objekte TS 110/x kV/kV

Iz tabele 3 se vidi da je najmanji broj prekida prema objektima ED Vrbas a najveći prema objektima ED Senta i objektu TS Sombor 1. Najmanja raspoloživost veze je za objekte ED Ruma gde prekidi nisu česti ali traju dosta dugo. Prilikom analize, za objekte ED Sombor je ustanovljena izvesna neujednačenost pojave prekida. Kod TS Sombor 2, TS Odžaci i TS Apatin su rezultati približni i raspoloživost veze je iznad 98 %. Međutim za TS Crvenka, broj prekida je mali ali je prosečno trajanje prekida oko pola sata i najveći broj prekida (oko 70 %) je trajanja između minuta i jednog časa. Kod TS

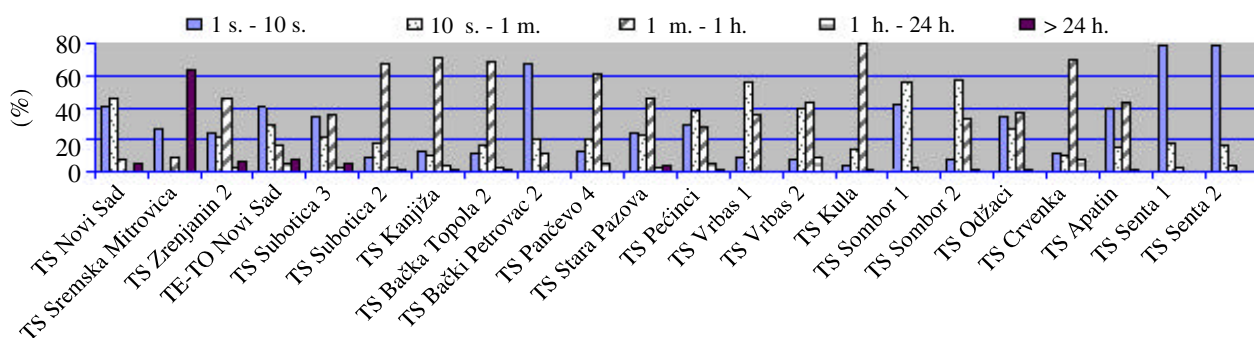
Sombor 1 je ustanovljen ubedljivo najveći broj prekida (preko 10 000 prekida za 189 dana). Prosečno trajanje prekida je najkraće u odnosu na ostale objekte. Raspoloživost veze je preko 98 %, međutim vrlo česti ispadi narušavaju kvalitet veze i nedopustivi su za prenos podataka u realnom vremenu. Pošto se od Novog Sada do Sombora koristi jedan prenosni put ovo ukazuje na loš kvalitet veze od ED Sombor do TS Crvenka i TS Sombor1.

Može se primetiti da su za ostale objekte iz iste distribucije podaci o prekidima dosta slični jer se

Tabela 4.

Prikaz dužine trajanja prekida komunikacije za sve objekte uključene u SCADA sistem

		Dužina trajanja prekida										Suma
		0 -10 sec.		10 sec - 1 min.		1 min - 1 sat		1 sat - 1 dan		> 1 dan		
		broj	%	broj	%	broj	%	broj	%	broj	%	
SEEO	TS Novi Sad 3	57	40,7	65	46,4	11	7,9	0	0,0	7	5,0	140
	TS Sremska Mitrovica 2	3	27,3	0	0,0	1	9,1	0	0,0	7	63,6	11
	TS Zrenjanin2	24	24,7	21	21,6	44	45,4	2	2,1	6	6,2	97
	TE-TO Novi Sad	15	40,5	11	29,7	6	16,2	2	5,4	3	8,1	37
	TS Subotica 3	26	34,7	16	21,3	27	36,0	2	2,7	4	5,3	75
PUC SU	TS Subotica 2	35	9,5	67	18,1	250	67,6	11	3,0	7	1,9	370
	TS Kanjiža	52	13,0	41	10,3	286	71,7	14	3,5	6	1,5	399
	TS B.Topola 2	97	11,0	145	16,4	609	68,9	26	2,9	7	0,8	884
PUC NS	TS B.Palanka 2	2 203	67,0	682	20,7	390	11,9	11	0,3	1	0,0	3 287
PUC PA	TS Pančevo 4	132	12,8	217	21,0	630	60,9	50	4,8	5	0,5	1 034
PUC RU	TS Stara Pazova	99	24,6	94	23,3	185	45,9	11	2,7	14	3,5	403
	TS Pećinci	112	29,1	145	37,7	106	27,5	18	4,7	4	1,0	385
PUC VR	TS Vrbas 1	30	8,7	193	55,8	121	35,0	1	0,3	1	0,3	346
	TS Vrbas 2	25	8,0	124	39,9	133	42,8	28	9,0	1	0,3	311
	TS Kula	16	4,1	54	14,0	309	79,8	6	1,6	2	0,5	387
PUC SO	TS Sombor 1	4 230	42,2	5 562	55,5	222	2,2	4	0,0	0	0,0	10 018
	TS Sombor 2	39	7,4	306	57,7	179	33,8	4	0,8	2	0,4	530
	TS Odžaci	199	34,5	156	27,0	211	36,6	11	1,9	0	0,0	577
	TS Crvenka	33	11,6	30	10,5	199	69,8	23	8,1	0	0,0	285
	TS Apatin	179	39,6	69	15,3	198	43,8	6	1,3	0	0,0	452
PUC SE	TS Senta 1	3 077	79,4	681	17,6	107	2,8	7	0,2	1	0,0	3 873
	TS Senta 2	3 260	79,3	697	16,9	148	3,6	7	0,2	1	0,0	4 113
	PROSEK	13 943	49,8	9 376	33,5	4372	15,6	244	0,9	79	0,3	28 014



Slika 6. Grafički prikaz procentualne dužine trajanja prekida grupisanih u 5 vremenskih intervala

koristi većim delom ista deonica (Novi Sad – mesto distribucije).

Srednje vreme između dve pojave prekida (učestanost prekida) varira od 30 minuta do 17 časova. Prosečna učestalost prekida za distributivne

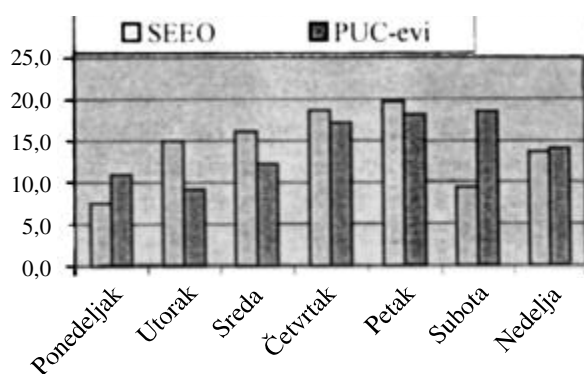
objekte je 8 časova što znači da se u proseku prekid javlja 3 puta dnevno.

Srednje vreme između dve pojave prekida generalno je kod SEEO mnogo veće u odnosu na objekte 110/x kV/kV a broj prekida je manji. Me-

Tabela 5.

Procentualni prikaz nastanka prekida komunikacije u zavisnosti od dana

Objekat	Ponedeljak	Utorak	Sreda	Četvrtak	Petak	Subota	Nedelja
Novi Sad 3	6,4	16,4	12,1	12,9	19,3	15,7	17,1
Sremska Mitrovica 2	18,2	18,2	18,2	27,3	0,0	9,1	9,1
Zrenjanin 2	6,2	12,4	18,6	8,2	30,9	6,2	17,5
TE-TO Novi Sad	2,7	10,8	35,1	24,3	13,5	0,0	13,5
Subotica 3	12,0	17,3	10,7	38,7	12,0	6,7	2,7
Subotica 2	35,4	14,1	11,9	10,3	13,2	6,2	8,9
Kanjiža	31,6	14,0	14,5	11,3	14,0	6,3	8,3
Bačka Topola 2	15,5	12,1	15,2	8,1	20,6	22,6	5,9
Bačka Palanka 2	4,0	7,9	6,1	19,4	41,6	19,8	1,1
Pančevo 4	21,4	16,6	15,9	9,3	12,7	16,9	7,3
Stara Pazova	9,4	8,2	10,2	6,7	39,5	19,9	6,2
Pećinci	10,4	10,6	10,1	6,2	40,0	17,9	4,7
Vrbas 1	16,5	13,9	13,9	33,5	10,1	8,4	3,8
Vrbas 2	18,0	15,1	15,8	27,3	10,9	8,7	4,2
Kula	15,0	12,7	12,9	38,0	10,9	7,2	3,4
Sombor 1	3,6	2,7	11,9	21,5	15,4	23,3	21,7
Sombor 2	20,2	24,5	34,3	7,5	4,0	2,1	7,4
Odžaci	19,4	32,8	31,9	7,6	4,3	1,9	2,1
Crvenka	26,3	17,9	16,1	16,5	11,6	5,3	6,3
Apatin	30,1	13,9	14,6	13,1	6,6	12,2	9,5
Senta 1	14,7	11,8	10,4	14,7	14,7	17,4	16,4
Senta 2	16,3	12,6	11,5	12,9	14,2	16,9	15,7
PROSEK	10,9	9,3	12,2	17,1	18,1	18,3	14,0



Slika 7. Grafički prikaz po danima nastanka prekida

đutim, usled većeg broja dužih prekida, prosečno trajanje prekida je duže i raspoloživost veze je manja (za SEEO prosečna raspoloživost je 90,72 % a za objekte 110/x kV/kV prosečna raspoloživost je 96,04 %).

Vreme trajanja najdužeg prekida je za sve objekte izuzetno veliko. Slika 5 prikazuje vremen-

ske trajanje najdužeg prekida i ukupno trajanje svih prekida za sve objekte 110/x kV/kV.

3.1. Dužina trajanja prekida

Prilikom analize pojave prekida komunikacije utvrđeno je da je vrlo veliki broj prekida trajao manje od 10 sekundi. Taj vremenski interval nije toliko kritičan za SCADA sistem. Zbog toga je izvršena analiza trajanja prekida po vremenskim intervalima. U tabeli 4 je dat prikaz dužine trajanja prekida grupisanih u 5 vremenskih intervala. Na slici 6 je dat prikaz dužine trajanja prekida po vremenskim intervalima i to za sve objekte (SEEO i TS 110/x kV/kV/kV).

Polovina ukupnog broja prekida je kraća od 10 sekundi a trećina ukupnog broja prekida je trajanja do 1 minut. Prekidi koji traju duže od jednog minuta čine 17 procenata od ukupnog broja prekida i to su kritični prekidi. Broj prekida koji traju duže od 1 dan je oko 0,3 % od ukupnog broja

prekida. Međutim ovi prekidi su najkritičniji za SCADA sistem.

3.2. Dan pojave prekida komunikacije

Za sve posmatrane objekte izvršena je i analiza prekida komunikacije po danu kada je prekid nastao. U tabeli 5 je dat sumarni pregled po danima.

Najveći broj puta, prekid koji dugo traje, je nastajao četvrtkom ili petkom ili za vreme praznika tako da se i na otklanjanje prekida čekao prvi radni dan.

Na slici 7 je dat prikaz sumarno za svih 5 sistemskih elektroenergetskih objekata i svih 17 objekata koji pripadaju PUC-evima.

4. NADOGRAĐNJA POSTOJEĆE ANALIZE SAOBRAĆAJA

Osim analize arhivskih podataka iz SCADA baze, za potrebe kontrolisanja komunikacije sa objektima koji su uključeni u SCADA sistem na području Vojvodine napravljene su sledeće aplikacije :

a) za dispečere :

- Na operatorskom radnom mestu u MRC Novi Sad je realizovan skript koji proverava komunikaciju sa svim SEEO i ispisuje sve prekide i uspostave komunikacije u toku tekućeg dana, na ekran. Skript se pokreće iz glavnog menija za levi taster miša. Pokretanjem skripta se vrši automatsko udaljeno logovanje na SCADA server i izvrši se lociranje na odgovarajući katalog. Iz datoteke sa tekućim podacima o događajima u sistemu se filtriraju samo podaci o komunikaciji sa SEEO koji formiraju novu datoteku. Ta datoteka se prenese na operatorsko radno mesto i njen sadržaj se prikaže na ekranu. Ceo postupak se izvršava trenutno.
- Na operatorskom radnom mestu u DC EV Novi Sad je realizovan skript koji proverava komunikaciju sa objektima TS 110/x kV/kV koji su uključeni u SCADA sistem i ispisuje sve prekide i uspostave komunikacije u toku tekućeg dana, na ekranu. Skript je takođe realizovan na LINUX operativnom sistemu kao *shell* skript.

b) za ostala inženjerska mesta :

- Za personalni računar pod Windows i DOS operativnim sistemom je realizovan program u Pascalu koji na osnovu unetog datuma proverava komunikaciju sa svim objektima ili samo sa sistemskim elektroenergetskim objektima i prikazuje na ekran sortirane ispise o prekidima i uspostavama komunikacija za izabrani dan.

Na osnovu ovih aplikacija je omogućeno da dispečer sa operatorskog radnog mesta ili odgovarajući korisnik sa personalnog računara ima uvid u stanje komunikacionih linija.

Nakon uključanja preostalih objekata u SCADA sistem na području Vojvodine, bilo bi korisno vršiti ove analize periodično, recimo svakog tromesečja. Na osnovu rezultata analize se može ukazati imaocima prenosnih puteva na kvalitet linija koje se iznajmljuju elektroprivredi.

Sredinom 1996. godine je puštena I faza SCADA sistema na području Vojvodine. Iako je u početku nadzor vršen samo nad 4 objekta, u realnom vremenu, interesantno bi bilo izvršiti analize za ceo protekli period od 5 godina. Podaci postoje na arhivskim trakama, tako da je potrebno korišćenjem procedure navedene u ovom radu, podatke pripremiti i statistički obraditi. Na taj način bi se dobio sveobuhvatni prikaz sa mogućim analizama po godinama, godišnjim dobima i nekim drugim karakterističnim faktorima.

5. ZAKLJUČAK

Praćenjem i analizom prekida komunikacije ka objektima uključenim u SCADA sistem na području Vojvodine, može se zaključiti da raspoloživost telekomunikacionog sistema ne zadovoljava osnovne zahteve za prenos podataka u realnom vremenu. Prenos podataka u sistemu daljinskog upravljanja je jedan od najznačajnijih telekomunikacionih servisa u okviru Elektroprivrede jer se odnosi na prenos podataka procesnog upravljanja u realnom vremenu. Zahtevana raspoloživost za sistem daljinskog upravljanja treba da bude veća od 99,99 % vremena. To znači da period neraspoloživosti za svaku relaciju ne sme biti veći od 52 minuta za godinu dana. Na osnovu prikazanih rezultata vidi se da je realna neraspoloživost sistema mnogo veća. Treba naglasiti da se ovde radi se o složenom sistemu međutim pokazalo se da je uzrok neraspoloživosti sistema najvećim delom zbog iznajmljenih PTT linija. Usled visokih zahteva pouzdanosti za sistem realnog vremena, Elektroprivreda Srbije se ne može osloniti na sisteme drugih imaoca veza. Zbog toga je opredeljenje za sopstvene prenosne puteve u okviru elektroprivrede sasvim opravdano.

6. LITERATURA

- [1] Institut M. Pupin, SISTEM ZA NADZOR I UPRAVLJANJE SCADA VIEW600,
- [2] S. Jovanović, UNIX – UVOD U SISTEM, MREŽNO OKRUŽENJE I ADMINISTRACIJU,
- [3] Borland Pascal.

Vladimir Katić

Istraživanje viših harmonika u distributivnoj mreži – kratak pregled i iskustva

Stručni rad
UDK: 621.3.02; 621.311.1

Rezime:

U radu je dat kratak pregled istraživanja viših harmonika u distributivnoj mreži na bazi literature i višegodišnjih iskustva autora. Razmatran je teoretski i empirijski pristup. Naročita pažnja posvećena je načinima prezentacije rezultata, kao bitnog faktora za razumevanje pojave i odlučivanje o narednim postupcima. U tome veliku važnost imaju harmonijski limiti. Na bazi analize snimljenih rezultata i njihovog poređenja sa poznatim standardima, dat je predlog graničnih vrednosti viših harmonika za distributivnu mrežu EPS-a.

Ključne reči: viši harmonici, merenje, standardi.

Abstract:

RESEARCH OF HIGHER HARMONICS IN THE DISTRIBUTION NETWORKS - SHORT REVIEW AND EXPERIENCE

A short review of research on higher harmonics in the distribution network is given, based on literature and long-standing experience of the author. A theoretical and empirical approach is considered. Special attention is given to the mode of presentation of results, as an essential factor for understanding the phenomenon and decisionmaking on the following procedures. Harmonic limits have great importance there. On the basis of analysis of recorded results and their comparison with known standards, proposed bordering values of higher harmonics for EPS's distribution network are presented.

Key words: higher harmonics, measuring, standards

1. UVOD

Istraživanje viših harmonika već 40 godina privlači pažnju istraživača i stručnjaka širom sveta. Tome je doprinelo pre svega naglo i široko uvođenje pretvarača energetske elektronike u industriju, poslovne prostore, domaćinstva i dr., početkom sedamdesetih godina prošlog veka. Oni su svojim prekidačkim principom rada uneli nelinearno opte-

rećenje u distributivnu mrežu. Istovremeno se pojavio veliki broj mikroprocesorski upravljanih računarskih mašina i uređaja, koji su ispoljavali malu imunost na više harmonike i druge poremećaje kvaliteta električne energije – tzv. »osetljivi potrošači«. Zbog složenosti mreže i teškoće razvoja modela za sve komponente spektra, istraživanja su se orijentisala na izvore i efekte harmonika, dok je prisustvo i prostiranje harmonika u mreži utvrđiva-

Prof. dr Vladimir Katić – Fakultet tehničkih nauka, Institut za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, 21000 Novi Sad, Fruškogorska 11.

no merenjem. Od energetskih pretvarača, ispravljač je istaknut kao najznačajniji izvor, dok su na kablovima, opremi i priključenim uređajima utvrđeni brojni negativni efekti [1].

To je dovelo do pojave odgovarajuće tehničke regulative. Već 1967. godine u Velikoj Britaniji i bivšem SSSR-u se pojavljuju prve preporuke i standardi o limitiranju njihovog nivoa u mreži. 1981. godine izlazi jedna od najkompletnijih preporuka – standard IEEE-519, kada se pojavljuju i predlozi CIGRE-a [2]. IEEE standard-519 je značajno dopunjen 1992. godine [3], dok su CIGRE limiti delimično prihvaćeni kao IEC standard serija 1000 (1990), koji je identičan sa evropskim standardom serija EN 61000 [4].

U ovom radu biće predstavljeni kratak pregled poslednjih istraživanja, kao i neka najzanimljivija iskustva u sprovođenju istraživanja.

2. PREGLED POSLEDNJIH ISTRAŽIVANJA

Od početka devedesetih godina prošlog veka sprovode se velika istraživanja viših harmonika, propada napona i drugih parametara kvaliteta u SAD, Kanadi, Francuskoj, Velikoj Britaniji, Norveškoj, Švajcarskoj i dr. U SAD, opsežna merenja harmonika napona i struje su sprovedena u severoistočnim delovima i trajala su oko dve godine [5,6], kao i na jugozapadu, ali u nešto kraćem trajanju [7]. Simultano istraživanje više parametara kvaliteta električne energije je uradio Institut EPRI u periodu 1992-1994. na lokacijama širom SAD, uglavnom u istočnom i srednjem delu [8]. Još jedno obimno istraživanje sprovedeno je u SAD i Kanadi od 1990. do 1994. godine [9]. Ova istraživanja su ukazala na izražene harmonike struje, naročito kod industrijskih potrošača, dok su harmonici napona uglavnom bili unutar dozvoljenih granica.

Poređenja sa rezultatima ranijih merenja (iz 1978. i 1981) pokazuju da je tokom desetak godina došlo do značajnog povećanja, naročito udela 3-ćeg harmonika [5,6]. Do sličnog zaključka su došli i istraživači u Švajcarskoj, posmatrajući period 1979-1991. godine, gde je povećanje prosečne ukupne harmonijske distorzije iznosilo 30 %, a 3-ćeg harmonika skoro 100 % [10]. Najnovije studije imaju za cilj ne samo da utvrde stanje, nego da omoguće i predikciju, ali i da odgovore na pitanje koja je cena degradiranja kvaliteta (harmonijski gubici), odnosno šta i kako dodatno naplatiti od potrošača za rad nelinearnih pogona [11]. Rezultati ankete pokazuju da 46 % distribucija ima nameru da dodatno naplaćuje generisanje harmonika i flikera, 40 % da naplaćuje kVA, a ostale vreme korišćenja.

Zanimanje za problematiku viših harmonika na ovim prostorima je počelo još krajem sedamdesetih godina prošlog veka, kad su izvršena merenja

na nekoliko lokacija u Srbiji (Beočin, Smederevo, Kostolac i Surdulica). Međutim, ta merenja su najčešće obavljena po zahtevima pojedinih preduzeća, tako da je tek mali deo tih rezultata predstavljen stručnoj javnosti [12,13,14]. Opravdano je pretpostaviti da o nekim merenjima nema zapisa u stručnoj literaturi ili autor nije na njih naišao.

Organizovana i sveobuhvatna istraživanja ove problematike počela su 1990. godine, kada je urađena studija o Energetskim elektronskim pretvaračima kao izvorima viših harmonika u distributivnoj mreži [12]. U njoj je dat teorijski opis problema viših harmonika, predstavljeni modeli ispravljača, kao najčešćih generatora zagađenja u mreži, opisani negativni efekti i dat pregled standarda i preporuka za limitiranje nivoa viših harmonika. Matematički modeli su i dalje razvijani i prilagođavani praktičnoj primeni [15].

U drugoj fazi, koja je završena 1992. godine, izvršena je realizacija kompletnog mernog sistema i softverskog paketa za kontinualno merenje i analizu viših harmonika (** MAH **) [16].

Prva merenja u sklopu ovih istraživanja započela su u mreži JP Elektrovojvodine 1992. godine nakon realizacije mernog sistema, kad su prvo izvršena test, a zatim (tokom 1993. godine) i preliminarna merenja. Zvanična merenja su počela u maju 1995. godine i sa manjim prekidima za intervencije, baždarenje i sitne popravke, trajala do februara 1997. godine [17,18]. Nakon delimične analize rezultata, neka merenja su ponovljena u novembru 1997. godine. U periodu 1998–2000. godine, merenja su proširena i na ostale distribucije EPS-a, uglavnom kod velikih industrijskih potrošača.

Rezultati analize, poređenje standarda, kao i poznavanje prakse u drugim elektroprivredama u svetu daju podloge za predlaganje sopstvenih pravila i postupaka u cilju daljeg poboljšanja kvaliteta električne energije.

3. PRISTUPI ISTRAŽIVANJU

Pojava, prostiranje i efekti viših harmonika predstavljaju veliki izazov za istraživače. Tome doprinosi veliki broj potencijalnih izvora viših harmonika, nejednako raspoređenih u mreži, zatim nepoznavanje frekventne karakteristike vodova, kao i slučajan karakter pojavljivanja negativnih efekata. Zbog toga se pored uobičajenog pristupa istraživanju, koji podrazumeva teorijsku obradu, matematičko modelovanje i kompjutersku simulaciju [1], primenjuju i dugačije metode, kao na primer anketiranje, statistička obrada i sl. [19]. Bez obzira na primenjen metod, neophodno je rezultate verifikovati merenjem na terenu. Analiza i tumačenje rezultata, korišćenjem definisanih graničnih vrednosti, predstavlja zadnju fazu istraživanja.

3.1. Teorijski pristup

Teorijski pristup predstavlja fundament svakog istraživanja i kao takav obezbeđuje neophodna saznanja o problemu. U savremenim uslovima, to je dugotrajan proces, koji problemu pristupa sa svih strana i rezultira kompletnom slikom generisanja, ispoljavanja i mogućih načina rešavanja problema.

Istraživanje viših harmonika bazira na poznatom matematičkom aparatu – Furijeovoj transformaciji. Problemi vezani za pojavu lažnih frekvencija (aliasing), curenje spektra, efekat ograde i sl., rešavaju se primenom prozorskih funkcija (Hanningove, Hamingove, Gausove, pravougaone i dr.) [1]. Za analizu harmonika pri dinamičkim, tranzijentnim ili drugim kratkotrajnim pojavama u mreži, odnosno kod potrošača, Furijeova transformacija nije dovoljno tačna, pa se primenjuju novije metode Wavelet transformacije, filter banki i sl. [20].

U teoretskom razmatranju posebnu važnost ima modelovanje harmonijskih izvora. Kako je ispravljaj najčešći uzročnik pojave viših harmonika, razvijeni su simulacioni modeli u više nivoa:

1. idealizovan, pogodan za osnovnu analizu i brze proračune [12],
2. kvazirealni – pogodan za inženjersko izračunavanje [12] i
3. realni – kompleksan model, koji obuhvata kompletan rad pogona sa ispravljajem uključujući i prelazne režime [15].

Primena sveobuhvatnijih modela i na njima baziranih programskih paketa za simulaciju i analizu u kojima se delovi ili cela mreža modeluju za harmonijske učestanosti, odnosno prati prostiranje harmonika, su od posebne važnosti [1]. Poslednjih godina pojavilo se više takvih programskih paketa, od kojih su najpoznatiji CHAMPS, HARMFLO, VHARM, EMTP i dr.

Međutim, treba imati na umu da rezultati simulacija nisu uvek dovoljno verodostojni. To je posledica raznih aproksimacija uvedenih u modele, a takođe i nepoznavanja tačnih vrednosti nekih parametara mreže, postojećeg nivoa izobličenja napona i sl. Poređenja pokazuju da su ovako dobijeni rezultati dobri za prikazivanje trendova pri promenama karakteristika sistema, ali su odstupanja od stvarnih (izmerenih) i do 40 % [21].

3.2. Empirijski pristup

U praksi često nema dovoljno vremena ili akumulisanog znanja da se problemu prilazi sa teoretskog pristupa. Traži se brza i uspešna reakcija na žalbe potrošača radi lokalizovanja i otklanjanja problema. Tada dolazi do izražaja prethodno iskustvo i poznavanje problematike, odnosno primenjuju se metode ankete i statističke obrade.

Ove metode se primenjuju pre svega za slučajeve kad potrošači ne mogu sa sigurnošću da prepoznaju uzrok negativnih pojava, koje su iskusili, ali su sigurni da su u pitanju problemi sa napajanjem električnom energijom (dijagnoza problema). Takođe, pogodne su za lokalizaciju istraživanja, tj. koncentraciju na ona mesta gde su uočeni ili se mogu očekivati neželjeni efekti. Ovaj pristup obuhvata nekoliko postupaka:

1. Dijagnoza problema: Kroz specijalno sačinjen upitnik, koji popunjava potrošač prilikom žalbe, pokušava se otkriti uzrok problema. Takođe, razgovara se sa potrošačem, daju mu se razne informativne publikacije, analizira problematična situacija i sl.

2. Rano otkrivanje problema: Vršiti se anketiranje potrošača o pojavi negativnih efekata viših harmonika. Sprovodi je služba za kvalitet i to kod potrošača, kod kojih postoji mogućnost pojave, a oni nemaju iskustva u detektovanju.

U oba slučaja, ako se posumnja na delovanje ili postojanje viših harmonika, nastavak istraživanja se sprovodi postupcima merenja. Moguće je prethodno izvršiti i modelovanje ugroženog dela sistema, kao računarsku simulaciju, ali je merenje neophodno.

4. MERENJE I PRIKAZ REZULTATA

Rezultati merenja predstavljaju najvrednije podloge za preduzimanje daljih koraka u pravcu poboljšanja kvaliteta električne energije. Iz tog razloga se mernoj opremi i postupcima merenja posvećuje velika pažnja. Autor je u ranijem periodu dosta pisao o ovoj problematici, pa se ovde neće ponavljati [12,16,17].

Samo merenje je složen postupak, jer se ne radi samo o jednom ili nekoliko merenja, već o dugotrajnom praćenju stanja i merenju u određenim intervalima. Uobičajeno je da merenje traje 7 dana, u intervalima od 10 do 15 minuta [22]. U nekim radovima se predlaže merenje unutar veoma kratkih intervala (npr. svake sekunde), s tim da se onda vrši usrednjavanje po paketima – svaki minut, pa svakih 10 minuta i sl.

U svakom slučaju, dobija se ogroman broj podataka, koji se moraju dodatno obraditi, da bi kod prikazivanja bili razumljivi i upotrebljivi. To je poseban problem, koji je potrebno prodiskutovati.

Moguće je nekoliko načina prikazivanja rezultata:

1. vremenski prikaz – kontinualni i diskretni,
2. prikaz u frekventnom domenu,
3. statistički prikaz.

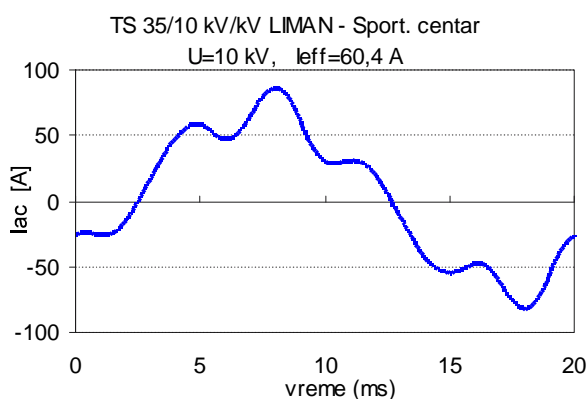
4.1. Kontinualni vremenski prikaz

Kontinualni vremenski prikaz daje više harmonike u dva oblika:

1. u obliku izgleda vremenske funkcije napona ili struje, i

2. u obliku vremenske promene ukupne ili pojedinačne harmonijske distorzije (THD ili HD).

Na slici 1 dat je primer izgleda harmonijskog izobličenja talasnog oblika struje, a na slici 2 primer prikaza vremenske promene THDU.



Slika 1. Struja u 10 kV izvodu Sportskog centra – SPENS u Novom Sadu

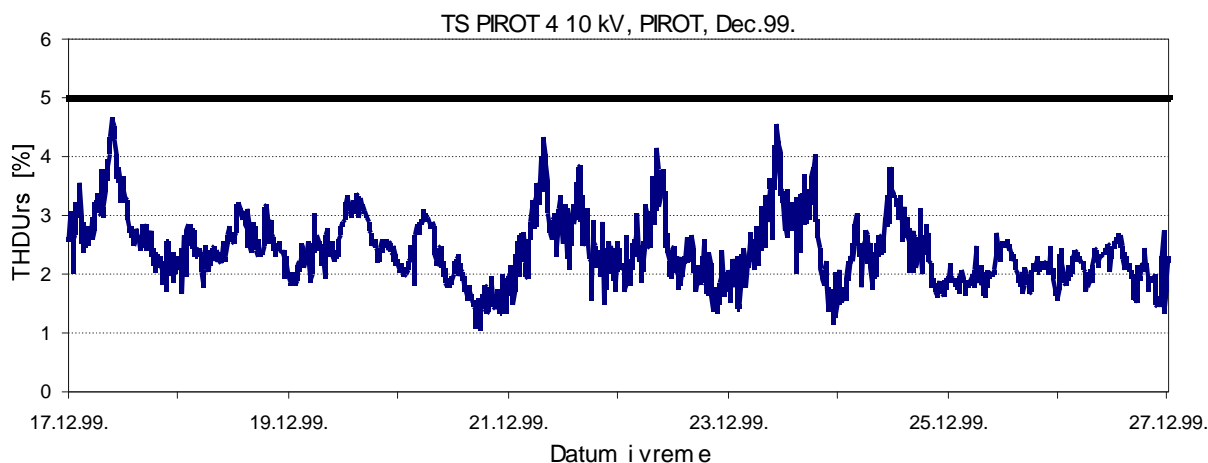
vljen jedan takav dnevni dijagram, izvađen iz rezultata merenja datih na slici 2. Ovakav prikaz ukazuje na skokovite promene sadržaja viših harmonika, što se može povezati sa dinamikom rada nelinearnih potrošača – harmonijskih izvora.

Za analizu kompletnih rezultata merenja propada napona, pogodno je da diskretni vremenski prikaz daje vremensko trajanje pojedinih nivoa THD ili harmonika. Na slici 4 dat je primer takvog prikaza za THDU u slučaju merenja prikazanog na slici 3. Ovakvo predstavljanje je pogodno za procenu o mogućnosti pojave nekog negativnog efekta.

4.3. Prikaz u frekventnom domenu

Ovaj tip prikaza je rezultat primene Furijeove transformacije na talasni oblik signala. On ukazuje na to koji su harmonici prisutni ili dominantni i, na taj način indirektno na uzroke i opasnosti njihovog prisustva. Na primer, spektar struje sa slike 1 dat je na slici 5. Može se uočiti visoka vrednost 5-tog i 7-og harmonika, što je karakteristično za jednosmerne pogone.

Ovakav prikaz je pogodan i za analizu prostiranja harmonika u mreži. U radu [23] je opisana jedna mreža, kojoj se menja konfiguracija uključanjem ili isključenjem određenih prekidača. Time se menja i spektar, što je pokazano na slici 6.



Slika 2. Vremenska promena harmonika napona (THDU) na sabirnicama 10 kV

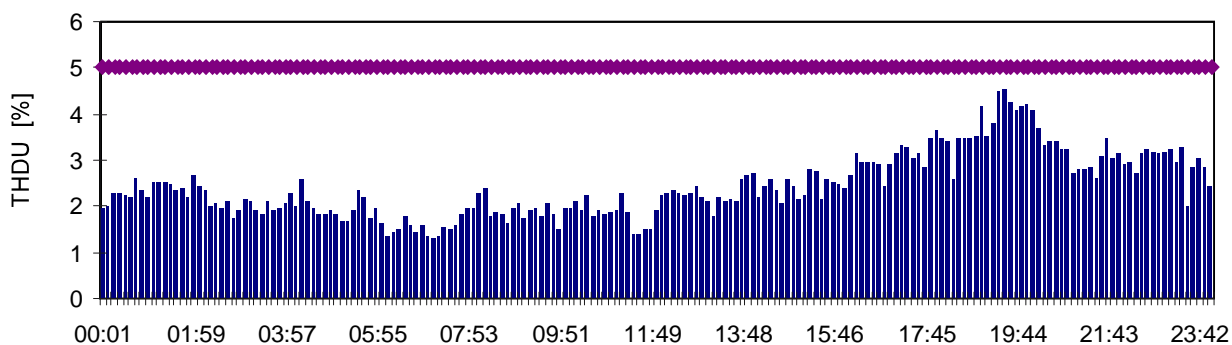
4.2. Diskretni vremenski prikaz

Kontinualni vremenski prikaz ukupne harmonijske distorzije ili pojedinih harmonika je u stvari diskretni, jer se merenja vrše u intervalima 10-15 minuta. Na nedeljnom dijagramu, zbog velikog broja podataka (1 008 merenja), takva diskretnost se gubi. Međutim, ako se posmatra dnevni dijagram, ona postaje očigledna. Na slici 3 je predsta-

4.4. Statistički prikaz

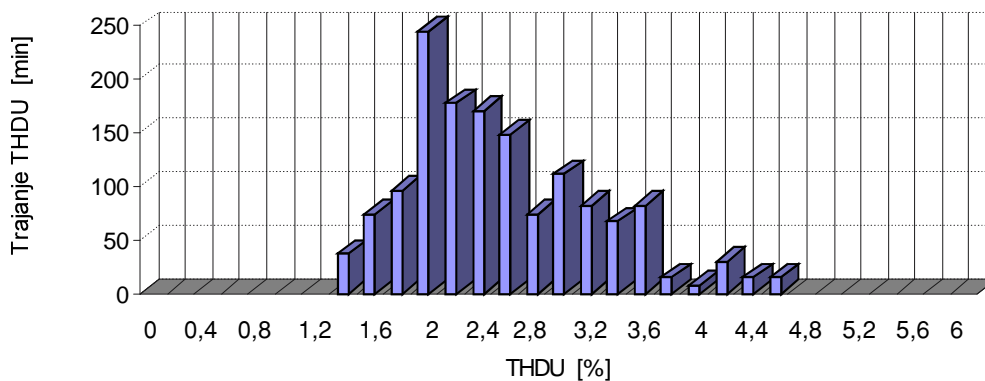
S obzirom na veliki broj podataka, koji se prikupi tokom merenja postoji potreba za njihovom statističkom analizom. Kod istraživanja harmonika primarno je da li je premašen određen nivo ili ne, a zatim koliki je prosečan nivo i sl. Zbog toga se statistička obrada ne bavi krivama raspodele, već kumulativnim verovatnoćama. Pored maksimalnog,

TS PIROT 4, 10 kV, 23.12.99. THDU [%]

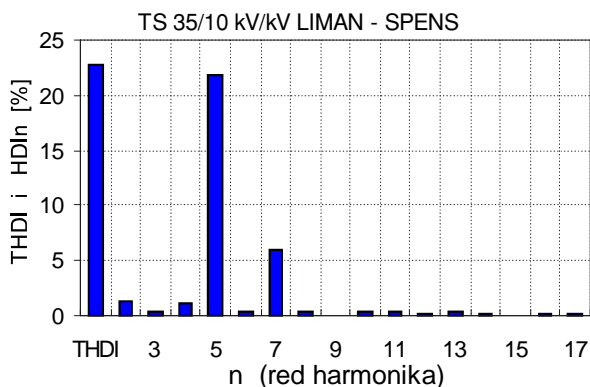


Slika 3. Diskretni vremenski prikaz promene THDU tokom jednog dana

TS PIROT 4, 10 kV, 23.12.99.

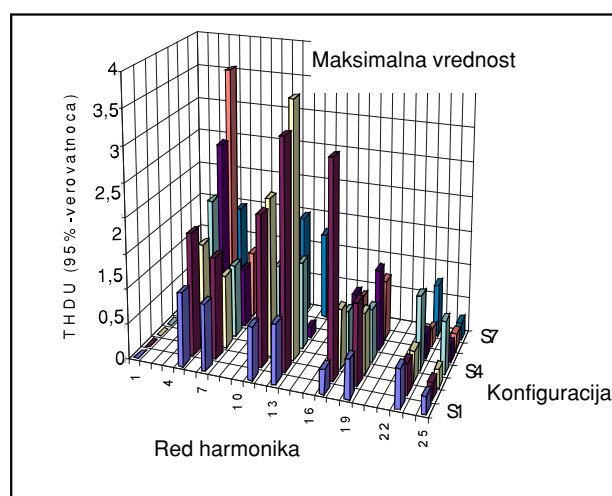


Slika 4. Diskretni vremenski prikaz – trajanje THDU (u minutima) tokom jednog dana



Slika 5. Spektar struje mreže sa slike 1

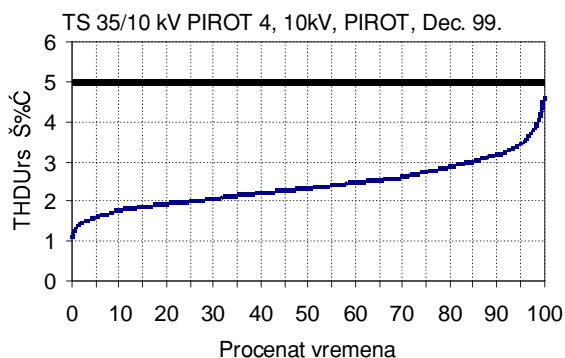
bitan je i nivo harmonika, koji nije premašen u 95% vremena. Time se uvažava dinamika harmonika, ali se zanemaruju kratkotrajni skokovi. Kritična si-



Slika 6. Poređenje harmonijskog sastava za različite konfiguracije mreže [23]

tuacija nastaje ako je taj nivo iznad dozvoljenog (propisanog). Na slici 7 je prikazan statistički dijagram za THDU za rezultate merenja sa slike 2. Vidi se da je 95 % nivo oko 3,5 %, dakle u dozvoljenim okvirima, ispod limita od 5 %.

Kombinovani, statističko-frekventni prikaz takođe daje dobru osnovu za donošenje zaključaka. Na slici 8 predstavljen je primer prikaza rezultata merenja nakon harmonijske i statističke analize – statistički spektar napona za usrednjene vrednosti viših harmonika napona za 6 kV sabirnice industrijskog potrošača. Ucrtane su srednja vrednost, 95% verovatnoća, maksimalna vrednost, kao i maksimalno dozvoljeni nivoi po IEEE-519 [3] i standardu IEC 1000 [24]. Može se uočiti da maksimalne vrednosti idu i iznad IEEE limita, ali su unutar IEC granica. To ukazuje na mogućnost pojave negativnih efekata.



Slika 7. Kumulativna verovatnoća – THDU sa slike 2

5. GRANIČNI NIVOI

Na međunarodnom planu danas se za dozvoljene nivoe viših harmonika napona u distributivnoj mreži najčešće primenjuju standardi IEEE-519,

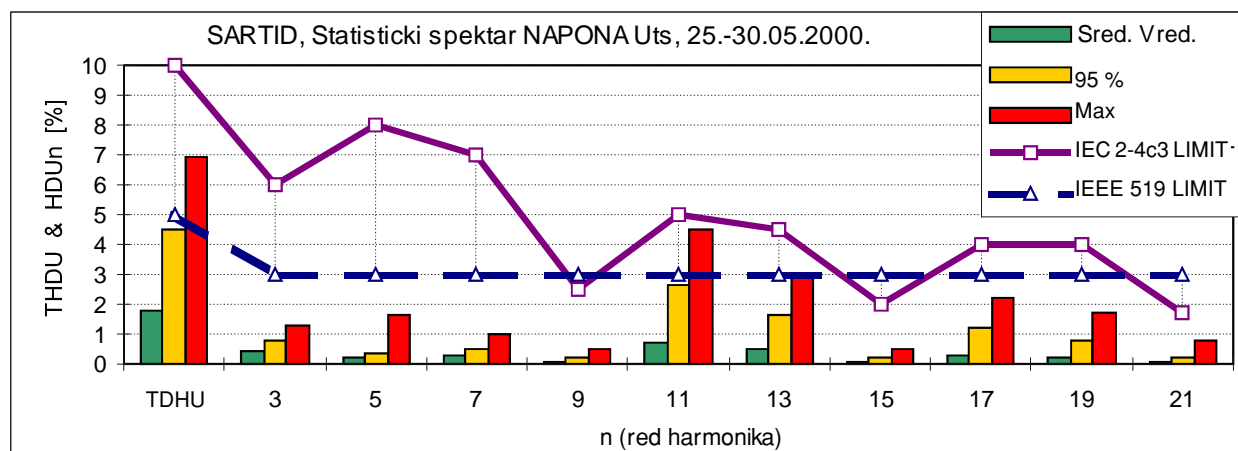
IEC-1000 i CIGRE preporuke [2,3,4]. Standardom IEEE-519 su pored harmonika napona, limitirani i harmonici struje, a granični nivoi su definisani za različite odnose struje kratkog spoja sabirnica prema maksimalnoj struji potrošača.

IEC i CIGRE limiti dosta se razlikuju od onih datih IEEE-519 standardom. U prvom slučaju je data veća diversifikacija kod limita za harmonike napona (o čemu treba da vodi brigu distribucija), dok su u drugom detaljnije limitirani harmonici struje, koje generišu potrošači (odgovornost potrošača). Značajno je napomenuti da se IEC limiti definišu za javnu mrežu [4] i industrijske mreže [24]. Kod industrije razlikuju se 3 klase – osetljivi laboratorijski uređaji, priključak industrije na javnu mrežu i industrijske mreže unutar pogona bogatih nelinearnim potrošačima.

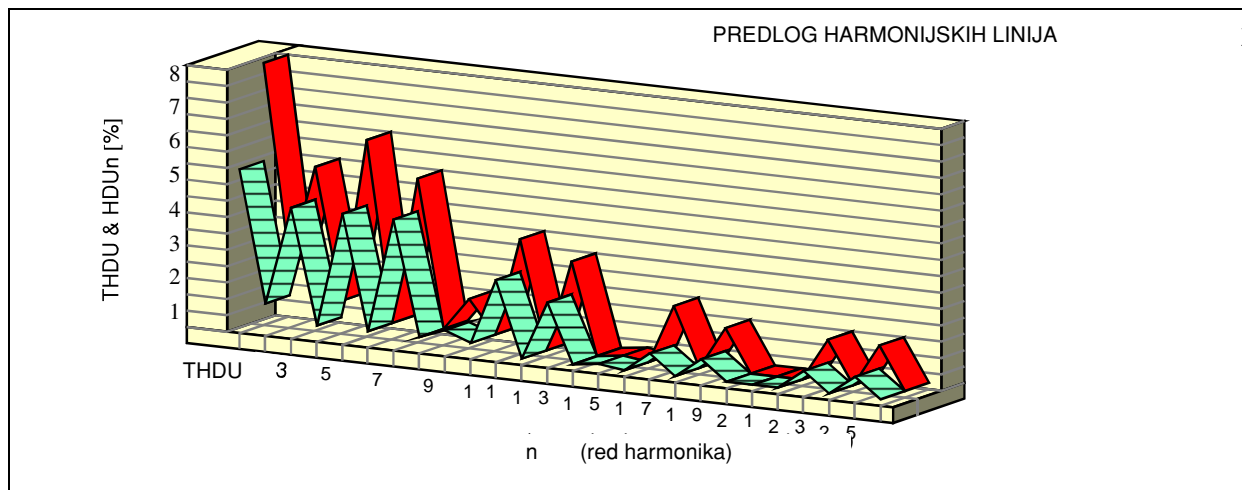
Rezultati analize registrovanih harmonika napona u mreži JP „Elektrovojvodina”, odnosno EPS-a, pokazuju da oni nisu premašili IEEE-519 limite u javnoj mreži [17,18]. Međutim, ovi limiti su premašeni u nekim industrijskim mrežama (slika 8). To ukazuje da je potrebno selektivno uspostaviti granične vrednosti za harmonike napona u zavisnosti od vrste mreže i potrošača.

Što se tiče strujnih harmonika, oni su često bili iznad dozvoljenih vrednosti po IEEE-519 standardu. To je naročito bilo izraženo kod velikih industrijskih potrošača, ali i u drugim slučajevima. Međutim, istovremeno snimljeni harmonici napona bili su u redu. To ukazuje da je impedansa naše mreže niža od odgovarajuće u USA, pa iskakanje strujnih harmonika daje samo nagoveštaj da se mogu očekivati problemi.

S druge strane IEC 1000 standardi u potpunosti odgovaraju situaciji u mreži EPS-a, tj. nisu zabeleženi slučajevi njihovog premašenja. To znači da se kao takvi, mogu usvojiti za distributivnu mre-



Slika 8. Rezultati merenja viših harmonika na 6 kV sabirnicama u industriji »Sartid«



Slika 9. Predlog graničnih vrednosti za više harmonike u javnoj distributivnoj mreži.

žu u Srbiji i to bez štetnih posledica ili potrebe za dodatnim ulaganjem.

Ranije je već pomenuto da kod IEC standarda postoji nekoliko granica u zavisnosti od vrste mreže i potrošača. U jednom delu granične vrednosti IEC-a odgovaraju CIGRE gornjim limitima, što znači da su postavljene na nivoe, koji se retko pojavljuju (premašuju). Međutim, ako se to desi, postoji velika verovatnoća pojavljivanja negativnih efekata. CIGRE donji limiti su oni koji se javljaju u blizini velikih izvora harmonika. Oni su upozoravajući, tj. njihovim premašenjem se ulazi u zonu mogućnosti pojavljivanja negativnih efekata.

Iz tog razloga predlaže se da budući tehnički propis EPS-a specifikira limite za harmonike napona u dva nivoa: donji (upozoravajući), koji odgovara CIGRE donjim limitima, i gornji (kritični), koji odgovara IEC vrednostima i koji ima IEC selektivnost. Na slici 9 predstavljene su ove granične vrednosti za javnu distributivnu mrežu (donji nivo – šaširano, gornji – puno). Posebne vrednosti bi bile za specijalne (osetljive) potrošače i za industrijske mreže.

6. ZAKLJUČAK

Nakon višegodišnjeg sveobuhvatnog razmatranja viših harmonika u distributivnoj mreži, predstavljeni su pristupi istraživanju, kao i postupci merenja i prezentacije rezultata. Predloženo je da se kao granične vrednosti za više harmonike u mreži EPS-a usvoje limiti IEC-a i donji limiti CIGRE-a. Cilj je dobijanje tehničke regulative za kompletno rešavanje problema pojave viših harmonika.

7. LITERATURA

- [1] J.Arrillaga, D.Bradley, P.Bodger: POWER SYSTEM HARMONICS, *John Wiley & Sons*, Chichester, 1985.
- [2] CIGRE SC36-WG5: HARMONICS, CHARACTERISTIC PARAMETERS, METHODS OF STUDY, ESTIMATES OF EXISTING VALUES IN THE NETWORK, *Electra*, No.77, July 1981, pp.35-54.
- [3] IEEE Standard 519: IEEE RECOMMENDED PRACTICES AND REQUIREMENTS FOR HARMONIC CONTROL IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS, IEEE, New York, 1992.
- [4] IEC 1000-2-2: ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) – PART 2: ENVIRONMENT – SECTION 2: COMPATIBILITY LEVELS FOR LOW-FREQUENCY CONDUCTED DISTURBANCES AND SIGNALLING IN PUBLIC LOW-VOLTAGE POWER SUPPLY SYSTEMS, International standard, IEC, Geneve, 1990.
- [5] A.Emanuel, J.Orr, D.Cyganski, E.Gulachenski, A SURVEY OF HARMONIC VOLTAGES AND CURRENTS AT DISTRIBUTION SUBSTATIONS, *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol.6, No.4, Oct.1991, pp.1883-1890.
- [6] A.Emanuel, J.Orr, D.Cyganski, E.Gulachenski, A SURVEY OF HARMONIC VOLTAGES AND CURRENTS AT CUSTOMER'S BUS, *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol.8, No.1, Jan.1993, pp.411-421.
- [7] S.Govindarajan, M.Cox, F.Berry, SURVEY OF HARMONIC LEVELS ON THE SW ELECTRIC POWER COMPANY SYSTEM, *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol.6, No.4, Oct. 1991, pp. 1869-1875.
- [8] E.Gunther, H.Mehta, A SURVEY OF DISTRIBUTION SYSTEM POWER QUALITY – PRELIMINARY RESULTS, *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol.10, No.1, Jan.1995, pp.322-329.
- [9] D.Dorr, POINT OF UTILIZATION POWER QUALITY STUDY RESULTS, *IEEE Tran. on Industry Applic.*, Vol.31, No.4, Jul/Aug.1995, pp.658-666.
- [10] R.Redl, P.Tenti, J.D.van Wyk, POWER ELECTRONICS' POLLUTING EFFECTS, *IEEE Spectrum*, Vol.34, No.5, May 1997, pp.32-39.

- [11] Carpinelli at all., PROBABILISTIC EVALUATION OF THE ECONOMICAL DAMAGE DUE TO HARMONIC LOSSES IN INDUSTRIAL ENERGY SYSTEM, *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol.11, No.2, Apr.1996, pp.1021-1030.
- [12] Katić: ENERGETSKI ELEKTRONSKI PRETVARAČI KAO IZVORI VIŠIH HARMONIKA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI – I DEO, *Studija za SOUR Elektrovojdina*, Novi Sad, mart 1990.
- [13] P.Vukelja, M.Vučinić, N.Jokanović, D.Nikolić: IZOBLIČENJA NAPONA PRI RADU INDUKCIONIH I ELEKTROLUČNIH PEČI, XVII Savetovanje JUKO-CIGRE, Struga, 1985, pp.249-257.
- [14] M.Zorić: UTICAJ KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE NA NAPONSKE PRILIKE POTROŠAČA NA KOPU „KOSTOLAC“ I MERE ZA POTISKIVANJE VIŠIH HARMONIKA, JUKO CIGRE STK 31 – Struč. konsultacija: Kvalitet električne energije, Vrnjačka Banja, okt. 1992, pp.143-148.
- [15] V.Katić, D.Graovac: A METHOD OF REAL ANALYSIS OF AC/DC CONVERTER LINE SIDE HARMONICS, *Facta Universitatis – Series: Electronics and Energetics*, Vol.10, No.1, 1997, pp.107-123.
- [16] V.Katić: COMPUTER BASED HARMONIC MEASUREMENT SYSTEMS: DISCUSSION AND A REALIZATION, *IEEE Int. Conf. on Harmonics in Power Systems – ICHPS V*, Atlanta (USA), sep.1992, pp.16-22.
- [17] V.Katić, N.Katić: MERENJE VIŠIH HARMONIKA U DISTRIBUTIVNOJ NISKONAPONSKOJ MREŽI, XXII Savetovanje JUKO CIGRE, Vrnjačka Banja, maj 1995, R31-23.
- [18] V.Katić: ISTRAŽIVANJE VIŠIH HARMONIKA U MREŽI ELEKTROVOJVODINE, I Savetovanje JUKO CIRED, Zlatibor, okt.1998, R-2.03.
- [19] J.Milanović, M.Negnevitsky: QUALITY OF ELECTRICITY SUPPLY IN TASMANIA: PROBLEMS REPORTED BY THE UTILITY AND INDUSTRY The Australasian University Power Engineering Conference, Sydney, 1997, pp.361-364.
- [20] J.Knežević, V.Katić, D.Graovac: METOD HARMONIJSKE ANALIZE TALASNIH OBLIKA STRUJE I NAPONA PRIMENOM WAVELET TRANSFORMACIJE, II Savetovanje JUKO-CIRED, Herceg-Novi, sep.2000, R-2.3.
- [21] S.Williams, G.Brownfield, J.Duffus, HARMONIC PROPAGATION ON AN ELECTRIC DISTRIBUTION SYSTEM: FIELD MEASUREMENTS COMPARED WITH COMPUTER SIMULATION, *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol.8, No.2, Apr.1993, pp.547-552.
- [22] IEEE Std. 1159-1995: IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY, *IEEE*, NEW YORK, 1995.
- [23] J.SCHLABBACH, V.KATIĆ: ESTIMATION OF HARMONIC LEVELS IN MV SYSTEMS USING SIMULATION AND MEASUREMENT, X Simpozijum Energetska elektronika – Ee'99, Novi Sad, okt.1999, pp.87-94.
- [24] IEC 1000-2-4 (1994-02): ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) – PART 2: ENVIRONMENT – SECTION 4: COMPATIBILITY LEVELS IN INDUSTRIAL PLANTS FOR LOW-FREQUENCY CONDUCTED DISTURBANCES, *IEC*, Geneva, 1994.

Rad je primljen u uredništvo 11. 10. 2001. godine

Povećanje proizvodnje i snage hidroelektrana i njihov uticaj na energetske efekte u sistemu

Rezime:

Po prirodi objekata, uobičajeno je da se prilikom revitalizacije hidroelektrana (posebno kada se radi o zameni orema ili dela opreme), kao realnost razmatra i mogućnost povećanja maksimalne snage i proizvodnje električne energije. Izbor nivoa ovog povećanja definiše se ekonomskom analizom upoređenjem odnosa ušteda i troškova u sistemu (Benefit/Cost) za varijantu promene (povećanja) osnovnih energetske parametara objekta.

Ovaj članak ima za cilj razmatranje veličine i strukture promena koje nastaju povećanjem snage i proizvodnje električne energije i njihov uticaj na energetske efekte u sistemu, odnosno na energetske ekonomsku opravdanost ulaganja.

U članku su, sem metodoloških i teoretskih razmatranja, prikazani i rezultati primenjenog postupka na HE Zvornik, kao karakterističan objekat u smislu mogućih aktivnosti na revitalizaciji.

Ključne reči: revitalizacija, povećanje, snaga, energija, ekonomika, opravdanost

Abstract:

INCREASED HYDRO POWER PLANT PRODUCTION AND CAPACITY AND THEIR IMPACT ON ENERGY EFFECTS IN THE SYSTEM

According to the nature of plants, it is usual to consider as a reality the possibility of maximum capacity and electric power production during hydro power plant rehabilitation (particularly when replacement of equipment or part of equipment is concerned). The selection of level of this increase is defined by economic analysis and comparison of the benefit/cost in the system for the variant of change (increase) of the basic energy parameters of plant.

The purpose of this paper is to consider the size and structure of changes occurring by increase of electric power capacity and production and their impact on the energy effects in the system, or on the energy and economic justification of investments.

The paper deals with results of applied procedure on Hydro Power Plant Zvornik, apart from methodological and theoretical considerations, as a specific plant in the sense of possible activities on rehabilitation.

Key words: rehabilitation, increase, capacity, energy, economics, justification

1. UVOD

Realizovano vreme rada skoro svih naših hidroelektrana i protekli radni vek postavili su, kao veoma aktuelno, pitanje njihove revitalizacije. U tom kontekstu, pitanje izrade odgovarajuće dokumentacije postaje za stepen hitnije i preče. Do sada urađena dokumentacija iz ove oblasti (Đerdap I, Ovčar Banja, Međuvršje) u sebi je sadržala i pitanja koja je bilo logično obraditi ranije i u konačne (Idejne) projekte uči sa izabranim parametrima, tj. sa jednom ili minimalnim brojem varijanti. Polazeći od činjenice da su objekti čija se revitalizacija razmatra po pravilu stariji od 30 godina, što znači da su projektovane pre najmanje 35 do 40 godina, mora se imati u vidu:

- protekli tehnološki razvoj,
- način projektovanja i tada važeći kriterijumi,
- način izbora osnovnih energetskih parametara,
- zahtevi ostalih korisnika i ograničenja,
- iskustva iz eksploatacije objekata,
- mogućnosti tadašnje operative i mašingradnje,
- konkretni uslovi nabavke opreme (ratna oštećenja, pomoć i sl.), kao i
- ostvareni razvoj elektroprivrede odnosno odgovarajućeg elektroenergetskog sistema.

Vodeći računa o navedenim faktorima, ali i o nizu drugih navedenih a koji ne moraju biti manje značajni, omogućiće se realnije sagledavanje uslova rada objekta u budućnosti, maksimalno moguće iskorišćenje energetskog profila i postojećih građevinskih delova objekata kao i eliminisanje nedostataka na opremi i objektu u celini uočenih tokom eksploatacije objekta.

2. OSNOVNE METODOLOŠKE POSTAVKE

Suštinski, energetski efekti hidroenergetskih proizvodnih objekata u elektroenergetskom sistemu predstavljaju smanjenje potrebnog nivoa izgradnje alternativnih izvora (termoenergetskih), što se manifestuje smanjenjem stalnih troškova sistema, smanjenjem troškova goriva u termoelektranama, što se manifestuje smanjenjem promenljivih troškova u sistemu i promenom nivoa i dubine redukcija, kao planskog parametra, zbog stohastičke prirode dotoka, što takođe dovodi do promene promenljivih troškova sistema. Polazeći od definicije energetskih efekata kao razlike stanja u sistemu sa i bez razmatranog objekta, podrazumevajući iste uslove zadovoljenja potrošača i minimalne troškove rada sistema, nameće se potreba optimalne eksploatacije i izgradnje sistema.

Optimalna eksploatacija postiže se maksimalnim korišćenjem (u granicama energetskih parametara), postojećih proizvodnih kapaciteta, plasirajući njihovu proizvodnju i snagu o odgovarajući deo dijagrama opterećenja.

Optimalna izgradnja sistema postiže se realizacijom objekata koji se najbolje uklapaju u očekivani dijagram opterećenja i pri tome iskazuju takve energetske efekte koji u odnosu na nivo investicija i promenljivih troškova daju najveći količnik ušteda i tokova B/C (Benefit/Cost).

Za potrebe analize elektroenergetskih prilika i ocenu stanja proizvodnog dela elektroenergetskog sistema, bilansiranje potrošnje i proizvodnje električne energije vrši se pomoću matematičkog modela za simulaciju proizvodnje elektrana. Ovaj model korišćen je za ispitivanje energetskih efekata izgradnje novih elektrana, proveru i izbor osnovnih energetskih parametara projektovanih hidroelektrana i termoelektrana, utvrđivanje načina rada postojećih i budućih proizvodnih kapaciteta.

U modelu se prognozirani dijagram trajanja opterećenja sistema deli na konstantni i varijabilni deo, što predstavlja osnovu metode konstantne i varijabilne energije koja je detaljno izložena u (1). Korišćenje metode konstantne i varijabilne energije za analizu prilika u elektroenergetskom sistemu u proteklom periodu bilo je uslovljeno, pored ostalog, osnovnim karakteristikama proizvodnih mogućnosti elektrana. Prilikom analize stvarnih prilika u proizvodnom delu sistema pokazalo se neophodnim razdvajanje dela kapaciteta elektrana čije konstantno korišćenje diktiraju tehnološki ili prirodni uslovi proizvodnje energije, od dela koji se može koristiti po potrebi u zavisnosti od varijacija opterećenja sistema. Prvi deo se javlja kao posledica postojanja tehničkih minimuma termoelektrana, biološkog i plovidbenog minimuma hidroelektrana, kao i zahteva za maksimalnim korišćenjem voda u hidroelektranama pri protocima bliskim instalisanom kada se ne raspolaže sa praznim prostorom u akumulacionom bazenu. Drugi deo proizvodnih mogućnosti elektrana karakteriše sposobnost prilagođavanja rada izvora promenljivim zahtevima konzuma i sačinjava osnovu fleksibilnog rada sistema. Prednosti opisanog metodološkog prilaza dolazile su do izražaja u analizama rada sistema sa većim brojem elektrana različitih tehničkih karakteristika i proizvodnih mogućnosti. Metoda je omogućila, s jedne strane, prenošenje osnovnih podataka o uslovima rada sistema iz dnevnih dijagrama opterećenja, a s druge strane, pogodan opis proizvodnih mogućnosti elektrana (posebno mogućnosti fleksibilnog tj. varijabilnog rada). Na taj način je bio omogućen jednostavan, i u tolerantnim granicama greške - imajući u vidu stepen neodređenosti polaznih podloga - pouzdan tretman rada

elektrana koji je služio za ocenu očekivanog rada sistema u budućnosti.

Polazeći od činjenice da je, osim zadovoljenja potrošnje po energiji i snazi, neophodno obezbediti i stabilan rad sistema, proizvodni kapaciteti moraju biti dimenzionisani (uvećani) i za pokrivanje neplaniranih povećanja potrošnje, kratkotrajnih ispada agregata, kao i za pokrivanje dužih ispada agregata termoelektrana. Ovaj nivo snage i proizvodnje definiše nivo rotirajuće i hladne rezerve sistema. Pored navedenog, za normalnu eksploataciju sistema, neophodno je obezbediti remont svakog termoagregata tokom godine u trajanju od jednog do dva meseca.

Zadovoljavanjem zadatih potreba konzuma (uključujući i potrebe rezerve) putem korišćenja proizvodnih mogućnosti svih elektrana u toku posmatrane godine i ispitivanjem promena odnosa u elektroenergetskom sistemu u različitim hidrološkim uslovima, sa navedenim simulacionim modelom se - na bazi učestanosti pojave pojedinih stanja - formira statistička ocena o očekivanoj pouzdanosti rada proizvodnog dela sistema, odnosno o stepenu sigurnosti snabdevanja potrošača električnom energijom.

Ključne faktore koji su od uticaja na ocenu sigurnosti rada sistema predstavljaju:

- neizvesnost proizvodnje hidroelektrana,
- nerazpoloživost termoenergetskih blokova.

Definisani i usvojeni nivo sigurnosti odnosi se na ocenu sigurnosti s obzirom na neizvesnosti proizvodnje hidroelektrana, pri čemu se predpostavlja da određeni nivo rezerve u podsistemu termoelektrana obezbeđuje sigurno korišćenje raspoložive snage angažovanih jedinica.

Na osnovu analiza koje su prethodno opisane, moguće je za svaku godinu i svaki mesec u toku godine u posmatranom planskom periodu odrediti iskoristivu snagu i proizvodnju hidroelektrana, gubitke proizvodnje hidroelektrana, angažovanu snagu i proizvodnju jedinica termoelektrana, snagu i neisporučenu energiju potrošačima, kao i ukupne troškove u sistemu (troškovi goriva i troškovi neisporučene energije).

Ovaj obim informacija omogućuje da se analizom alternativnih rešenja stvore pouzdane podloge za određivanje obima i dinamike izgradnje novih elektrana, odnosno sagledaju energetske efekti svakog objekta u sistemu, pojedinačno.

3. MOGUĆI ZAHVATI NA OBJEKTIMA U CILJU POVEĆANJA ENERGIJE I SNAGE

U cilju povećanja proizvodnje energije i snage hidroelektrana moguće je delovati na:

- raspoloživi pad,
- stepen iskorišćenja agregata,

- veličinu instalisanog protoka,
- veličinu protoka na profilu,
- veličinu i raspored dotoka tokom godine,
- specifičnosti pojedinih objekata.

Povećanje raspoloživog pada hidroelektrana moguće je po osnovu:

- povećanja kote uspora,
- snižavanjem donje vode i
- smanjenjem gubitaka u dovodu.

Promena (povećanje) stepena iskorišćenja agregata može se odnositi na generator, na turbinu, ili na oboje. Pri tome se smatra da povećanje stepena iskorišćenja transformatora nije od značaja (već je dovoljno visok). Kod turbine mogu se pojaviti dva slučaja:

- povećanje stepena iskorišćenja u celom opsegu, i
- povećanje stepena iskorišćenja u delu radne oblasti.

Kod generatora, uglavnom se radi o povećanju stepena iskorišćenja u celoj radnoj oblasti.

Kada je turbina u pitanju, može se pojaviti i poseban slučaj (na starijim objektima) kada se realna radna oblast turbine razlikuje od one koja se zahteva na izvedenom objektu.

Instalisani protok elektrane, tj. njegovo povećanje u principu može se izvesti kao:

- generalno povećanje u svim uslovima, ili kao
- povećanje protoka u pojedinim radnim režimima.

Generalno povećanje protoka svodi se na:

- povećanje protoka postojećih agregata, i
- ugradnju dodatnih agregata.

Povećanje protoka u pojedinim radnim režimima, po pravilu, odnosi se na postojeće agregate.

Veličina i raspored dotoka tokom godine može se ostvariti:

- uvođenjem dodatnih količina vode, i
- promenom rasporeda voda tokom godine.

Povećanje protoka na profilu moguće je uvođenjem dodatnih količina voda koje prirodno ne teku kroz razmatrani profil a može se ostvariti sa ili bez energetske uticaja na druge objekte. Uvođenje dodatnih voda ima uticaja i na sve profile nizvodno od razmatranog, a može imati i negativan uticaj na energetske korišćenje voda iz sliva i sa vodotoka sa koga su iste oduzete. U tom smislu povećanje protoka na ovaj način zahteva dodatne šire analize, što treba, takođe, uvažiti.

Promena (poboljšanje) rasporeda dotoka tokom godine/meseca predstavlja poseban slučaj. Ovo se može ostvariti ili značajnim povećanjem sopstvene akumulacije (izuzetno retko) ili izgradnjom akumulacija uzvodno u slivu. Suština ovih intervencija svodi se na povećano iskorišćavanje proticaja (zbog povoljnijeg rasporeda dotoka) i po-

većanje energetske pada, posebno u periodima kritičnim za rad sistema.

Pored toga, specifičnosti nekih objekata (korišćenje biološkog minimuma, na primer) ukazuju i na druge moguće i specifične zahvate i mogućnosti povećanja proizvodnje i snage elektrane.

Na slici 1. prikazani su navedeni slučajevi u vidu preglednog dijagrama aktivnosti.

Delovanje na pojedine navedene elemente elektrane, i/ili na više njih predstavlja realnu i, verovato, najčešću mogućnost.

4. UTICAJ POJEDINIH INTERVENCIJA NA ENEGETSKE EFEKTE U SISTEMU

Povećanje raspoloživog pada dovodi do povećanja i proizvodnje i snage pri svim proticajima na objektu. U tom smislu, povećavaju se i energetske efekti hidroelektrane u sistemu srazmerno povećanju pada po svim parametrima (nivo izgradnje, troškovi goriva) te je i ekonomska opravdanost ovakve intervencije verovatnija. Koja od varijanti povećanja pada će se pokazati najbolja direktno zavisi od potrebnih investicionih ulaganja za svaku varijantu.

Povećanje stepena iskorišćenja turbine i generatora u celom radnom opsegu praktično dovodi i do povećanja energetske efekata po svim parametrima pa je u tom pogledu ekvivalentno povećanju pada.

Povećanje stepena iskorišćenja samo u delu radne oblasti prouzrokuje i povećanje energetske efekata koji se odnose na te radne režime i, po pravilu, manji su od prethodnih.

Promena radne oblasti turbine (usklađivanje sa stanjem na terenu), suštinski obuhvata jedan ili oba prethodna slučaja, a kako se može raditi o znatnim razlikama i odgovarajući energetske efekti biće srazmerni istim.

Generalno povećanje instalisanog protoka elektrane dovodi do povećanja maksimalne snage pri svim doticajima (izuzetak su biološki ili plovidbeni minimumi), ali pri svim proticajima ne mora doći do povećanja proizvodnje. Naprotiv kod derivacionih postrojenja (dugački tunelski dovodi i sl.) može doći i do smanjenja proizvodnje zbog povećanih gubitaka pada u dovodnim organima. Do povećanja i proizvodnje i snage dolazi u periodu pojave preliva na objektu. Priroda energetske efekata u sistemu koji su posledica ovakvih intervencija na objektu je bitno različita u odnosu na prethodne. Dok se kod prethodnih energetske efekti manifestuju pokrivanjem konzuma po energiji i snazi, u svim radnim režimima (ili skoro svim), u ovom slučaju se pokrivanje konzuma po energiji i snazi dešava u periodu velikih dotoka kada, po pravilu, postoje dovoljne rezerve i u energiji i snazi.

U kritičnom periodu rada sistema javljaju se (mogu se javiti) efekti u rotirajućoj rezervi. Ovu vrstu efekata mogu obezbediti sve hidroelektrane sa bazenom za dnevnu regulaciju voda. U tom smislu ovi efekti su više zavisni od stanja sistema, tj. od njegove strukture. Sve navedeno ukazuje na značajno manje (ili manje verovatne) energetske efekte pa i odgovarajuću ekonomsku opravdanost.

Povećanje protoka u pojedinim radnim oblastima ostvaruje i odgovarajuće efekte u tim radnim režimima koji su, po prirodi stvari, samo deo efekata opisanih u prethodnom pasusu. U tom smislu treba posmatrati i njihovu ekonomsku opravdanost.

Povećanje protoka na razmatranom profilu svakako prouzrokuje povećanje energetske efekata u svim hidrološkim situacijama. Za razliku od povećanja pada, ovi efekti su zavisni od rasporeda protoka tj. od hidroloških uslova. Pored ove zavisnosti, bitna razlika nastaje ako su uvedene vode oduzete sa nekog postojećeg ili planiranog objekta, ili su vode koje gravitiraju razmatranom slivu i profilu. Najčešće se energetske efekti u ovakvim situacijama (prevođenje voda) razmatraju sa znatno šireg aspekta, izuzev, u hidrološkom smislu jednostavnih i trivijalnih rešenja.

Energetske efekti promene rasporeda protoka tokom meseca/godine bitno zavise od povećanja korisne zapremine sopstvene ili uzvodnih akumulacija. S obzirom na njihovu prirodu (strukturu) i vremenski raspored mogu biti veoma značajni za sistem pa i njihova ekonomska opravdanost vrlo verovatna. Konkretni primer, u ovome kontekstu, predstavlja mogućnost korišćenja prostora za prihvatanje poplavnog talasa, u pojedinim periodima godine.

5. KOMENTAR POSTOJEĆEG STANJA HE ZVORNIK

Komentar postojećeg stanja energetske parametara HE Zvornik baziran je na podacima iz (2.) i raspoloživim podacima Energoprojekta prikupljenim tokom rada na drugim studijama i projektima posle 1990. godine. Prema raspoloživim podacima uočava se značajna razlika između kote maksimalnog (160,0 m.n.m) i kote normalnog uspora (157,30 m.n.m).

Takođe, sagledava se efekat zasipanja akumulacije. Očigledno da svojevremeno nisu bile preuzete sve mere za zaštitu ove akumulacije pa se nepovratno izgubilo, u periodu od 1955. do 1983. godine preko $40 \times 10^6 \text{ m}^3$ korisnog prostora i isti sveo na samo $14 \times 10^6 \text{ m}^3$. Vrlo verovatno, situacija 2000. godine je mnogo nepovoljnija a u daljem periodu se praktično, dovodi u pitanje postojanje korisnog akumulacionog prostora.

Kriva donje vode, za stanje iz perioda 1990. godine i ranije ukazuje da bi se daljim radovima nizvodni nivoi mogli znatno sniziti. Ovo sniženje, zavisno od varijante prokopavanja moglo bi iznositi oko 1.65 m.

Školjkasti dijagram turbine, za koji se sa sigurnošću ne može tvrditi da je odgovarajući ali je blizak realnosti, ukazuje na niske stepene iskorišćenja turbine (0,84) pri nominalnim parametrima. Može se reći, između ostalog, da ova turbina ne odgovara uslovima na objektu tj. realni režim turbine pada van optimalne oblasti. Da bi se to dovelo u sklad trebalo bi raspoloživi pad povećati na vrednosti između 21 i 22 m pa i više.

Instalisana snaga generatora u elektrani je 4x30 MVA sa faktorom snage 0,8 što daje aktivnu snagu od 24 MW. Obzirom na topološki položaj elektrane u sistemu ne može se računati sa povećanjem faktora snage.

Biološki minimum (60 m³/s) je za ovaj objekat obavezujuća kategorija, obzirom da ne postoje nizvodni objektu niti se, u doglednom vremenu planiraju.

Uzvodna regulacija, u smislu dnevnih regulacija proticaja, vrši se u Bajinoj Bašti. Neizgrađeni, deo vodotoka je dovoljne dužine da, praktično, eliminiše uzvodnu regulaciju. To znači da, u smislu dnevnog regulisanja, na HE Zvornik dolaze neregulisani proticaji.

6. POLAZNE POSTAVKE

Analiza mogućnosti povećanja proizvodnje i snage HE Zvornik izvršena je polazeći od aktuelnog stanja parametra, komentara i pretpostavke o daljem stanju izgradnje objekata na Drini. U tom smislu polazne osnove bile su proizvodne mogućnosti prema osnovnim energetskim parametrima i sedmičnim proticajima u periodu 1946 - 1985. godine. Od uzvodnih, sezonskih, akumulacija obuhvaćen je uticaj postojećih (Uvac, Kokin Brod, Piva) dok je neposredno uzvodni i nizvodni deo toka Drine od HE Zvornik zadržan na sadašnjem nivou, tj. neizgrađen.

7. RAZMATRANE VARIJANTE POVEĆANJA PROIZVODNJE I SNAGE

Imajući u vidu osnovne energetske parametre i aktuelno stanje objekta sagledane su, kao realne i izvodljive, sledeće varijante:

- prokopavanje korita nizvodno od elektrane,
- podizanje kote normalnog uspora,
- povećanje protoka i stepena iskorišćenja
- ugradnjom novih radnih kola turbine, i

- povećanje protoka ugradnjom dodatnog agregata.

Nije eksplicitno razmotrena varijanta povećanja korisne zapremine akumulacije u smislu bagerisanja postojeće ili slično. Implicitno, kroz povećanje kote uspora, povećava se i korisna zapremina.

8. ANALIZA PRILIKA U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU EPS-a U NAREDNOM PERIODU

Za potrebe određivanja energetskih efekata razmatranih varijanti povećanja proizvodnje i snage HE Zvornik po sistemu "sa i bez objekta" pretpostavljeno je sledeće:

- stanje bez objekta, od 2005. god. nadalje, HE Zvornik radi sa baznim parametrima,
- stanje sa objektom podrazumeva izvršene intervencije u smislu povećanja snage i proizvodnje od 2005. godine nadalje.

Nije posebno analizirano stanje u sistemu u periodu revitalizacije HE Zvornik, niti smanjenje proizvodnje u periodu do revitalizacije.

7.1. Podloge o očekivanim pravcima razvoja elektroenergetskog sistema Srbije

Prilikom formiranja osnovnih podloga o elektroenergetskom sistemu Srbije u periodu iza 2000. godine, korišćena su aktuelna sagledavanja u elektroprivredi Srbije (3.), kao i energetske tehnički podaci raspoloživi u okviru investiciono-tehničke dokumentacije Energoprojekta i verifikovani od strane stručnih službi EPS-a.

7.2. Energetski efekti pojedinih varijanti povećanja proizvodnje i snage

Kao polazno stanje usvojena je moguća proizvodnja HE Zvornik u skladu sa polaznim postavkama tj. sa kotom uspora 157,30 m.n.m. i krivom donje vode za neprokopano korito. Prosečna vrednost proizvodnje iznosila je 476,8 GWh od čega je konstantna energija iznosila 257,4 GWh a maksimalna snaga 96,0 MW. Proračuni su rađeni za nivo korisne zapremine akumulacije iz 1983. godine tj. 14x10⁶ m³. Iskoristivi proticaj je bio 351,5 m³/s što je predstavljalo 90 % proticaja na ovom profilu (391,7 m³/s).

8.2.1. Prokopavanje korita nizvodno od elektrane

Prokopavanjem korita nizvodno od elektrane moguće je sniziti kotu donje vode, tj. povećati pad za oko 1,65 m. Ovome povećanju pada odgovara

povećanje proizvodnje od 36 GWh i snage od 3,5 MW uz zadržavanje postojećih turbina i druge opreme, osim transformatora koji se moraju zameniti, i mora se poboljšati hlađenje postojećih generatora. Investiciono, ovi radovi koštaju $1,89 \times 10^6$ \$ što daje ekonomsku cenu dodatne proizvodnje od 0,47 c/KWh. Isplativost ove intervencije nije potrebno dalje dokazivati.

8.2.2. Podizanje kote normalnog uspora

Razmotrene su dve varijante. Varijanta podizanja kote do nivoa 158,00 m.n.m. za koju su troškovi eksproprijacije minimalni ($0,7 \times 10^6$ \$) i varijantno podizanje kote uspora do nivoa 160 m.n.m. za koju troškovi eksproprijacije iznose $4,9 \times 10^6$ \$. Podizanjem kote uspora do nivoa 158,00 m.n.m. (bazna vrednost 157,30 m.n.m.) ostvaruje se dodatna proizvodnja od 15,3 GWh i snaga od 1,5 MW. Ekonomska cena dodatnog kWh iznosi 3,47 centi. Za varijantu podizanja kote uspora na nivo 160,00 m.n.m. dodatna proizvodnja iznosi 58,9 GWh a snaga 5,8 MW što daje ekonomsku cenu kWh od 1,96 centi.

Očigledno je podizanje kote uspora na nivo 160,00 m.n.m. povoljnija varijanta i pored značajnih troškova eksproprijacije ($4,9 \times 10^6$ \$) i ukupnih investicionih ulaganja od $12,5 \times 10^6$ \$. U tom smislu ista je usvojena kao bazna za dalja razmatranja.

8.2.3. Zamena radnih kola turbina istog prečnika

Zamenom radnih kola turbine povećava se stepen iskorišćenja turbine i veličina instalisanog protoka. Radi ostvarivanja maksimalne snage (35,4 MW) potrebno je, u ovoj varijanti, izvršiti i premotavanje generatora kao i dodavanje paketa magnetnog kola. Takva intervencija omogućila bi proizvodnju od 640,5 GWh od čega u konstantnom delu 310,1 GWh a u varijabilnom delu 330,4 GWh sa maksimalnom snagom od 141,6 MW tj. 35,4 MW po generatoru. Iskoristivi protok iznosio bi $362,0 \text{ m}^3/\text{s}$ tj. 92 %. Energetski efekti promene radnih kola i intervencija na generatoru iskazani na nivou moguće proizvodnje, a u odnosu na prokopavanje i nadvišenje (160,00 m.n.m.) iznose 68,7 GWh i 36,3 MW uz povećanje iskoristivog protoka od $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ tj. 1,4%. Ekonomska cena ove dodatne proizvodnje iznosi 1,51 centi/KWh.

Pored prikazanih efekata izvršena je analiza uklapanja istih u elektroenergetski sistem u perio-

du do 2015. godine. Razlika stanja u sistemu sa i bez dodatne proizvodnje i snage dala je sledeće efekte:

	2005.	2010.	2015.
Smanjenje potrebne snage TE (raspoloživa) (MW)	30,50	44,10	44,10
Smanjenje troškova goriva (10^6 \$)	3,15	3,40	3,40
Promena troškova redukcije (10^6 \$)	-0,87	-0,64	-0,64

Ovi podaci poslužili su za dalje ekonomske analize i dali odnos ušteda i troškova B/C = 3,70.

8.2.4. Zamena radnih kola turbine većim $D=4,85$ m

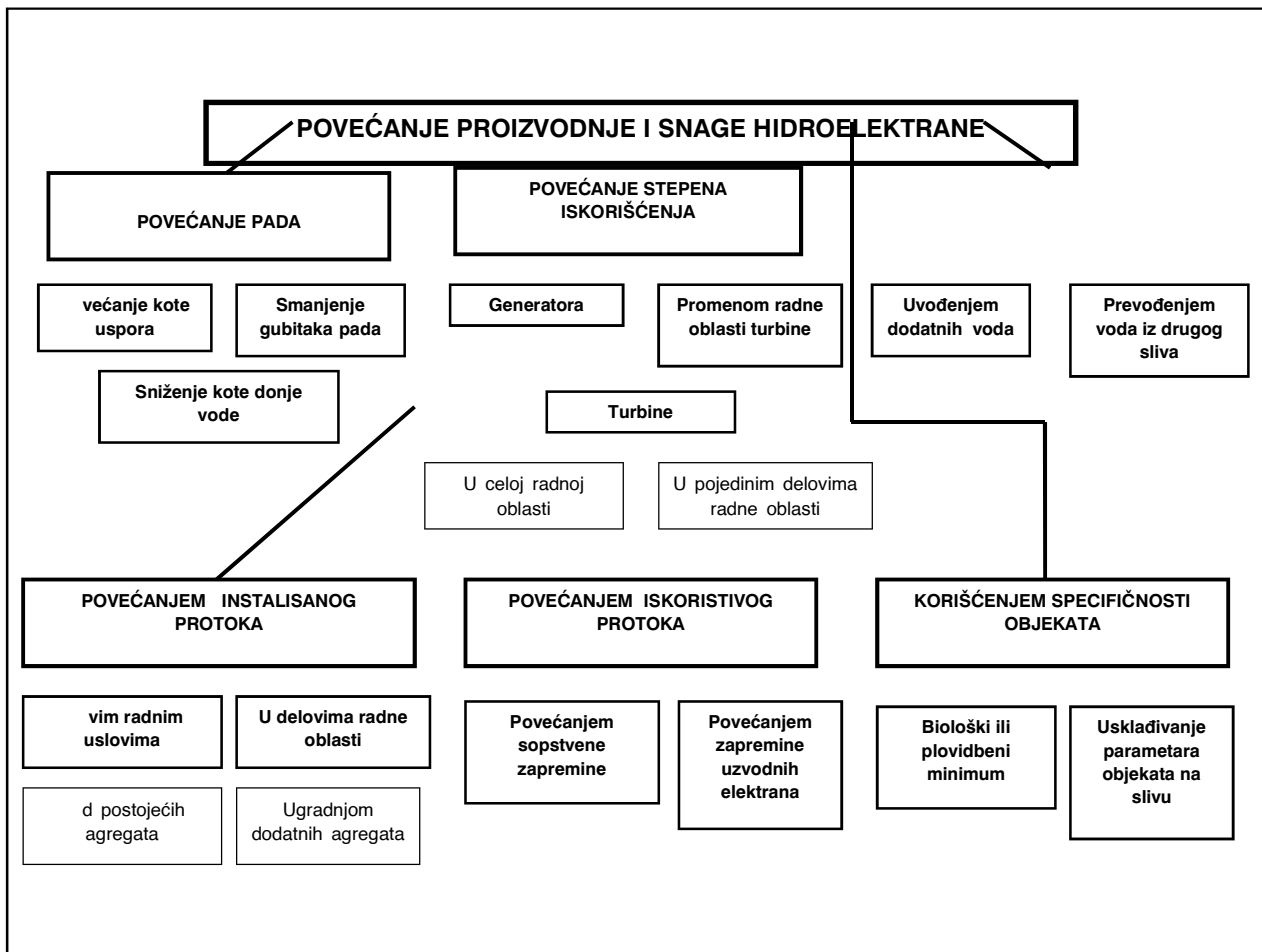
U ovoj varijanti, protok kroz turbinu povećan je na $187 \text{ m}^3/\text{s}$ što je dalo povećanje iskoristivog protoka od $12,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ($368,6 \text{ m}^3/\text{s}$) moguću proizvodnju od 640,7 GWh od čega 297,0 GWh konstantne energije i maksimalnu snagu od 151,2 MW (37,8 MW po agregatu) Ukupna ulaganja za ovu varijantu iznose $18,5 \times 10^6$ \$. Energetski efekti ove varijante, na nivou proizvodnje iznose 68,9 GWh i 45,9 MW. Ekonomska cena dodatne proizvodnje iznosi 1,92 centa/KWh.

Očigledno je da povećanje iskoristivog protoka ne daje odgovarajuće povećanje proizvodnje što je posledica povećanja kote donje vode zbog većeg instalisanog protoka. U suštini, povećanje proizvodnje u odnosu na prethodnu varijantu je simbolično. Treba, međutim imati u vidu da se najveći deo energetskih efekata ostvaruje u rotirajućoj rezervi što i ovoj varijanti obezbeđuje visoke efekte i visok odnos B/C. Po preliminarnim analizama, ovaj odnos bi se kretao oko B/C=4.

8.2.5. Dodatni - peti agregat

Analize izvršene za varijantu turbine sa prečnikom $D=4,85$ m (podrazumeva se i da su postojeći agregati revitalizovani istim radnim kolima) dale su povećanje iskoristivog protoka od $12,7 \text{ m}^3/\text{s}$, povećanje proizvodnje od 19,1 GWh i povećanje snage od 35,2 MW. Razlika, u odnosu na stanje sistema bez petog agregata dala je sledeće energetske efekte:

	2005.	2010.	2015.
Smanjenje potrebne snage TE (raspoloživa) (MW)	10,50	31,0	31,00



Smanjenje troškova goriva (10 ⁶ \$)	0,66	0,18	0,18
Promena troškova redukcije (10 ⁶ \$)	-0,77	-0,58	-0,58

Na osnovu prikazanih rezultata energetskih analiza kao i na osnovu sagledanih investicija za pojedina tehnička rešenja izvršene su ekonomske analize razmatranih varijanti. Rezultati tih analiza dali su optimalnu varijantu povećanja snage na HE Zvornik koja je definisana na sledeći način:

- prokopavanje korita nizvodno od elektrane,
- podizanje kote normalnog uspora na 160,00 m.n.m.,
- ugradnja petog agregata,
- zamena radnih kola novim, prečnika D=4,85 m i odgovarajućim intervencijama na generatoru.

Izvršena analiza osetljivosti nije dovela u pitanje navedene konstatacije već ih je, u određenoj meri, i pojačala.

Izvršena analiza osetljivosti nije dovela u pitanje navedene konstatacije već ih je, u određenoj meri, i pojačala

9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Ako bi se formirao uslovni redosled po elementu izvesnosti energetskih efekata a na osnovu povećanja proizvodnje i snage onda bi to moglo izgledati ovako:

- povećanje raspoloživog pada,
- povećanje stepena iskorišćenja,
- uvođenje dodatnih voda,
- poboljšanje rasporeda protoka tokom godine,
- povećanje instalisanog protoka, i
- korišćenje specifičnosti pojedinih objekata

Ovaj redosled analiza i proračuna trebalo bi slediti i prilikom izrade tehničke dokumentacije koja predhodi Idejnom projektu a ima za cilj izbor varijantnog rešenja za razmatrani profil ili objekat.

Vladimir Janković,
Milan Đurić, Predrag Savić

Statička analiza naponske stabilnosti

Stručni rad
UDK: 621.3.015.1; 621.3.02

Rezime:

U radu su date definicije naponske stabilnosti i ukazano je na razlike između ugaone i naponske stabilnosti. Prikazane su mogućnosti statičkog pristupa u analizi naponske stabilnosti. Na primeru elektroenergetskog sistema Srbije, primenom kontinualne tehnike proračuna tokova snaga i naponskih stanja određena je tzv. maksimalna opteretivost sistema za jedan scenario dodatnog opterećivanja elektroenergetskog sistema u odnosu na zadato bazno stanje. Ukazano je i na ograničenja statičkog pristupa analizi naponske stabilnosti.

Ključne reči: naponska stabilnost, statička analiza

Abstract:

STATIC ANALYSIS OF VOLTAGE STABILITY

The paper gives definitions of voltage stability and indicates differences between the angle and voltage stability. It shows the possibilities of static approach in the analysis of voltage stability. On the example of the electric power system of Serbia, by application of the continuation load flow, a so-called maximum system loadability is determined for one scenario of additional loading of the electric power system in relation to the given base state. Limitations of static approach to voltage stability analysis are also indicated.

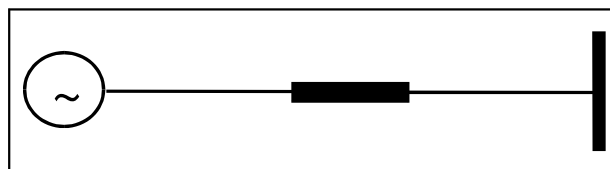
Key words: voltage stability, static analysis

1. UVOD

Smatra se da je stabilnost ili nestabilnost elektroenergetskog sistema (EES) jedna, ali da se može ispoljavati na više načina u zavisnosti od karakteristika i konfiguracije elektroenergetskog sistema, njegovog pogonskog stanja i prirode i lokacije poremećaja [2]. Dva granična slučaja su sledeća:

- kada je jedan sinhroni generator preko dugačkog prenosnog voda vezan na sabirnice beskonačne snage, tj. „kruti” elektroenerget-

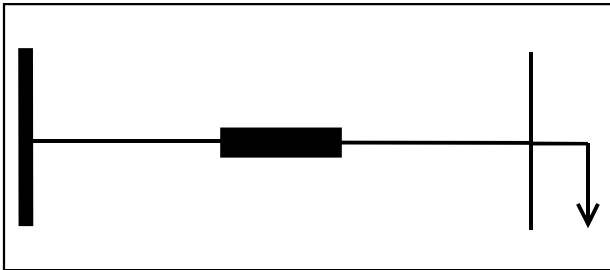
ski sistem (slika 1), što je problematika prave ugaone stabilnosti;



Slika 1. Sinhroni generator povezan dugačkim vodom sa sabirnicama beskonačne snage

Mr Vladimir Janković, dipl.ing., Predrag Savić, dipl.ing. – JP "EPS", Direkcija za upravljanje EES, 11000 Beograd, Vojvode Stepe 412
Prof. dr Milan Đurić - Elektrotehnički fakultet 11120 Beograd, Bulevar Kralja Aleksandra 73

- kada jedan sinhroni generator ili „kruti” elektroenergetski sistem napaja pasivnu potrošnju (slika 2), što je problematika prave naponske stabilnosti.



Slika 2. Napajanje pasivnog potrošačkog područja sa sabirnicama beskonačne snage

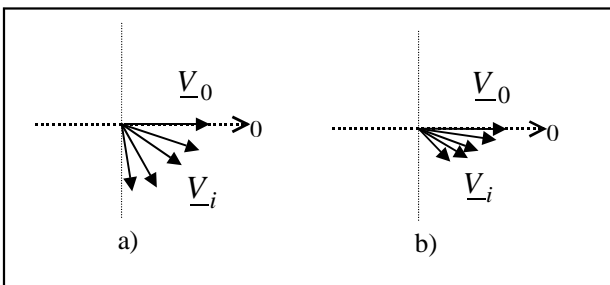
2. RAZLIKA IZMEĐU UGAONE I NAPONSKE STABILNOSTI

U slučaju pojave nestabilnosti u elektroenergetskom sistemu moguće je izvršiti klasifikaciju prema prirodi uzroka nestabilnosti [1]. Tako se ugaona nestabilnost javlja usled nedovoljnog sinhronizacionog momenta i/ili nedovoljnog prigušnog momenta, dok se kod naponske nestabilnosti nemogućnost generisanja i prenosa potrebne reaktivne snage smatra uzrokom nestabilnosti.

Naponska nestabilnost retko se javlja u svom čistom obliku kao „prava” naponska nestabilnost (slika 2), tj. često se naponska i ugaona nestabilnost javljaju zajedno. Kada usled ugaone nestabilnosti jedna ili više mašina „izgubi korak”, tj. dođe do gubitka sinhronizma, obično se u pojedinim čvorovima mreže javljaju veoma niski naponi, odnosno dolazi do naponskog sloma.

Na slici 3 prikazani su fazori napona u pojedinim čvorovima mreže u slučaju ugaone i naponske nestabilnosti.

S druge strane pojava naponskog sloma je moguća i tamo gde uopšte nije ugrožen sinhroni rad generatora tj. kad postoje dovoljni sinhronizacioni i prigušni momenti u sistemu.



Slika 3. Fazori napona u pojedinim čvorovima mreže pri pojavi a) ugaone i b) naponske nestabilnosti

U slučaju da do naponskog sloma dođe u potrošačkom području, reč je obično o naponskoj nestabilnosti. Ako do naponskog sloma dođe u prenosnoj mreži dalje od potrošačkog područja reč je o ugaonoj nestabilnosti [4]. Stoga se o ugaonoj stabilnosti može govoriti kao o stabilnosti generatora, jer je osnovni cilj da se spreči ispad generatora iz sinhronizma. Sa druge strane, o naponskoj stabilnosti se može govoriti kao o stabilnosti potrošača, jer je cilj da se spreči naponski slom i u slučaju kada svi generatori ostaju u sinhronizmu.

Smatra se da postoji jaka veza, tj. preklapanje između tranzijentne ugaone i tranzijentne naponske stabilnosti, dok postoji znatno manja povezanost dugotrajne naponske i dugotrajne ugaone nestabilnosti.

3. DEFINICIJE NAPONSKE STABILNOSTI (prema radnoj grupi CIGRÉ [6])

Naponska stabilnost je podskup globalne stabilnosti elektroenergetskog sistema. Ona, uopšteno govoreći, ima za posledicu aperiodičko snižavanje (ili povećanje) napona, mada se može ispoljiti i kroz neprigušene oscilacije napona. Oscilacije izazvane lošim podešenjem zaštite ili regulacije nisu obuhvaćene ovim definicijama.

– naponska stabilnost

Elektroenergetski sistem je za dato pogonsko stanje i zadati poremećaj naponski stabilan ako nakon poremećaja naponi kod potrošača dostižu vrednosti koje odgovaraju ravnotežnom posthavarijskom stanju. Stanje nakon zadatog poremećaja i svih upravljačkih akcija je unutar „oblasti privlačenja” stabilnog posthavarijskog ravnotežnog stanja.

Važno je napomenuti da ova definicija odgovara tzv. tranzijentnoj stabilnosti (u američkoj terminologiji [1]) ili dinamičkoj (u ruskoj) za koju se kaže da je svojstvo samog elektroenergetskog sistema, njegovog pogonskog stanja i samog poremećaja.

U ovom slučaju je u analizi neophodno modelovati elektroenergetski sistem preko nelinearnih diferencijalnih i algebarskih jednačina.

Naziva se i naponska stabilnost pri velikim poremećajima [5].

– naponska stabilnost pri malim poremećajima

Elektroenergetski sistem je u razmatranom pogonskom stanju naponski stabilan za male poremećaje ako, nakon bilo kakvog malog poremećaja, vrednosti napona kod potrošača ostaju jednake ili bliske vrednostima pre nastanka poremećaja.

Ovaj tip naponske stabilnosti analizira se pomoću linearizovanog dinamičkog modela elektroenergetskog sistema ispitivanjem da li koreni karak-

teristične jednačine (sopstvene vrednosti) imaju negativan realan deo.

Ova definicija odgovara tzv. statičkoj stabilnosti za koju se kaže da je svojstvo samog elektroenergetskog sistema i njegovog pogonskog stanja.

– *naponski slom*

Usled naponske nestabilnosti u elektroenergetskom sistemu dolazi do naponskog sloma, ako su naponi kod potrošača u posthvarijskom ravnotežnom stanju ispod prihvatljivih graničnih vrednosti. Naponski slom može biti potpuni (ako je reč o raspadu elektroenergetskog sistema) ili delimični.

I usled ugaone nestabilnosti može doći do naponskog sloma u tzv. električnom centru mreže.

– *naponska nestabilnost*

Naponska nestabilnost je odsustvo naponske stabilnosti i ima za posledicu progresivno sniženje (ili porast) napona.

Raznim upravljačkim akcijama može se, međutim, dostići stabilno stacionarno stanje i unutar i van dozvoljenog opsega napona.

4. ANALIZA NAPONSKE STABILNOSTI

Kako je naponski slom u osnovi dinamička pojava, naponska stabilnost se može u potpunosti proučavati samo primenom dinamičke analize i dinamičkih modela elemenata EES. Zbog svoje složenosti dinamička analiza se još uvek vrši samo u okviru istraživačkih radova, dok se uprošćeni statički pristup javlja kao jedini koji se primenjuje u praksi u proučavanju i analizi rada realnih EES.

4.1. Statički pristup analizi naponske stabilnosti

Osnovu statičkog pristupa analizi naponske stabilnosti čine algebarske jednačine ravnoteže aktivnih i reaktivnih snaga u svim čvorovima mreže i metode njihovog rešavanja (proračun tokova snaga i naponskih stanja). Pri tome je potrebno posebno modelovati one elemente EES koji bitno utiču na naponsku stabilnost (sinhroni generatori, regulacione transformatore i potrošače) i to na sledeći način:

- potrebno je uvažiti stvarna ograničenja u generisanju reaktivne snage na generatorima (zavisna od napona na krajevima generatora) usled zagrevanja pobudnog i statorskog namotaja, tj. obezbediti da se radna tačka sinhronih generatora uvek nalazi unutar pogonske karte,
- potrebno je uvažiti statičke karakteristike potrošnje, tj. zavisnost aktivne i reaktivne snage potrošača od napona i

- potrebno je realizovati regulaciju napona kod transformatora sa regulacijom pod opterećenjem preko diskretnih promena odnosa transformacije na osnovu stvarnih podataka.

Statička analiza omogućava generisanje više stacionarnih stanja sistema u vidu $P-V$ i $Q-V$ krivih. Ove krive predstavljaju trajektorije stacionarnih stanja sistema za unapred definisani scenario opterećivanja sistema i preraspodele angažovanja proizvodnih kapaciteta. Reč je najčešće o dvostranim krivama sa karakterističnom tačkom spajanja (koleno ili nos krive - tačka K na slici 4 u poglavlju 4.2).

Za stacionarna stanja na kolenu krive i oko nje ga važi da se ne mogu izračunati primenom klasičnog Njutn-Rafsonovog postupka proračuna tokova snaga i naponskih stanja zbog toga što je Jakobijeva matrica koja se koristi u ovom postupku bliska ili jednaka singularnoj. Zbog toga se za izračunavanje stacionarnih stanja EES na ovom delu krive primenjuje kontinualna tehnika proračuna tokova snaga i naponskih stanja. Kontinualna tehnika je detaljno objašnjena u referenci [8] i neće ovde biti prikazana.

Na osnovu dobijenih stacionarnih stanja i krivih moguće je odrediti vrednosti niza tzv. indikatora naponskog sloma koji omogućavaju da se proceni kolika je rezerva stabilnosti i da se identifikuju ograničenja elemenata EES u posmatranom stanju. Ovi indikatori mogu takođe poslužiti kao kriterijumi za primenu niza preventivnih i korektivnih akcija. Statička analiza omogućava da se ispituju različita pogonska stanja i da se simuliraju razni poremećaji.

4.2. Indikatori naponskog sloma

Svrha indikatora naponskog sloma je procena rezerve stabilnosti, tj. određivanje rastojanja između posmatranog pogonskog stanja i graničnog stanja u kome je sistem naponski nestabilan. Dobro odabrani indikator može pravovremeno da upozori bilo dispečera (u upravljanju u realnom vremenu) ili planera (u kratkoročnom planiranju pogona ili srednjoročnom i kratkoročnom planiranju izvora i mreže) na opasnost i „blizinu” naponskog sloma. Razvijen je niz indikatora koji se mogu koristiti u razne svrhe i za različite tipove sistema.

Svi indikatori se mogu podeliti u dve osnovne grupe [7]:

- indikatore određene na osnovu posmatranog stacionarnog stanja;
- indikatore određene na osnovu simulacije velike promene (odstupanja) u odnosu na početno stanje.

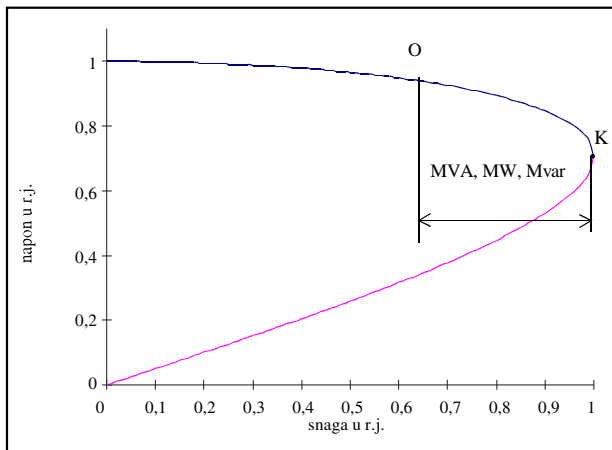
U određivanju indikatora prve grupe koriste se samo podaci o početnom ili trenutnom stanju siste-

ma i ne prati se eventualni dalji razvoj promena stanja u sistemu, dok se indikatori druge grupe određuju tako što se počev od nekog zadatog stanja prati ponašanje sistema i to za određeni scenario povećanja opterećenja i tranzita u sistemu sve do tačke kada sistem postaje naponski nestabilan.

Kod indikatora druge grupe posebno se specificira način povećanja opterećenja tj. scenario po kome se dodatno opterećuje sistem. Kao rezultat dobija se rastojanje (ili margina) u MVA, MW ili Mvar između početnog i graničnog stanja, tj. koliko je potrebno dodatno opteretiti sistem da bi se dostiglo nestabilno stanje. Upravo to rastojanje (margina ili rezerva snage) predstavlja indikator naponskog sloma, tj. meru koja kazuje koliko smo udaljeni od naponskog sloma. Na slici 4 dat je grafički prikaz ovog indikatora.

Scenario opterećivanja sistema se može proizvoljno birati, pa se zato za izračunatu marginu aktivne i reaktivne snage kaže da je izračunata za određeni scenario opterećivanja sistema.

Postoji više metoda za određivanje ovog indikatora. Osnovna je primena klasične i kontinualne tehnike proračuna tokova snaga i naponskih stanja u raznim varijantama koja je detaljno prikazana u referenci [8]. Osnovna prednost kontinualne tehnike je to što omogućava simulaciju višestrukih promena (npr. kada više generatora jedan za drugim dostignu ograničenje po reaktivnoj snazi i sl.). Mana ove tehnike je što ne može da uvaži vremenski zavisne karakteristike kao npr. karakteristiku termostatski regulisanih potrošača.



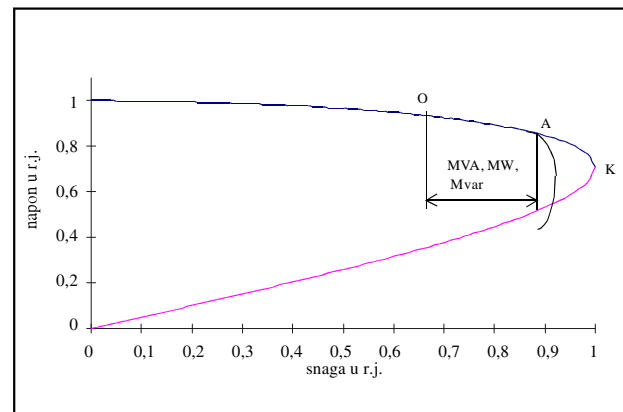
Slika 4. Margina snage uz zanemarivanje ograničenja elemenata EES

Margina određena na način kako je prikazano na slici 4 u suštini predstavlja marginu snage u odnosu na tačku K, tj. tačku koja odgovara graničnoj snazi prenosa date mreže. Ova granica se naziva i **granica opteretivosti sistema** (engl. **loadability limit**).

U tom smislu ne važi prethodno navedena definicija koja zahteva da se dostigne tačka u kojoj sistem postaje naponski nestabilan, jer tačka K predstavlja tačku u kojoj je sistem naponski nestabilan samo u ograničenom broju slučajeva. U tački K je Jakobijeva matrica sistema jednačina za proračun tokova snaga (\mathbf{J}_{LF}) singularna i to nam daje samo informaciju o egzistenciji stacionarne tačke za određeni nivo opterećenja u sistemu, ali ne i o tome da li je sistem nestabilan ili ne. Tu informaciju možemo dobiti na osnovu karaktera sopstvenih vrednosti Jakobijeve matrice linearizovanog sistema diferencijalnih jednačina (\mathbf{J}_{SYS}) kojima su obuhvaćeni dinamički modeli elemenata EES. Tako su npr. u [3] navedena samo dva slučaja, uz niz pretpostavki, kada se na osnovu singularnosti Jakobijeve matrice \mathbf{J}_{LF} može zaključiti da li je sistem stabilan ili ne. Zbog toga je pravilnije o ovom indikatoru govoriti kao o rezervi sistema do granice opteretivosti, a ne o rezervi stabilnosti.

Ovakvo izračunata margina ipak ima značaj jer daje teoretsku granicu do koje se mreža može opterećivati pod uslovom da se zanemare preopterećenja pojedinih elemenata sistema.

Veću primenu mogu imati margine koje mere rastojanje do tačaka kada se iscrpljuju rezerve reaktivne snage kod pojedinih generatora ili kada do-



Slika 5. Margina snage uz uvažavanje ograničenja po reaktivnoj snazi generatora

lazi do preopterećenja dalekovoda do nivoa podešenja zaštite od preopterećenja. Na slici 5 grafički je interpretirana jedna ovakva margina.

Potrebno je napomenuti da do dinamičke nestabilnosti može doći i u stanjima koja prethode granici opteretivosti, ali za određivanje graničnog stabilnog stanja potrebno je primeniti dinamičke modele elemenata EES i neku od metoda dinamičke analize.

4.3. Specifičnosti određivanja granice opteretivosti

Postoji puno faktora koji utiču na izračunatu vrednost granice opteretivosti. To su:

- izbor trajektorije opterećivanja sistema (kako se menjaju aktivna i reaktivna snaga potrošnje i na koji način se vrši dodatno angažovanje agregata);
- primenjene statičke karakteristike potrošača (prava, kriva drugog reda, izlomljena karakteristika);
- izbor balansnog čvora (ili više njih) i njegove naponske reference; izbor naponskih referenci u generatorskim čvorovima;
- način zadavanja maksimalnih generisanja reaktivne snage kod generatora (preko fiksne vrednosti, preko naponski zavisnih karakteristika uz primenu različitih faktora strujnog preopterećenja namotaja rotora i statora);
- način korišćenja regulacije napona kod regulacionih transformatora (da li se vrši ili ne regulacija, da li se blokira regulacija, koja je zadata vrednost regulisanog napona).

Granica opteretivosti je naravno jako osetljiva i na promene u raspoloživosti generatora i vodova prenosne mreže.

Statički pristup omogućava da se izvrši analiza statičke naponske sigurnosti i da se, pored granice opteretivosti, odrede i rezerve sigurnosti do karakterističnih stanja. To mogu biti stanja kada dolazi do sniženja napona ispod dozvoljenih vrednosti, kada dolazi do reagovanja zaštite od preopterećenja na dalekovodima u 1. i 2. stepenu i kao najvažnija, ona stanja kada se iscrpljuje rezerva reaktivne snage na generatorima tj. kada se na pojedinim generatorima dostižu ograničenja po reaktivnoj snazi. Jedino ovako određene rezerve sigurnosti mogu imati praktičnu primenu. Važno je napomenuti da vrednosti napona nisu dobri indikatori blizine naponskog sloma i to zbog dejstva regulacije napona kod regulacionih transformatora koji uspevaju da održe dobre napone i u situacijama kada se javlja veliki deficit reaktivne snage u sistemu.

Prilikom generisanja krivih može se javiti više slučajeva:

- dobija se kompletna dvostrana (gornja i donja) kriva u celom opsegu promene parametra opterećivanja;
- u nekom stanju, kao rešenja jednačina za proračun tokova snaga javljaju se kompleksne vrednosti, tj. nema realnih rešenja; na taj način se generiše deo krive, a prekid može biti i na donjem i na gornjem delu krive;
- umesto izrazito odvojene donje krive dobija se kriva veoma bliska gornjoj; u ovom sluča-

ju početne pretpostavke su se bitno promenile, tako da smo se pri generisanju krive vratili po gornjoj krivoj koja odgovara znatno izmenjenom sistemu;

- posle nekoliko izračunatih stanja postupak divergira, pa se generiše samo deo krive; u ovom slučaju u velikom broju generatorskih čvorova došlo je do promene tipa čvora (zbog dostizanja ograničenja po reaktivnoj snazi) u potrošačke, pa postupak divergira.

Ovi različiti slučajevi se češće javljaju kada su scenarijom opterećivanja sistema obuhvaćeni svi potrošački čvorovi. U slučaju dodatnog opterećivanja samo manjeg dela sistema, obično se dobijaju dvostrane krive pri čemu se kod pojedinih potrošačkih čvorova može zapaziti izraziti naponski slom.

5. ILUSTRATIVNI PRIMER

Primenom posebno razvijenog programa opisanog u [8] izračunate su granice opteretivosti i rezerve sigurnosti za EES EPS-a i deo EES EPCG. Posmatrana je konfiguracija kada su u pogonu svi generatori priključeni na 400 kV i 220 kV mrežu, a uzeti su u obzir svi vodovi 400 i 220 kV, kao i transformatori 400/x i 220/x kV/kV - ukupno 147 čvorova i 189 grana. Kao osnovno stanje uzeto je maksimalno opterećenje za zimu 1995/96. god. Bruto konzum posmatranog EES je 5 828 MW.

Obrađen je slučaj dodatnog opterećivanja jednog čvora na periferiji sistema (povećavane su aktivna i reaktivna snaga u TS Šandofalva koja je radialno povezana 400 kV vodom sa TS Subotica 3). Na taj način je proveravano koliki je maksimalni mogući izvoz u Mađarsku kada se izvoz realizuje povezivanjem jednog potrošačkog ostrva na naš sistem. Pri ovom proračunu uzeta su u obzir ograničenja po aktivnoj i reaktivnoj snazi generatora, statičke karakteristike potrošača, a aktivirana je i regulacija napona kod transformatora.

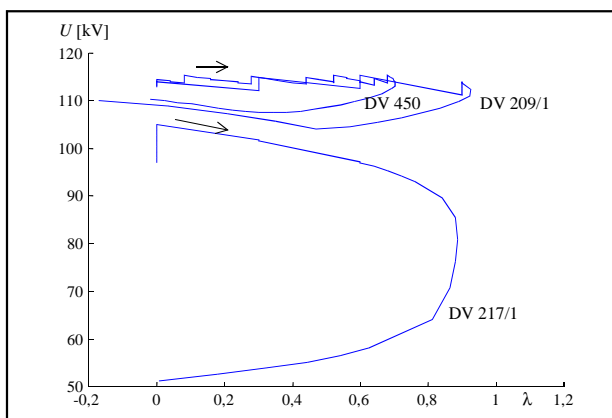
Prvo je vršena analiza kako ispadi pojedinih dalekovoda utiču na vrednosti granice opteretivosti i rezerve sigurnosti. Kao rezerva sigurnosti uzeto je maksimalno dodatno opterećenje čvora TS Šandofalva za koje napon u čvoru ostaje u dozvoljenim granicama (≥ 380 kV).

U tabeli 1 prikazani su rezultati za najkritičnije ispade, kao i slučaj kada su svi dalekovodi uključeni.

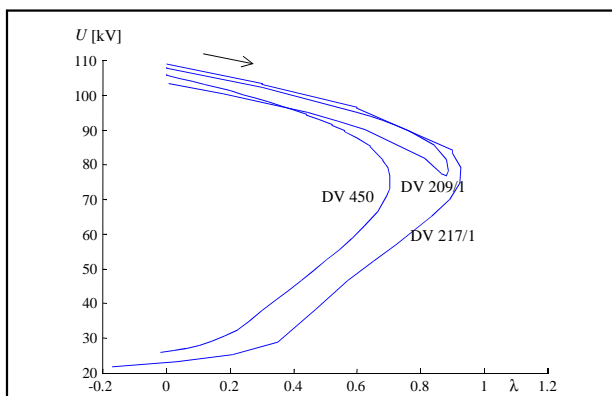
Pri ispadu dalekovoda 209/1 do naponskog sloma najpre dolazi u TS Sremska Mitrovica 2, dok se pri ispadima ostalih dalekovoda naponski slom najpre javlja u TS Subotica 3. Na slikama 6 i 7 prikazani su naponi na 110 kV sabirnicama u TS Sremska Mitrovica 2 i TS Subotica 3.

Tabela 1
Aktivna i reaktivna snaga u potrošačkom čvoru
TS Šandorfalva za karakteristične radne tačke

Ispad DV br.	Granica opteretivosti	Stanje pri kome $U \geq 380$ kV
-	380 MW / 403 Mvar	108 MW / 102 Mvar
450	271 MW / 286 Mvar	27 MW / 25 Mvar
209/1	339 MW / 351 Mvar	62 MW / 59 Mvar
217/2	345 MW / 352 Mvar	88 MW / 83 Mvar
217/1	352 MW / 365 Mvar	81 MW / 76 Mvar
254	355 MW / 386 Mvar	87 MW / 82 Mvar
402	365 MW / 385 Mvar	84 MW / 80 Mvar
453	367 MW / 389 Mvar	92 MW / 87 Mvar
401/2	371 MW / 387 Mvar	95 MW / 90 Mvar



Slika 6. Krive $V - \lambda$ za čvor TS Sremska Mitrovica 2,
1. sistem sabirnica 110 kV



Slika 7. Krive $V - \lambda$ za čvor TS Subotica 3,
2. sistem sabirnica 110 kV

Parametar λ označen na slikama 6-10 predstavlja meru dodatnog nominalnog opterećenja čvora [8] i u ovom slučaju $\lambda=1$ odgovara dodatnom nominalnom opterećenju čvora Šandorfalva od 400 MW / 400 Mvar. Pri opterećivanju čvora povećavana je

generisana aktivna snaga proporcionalno na svim generatorima u pogonu (do ograničenja po maksimalnoj snazi).

Takođe, vršena je analiza kako ispadi pojedinih generatora utiču na vrednosti granice opteretivosti i rezerve sigurnosti. U tabeli 2 navedene su ispitane varijante, a u tabeli 3 prikazani su rezultati.

Tabela 2.

Simulirani ispadi generatora

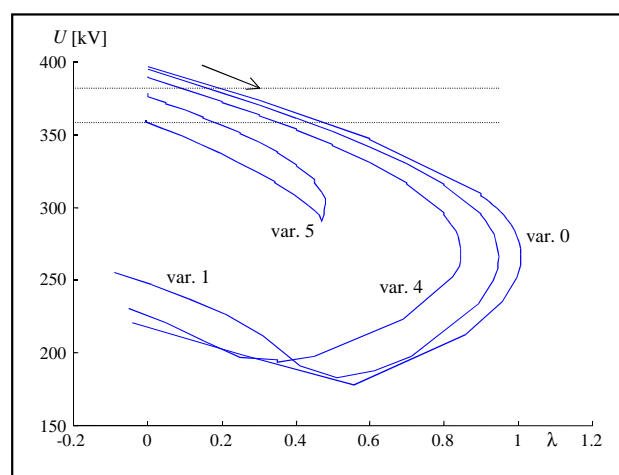
Varijanta	Proizvodne jedinice van pogona
0	svi generatori u pogonu
1	G-2 u TENT-B
2	kao varijanta 1 + G-2 u TE Kostolac B
3	kao varijanta 2 + G-1 u TENT-A
4	kao varijanta 3 + G-6 u TENT-A
5	kao varijanta 4 + G-1 u TENT-B

Tabela 3.

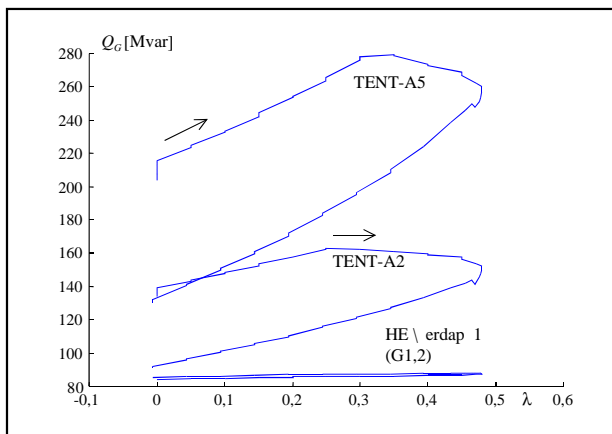
Aktivna i reaktivna snaga u potrošačkom čvoru
TS Šandorfalva za karakteristične radne tačke

Varijanta	Granica opteretivosti	Stanje pri kome $U \geq 380$ kV
0	380 MW / 403 Mvar	108 MW / 102 Mvar
1	358 MW / 376 Mvar	93 MW / 88 Mvar
2	353 MW / 373 Mvar	90 MW / 85 Mvar
3	347 MW / 366 Mvar	83 MW / 78 Mvar
4	322 MW / 337 Mvar	64 MW / 61 Mvar
5	197 MW / 182 Mvar	0 MW / 0 Mvar

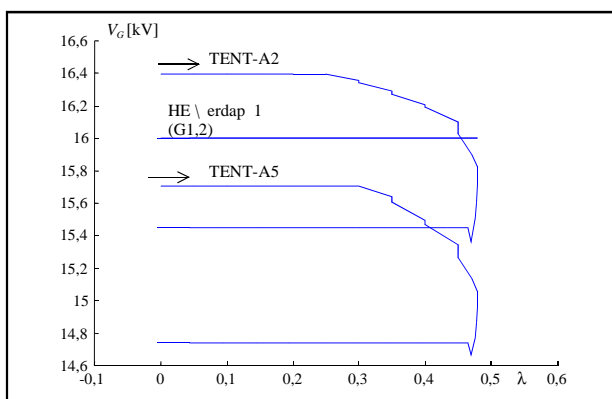
Na slici 8. prikazani su naponi u TS Šandorfalva za neke od ispitanih varijanti. Za varijante 4 i 5, pre dostizanja granice opteretivosti, na pojedinim



Slika 8. Krive $V - \lambda$ za čvor TS Šandorfalva



Slika 9. Kriva $Q_G - \lambda$ za TENT-A2, TENT-A5 i G-1,2 u HE Đerdap 1 (varijanta 5)



Slika 10. Kriva $V_G - \lambda$ za TENT-A2, TENT-A5 i G-1,2 u HE Đerdap 1 (varijanta 5)

generatorima u TENT-A dostignuto je ograničenje po reaktivnoj snazi usled zagrevanja pobudnog namotaja. Na slikama 9 i 10 prikazan su naponi i reaktivne snage generatora G-5 i G-2 u TENT-A, kao i zbirno generatora G-1 i G-2 u HE Đerdap 1 za varijantu 5.

6. ZAKLJUČCI

Statička analiza naponske stabilnosti omogućava generisanje više stacionarnih stanja sistema u

vidu $P - V$ i $Q - V$ krivih. Na taj način se vrši svojevrsna „simulacija“ stacionarnih stanja EES za unapred definisani scenario promena parametara u EES. Na osnovu dobijenih stacionarnih stanja i krivih moguće je proceniti kolike su granice opterećenosti i rezerve sigurnosti, a moguća je i identifikacija ograničenja pojedinih elemenata EES u posmatranim stanjima. Ove veličine mogu takođe poslužiti i kao kriterijumi za primenu niza preventivnih i korektivnih akcija. Statička analiza omogućava da se ispitaju različita pogonska stanja i da se simuliraju razni poremećaji.

7. LITERATURA

- [1] IEEE Task Force on Terms & Definitions, SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE SUBCOMMITTEE, POWER SYSTEM ENGINEERING COMMITTEE, PROPOSED TERMS & DEFINITIONS FOR POWER SYSTEM STABILITY, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, No.7, July 1982, pp. 1894-1898.
- [2] Mansour Y. (editor), VOLTAGE STABILITY OF POWER SYSTEMS: CONCEPTS, ANALYTICAL TOOLS AND INDUSTRY EXPERIENCE, IEEE Committee report 90TH0358-2-PWR, 1990.
- [3] Sauer P., Pai M., POWER SYSTEM STEADY-STATE STABILITY AND THE LOAD FLOW JACOBIAN, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.5, No.4, November 1990, pp. 1374-1383.
- [4] Taylor C.W., POWER SYSTEM VOLTAGE STABILITY, McGraw-Hill Inc., New York, 1994.
- [5] Kundur P., POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL, McGraw-Hill Inc., New York, 1994.
- [6] CIGRÉ TF 38.02.10., MODELLING OF VOLTAGE COLLAPSE INCLUDING DYNAMIC PHENOMENA (edited by C.W.Taylor), March 1993. (preprint)
- [7] CIGRÉ TF 38.02.11., INDICES PREDICTING VOLTAGE COLLAPSE INCLUDING DYNAMIC PHENOMENA (edited by N. D. Hatziargyriou, T.V.Cutsem), May 1994. (preprint)
- [8] Janković V., Đurić M., Savić P., Dimitrijević V., KONTINUALNA TEHNIKA PRORAČUNA TOKOVA SNAGA I NAPONSKIH STANJA, 24. SAVETOVANJE JUKO CIGRÉ, Vrnjačka Banja, oktobar 1999, referat 38-08.

Rad je primljen u uredništvo 11. 10. 2001. godine

Aca Vučković, Nikola Nikolić,
Marijana Sučević–Tasić, Nataša Blagojević, Slobodan Ružić

Rezultati simulacija rada EES EPS-a u srednjoročnom planu razvoja

Stručni rad
UDK: 621.31

Rezime:

U radu su prikazani rezultati simulacija rada EES EPS-a, koje je vršeno zbog definisanja novog srednjoročnog plana razvoja. U analizi je primenjen programski paket razvijen u EPS-u čiji je kratak opis dat u radu. Za analiziranu godinu se prvo izvrši prognoza potrošnje po mesecima. Zatim se uzimajući u obzir proizvodne karakteristike hidroelektrana i termoagregata vrši popunjavanje dijagrama opterećenja. Kao rezultat se dobijaju deficiti (suficiti) snage i energije po mesecima.

Ključne reči: srednjoročni plan razvoja, simulacije rada, racionalizacija, održavanje, revitalizacija.

Abstract:

RESULTS OF SIMULATIONS OF OPERATION OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM OF THE ELECTRIC POWER INDUSTRY OF SERBIA IN THE MEDIUM-TERM DEVELOPMENT PLAN

The paper deals with results of simulations of operation of the electric power system of the electric power industry of Serbia, made for the purpose of defining the new medium-term development plan. The analysis applies a programme package the description of which is given the paper. For the analyzed year, the demand forecast is first done by months. Then, taking into account the production characteristics of hydro power plants and thermal sets of machines, the load-diagram is filled-in. Deficits (surpluses) of capacity and energy by months are obtained as results.

Key words: medium-term development plan, operation simulations, rationalization, maintenance, rehabilitation

1. UVOD

Srednjoročni plan razvoja EES EPS-a analiziran u ovom radu se odnosi na period od 2001. do 2005. godine. Za sveobuhvatnu analizu plana razvoja bilo je potrebno obraditi veliki broj mogućih scenarija. Zbog toga je za simulaciju rada EES EPS-a korišćen ranije razvijen programski paket koji, između ostalog, određuje i mesečne deficite (suficite) energije i vršne snage. U radu je kao po-

sebna celina dat kratak opis korišćenog programskog paketa u okviru koje je opisano tretiranje potrošnje, hidroelektrana (HE), termoagregata (TA) i način popunjavanja prognoziranih dijagrama opterećenja. Sledeće celine u radu se odnose na izvršenu prognozu, očekivane efekte racionalizacije potrošnje i proizvodne mogućnosti postojećih kapaciteta. Na kraju su prikazani rezultati dobijeni na periodu za koji je pravljen srednjoročni plan razvoja.

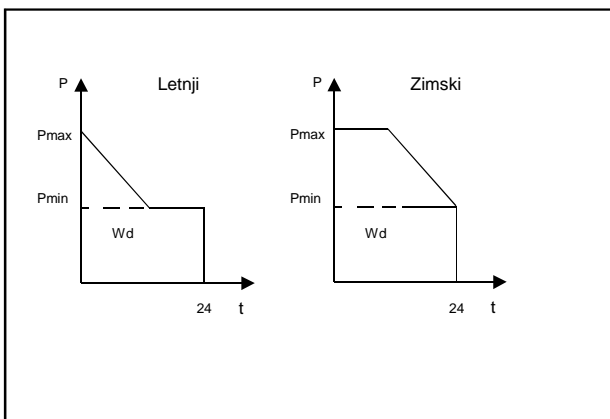
Mr Aca Vučković, dipl. ing.el., Nikola Nikolić dipl. ing.el., Marijana Sučević-Tasić, dipl. ing.el.,
Nataša Blagojević, dipl. ing.el., dr Slobodan Ružić, dipl.ing. el – JP "EPS", Direkcija za razvoj i investicije, 11000 Beograd, Vojvode Stepe 412.

2. PROGRAMSKI PAKET ZA SIMULACIJU RADA EES-A

Namena ovog programskog paketa je proračun troškova, potrebnih količina goriva, deficita i suficita energije i snage za pretpostavljene uslove u sistemu. Ulazni podaci su: godišnje energije, mesečne raspodele te energije, faktori opterećenja, hidro proizvodnje, planovi remonata i karakteristike termoagregata. Sve ove vrednosti osim poslednje navedene mogu se varirati tako da broj simulacija može biti izuzetno veliki. Pretpostavljeni mesečni dijagrami opterećenja se prvo popunjavaju proizvodnjom protočnih i akumulacionih hidroelektrana. Zatim se ostatak potrošnje pokriva proizvodnjom termoagregata. Ukoliko je kompletna potrošnja pokrivena, pristupa se određivanju suficita, a u suprotnom deficita snage i energije po mesecima za posmatranu simulaciju. Postupak se ponavlja za neki drugi set ulaznih vrednosti koje se variraju (godišnja energija, mesečna raspodela godišnje energije, faktori opterećenja, hidro proizvodnja). Na kraju se, kao izlaz iz programa uzimajući u obzir sve simulacije urađene za različite vrednosti ulaznih parametara, dobijaju očekivani mesečni deficiti (suficiti) snage i energije.

2.1. Tretiranje potrošnje

Svaki mesec u godini je predstavljen karakterističnim danom (reprezentom meseca) čije su osnovne karakteristike dnevna energija (W_d), vršna (P_{max}) i minimalna (P_{min}) snaga. Uz pretpostavku da se mesec sastoji od energetski identičnih dana određuje se kriva trajanja dnevnog opterećenja.



Kriva trajanja opterećenja je aproksimirana pomoću dva linearna segmenta i ima dva karakteristična oblika prikazana na slici 1. Dani sa malom dnevnom energijom, za koje važi $W_d < 12(P_{M+P_{min}})$, imaju oblik krive trajanja opterećenja tipično letnjeg dana, dok dani sa velikom dnevnom energijom, za koje je $W_d > 12(P_{M+P_{min}})$, imaju oblik krive trajanja opterećenja tipično zimskog dana.

2.2. Proizvodnja hidroelektrana

U simulacijama rada EES-a godišnja hidro proizvodnja se varira u unapred zadatom opsegu koji je određen na prethodnom višegodišnjem periodu. Pri tome se svakoj vrednosti hidro proizvodnje dodeljuje odgovarajuća verovatnoća pojave. Pretpostavljena godišnja proizvodnja se deli na protočni i akumulacioni deo, a zatim se godišnja proizvodnja protočnih deli po mesecima primenom raspodele dobijene analizom podataka ostvarenih na istorijskom periodu. Biološkim minimumom protočnih HE se pokriva deo potrošnje u baznom delu dijagrama opterećenja. Preostalom proizvodnjom protočnih HE pokriva se potrošnja u varijabilnom delu dijagrama potrošnje. Proizvodnja akumulacionih se deli na dva dela. Prvi deo predstavlja minimalna mesečna proizvodnja koja se određuje pomoću posebnog algoritma ili se ove vrednosti zadaju na bazi iskustva. Ostatak proizvodnje akumulacionih HE se raspodeljuje po mesecima tako da se teži izravnanju godišnjeg dijagrama opterećenja.

2.3. Proizvodnja termoagregata

Mesečni dijagrami potrošnje od kojih je oduzeta hidro proizvodnja se dalje pokrivaju proizvodnjom termoagregata. Raspoloživi termoagregati se angažuju po prioritetnoj listi, kao što je prikazano u [3]. Podaci od značaja za tretiranje termoagregata pri popunjavanju dijagrama potrošnje su: raspoloživost, proizvodna karakteristika, minimalna i maksimalna snaga i stopa zastoja. Stopa zastoja se određuje na osnovu stope prinudnih ispada i planiranog vremena trajanja remonata.

Na osnovu mesečnih dijagrama potrošnje od kojih je oduzeta hidro proizvodnja i zadatih trajanja remonata definiše se (simulira) globalni plan održavanja TA. Drugim rečima, definiše se ukupna snaga koja treba da bude u remontu u svakom mesecu. Zbog toga se prvo određuju potencijalne rezerve energije i snage u svakom mesecu ukoliko nema planskog održavanja. Zatim se određuje ukupni godišnji gubitak proizvodnje zbog neophodnog održavanja TA. Ova vrednost se dobija kao suma proizvoda stope prinudnih ispada, maksimalne snage TA i predviđenih dužina remonata. Ovako proračunato smanjenje proizvodnje se raspoređuje po mesecima specijalno razvijenim algoritmom kojim se maksimalno ujednačava preostala rezerva snage u svakom mesecu. U ovom postupku se vodi računa o ograničenju na maksimalno dozvoljenu snagu koja jednovremeno može biti u remontu.

Na osnovu ovako definisanih mesečnih gubitaka proizvodnje zbog održavanja i stope prinudnih ispada TA, definišu se ekvivalentne mesečne stope zastoja. Pri popunjavanju dnevnih dijagrama opterećenja maksimalne snage TA se množe sa pret-

hodno izračunatim ekvivalentnim mesečnim stopama zastoja.

3. PRIMENA PROGRAMSKOG PAKETA

Programski paket za simulaciju rada EES korišćen je pri izradi srednjoročnog plana razvoja EES EPS-a za period od 2001. do 2005. godine (za područje Srbije bez Kosova i Metohije). Za potrebe srednjoročnog plana izvršena je prognoza potrošnje, analizirani su mogući efekti racionalizacije potrošnje, a zatim i proizvodne mogućnosti elektran EPS-a.

3.1. Prognoza potrošnje bez racionalizacije

Inicijalna prognoza potrošnje je vršena uz pretpostavku da se zadrže dosadašnji trendovi, odnosno da neće biti primenjene mere za racionalizaciju potrošnje. S obzirom na različite karakteristike, ukupni bruto konzum je podeljen na tri dela: industrijski potrošači na visokom naponu (≥ 10 kV) koji su praktično sezonski ravnomerni, potrošači na niskom naponu koji su zbog grejanja izrazito sezonski neravnomerni i gubici energije u prenosu i distribuciji.

a) Industrijska potrošnja na 'visokom' naponu u periodu od 2001. do 2005. godine prognozirana je na osnovu pretpostavke da će oporavak industrije biti sličan oporavku iz perioda 1995-1998. godine. To znači da će posle intenzivnijeg rasta ove potrošnje u prvoj godini posle bombardovanja, u periodu od 2001. do 2005. godine doći do smanjenja godišnje stope rasta od 8 % do 4 %. Ako se primene ove pretpostavke, u 2005. godini industrijska potrošnja će dostići nivo iz perioda između 1991. i 1992. godine.

b) Potrošnja na niskom naponu je u periodu od 2001. do 2005. godine prognozirana na osnovu sledeće analize:

b1) Potrošnja na niskom naponu je u 1999. godini ostala na nivou potrošnje iz 1998. godine. Međutim, zbog ratnih dejstava u periodu od kraja marta do početka jula 1999. potrošnja je bila manja za oko 640 GWh nego u istom periodu prethodne godine. To znači da bi u 1999. godini, da nije bilo rata, potrošnja na niskom naponu porasla za oko 2,3 % u odnosu na 1998. godinu.

b2) Veće stope rasta potrošnje (preko 3%) sa kraja 1999. godine su posledica priliva stanovništva sa Kosova i Metohije, tako da nije realno očekivati da se održe i u narednom periodu.

b3) Stopa porasta potrošnje na niskom naponu je došla u zonu zasićenja tako da bi u narednom periodu morala da opada i da se zadrži na nekoj maloj vrednosti. Na ovakvo opadanje trenda porasta široke potrošnje ukazuje ponašanje potrošača u periodu 1997-1998. godine.

Zbog toga je pretpostavljeno da će u 2001. godini ova stopa porasta biti 1,5 %, u 2002. će pasti na 1 %, da bi od 2003. do 2005. dalje padala i imala vrednosti 0,7 %, 0,5 % i 0,3 %, respektivno.

c) Ako ne bude sistematskih pravnih i tehničkih mera za snižavanje gubitaka, isti će dalje rasti zbog nepovoljnijeg rada EES-a prouzrokovanog porastom potrošnje i sve većim uvozom energije iz okolnih sistema. Kod krajnjih potrošača se može očekivati sve veći procenat neovlašćenog priključenja mimo brojila, odnosno krađe električne energije. Zbog toga je za period 2001-2005. godina pretpostavljen porast gubitaka i to od 16,4 % do 16,8%.

Pri prognozi vršnog opterećenja izvršena je njegova podela na dve komponente. Deo vršnog opterećenja koji je posledica potrošnje na visokom naponu, određen je uz pretpostavku sezonski konstantnog rada industrije. Dakle, pretpostavljeno je da u periodu april-septembar industrija radi sa konstantnom snagom, a u periodu od oktobra jedne do marta sledeće godine sa nekom drugom konstantnom snagom. Druga komponenta, koja je posledica potrošnje na niskom naponu i gubitaka određena je na bazi prosečnih mesečnih faktora opterećenja, koji su dobijeni analizom ovog dela konzuma u periodu 1990-1998. godine. Sumiranjem vrednosti ove dve komponente je određena vršna snaga u sistemu.

Dobijeni rezultati prikazani su u narednoj tabeli:

Tabela 1.
Prognozirane godišnje energije i vršne snage bez efekata racionalizacija potrošnje

Godina	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.
Potrošnja na VN [GWh]	7 250	7 750	8 200	8 600	8 950
Potrošnja na NN [GWh]	19 950	20 150	20 300	20 400	20 450
Gubici [GWh]	5 350	5 500	5 650	5 800	5 950
Bruto konzum [GWh]	32 550	33 400	34 150	34 800	35 350
Vršna snaga [MW]	6 706	6 837	6 955	7 057	7 145

3.2. Racionalizacija potrošnje

Mere za racionalizaciju potrošnje električne energije treba da dovedu do racionalnijeg korišćenja električne energije, do smanjenja sezonske neravnomernosti, do smanjenja vršnog opterećenja i poboljšanja dnevnog dijagrama potrošnje. Mere za racionalizaciju potrošnje sistematizovane su u tri grupe:

a) Mere ekonomske prinude koje se ogledaju u postupnom povećanju cene električne energije i is-

pravljanje dispariteta cena osnovnih energenata uz primenu novog tarifnog sistema. Neophodno je da prosečna cena električne energije hitno dostigne nivo koji će omogućavati EPS-u da iz sopstvenih sredstava kvalitetno obavlja održavanje proizvodnih, prenosnih i distributivnih kapaciteta, a nešto kasnije i da delimično finansira revitalizaciju postrojenja i izgradnju prioritetnih objekata. Obezbeđivanjem odgovarajućeg nivoa cene, biće ublažen disparitet cena osnovnih energenata, pa će deo potrošača koji imaju izbora zameniti električnu energiju drugim energentom za grejanje. Uporedo sa postepenim povećanjem cena električne energije potrebno je uvesti novi tarifni sistem koji je svojim rešenjima primeren sadašnjem stanju u elektroenergetskom sistemu EPS-a. Osnovni cilj tarifnog sistema, kao što je pokazano u [1], je uticaj na racionalizaciju potrošnje električne energije. Zbog toga novi tarifni sistem favorizuje potrošače koji su ravnomerni tokom godine, a tarifni elementi su tako definisani da cena električne energije zavisi od načina i mesta na kome potrošač preuzima električnu energiju. Drugim rečima, novim tarifnim sistemom se obezbeđuje dodatno snažno korigovanje postojećih dispariteta cena energenata koji se koriste za grejanje.

Analizom potrošnje u poslednjoj deceniji može se zaključiti da je potrošnja za grejanje povećana za oko 2 000 GWh neto. Zato se primenom ovih mera može očekivati da će se potrošnja električne energije za grejanje smanjiti bar za 1 000 GWh, s tim što će se u 2001. godini efekti osetiti tek od oktobra i iznosiće oko 400 GWh neto.

b) Smanjenje gubitaka u sistemu će biti prirodna posledica smanjenja opterećenja u sistemu. Dalje smanjenje gubitaka će usloviti izgradnja prioritetnih objekata u prenosnoj i distributivnoj mreži, aktiviranje postojećih i ugradnja novih kompenzacionih uređaja. Promena pravne regulative će usloviti smanjenje krađe električne energije. Procenjeni efekat smanjenja gubitaka je takav da se umesto očekivanog porasta od 16,4 % u 2001. godini na 16,8 % u 2005. godini, pretpostavlja da će udeo gubitaka u ukupnoj godišnjoj energiji od 16,3 % u 2001. godini pasti na 15,9 % u 2005. godini.

c) Treća grupa mera za racionalizaciju je stimulisanje korišćenja energetski štedljivih uređaja. To znači da državnim merama, prvenstveno merama poreske i carinske politike, treba stimulisati potrošače da koriste uređaje koji su energetski manje zahtevni, a industriju treba stimulisati da se preorijentiše na proizvodnju takvih uređaja. To treba da bude dugoročna državna politika, dok u narednom petogodišnjem periodu EPS realno može da započne sa aktivnostima na zamenu postojećih inkandescentnih sijalica u domaćinstvima, energetski višestruko efikasnijim kompaktnim fluorescentnim

sijalicama. Predviđa se da ova akcija počne aprila meseca 2002. godine i da se tokom 5 narednih godina realizuje, što znači da maksimalni efekti budu dostignuti aprila 2007. godine. Na bazi ukupnog broja potrošača, faktora jednovremenosti i doba godine određena su ekvivalentna vremena korišćenja sijalica u svakom mesecu i očekivani maksimalni mesečni energetski efekti nakon uvođenja kompaktnih fluorescentnih sijalica u dnevne sobe svih potrošača (nakon 5 godina od početka akcije). Kao što je pokazano u [2], u pogledu vršne snage, puni efekti koji se dostižu aprila 2007. godine će iznositi oko 250 MW, dok će godišnja ušteda energije biti oko 630 GWh.

Prognoza potrošnje do 2005. godine uz uvažavanje efekata racionalizacije potrošnje prikazana je u narednoj tabeli:

Tabela 2.

Prognoza potrošnje u periodu 2001-2005. godine uz uvažavanje efekata racionalizacije potrošnje

Godina	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.
Potrošnja na VN [GWh]	7 250	7 750	8 200	8 600	8 950
Potrošnja na NN [GWh]	19 550	19 020	18 980	18 910	18 800
Gubici [GWh]	5 200	5 180	5 220	5 240	5 250
Bruto konzum [GWh]	32 000	31 950	32 400	32 750	33 000
Vršna snaga [MW]	6 398	6 279	6 325	6 351	6 368

3.3 Proizvodne mogućnosti

Proizvodne mogućnosti EPS-a su analizirane posebno za hidroelektrane i posebno za termoelektrane. Pretpostavljeno je da u narednom periodu neće doći do značajnijih promena u radu hidroelektrana u odnosu na dosadašnji period. Proizvodnja hidroelektrana varirana je od 8 000 do 13 000 GWh godišnje, sa korakom od 1 000 GWh, tako da je razmatrano 6 hidroloških scenarija. Pretpostavljena godišnja proizvodnja deli se na protočni (83 %) i akumulacioni deo (17 %). U ovu proizvodnju je uračunata i proizvodnja HE Piva, zbog čega su predviđene odgovarajuće isporuke energije Crnoj Gori. Proizvodnja RHE Bajina Bašta se posebno tretira i naknadno se dodaje na pretpostavljenu godišnju hidro proizvodnju. Istovremeno noćna potrošnja sa uvećava za iznos potrebne energije pumpanja. Pretpostavljeno je da će HE Đerdap 1 u periodu 2003 - 2008. godine, zbog revitalizacije raditi sa jednim agregatom manje. U 2001. godini se takođe planira smanjena proizvodnja akumulacionih

HE za 360 GWh, zbog stanja akumulacionih jezera na kraju 2000. godine.

Proizvodne mogućnosti termoelektrana su razmatrane u dve različite varijante. U prvoj se pretpostavlja nastavak neadekvatnog održavanja i dalje odlaganje planiranih velikih remonata i revitalizacije postojećih proizvodnih kapaciteta. U drugoj varijanti se predviđa poboljšano, tehnički korektno, a ekonomski opravdano održavanje, sprovođenje revitalizacija i dovođenje objekta na projektovane karakteristike.

Ekvivalentne stope prinudnih ispada za ove dve varijante date su u tabeli 3.

Tabela 3.

Stope prinudnih ispada termoagregata na uglj

Stopa prinudnih ispada (%)	Godina	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.
	Varijanta 1	30,0	31,5	33,0	34,5	36,0
	Varijanta 2	28,0	24,5	23,0	22,0	21,0

Pri određivanju očekivanih deficita postavlja se pitanje kakav se rad naših termoelektrana-toplana (TE-TO), koje koriste gas kao energent, može očekivati u narednom periodu? U prethodnim godinama njihov rad nije bio moguć u punom obimu zbog nedostatka gasa. Zato su u analizi rezultata prikazani deficiti u energiji i snazi u dve varijante. U prvoj varijanti je pretpostavljeno da TE-TO tokom grejne sezone (6 meseci) mogu da rade punim kapacitetom po 16 sati dnevno. Energetski, to je ekvivalentno njihovom četvoromesečnom konstantnom angažovanju. U drugoj varijanti je pretpostavljeno da su TE-TO neraspoložive zbog nedostatka gasa tokom cele godine.

4. ANALIZA REZULTATA

Simulacija rada EES EPS-a u periodu od 2001. do 2005. godine urađena je za dva različita scenarija.

U prvom je pretpostavljen nastavak dosadašnjih negativnih trendova u potrošnji električne energije i održavanju elektroenergetskih objekata. Drugim rečima, korišćena je prognoza potrošnje prikazana u tabeli 1, stope prinudnih ispada prikazane kao varijanta 1 u tabeli 3, a pretpostavljano vreme planskih zastoja zbog remonata je 60 dana godišnje za svaki agregat. Duži zastoji zbog kapitalnih remonata i revitalizacija nisu predviđeni.

Drugi scenario predviđa racionalizaciju potrošnje električne energije, odnosno ukupnu potrošnju u EES-u datu u tabeli 2. Osim toga, ovaj scenario podrazumeva poboljšano održavanje i izvršavanje najkritičnijih revitalizacija, odnosno planske zastoj prikazane u tabeli 4. Zbog takvog održavanja korišćene su manje stope prinudnih ispada u ovom scenariju, prikazane kao varijanta 2 u tabeli 3.

Tabela 4.

Trajanje remonata i revitalizacija termoagregata u periodu 2001 – 2005. godina

	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.
TE N. Tesla A1	65	60	365	60	60
TE N. Tesla A2	65	60	60	366	60
TE N. Tesla A3	150	60	60	60	60
TE N. Tesla A4	35	60	90	60	60
TE N. Tesla A5	35	60	60	90	60
TE N. Tesla A6	35	60	60	60	90
TE N. Tesla B1	75	60	60	60	90
TE N. Tesla B2	60	75	60	60	60
TE Kostolac A1	180	365	60	60	60
TE Kostolac A2	92	60	60	60	90
TE Kostolac B1	60	120	60	60	60
TE Kostolac B2	60	120	60	60	60
TE Kolubara 1	75	60	60	60	60
TE Kolubara 2	181	60	60	60	60
TE Kolubara 3	75	60	60	60	60
TE Kolubara 4	60	90	60	60	60
TE Kolubara 5	270	60	60	60	60
TE Morava	60	60	60	60	180

U tabeli 5 su prikazani deficiti koji se dobijaju uz pretpostavku da su TE-TO raspoložive i da goriva za njihovo korišćenje ima dovoljno četiri meseca godišnje. U tabeli 6 su prikazani deficiti uz pretpostavku da su TE-TO tokom cele godine neraspoložive zbog nedostatka gasa.

Tabela 5.

Godišnji deficiti električne energije i snage sa angažovanjem TE-TO

	DEFICIT	GODINA					
		2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	
Scen. 1.	W (GWh)	3 586	3 717	4 867	5 888	6 921	24 979
	P (MW)	828	1 010	1 169	1 361	1 478	
Scen. 2.	W (GWh)	3 386	1 578	1 534	1 533	1 258	9 289
	P (MW)	668	406	425	418	357	
Razlika	W (GWh)	200	2 139	3 333	4 355	5 663	15 690
	P (MW)	160	604	744	943	1 121	

Tabela 6.

Godišnji deficiti električne energije i snage bez angažovanja TE-TO

	DEFICIT	GODINA					
		2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	
Scen. 1.	W (GWh)	4 369	4 493	5 639	6 645	7 672	28 818
	P (MW)	1 117	1 306	1 459	1 645	1 755	
Scen. 2.	W (GWh)	4 196	2 411	2 362	2 363	2 084	13 416
	P (MW)	790	569	608	622	571	
Razlika	W (GWh)	173	2 082	3 277	4 282	5 588	1 5402
	P (MW)	327	737	851	1 023	1 184	

Rezultati prikazani u gornje dve tabele pokazuju da nastavljanje dosadašnjih trendova u proizvodnji i potrošnji dovodi do zastrašujućih nedostataka i u energiji i u snazi (scenario 1). U 2005. godini očekuje se manjak energije između 6 900 i 7 700 G Wh i manjak snage između 1 450 i 1 750 MW, zavisno od toga da li ima gasa za rad TE-TO ili ne. Ako bi se sva nedostajuća količina energije u ovom periodu nabavljala kupovinom, po prosečnoj ceni od samo 3 c/kWh, bilo bi potrebno obezbediti između 749 i 864 miliona USD, zavisno od stepena angažovanja TE-TO (za koje takođe treba obezbediti sredstva za kupovinu gasa).

Rezultati iz prethodnih tabela takođe pokazuju da u svim godinama racionalizacija potrošnje i tehnički korektno održavanje dovode do značajnog smanjenja deficita i energije i snage. Najmanji efekti se mogu očekivati u 2001. godini. Prvi razlog tome je potreba da se u ovoj godini neodložno uradi veliki broj remonata koji su zbog stanja kapaciteta neophodni. Produženi remontni uslovljavaju pojavu većeg manjka u energiji tokom letnjeg perioda (u vreme intenzivnih remonata). Drugi razlog je što se efekti primene novog tarifnog sistema mogu očekivati tek u narednoj zimskoj sezoni. Zbog toga se deficit energije u poslednja tri meseca 2001. godine značajno smanjuje.

Prema tome, sistematska racionalizacija potrošnje i adekvatno ulaganje u održavanje postojećih proizvodnih kapaciteta mogu smanjiti potrebu za uvozom energije u narednom petogodišnjem periodu čak za 15 500 GWh. Samo u 2005. godini smanjenje deficita iznosi oko 5 600 GWh energije i 1 150 MW vršne snage. To su efekti približni efektima rada cele TE "Nikola Tesla B". Autori rada smatraju da su sve aktivnosti koje vode ovakvim uštedama snage i energije, odnosno smanjenju uvoza i/ili odlaganju izgradnje novih velikih kapaciteta, od prvorazrednog značaja za EPS.

Sa druge strane očigledno je da se, uprkos merama za racionalizaciju potrošnje i poboljšanom održavanju, u narednom periodu ipak mogu očekivati sistematski deficiti snage i energije. Brojne simulacije rada EES EPS-a pokazuju da se ovi deficiti mogu očekivati tokom cele godine, a ne samo u zimskom periodu. To ukazuje na potrebu hitne izgradnje nove bazne elektrane, a upravo takva je već davno započeta TE Kolubara B.

Na žalost, čak i ako se vrlo brzo zatvori finansijska konstrukcija i nađe adekvatan partner za nastavak izgradnje ove elektrane, ne može se očekivati da prvi agregat u TE Kolubara B bude pušten u pogon pre kraja 2004. godine. Drugim rečima, prvo poboljšanje elektroenergetskih prilika zbog izgradnje TE Kolubara B može nastupiti tek u 2005. godini, a puni efekti mogu se očekivati tek u periodu 2006 – 2010. godine. Zbog toga najveći deo radova na revitalizaciji objekata treba planirati u tom periodu.

Dakle, puštanjem u pogon prvog agregata u TE Kolubara B (350 MW) i njegovim angažovanjem tokom 2005. godine, očekivani deficiti energije i snage se svode na 205 GWh i 124 MW. Ovi deficiti se pojavljuju samo tokom zime, dok se tokom leta pojavljuje raspoloživ višak bazne energije od 773 GWh. To daje realne mogućnosti da se izvrši razmena dela letnje energije za potrebnu zimsku i time bez direktnog uvoza uravnoteži elektro-energetski bilans. Ako se ova razmena energije izvrši sa koeficijentom 1,4, odnosno ako se u razmeni daje 40 % više letnje energije nego što se dobija zimske, još uvek će preostati 486 G Wh letnje energije za izvoz.

Ovde, međutim treba naglasiti da se u ovoj analizi radi o očekivanim prilikama u sistemu. Drugim rečima, klimatski osetljiva komponenta potrošnje je svedena na prosečne 100-godišnje temperature, a proizvodnja hidroelektrana je takođe varirana oko prosečne vrednosti. To znači da hladnija zima i/ili sušna godina, dovode do većih deficita energije nego što su iskazani.

Da bi se obezbedila sigurnost u snabdevanju potrošača električnom energijom, planiranje razvoja treba vršiti za nešto otežanije temperaturne i/ili hidrološke uslove. Na žalost, ne postoje objek-

tivne mogućnosti da se unapredi sigurnost napajanja potrošača u narednom srednjoročnom periodu. Kao što rezultati pokazuju, tek 2005. godine se može očekivati da, u prosečnim uslovima, podmirimo potrebe potrošača za električnom energijom iz sopstvenih izvora. Smanjenje osetljivosti EES EPS-a u odnosu na pogoršane hidrometeorološke uslove može se obezbediti tek nakon 2005. godine, ako se, uz racionalizaciju potrošnje, poboljšano održavanje i revitalizaciju postojećih objekata, realizuju i sledeće razvojne i investicione aktivnosti:

- 1. Izvrši uvođenje Toplodolske reke u akumulaciju HE Piroto do 2004. godine.
- 2. Pusti u pogon prvi agregat u TE Kolubara B do 2005. godine.
- 3. Pusti u pogon drugi agregat u TE Kolubara B do 2006. godine.
- 4. Pusti u pogon HE Brodarevo do 2008. godine.
- 5. Puste u pogon HE Ribarići, HE Bovan i HE Čelije do 2009. godine.

Ako se sve ove aktivnosti budu realizovale predviđenom dinamikom, EES EPS-a će u periodu 2006 – 2010. godina, iz sopstvenih izvora moći da podmiri potrebe potrošača i pri hidro proizvodnji koja odgovara 70 % verovatnoći pojave dotoka.

5. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati sveobuhvatne analize, bazirane na simulacijama rada EES EPS-a u cilju definisanja novog srednjoročnog plana razvoja. Prezentirani rezultati pokazuju da nastavljanje dosadašnjih trendova u potrošnji i proizvodnji vodi ka ogromnim (sve većim) deficitima snage i energije. U tom slučaju bi tokom cele godine bio potreban uvoz električne energije, dok bi u zimskom

periodu sigurno bile neophodne i redukcije potrošnje.

Da bi se predupredio ovako nepovoljan razvoj događaja neophodno je odmah početi primenu mera za racionalizaciju potrošnje i povećati cene električne energije do nivoa potrebnog za korektno sprovođenje remonata. Prvi značajni rezultati u smanjenju deficita snage i energije postigli bi se već 2002. godine. Potpuno eliminisanje deficita nije realno očekivati pre 2005. godine, odnosno pre nego što prvi agregat u TE Kolubara B bude pušten u pogon.

Prema tome, racionalizacija potrošnje, bolje održavanje i revitalizacija postojećih objekata i izgradnja TE Kolubara B mogu se označiti kao apsolutni prioriteti predstojećeg perioda.

6. LITERATURA

- [1] S. Ružić: TARIFNI SISTEM KAO SREDSTVO ZA INDIREKTNO UPRAVLJANJE POTROŠNJOM ELEKTRIČNE ENERGIJE, ENYU '99, Energija, ekonomija, ekologija, Broj 1, Mart 1999., strana 314-320.
- [2] S. Ružić, Lj. Mačić, Č. Dobrijević: FLUORESCENTNE SVETILJKE – ZNAČAJNA MOGUĆNOST ZA RACIONALIZACIJU POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE, ENYU ž00, Energija, ekonomija, ekologija, Broj 1-2, Mart 2000., strana 158.-165.
- [3] N. Nikolić, S. Ružić, A. Vučković, ODREĐIVANJE KRIVE TROŠKOVA PUMPANJA U PROCEDURI DUGOROČNOG PLANIRANJA RADA AKUMULACIONIH HIDROPOSTROJENJA, 10. simpozijum Juko Cigre žUpravljanje i telekomunikacije u elektroenergetskom sistemuž, Herceg Novi 22-25. maj 2000, III&V.11.

Rad je primljen u uredništvo 11. 10. 2001. godine