



Elektroprivreda

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

Godina LV Jul-Septembar Broj 3
Year Year July-September No.

Sadržaj	Strana Page	Content
<i>Dragan P. Popović</i>		
GENERALIZOVANI MODEL UČEŠĆA GENERATORA U PRORAČUNIMA PRENOSNIH MOGUĆNOSTI ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA	3	GENERALIZED MODEL OF GENERATOR PARTICIPATION IN TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENTS OF ELECTRIC POWER INTERCONNECTION
<i>Branko Milosavljević</i>		
UTVRĐIVANJE PARAMETARA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA I NJIHOVIH STEPENA NESIMETRIJE	13	DETERMINATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF POWER TRANSFORMERS AND THEIR DEGREES OF UNSYMMETRY
<i>Vladica Mijailović</i>		
ODRŽAVANJE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA – pogonska iskustva –	18	POWER TRANSFORMERS MAINTENANCE - operational experiences
<i>Aleksandar R. Katančević</i>		
POREĐENJE MODELA FARME VETROGENERATORA NA BAZI ANALIZE PRELAZNIH STANJA	24	WIND FARM'S MODEL COMPARISON ON THE BASIS OF ANALYSES OF TRANSIENT STATES
<i>Vladimir I. Balkovoj i Miomir M. Dutina</i>		
TERMIČKA NAPREZANJA OPGW PRI ZEMLJOSPOJU U PRENOSNIM MREŽAMA ELEKTROPRIVREDE SRBIJE	31	OPGW TEMPERATURE RISE DURING GROUND FAULTS IN THE TRANSMISSION SYSTEM OF EPS
<i>Duško Bekut, Borislav Mihić i Zoran Grahovac</i>		
PRORAČUNI REŽIMA SA KRATKIM SPOJEVIMA/PREKIDIMA U RADIJALNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA	47	ANALYSIS OF SHORT CIRCUITS/PHASE INTERRUPTIONS IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS
<i>Dragan Tasić, Miodrag Stojanović</i>		
FAZI („FUZZY“) PRISTUPI PRORAČUNU GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA	59	FUZZY APPROACHES TO DISTRIBUTION ENERGY LOSSES CALCULATION
<i>Tomislav Milanov</i>		
PROSTORNE PROGNOZE VRŠNOG OPTEREĆENJA TS VN/SN I MIKROREONA NA KONZUMU JP „ELEKTRODISTRIBUCIJA – BEOGRAD“	68	SPACE FORECASTS OF PEAK LOAD OF HIGH VOLTAGE SUBSTATIONS AND MICROREGION IN THE NETWORK OF PUBLIC ENTERPRISE ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD
<i>Mirjana Stojanović</i>		
NOVI PRISTUP PROJEKTOVANJU ELEKTROPRIVREDNIH TELEKOMUNIKACIONIH MREŽA	74	A NOVEL APPROACH TO DESIGN OF TELECOMMUNICATION NETWORKS IN THE POWER UTILITIES
<i>Dardan Klimenta</i>		
NESTACIONARNA STANJA ZAGREVANJA/HLAĐENJA IZOLACIJE PODZEMNIH KABLOVSKIH VODOVA	87	UN-STATIONARY HEATING/COOLING STATES OF CABLE INSULATION IN UNDERGROUND LINES
<i>Prikaz knjiga autor Miroslava Markovića</i>		
PRIVATNO FINANSIRANJE ENERGETSKIH PROJEKATA	95	PRIVATE FINANCING OF ENERGY PROJECTS
<i>by Miroslav Marković</i>		
DEREGULACIJE TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE	96	UNBUNDLING OF THE ELECTRICITY MARKET
<i>by Branka Stojković i Vesna Stojković</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

Elektronske prezentacije: www.jugel.co.yu; www.eps.co.yu; www.epcg.cg.yu; Elektronska pošta: jugel@sezampro.yu

DIREKTOR I GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK
DIRECTOR AND CHIEF EDITOR

Branislav A. Bošković, dipl. ing.

IZDAVAČKI SAVET
PUBLISHING COUNCIL

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

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

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

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

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

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

REDAKCIONI ODBOR
EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

TEHNIČKI UREDNIK
TECHNICAL EDITOR

Jovo Todorović dipl. teh.

LEKTOR

LINGUISTIC REVIEW

Lela Lončar, dipl. filolog

TEHNIČKI CRTAČ

MAPS AND GRAPHICS

Milanka Pejović,

teh. crtač

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

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

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

Štampa: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

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

Tiraž: 1 000 primeraka

Circulation: 1,000 copies

Dragan P. Popović

Generalizovani model učešća generatora u proračunima prenosnih mogućnosti elektroenergetskih interkonekcija

Originalni naučni rad
UDK: 621.3.05; 621.313.52

Rezime:

U radu se izlažu različiti modeli angažovanja generatora tokom proračuna graničnih prenosnih mogućnosti elektroenergetskih interkonekcija. Evaluacija ovih modela je izvršena na primerima automatizovanog proračuna graničnih prenosnih mogućnosti u okviru druge UCTE sinhronne zone. Ona je omogućila izbor generalne forme modela učešća generatora, koja je najpovoljnija sa aspekta realne pogonske prakse u novim uslovima liberalizovanog tržišta električne energije.

Ključne reči: generator, generalizovani model, učešće, prenosne mogućnosti, automatizacija proračuna, druga UCTE sinhrona zona

Abstract:

**GENERALIZED MODEL OF GENERATOR PARTICIPATION
IN TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENTS OF ELECTRIC POWER INTERCONNECTION**

The paper deals with different generator participation models during the transmission capacity assessments of electric power interconnection. Evaluation of these models is made on the example of automatic cross-border transmission capacity calculation in the condition of the second UCTE synchronous zone. This evaluation enabled the choice of the general form of participation model, which is the most convenient one regarding the real operational practice in new conditions of liberalized electricity markets.

Key words: generator, generalized model, participation, transmission capacity, automatic calculation, second UCTE synchronous zone

1. UVOD

Široj javnosti, i to ne samo stručnoj, već su dobro poznati relevantni sadržaji i izazovi vezani za procese liberalizacije tržišta električne energije i restrukturiranja elektroprivrednih kompanija. O tome najbolje govori izuzetno veliki broj urađenih studija i publikovanih radova, naročito poslednjih godina, a koje nije moguće citirati u raspoloživom prostoru ovoga rada. Oni su se bavili veoma širokim spektrom

novih metodoloških i praktičnih aspekata koje je unela ova problematika, a naročito u kontekstu novih zahteva i izazova u planiranju, eksploataciji i upravljanju EES-a. Pomenute činjenice autorima novih radova iz ove oblasti znatno olakšavaju pisanje uvodnih delova, omogućujući im da se neposredno koncentrišu na osnovni cilj i sadržaj samoga rada.

Ovaj rad bavi se jednim veoma značajnim segmentom proračuna graničnih prenosnih mogućnosti elektroenergetskih interkonekcija (u daljem tekstu

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

za ovaj pojam koristiće se oznaka NTC (Net Transfer Capacity)[1]). Taj segment se odnosi na izbor generatora i sam način njihovog angažovanja tokom odvijanja ovih proračuna. Njegovo pisanje podstaknuto je studijom koja se radi za potrebe Elektroprivrede Srbije (EPS), čiji je naziv „Razvoj i praktična primena računarskog programa za automatizovan proračun prenosnih mogućnosti elektroenergetskih interkonekcija”. Imajući u vidu nespornu činjenicu da na rezultate proračuna NTC-a veliki i neposredni uticaj imaju, kako način izbora generatora i njihovih prioriteta, odnosno redosleda njihovog angažovanja, tako i sam način njihovog učešća u izabranom diskretnom koraku promene totala razmene između EES-a od interesa, tom pitanju morala je da se posveti posebna pažnja u realizaciji pomenute studije, odnosno odgovarajućeg računarskog programa. Takođe, pri tome imala se i u vidu zahtevana visoka tačnost proračuna NTC-a, kada se oni rade za kraće vremenske horizonte (na primer, na nedeljnom nivou, a posebno za dan unapred - Day Ahead [2]).

U ovom radu najpre se u kraćim crtama daju globalni aspekti proračuna prenosnih kapaciteta, koji u potpunosti respektuju aktuelnu praksu, zahteve i standarde ETSO (European Transmission System Operators)[1,2,3].

Zatim, daje se prikaz modela učešća generatora tokom proračuna NTC-a, uobičajeno korišćenih od strane ETSO [2], kao i prikaz drugih mogućih modela učešća.

Dalje, izvršena je evaluacija navedenih modela na primeru proračuna NTC-a u okviru realne interkonekcije, odnosno druge UCTE sinhronne zone.

Sprovedena evaluacija je omogućila formiranje takvog modela učešća generatora, (a koji je nastao kao rezultat saradnje Naručioaca (EPS) i Odrađivača (Institut „Nikola Tesla”) prethodno pomenute studije), čija generalna forma omogućuje jednostavno modelovanje niza prethodno prikazanih modela i njihovih kombinacija. Ujedno, karakteristike predloženog modela obezbeđuju da se na veoma jednostavan način mogu da „preslikaju” različite pogonske situacije, vezane za uobičajene „vozne redove” izvora u uslovima otvorenog tržišta električne energije. Time rezultati proračuna NTC-a dobijaju na željenoj tačnosti.

Ovaj razvijeni generalizovani model je inkorporiran u programsku celinu za automatski proračun NTC-a, čime je, uz pomenutu visoku realnost i tačnost dobijenih rezultata, omogućena i velika brzina i efikasnost njihovog odvijanja.

2. GLOBALNI ASPEKTI PRORAČUNA PRENOSNIH KAPACITETA

U ovom poglavlju, kao što je to već bilo rečeno u uvodnom izlaganju, u najkraćim crtama biće reći

samo o globalnim aspektima proračuna prenosnih mogućnosti elektroenergetskih interkonekcija, saglasno aktuelnoj praksi asocijacije ETSO, uz napomenu da se relevantni aspekti ove problematike mogu da nađu i u referencama [1–6].

U cilju upoznavanja samo sa globalnim aspektima proračuna NTC-a, poslužiće Prilog ovoga rada, iz koga mogu da se jasno uoče mesto, uloga, značaj i funkcija ključne preokupacije ovoga rada *učešće generatora tokom proračuna NTC-a*.

U pomenutom Prilogu daje se blok dijagram toka proračuna NTC-a između EES-a **A** i **B**, u slučaju da proračun vrši TSO (Transmission System Operator) EES-a **A**, saglasno praksi ETSO, uz napomenu da je ovaj blok dijagram direktno preuzet iz dokumenta [2].

Proračun startuje od uzajamno usaglašenog polaznog stacionarnog stanja (tzv. baznog stanja), odnosno od proračuna tokova snaga u stanju u kome može da postoji i odgovarajuća razmena između sistema od interesa (BCE = Base Case Exchange).

Zatim, za izabrani diskretni korak promene razmene (uobičajena vrednost ovoga koraka iznosi 50 MW), vrši se korekcija snaga generatora za taj iznos. U sistemu koji izvozi (**A**), vrši se povećanje, a u sistemu koji uvozi (**B**), smanjenje snage generatora. Proračun NTC-a se nastavlja sve dok ne nastupi jedna od sledećih situacija :

- Narušen kriterijum sigurnosti u EES **A**;
- Narušen kriterijum sigurnosti u EES **B**, koji je to i potvrdio;
- Iscrpljene mogućnosti za dalje „podizanje” snage u EES **A**.

Tada se smatra da je već dostignut granični prenosni kapacitet za razmatrano stanje EES-a **A** i **B**. Reč je o veličini ukupnog prenosnog kapaciteta TTC (Total Transfer Capacity), koja se izražava na sledeći način [2]:

$$TTC = BCE + DE = NTC + TRM \quad (1)$$

Veličina **DE** predstavlja iznos ukupne dodatne razmene (u odnosu na razmenu u baznom stanju BCE, ako je ona postojala), koja još uvek nije ugrozila zadate kriterijume sigurnosti. Dakle, ova dodatna razmena **DE** brojno je jednaka iznosu realizovane ukupne korekcije snaga generatora (u EES koji izvozi, to je povećanje snage, a u EES koji uvozi, to je smanjenje snage), odnosno reč je o prethodno uvedenom pojmu - *participacija generatora tokom proračuna NTC-a*.

Dalje, po kvantifikaciji granice pouzdanosti prenosa TRM (Transmission Reliability Margin [1,2]), što inače spada u jedan od najdelikatnijih segmenata proračuna NTC-a, dolazi se, saglasno relaciji (1), do traženog iznosa neto prenosnog kapaciteta NTC-a, na sledeći, evidentan način:

$$NTC = BCE + DE - TRM \quad (2)$$

Dakle, jedno od suštinskih pitanja vezanih za proračun NTC-a je **kako izvršiti adekvatan izbor kako samih generatora, tako i redosleda i načina njihove učešća u usvojenom diskretnom koraku promene razmene**, što je i glavna preokupacija ovoga rada. Pri tome ne treba posebno da se naglašava opšte poznata činjenica o velikom i neposrednom uticaju ovoga izbora na tokove snaga, odnosno na granične vrednosti prenosnih kapaciteta, koji se utvrđuju. Naredna poglavlja bave se ovim pitanjem.

3. MODELI UČEŠĆA GENERATORA U PRORAČUNIMA PRENOSNIH KAPACITETA

U referenci [2] navode se modeli učešća (povećanje/smanjenje snage) generatora tokom proračuna NTC-a koji se preporučuju, odnosno primenjuju u praksi ETSO. Ti modeli su sledeći :

- Proporcionalno povećanje/smanjenje snage. (Na primer, faktor na bazi koga se vrši distribucija povećanja/smanjenja snaga generatora u posmatranom EES (ili regulacionoj oblasti), određuje se na bazi odnosa snage angažovanja pojedinog generatora u tzv. baznom stanju i ukupne snage angažovanja generatora u posmatranom EES) (**model a**);
- Povećanje/smanjenje snage na bazi prethodno utvrđenih pravila ponašanja generatora. (Na primer, faktor preko koga se vrši distribucija povećanja/smanjenja snage u posmatranoj regulacionoj oblasti uzima u obzir uobičajeni model „odziva” generatora, za različite nivoe potrošnje (**model b**);
- Povećanje/smanjenje snaga na bazi opšte poznatih vrednosnih pravila („merit order”[2]). Na primer, kad god se primenjuje ekonomski dispečing, povećanje/smanjenje snaga generatora bi trebalo da se odvija saglasno utvrđenim vrednosnim pravilima (**model c**).

Naravno, u svim ovim prilazima neophodno je da se striktno respektuju pogonsko-tehnička ograničenja za svaki generator, kao i njihovi odgovarajući tehnički limiti (maksimalna/minimalna snaga, optimalno korišćenje elektrane, saglasno raspoloživosti vode ili uglja). Ujedno, potrebno je napomenuti da je izbor jedne od pomenutih mogućnosti ili njihovih kombinacija u domenu odgovornosti svakog TSO koji učestvuje u proračunu NTC-a, ali uz obavezu davanja potrebnog objašnjenja drugim TSO.

Uz prethodno date modele učešća generatora, uvršćeni su i sledeći modeli, za koje takođe važe pomenuta pogonsko-tehnička ograničenja:

- Povećanje/smanjenje snage proporcionalno nominalnim prividnim snagama generatora koji učestvuju u proračunu NTC-a (**model d**);

- Povećanje/smanjenje snage proporcionalno unapred datim participacionim faktorima (**model e**);
- Povećanje/smanjenje snage proporcionalno aktuelnim vrednostima rotacione rezerve generatora koji učestvuju u proračunu NTC-a (**model f**);

U svim prethodno pomenutim **modelima** učešća ((a)-(f)), naponske reference generatora ostaju nepromenjene tokom proračuna NTC-a, odnosno zadržavaju se njihove vrednosti iz polaznog tzv. baznog stanja.

4. EVALUACIJA PRIKAZANIH MODELA NA PRIMERU DRUGE UCTE SINHRONE ZONE

Evaluacija prethodno izloženih modela učešća generatora izvršena je na primerima proračuna NTC-a u okviru realne elektroenergetske interkonekcije na prostorima Balkana, koju sačinjavaju EES Srbije i Crne Gore, dela Republike Srpske, Rumunije, Bugarske, Makedonije, Grčke i Albanije (druga UCTE sinhrona zona). Modelovane su kompletne mreže 400 i 220 kV u svim pomenutim EES, osim u EES Grčke, gde su kompletno modelovane mreže 400 i 150 kV samo u njegovom severnom delu (a ostatak je predstavljen preko ekvivalenata Wardovog tipa, dobijenog od grčke elektroprivrede).

Proračuni su vršeni unapređenom verzijom računarskog programa **STATIC** (u kojoj je omogućen *automatizovan proračun prenosnih mogućnosti*), realizovanoj tokom rada na studiji, pomenutoj u uvodu ovoga rada.

Inače, osnovni metodološki i praktični aspekti analiza statičke sigurnosti već su detaljno bili izloženi u studiji [7] (njenom aneksu [8]) i korisničkom uputstvu [9], a dalja unapređenja ove metodologije i računarskog programa, u studiji [10]. Takođe, relevantni metodološki i praktični aspekti razvijene metodologije bili su predmet pažnje radova [11–13], a njena dalja unapređenja, predmet pažnje radova [14,15].

Ova unapređena verzija programa **STATIC**, koja vrši automatizovani proračun NTC-a, pruža korisniku sledeće četiri opcije primene:

- Prognoza zagušenja (congestion forecast) **I** - određivanje samo tokova snaga u tzv. baznom stanju (uz veoma široku dijagnostiku vezanu za tačnost i harmonizaciju relevantnih ulaznih podataka);
- Prognoza zagušenja **II** - određivanje tokova snaga u tzv. baznom stanju i obavljanje analiza sigurnosti za to stanje;
- Automatizovani proračun NTC-a, za fazu planiranja-„planning” (na godišnjem nivou);
- Automatizovani proračun NTC-a, za fazu dodeljenog kapaciteta-„allocated” (na mesečnom, sedmičnom i dnevnom nivou).

Dalje, postoje sledeće opcije izbora, odnosno formiranja liste poremećaja, za potrebe analiza sigurnosti :

- Samo ispadi generatora;
- Samo ispadi elemenata (transformatora i dalekovoda);
- Kombinovani ispadi (generatora i elemenata);
- Automatsko formiranje liste poremećaja, i to u sistemima od interesa (odnosno u sistemima između kojih se određuje NTC);
- Simultana promena ukupne snage potrošača u razmatranoj interkonekciji.

Zatim, postoje sledeće dve opcije za izbor referentnog stanja, od koga startuje automatizovan proračun NTC-a:

- Prva opcija se odnosi na stanje bez međusobnih razmena u baznom stanju;
- Druga opcija, kada te razmene postoje, odnosno kada se one specificiraju u okviru ulaznih podataka (već pomenuta BCE - razmena u baznom stanju).

Potrebno je napomenuti da će mnogo više detalja o svim relevantnim aspektima automatizovanog proračuna NTC-a biti dato u posebnim radovima, koji su u pripremi, a u kojima će to biti ključna preokupacija. U ovom radu je navedeno, u kraćim crtama, samo ono što je relevantno da se, u okviru velike i sadržajne celine koju čini proračun NTC-a, jasnije sagledaju mesto, uloga i značaj u njemu tretirane problematike, vezane za participaciju generatora tokom ovih proračuna.

Sprovedeni proračuni NTC-a u okviru druge UCTE sinhronne zone su pokazali najpre da modeli učešća generatora, koji ne vode računa o realnim pojedinačnim mogućnostima generatora u EES koji izvozi (naravno, reč je o aktuelnim veličinama rotacione rezerve), nemaju potrebnu fleksibilnost koju zahtevaju ovi proračuni. To se u prvom redu odnosi na **modele a i d**.

U **modelu a** participacioni factor je srazmeran učešću toga generatora u ukupnoj proizvodnji posmatrane regulacione oblasti. Dakle, u njegovom koncipiranju ne vodi se računa o raspoloživoj rotacionoj rezervi. Stoga nisu bili retki slučajevi u praksi, da se proračun NTC-a zaustavlja (nepotrebno), jer u datom diskretnom koraku promene razmene nema potrebne snage u pojedinim generatorima, saglasno kriterijumu učešća. To je neposredna posledica činjenice da generatori koji su najviše učestvovali u proizvodnji u polaznom, tzv. baznom stanju (a time sveli rotacionu rezervu na skromniji nivo) nemaju više mogućnosti za dalje povećanje snage, koliko je to zahtevala relativno visoka vrednost njima dodeljenog participacionog faktora. Prethodno izneto, neposredno sledi iz iskustava, stečenih kod konkretnih

proračuna NTC-a na pomenutom praktičnom primeru druge UCTE sinhronne zone.

Slično je i sa **modelom d** (participacija srazmerna nominalnoj prividnoj snazi generatora, a da se pri tome nije vodilo računa o aktuelnoj rotacionoj rezervi). I tada nisu bili retki slučajevi da se proračun NTC-a zaustavlja (takođe nepotrebno, jer u EES koji izvozi, gledano u celini, ima još rezerve snage na raspolaganju). Dakle, i u ovom slučaju to je posledica nedostatka potrebne snage u onim generatorima, koji su zbog svoje relativno velike prividne snage, dakle i visoke vrednosti participacionog faktora (a imali su srazmerno malu rotacionu rezervu), morali da daju više snage nego što su mogli.

Za razliku od **modela a i d**, kod kojih se participacioni faktori sračunavaju na jasan, odnosno eksplicitan način, u **modelima b, c i e**, ovi faktori se formiraju na posredan način, uglavnom empirijski. Oni mogu da budu dovoljno fleksibilni sa aspekta potreba efikasnog proračuna NTC-a (i to ne samo automatizovanog), samo ukoliko se pri njihovom formiranju u velikoj meri respektuje i aktuelna rotaciona rezerva generatora. Međutim, to unosi odgovarajuće praktične poteškoće kod njihovog formiranja, svojstvene kod svih modela koji su bazirani na multi-kriterijumskom prilazu. To su nedvosmisleno potvrdili konkretni proračuni NTC-a na primeru druge UCTE sinhronne zone.

Takođe, ovi proračuni su pokazali da ubedljivo najveću jednostavnost, fleksibilnost, dakle i efikasnost ima model učešća f (povećanje/smanjenje snage proporcionalno aktuelnim vrednostima rotacione rezerve generatora koji učestvuju u proračunu NTC-a). To i ne iznenađuje, jer u ovom modelu participacija pojedinog generatora neposredno zavisi od vrednosti njegove rotacione rezerve, koja se stalno preračunava tokom proračuna NTC-a. Stoga, u ovom modelu učešća, proračun NTC-a se zaustavlja (naravno, ako u prethodnom koraku proračuna nije bio narušen kriterijum sigurnosti) samo tada, kada stvarno bude iscrpljena sva rotaciona rezerva kod izabranih generatora na nivou EES-a (ili regulacione oblasti), koji izvozi.

U prethodnom tekstu, težište je bilo dato modelima učešća generatora u slučaju izvoza. Međutim, to ne znači da izbor liste generatora, njihovog prioriteta i načina njihove učešća u slučaju uvoza ima manji praktičan značaj. To samo znači da je, po pravilu, problem izbora liste generatora i načina njihove učešća moguće lakše i jednostavnije rešavati u ovom drugom slučaju (uvoza), što je praksa i potvrdila.

Prethodno koncizno izložena iskustva kod evaluacije različitih modela učešća generatora, stečena na primeru realne interkonekcije, kao i stečena dru-

ga domaća iskustva [16], omogućila su formiranje jednog takvog modela učešća generatora, čija *generalna forma* jednostavno obezbeđuje, kako formiranje nekih od prethodno datih modela ili njihovih kombinacija, tako i njegovo fleksibilno prilagođavanje novim zahtevima koje unosi liberalizacija tržišta električne energije. O tome, u narednom poglavlju.

5. FORMIRANJE GENERALNE FORME MODELA UČEŠĆA GENERATORA U PRORAČUNIMA NTC-a

Prethodno stečena praktična iskustva sa razmatranim različitim modelima učešća generatora tokom proračuna NTC-a, kao i široka diskusija koja je vođena između Naručioaca i Obradivača studije, pomenute u uvodu ovoga rada, omogućili su formiranje *generalne forme ovog modela*, koja će u najvećoj meri da simultano udovolji sledećim zahtevima :

1. U pogledu *formiranja liste* generatora koji će učestvovati u proračunu NTC-a, maksimalno respektovati realne mogućnosti EES-a (odnosno regulacionih oblasti) između kojih se određuje NTC.
2. S obzirom na to da je reč o utvrđivanju *graničnih prenosnih mogućnosti*, u ovoj listi generatora trebalo bi da se nalaze i generatori koji nisu angažovani u tzv. baznom stanju. Oni se, po ukazanoj potrebi (iscrpljenja rezerva kod generatora angažovanih u tzv. baznom stanju, a da još nije došlo do narušavanja zadatog kriterijuma sigurnosti), mogu *naknadno* da se uključe tokom kontinualnog odvijanja proračuna NTC-a.
3. U pogledu *redosleda* dopunskog angažovanja agregata u odnosu na tzv. bazno stanje, respektovati kriterijum ekonomičnosti, što neposredno sledi iz uslova konkurencije ponuđenih cena proizvedene električne energije, a koji je (uslov konkurencije) imperativ otvorenog tržišta električne energije.
4. Kod izbora *participacionih faktora*, trebalo bi da se maksimalno uvažava realne proizvodne mogućnosti angažovanih generatora (posebno u EES koji izvozi) u cilju nesmetanog i kontinualnog (automatizovanog) obavljanja proračuna NTC-a .
5. Zatim, potrebno je imati u vidu i vremenski horizont za koji se rade proračuni NTC-a (faza **planning** (na godišnjem nivou), u kojoj se daju indikativne, ali neobavezujuće vrednosti za NTC ili faza **allocation** (na nivou meseca, nedelje i dana), za koju se moraju dati precizniji rezultati proračuna, kako bi oni bili validni za dalje komercijalne transakcije).

6. Dalje, potrebno je da formirani model ima potrebnu jednostavnost, ali i fleksibilnost u pogledu mogućnosti uvažavanja različitih modela i njihovih kombinacija, odnosno potrebno je da formirani model ima zahtevanu *generalnu formu*.

7. Takođe, potrebno je da se omogući njegovo *jednostavno algoritmovanje* i što je još važnije, njegovo *efikasno inkorporiranje* (dakle, bez posebnih numeričkih problema) u programsku celinu za automatizovani proračun prenosnih mogućnosti elektroenergetskih interkonekcija.

Kad je u pitanju formiranje liste generatora, kako tzv. „aktivne” liste (zahtev br. 1), tako i tzv. „pasivne” (zahtev br. 2), najjednostavnije rešenje je bilo da se formira jedinstvena lista u kojoj se nalaze svi generatori, ali sa jasnom indikacijom najpre, o tome koji od angažovanih generatora učestvuje u proračunu NTC-a. („aktivna” lista). Takva jasna indikacija daje se i generatorima koji se ne nalaze u pogonu u tzv. baznom stanju („pasivna” lista), ali po ukazanoj potrebi mogu da se naknadno uključe u proračun (iscrpljena rezerva u do tada angažovanim generatorima, ali u prethodnom koraku proračuna nije bio narušen kriterijum sigurnosti), kao i generatorima koji nisu u pogonu i na koje se ne računa da „uskoče” u proračun NTC-a.

Što se tiče redosleda dopunskog angažovanja generatora u odnosu na polazno stacionarno stanje (zahtev br. 3), kao i redosleda generatora koji su u „pripremi”, uvedeni su odgovarajući indikatori, koji mogu da se neposredno spregnu sa cenom proizvedenog kWh, koja se nudi na otvorenom tržištu električne energije.

U realizaciji postavljenih ciljeva, najlakše je bio ostvaren zahtev br. 4 (izbor adekvatnog participacionog faktora), s obzirom na prethodno stečena praktična iskustva na primeru realne interkonekcije, koja su pokazala da ubedljivo najveću jednostavnost, realnost, potrebnu fleksibilnost, dakle i zahtevanu efikasnost ima **model učešća f** (povećanje/smanjenje snage proporcionalno aktuelnim vrednostima rotacione rezerve generatora koji učestvuju u proračunu NTC-a).

U ovom modelu, participacija pojedinog generatora neposredno zavisi od vrednosti njegove rotacione rezerve, koja se stalno preračunava tokom proračuna NTC-a, kao i ukupna rotaciona rezerva generatora koji u tome učestvuju. Konsekventno rečenom, aktivna snaga generatora u EES od interesa (ili regulacionih oblasti), tokom ovog proračuna, menja se na sledeći način :

$$P_m = P_{oi} \pm \sum_{k=1}^n \{ [(P_{ei} - P_{i(k-1)}) / (P_{ei} - P_{i(k-1)})] \text{ DRAZ} \} \quad (3)$$

uz striktno respektovanje sledećih ograničenja:

$$P_{\min i} \leq P_i \leq P_{\max i} \quad (4)$$

gde je :

P_{ni} - aktivna snaga i -tog generatora u n -tom koraku proračuna NTC-a;

P_{oi} - aktivna snaga i -tog generatora u polaznom ustaljenom stanju (tzv. baznom stanju);

k - brojač koraka proračuna NTC-a;

P_{ei} - ekstremne, odnosno granične vrednosti aktivne snage i -tog generatora. Za generatore u EES koji izvozi, to je raspoloživa maksimalna aktivna snaga $P_{\max i}$ (upotrebljen je termin „raspoloživa”, jer je u pitanju korigovana vrednost stvarne maksimalne aktivne snage $P_{\max i}$ za iznos unapred zadate rezerve - na primer 2 % od stvarne maksimalne snage). Za generatore u EES koji uvozi, to je $P_{\min i}$ - minimalna aktivna snaga;

NGA - ukupan broj angažovanih generatora (u datom EES ili regulacionoj oblasti) koji učestvuju u proračunu NTC-a;

DRAZ - diskretni korak promene totala razmene između EES-a, za koje se određuje NTC (kao što je već rečeno, uobičajena vrednost ovoga koraka iznosi 50 MW).

U datoj relaciji (3), koja se rekurentno primenjuje tokom proračuna NTC-a, znak „+” važi za generatore u EES koji izvozi (povećanje snage), a znak „-” važi za generatore u EES koji uvozi (smanjenje snage).

U pogledu potrebe za respektovanjem vremenskog horizonta za koji se rade proračuni NTC-a (zahtev br. 5), tu se u u prvom redu vodilo računa o samoj prirodi i cilju proračuna, a samim tim i o zahtevanoj tačnosti dobijenih rezultata.

U proračunima koji se obavljaju na godišnjem nivou (faza **planning**), daju se indikativne, ali neobavezujuće vrednosti za NTC. Dakle, u ovim uslovima ne zahteva se posebno visoka tačnost dobijenih rezultata.

Međutim, u tzv. fazi **allocation**, koja se radi na nivou meseca, nedelje i dana, logično je da se zahtevaju precizniji rezultati proračuna, kako bi oni bili validni za dalje komercijalne transakcije. U prethodnom izlaganju rečeno je da u svim pomenutim **modelima** učesća ((a)-(f)), naponske reference generatora ostaju nepromenjene tokom proračuna NTC-a, odnosno zadržavaju se njihove vrednosti iz polaznog tzv. baznog stanja.

Međutim, pitanje je koliko to odgovara realnoj pogonskoj praksi? Naime, poznato je iz prakse, da kada generator povećava svoju aktivnu snagu, da se tada takođe povećava i njegova naponska referenca, a kod sniženja snage, snižava se i njegova naponska referenca. Dakle, neophodno je da se na odgovarajući način valorizuje ono što se dešava u realnom po-

gonu, odnosno da se dođe i do realnijih tokova reaktivnih snaga, a time do pouzdanijih indikacija za (ne)narušavanje zadatih ograničenja u analizama sigurnosti.

U tom cilju, uvedena je mogućnost korekcije naponskih referenci angažovanih generatora tokom proračuna NTC-a, saglasno prirodi i veličini promene aktivne snage, na sledeći način:

$$V_n = V_o \pm \left\{ \left[\frac{(P_{(k)} - P_{(k-1)})}{P_{(k-1)}} \right] (V_e - V_{(k-1)}) \right\} \quad (5)$$

uz uvažavanje sledećih ograničenja:

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (6)$$

gde je :

V_n - naponska referenca generatora u n -tom koraku proračuna NTC-a;

V_o - naponska referenca generatora u polaznom ustaljenom stanju ;

V_e - ekstremne, odnosno granične vrednosti napona generatora. Za generatore u EES koji izvozi, to je maksimalna vrednost napona V_{\max} , a za generatore u EES koji uvozi, to je minimalna vrednost napona V_{\min} .

U datoj relaciji (5), koja se takođe rekurentno primenjuje kao i relacija (3) tokom proračuna NTC-a, znak „+” važi za generatore u EES koji izvozi (povećanje naponske reference generatora), a znak „-” važi za generatore u EES koji uvozi (smanjenje naponske reference).

U pogledu postavljenih zahteva, najveći izazovi su bili kod realizacije zahteva br. 6 (**generalna forma** modela) i zahteva br. 7 (**lako algoritmovanje i inkorporiranje** u programsku celinu za automatizovani proračun NTC-a, a da to bude bez ikakvih numeričkih problema). Ovi zahtevi su ostvareni na sledeći način:

- Svakom generatoru su asocirana po dva indikatora, koji definišu njihove prioritete angažovanja tokom proračuna NTC-a. Prvi indikator se odnosi na slučajevne kada EES u kome se oni nalaze izvozi, a drugi indikator, na slučajevne uvoza.
- U slučaju izvoza, za generatore koji se nalaze u pogonu u polaznom stanju (tzv. baznom stanju) ovi indikatori prioriteta mogu da se kreću od 1 do 50 (na primer, saglasno ceni proizvedenog kWh električne energije, naravno počevši od najmanje njene vrednosti).
- Redosled njihovog dopunskog angažovanja, odnosno podizanja njihove aktivne snage vrši se saglasno vrednostima ovih indikatora (od 1 pa na dalje). Dakle, generatori se sukcesivno dopunski angažuju jedan za drugim shodno definisanom prioritetu.
- Prelazak na narednu grupu vrši se kada generatori prethodnog prioriteta dostignu unapred definisani

- limit aktivne snage (koji ne mora da bude stvarna maksimalna aktivna snaga, ako se želi obezbedenje odgovarajuće rotacione rezerve).
- Za generatore koji nisu bili u pogonu u polaznom stanju, a predviđena je, po ukazanoj potrebi, mogućnost za njihovo eventualno naknadno angažovanje tokom proračuna NTC-a, indikatori prioriteta se kreću od 51 do 99.
 - Generatori koji ne učestvuju u proračunu (kako u slučaju izvoza, tako u slučaju uvoza), a nalaze se u pogonu (na primer regulacione elektrane - jer je neophodno da se obezbedi, uz rotacionu i odgovarajuću regulacionu rezervu), imaju indikator 100.
 - Generatori koji nisu bili u pogonu i za koje se uopšte ne planira da se naknadno angažuju, imaju vrednost indikatora veću od 100.
 - Indikatori prioriteta za slučaj uvoza kreću se od 1 do 50, saglasno kojima je definisan redosled njihovog angažovanja u „obaranju” snage (na primer, saglasno ceni proizvedenog kWh električne energije, naravno počevši od najveće njene vrednosti - dakle, obrnuta logika u odnosu na slučaj uvoza).
 - Unutar grupe generatora koji imaju isti prioritet (pojedina grupa može da ima samo jedan generator), bilo da je slučaj izvoza ili uvoza, odgovarajući iznos promene snage (diskretna promena totala razmene između EES-a za koje se određuje NTC) se raspodeljuje proporcionalno aktuelnoj vrednosti pojedinačne rotacione rezerve svakog generatora (model učešća f).
 - Generatori koji nisu bili u pogonu u polaznom stanju, a predviđeni su, po ukazanoj potrebi, za eventualno naknadno angažovanje tokom proračuna NTC-a, prisutni su (zajedno sa svojim blok transformatorima) u polaznoj matrici admitansi razmatrane interkonekcije, ali samo topološki, sa vrednostima parametara (veštački uvedenih), koje „govore” da oni nisu tada u pogonu.
 - U momentima njihovog uključivanja (iscrpljenja rezervi kod svih generatora koji su bili angažovani u tzv. baznom stanju, a da još nije došlo do narušavanja zadatog kriterijuma sigurnosti), vrše se potrebne korekcije odgovarajućih elemenata matrice admitansi koje respektuju činjenicu njihovog uključivanja.
 - Takođe, vrše se i odgovarajuće korekcije submatrice koeficijenata (kao i njihova dvojna trougaona faktorizacija) sistema raspregnutih jednačina, merodavnih za određivanje tokova snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima [8,12].
 - Izvršeno je dalje unapređenje i modifikovanje računarskog programa STATIC [7,9], u kontekstu prethodno navedenog, a da već poznata i proverena

na svojstva njegove visoke numeričke efikasnosti nisu bila ugrožena.

- Na taj način, realizacijom navedenih zahteva od 1 do 7, na prethodno opisani način, došlo se do željene generalne forme modela učešća generatora tokom proračuna NTC-a. Da je u pitanju stvarno njegova **generalna forma**, iz koje može da proizade niz pojedinačnih modela i njihovih kombinacija, a koja istovremeno može da udovolji i zahtevima otvorenog tržišta električne energije, govori sledeće:
- Formalno su uključeni svi generatori koji se nalaze u razmatranoj interkonekciji, odnosno u pitanju je jedinstvena njihova osnovna baza podataka. Iz nje se na veoma fleksibilan način „uzimaju” samo generatori koji učestvuju od početka proračuna NTC-a, kao i generatori koji će se eventualno naknadno, po ukazanoj potrebi, uključivati tokom odvijanja ovih proračuna.
 - Generatori koji nisu bili u pogonu u polaznom stanju, a predviđena su za eventualno angažovanje tokom proračuna NTC-a, prisutni su u polaznoj matrici admitansi razmatrane interkonekcije, ali samo topološki. Dakle, i ovde je u pitanju osobina jedinstvenosti, jer se topološka struktura ove matrice ne menja tokom proračuna.
 - Kada proračuni NTC-a zahtevaju njihovo uključivanje, vrše se samo korekcije odgovarajućih elemenata već formirane matrice admitansi, koje respektuju činjenicu njihovog uključivanja. Takođe, vrše se i odgovarajuće korekcije submatrice koeficijenata (kao i njihova dvojna trougaona faktorizacija).
 - Time ni na koji način nije ugrožena već poznata i dokazana visoka numerička efikasnost rešavanja sistema raspregnutih jednačina, merodavnih za određivanje tokova snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima analizirane interkonekcije.
 - Odgovarajućim izborom participacionih faktora, omogućeno je formiranje niza raznovrsnih grupacija generatora (sa istim participacionim faktorom) koji učestvuju u proračunu NTC-a. Moguće su kombinacije grupacija sa jednim, ili više generatora, uključujući i slučaj kada svi generatori u pojedinom EES (ili regulacionoj oblasti) imaju isti participacioni faktor.
 - Takođe, odgovarajućim izborom samih veličina participacionih faktora, moguće je da se generatori rangiraju i po ceni proizvedene energije. U slučaju izvoza, oni se dopunski angažuju po redosledu koji diktira cena, počev od najniže, a u slučaju uvoza, važi obrnuta logika. Na taj način omogućeno je da se direktno respektuju uslovi konkurencije, a koji su predominantni u liberalizovanom tržištu električne energije.

Kao što je već više puta naglašavano, ovaj razvijeni generalizovani model je uspešno inkorporiran u programsku celinu za automatski proračun NTC-a (unapređena i modifikovana verzija računarskog programa STATIC). Time je, uz visoku realnost i željenu tačnost dobijenih rezultata, omogućena i velika brzina i efikasnost njihovog odvijanja. O svemu tome, uz niz karakterističnih kvantitativnih pokazatelja, vezanih za konkretne proračune NTC-a u okviru druge UCTE sinhronne zone, biće reči u posebnim radovima, koji se nalaze u pripremi.

6. ZAKLJUČCI

U radu je formiran model učešća generatora u proračunima prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija, čija generalna forma omogućuje jednostavno modelovanje niza modela i njihovih kombinacija, do sada korišćenih u praksi. Ujedno, karakteristike razvijenog modela obezbeđuju da se na veoma jednostavan i fleksibilan način mogu da „preslikaju” različite pogonske situacije, vezane za uobičajene „vozne redove” izvora u uslovima otvorenog tržišta električne energije. Takođe, predložen je izbor adekvatnog participacionog faktora, s obzirom na stečena praktična iskustva na primeru realne interkonekcije. Ona su pokazala da ubedljivo najveću jednostavnost, realnost, potrebnu fleksibilnost, dakle i zahtevanu efikasnost ima model učešća generatora, u kome se povećanje/smanjenje snage vrši proporcionalno aktuelnim vrednostima rotacione rezerve generatora koji učestvuju u proračunu.

Imajući u vidu realnu pogonsku praksu, u kojoj se kada generator povećava svoju aktivnu snagu, takođe povećava i njegova naponska referenca, a koja se snižava kod sniženja snage, uvedena je mogućnost korekcije naponskih referenci angažovanih generatora tokom proračuna prenosnih kapaciteta, saglasno prirodi i veličini promene aktivne snage. Na taj način se dolazi do realnijih tokova reaktivnih snaga, a time do pouzdanijih indikacija za (ne)narušavanje zadatah ograničenja u analizama sigurnosti.

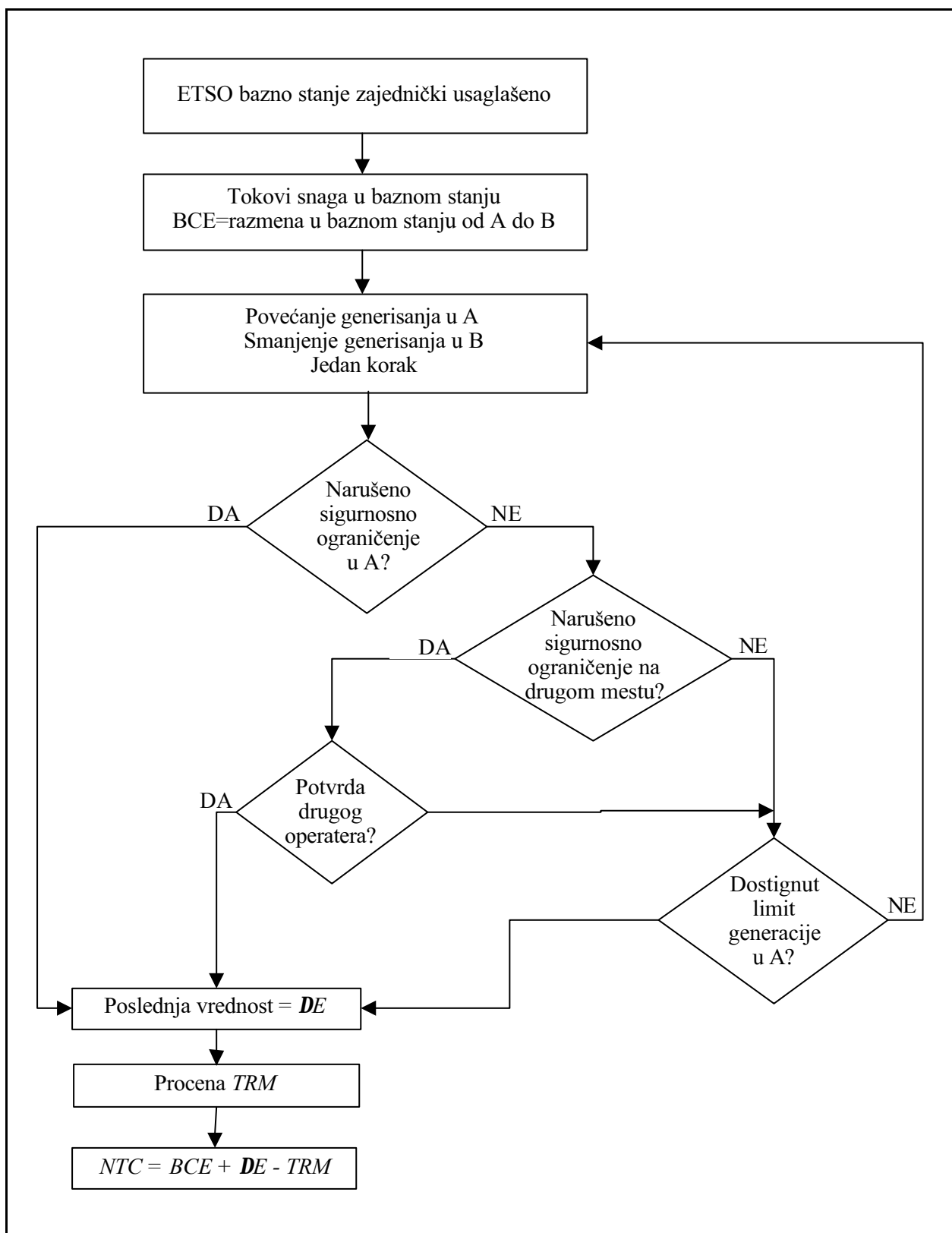
Razvijeni generalizovani model učešća generatora uspešno je inkorporiran u programsku celinu za automatizovani proračun prenosnih kapaciteta, čime su, uz visoku realnost i tačnost dobijenih rezultata, omogućene i velika brzina i efikasnost njihovog odvijanja.

7. LITERATURA

- [1] DEFINITIONS OF TRANSFER CAPACITIES IN LIBERALISED ELECTRICITY MARKETS, Final Report, ETSO, April, 2001
- [2] PROCEDURES FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENTS, ETSO, October, 2001
- [3] MODULAR DAY-AHEAD CONGESTION FORECAST AS A FIRST STEP OF A CONGESTION MANAGEMENT PROCESS, ETRANS, 2001
- [4] EVALUATION OF CONGESTION MANAGEMENT METHODS FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION, ETSO, Florence Regulators Meeting, November, 1999
- [5] Vujasinović Z, Popović D. P, DOSADAŠNJA ISKUSTVA I NOVI ZAHTEVI KOD PROGNOZE ZAGUŠENJA I PRORAČUNA GRANIČNIH PRENOSNIH MOGUĆNOSTI U OKVIRU DRUGE UCTE SINHRONE ZONE, časopis „Elektroprivreda”, br. 3, 2002, str. 28 - 33
- [6] UCTE WG Operation & Security, SG Network Models & Forecast Tools, LOAD FLOW AND CONGESTION FORECAST, 2002
- [7] RAZVOJ APLIKACIONOG PROGRAMSKOG PAKETA ZA ANALIZU STATIČKE SIGURNOSTI U STUDIJSKOM MODU, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 1999.
- [8] METODOLOŠKI ASPEKTI STUDIJSKIH ANALIZA STATIČKE SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, januar 2000.
- [9] PROGRAMSKI PAKET ZA STUDIJSKE ANALIZE STATIČKE SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA (RAČUNARSKI PROGRAMI INTERF, STATIC I RANG), KORISNIČKO UPUSTVO", Institut „Nikola Tesla”, Beograd, februar, 2000.
- [10] UNAPREĐENJE APLIKACIONOG PROGRAMSKOG PAKETA ZA ANALIZU STATIČKE SIGURNOSTI I NJEGOVO POVEZIVANJE SA PROGRAMSKIM PAKETOM ZA KRATKOROČNO PLANIRANJE RADA EES EPS-a, Institut „Nikola Tesla, Beograd, 2001.
- [11] Popović D. P, Dobrijević Đ. M, Mijušković N. A, Vlajsavljević D. J, METHODOLOGICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF STEADY-STATE SECURITY ASSESSMENT OF YUGOSLAV POWER SYSTEM, IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary, Aug. 29-Sept. 2, 1999, paper BPT 99-382-13.
- [12] Popović D. P, Dobrijević Đ. M, Mijušković N. A, Vlajsavljević D. J, AN ADVANCED METHODOLOGY FOR STEADY-STATE SECURITY ASSESSMENT OF POWER SYSTEMS, European Transactions of Electrical Power Engineering, Vol. 11, No. 4, 2001, pp. 227-234
- [13] Popović D. P, Dobrijević Đ. M, Mijušković N. A, Vlajsavljević D. J, Mijailović S. V, ANALYTICAL TOOLS FOR THE TRANSFER CAPABILITY

8. PRILOG

Procedura proračuna NTC-a između EES-a A i B, u slučaju kada TSO A vrši proračun



- EVALUATION OF BALKAN INTERCONNECTION SESSION-2000, CIGRE, Paris, paper 39-206
- [14] Popović D. P, Dobrijević Đ. M, AN IMPROVED METHODOLOGY FOR SECURITY ASSESSMENT OF POWER SYSTEMS IN CONDITIONS OF A DEREGULATED ENVIRONMENT, International Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control V, August 26-31, 2001, Onomichi, Japan, Paper No 10
- [15] Popović D. P, Dobrijević Đ. M, UNAPREĐENJA APLIKACIONOG PROGRAMSKOG PAKETA ZA ANALIZE STATIČKE SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, 25. savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi, 16-20. septembar 2001, referat 39. 01.
- [16] Vuković M, Ivković-Ivandečić M, Biuković P, ANALIZA NTC PRORAČUNA: ISKUSTVA EKC-a, 25. savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi, 16-20. septembar 2001, referat 38. 06.

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



Prof. dr Dragan P. Popović rođen je 1943. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 1965. godine na Energetskom odseku, magistrirao 1981. godine na smeru Elektroenergetski sistemi, a doktorsku tezu odbranio maja 1984. godine, sve na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Po diplomiranju, zaposlio se u Elektrotehničkom Institutu „Nikola Tesla”, gde se sada nalazi na radnom mestu višeg savetnika u centru „Elektroenergetski sistemi”. Godine 1993. izabran je za vanrednog profesora Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu sa nepunim radnim vremenom, za oblast Elektroenergetski sistemi, a 1997. godine dobio je najviše naučno-istraživačko zvanje naučni savetnik.

D. Popović je kao autor (pretežno) ili koautor do sada objavio ukupno 136 naučnih i stručnih radova, od kojih je 13 objavljeno u stranim časopisima, 53 u domaćim časopisima, 19 na međunarodnim konferencijama i 53 na domaćim konferencijama i savetovanjima. Takođe je razvio veći broj računarskih programa za analizu relevantnih statičkih i dinamičkih aspekata rada elektroenergetskih interkonekcija.

Utvrđivanje parametara energetskih transformatora i njihovih stepena nesimetrije

Stručni rad
UDK: 621.314.212; 621.313

Rezime:

U radu su opisani postupci za utvrđivanje magnetnih i električnih parametara energetskih transformatora kao i stepena njihove simetričnosti pogodnih za primenu u terenskim uslovima. Definisan je pojam simetričnosti, prikazan njegov značaj i protumačeni uzroci pojave nesimetričnosti. Na kraju su dati rezultati ispitivanja energetskih transformatora izvođenih u periodu 2000 – 2002. godina.

Cljučne reči: energetski transformator, reluktansa, simetričnost, električni parametri, magnetno kolo

Abstract:

DETERMINATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF POWER TRANSFORMERS AND THEIR DEGREES OF UNSYMMETRY

Here are described procedures for determination magnetic and electrical parameters of power transformers and their degrees of symmetry which are convenient to use on site. The term „symmetry” is defined, its meaning is presented and the causes of unsymmetry phenomenon are commented. At the end, here are given test results for tested power transformers from 2000 – 2002.

Key words: power transformer, reluctance, symmetry, electrical parameters, magnetic circuit

1. UVOD

U cilju što potpunijeg utvrđivanja ispravnosti transformatora u terenskim uslovima, pored do sada praktikovanih metoda pristupilo se i uvođenju postupaka kojima se utvrđuje stepen nesimetrije električnih i magnetnih parametara energetskih transformatora.

Ovi postupci se mogu primeniti u procesu dijagnostike kvara nakon pojave kvara na licu mesta, odnosno nakon izvršene opravke na mestu popravke, ili za utvrđivanje parametara prema ukazanoj potrebi.

U terenskim uslovima se ispitivanju transformatora može pristupiti, po pravilu, samo preko spo-

ljašnjih veza, pri čemu oprema za ispitivanje treba da bude što jednostavnija i dovoljno robusna za rad u terenskim uslovima.

2. KARAKTERISTIKE SIMETRIČNOSTI

2.1. Magnetno kolo transformatora se gradi kao geometrijski, i magnetno simetričan objekat.

Geometrijski, magnetno kolo je simetrično u odnosu na tri ravni simetrije, od kojih su za naša razmatranja važne dve ravni simetrije:

- Ravan koja sadrži osu srednjeg stuba i osu upravno na magnetno kolo,
- Ravan koja prolazi kroz tačke na sredini stubova i osu upravnu na magnetno kolo. Ova ravan je ortogonalna na prethodnu ravan.

Magnetna simetričnost se ostvaruje korišćenjem istovetnog materijala za sve delove magnetnog kola, koga karakteriše istovetnost magnetne permeabilnosti materijala, specifične električne provodnosti materijala i saglasnost dimenzija limova od koga se formira magnetno kolo.

2.2. Namotaji transformatora se grade takođe kao geometrijski podudarni elementi odgovarajućih oblika i dimenzija, sa međusobno jednakim brojem zavojaka i presekom provodnika; i raspoređuju se na istovetan način na stubove magnetnog kola. Iz ovoga treba da proisteknu iste vrednosti omskog otpora, i približno iste induktivnosti i kapacitivnosti za namotaje odgovarajućeg naponskog nivoa.

2.3. Prostorno - vremenska zavisnost magnetnog polja u simetričnom magnetnom kolu se može matematički predstaviti kao zbir jednog simetričnog i jednog antisimetričnog tenzora polja.

Ukoliko protekne struja kroz jedan namotaj na srednjem stubu, tada će se uspostaviti simetrično magnetno polje, čiji će se fluks istovetno rasporediti na leve i desne stubove i indukovati jednake i jednovremene EMS na levim i desnim namotajima. Ovom stanju odgovara simetrični tenzor magnetnog polja.

Raspodela flukseva pri proticanju struje kroz levi namotaj će se u odnosu na proticanje struje kroz desni namotaj odnositi kao original i lik u ogledalu. Indukovane EMS će se takođe odnositi kao original i lik u ogledalu.

Ukoliko se redno, kroz krajnje namotaje propusti struja tada će se uspostaviti antisimetrično magnetno polje, i u slučaju potpune simetrije magnetnog kola, kroz srednji stub se neće uspostavljati fluks, pa time ni EMS na namotajima na ovom stubu. Ovom stanju odgovara antisimetrični tenzor magnetnog polja.

2.4. Polazeći od napred opisanog, sledi da će se pobuđivanjem prostoperiodičnim strujama indukovati prostoperiodične EMS koje će u slučaju potpune simetrije magnetnog i električnih kola u odgovarajućim situacijama biti međusobno jednake ili se pak neće ni javljati.

Tako će se pri pobuđivanju strujom kroz jedan namotaj na srednjem stubu, u namotajima na susednim stubovima javiti međusobno jednake EMS, a pri

pobuđivanju strujom kroz dva na red povezana namotaja u namotajima na trećem stubu se neće javljati nikakve EMS.

Iz ovoga sledi jednostavna mogućnost utvrđivanja stepena nesimetričnosti merenjem navedenih EMS ili njihovih odgovarajućih razlika.

Označivši sa A levi, B srednji, i C desni stub magnetnog kola, možemo definisati sa jedne strane stepen nesimetričnosti kao odnos razlike EMS levog i desnog namotaja prema EMS srednjeg namotaja:

$$^1 \frac{E_{AC}}{E_B}$$

EMS srednjeg namotaja je praktički jednaka naponu napajanja srednjeg namotaja odnosno zbiru EMS levog i desnog namotaja:

$$E_B = E_A + E_C = U_B$$

S druge strane, možemo ga definisati kao odnos indukovane EMS u namotaju na srednjem stubu pri na red povezanim namotajima na krajnjim stubovima:

$$^2 \frac{E_B}{E_A + E_C}$$

gde je zbir $E_A + E_C$ praktički jednak naponu napajanja ove redne sprege.

Po analogiji sa magnetnim poljem kod obrtnih mašina, pobuđivanje strujom kroz namotaj na srednjem stubu uspostavlja magnetno polje po podužnoj osi (d), a pobuđivanje krajnjih namotaja povezanih na red uspostavlja magnetno polje po poprečnoj osi (q).

Stoga, veličina e_1 odgovara stepenu nesimetrije po podužnoj osi, a veličina e_2 odgovara stepenu nesimetrije po poprečnoj osi.

Magnetnom polju po podužnoj osi odgovara simetrični tenzor polja, a magnetnom polju po poprečnoj osi odgovara antisimetrični tenzor polja.

Skraćeno, možemo reći da e_1 predstavlja podužni stepen nesimetrije, a e_2 poprečni stepen nesimetrije.

3. UTICAJ SMETNJI I KVAROVA NA NESIMETRIČNOST PARAMETARA

Ukoliko dođe do smetnji, slabo izraženih kvarova, ili pojave jako izraženog kvara, doći će, po pravilu, do manjeg ili većeg narušavanja simetričnosti, tj. doći će do pojave razlike, odnosno EMS, kao odraz pojave nesimetričnosti parametara.

3.1. U smetnje ćemo ubrojati slabljenje ili gubitak izolacije među limovima, međunavojne spojeve na-

stale oštećenjem izolacije, i druga manja oštećenja materijala, koja su praćena odgovarajućim indukovanim strujama čije prisustvo uslovljava manje ili više izraženo pojačanje struje magnećenja i narušavanje magnetne simetrije okarakterisane veličinama e_1 i e_2 .

3.2. Pojava jako izraženog kvara dovodi, po pravilu, do potpune nesimetričnosti parametara i lako je prepoznatljiva, pošto je praćena strujama kvara velikih vrednosti, ili pak prekidanjem proticanja kroz neku od faza. Uz to se odvijaju i drugi prapratni procesi, kao što je razvoj gasova u ulju pod uticajem električnog luka, i drugo.

3.3. Uspešnom opravkom transformatora će se povratiti i njegova simetričnost, otkuda sledi da zadovoljavajuća simetričnost ukazuje na dobro izvedenu opravku, odnosno zadovoljavajuće stanje ispitivanog transformatora.

4. UTVRĐIVANJE PARAMETARA TRANSFORMATORA I ŠTEPENA NJEGOVE NESIMETRIČNOSTI

Utvrdjivanje parametara se može izvesti ispitivanjima u praznom hodu i ispitivanjima u kratkom spoju, delovanjem monofaznog izvora prostoperiodične struje. U terenskim uslovima se može koristiti raspoloživi izvor niskog napona (400/220 V/V) i merenje izvesti neposredno, na licu mesta.

4. 1. Ispitivanja u praznom hodu

Ispitivanja u praznom hodu se izvode monofaznim napajanjem svake faze namotaja vezanog u zvezdu, pri ostalim otvorenim (neopterećenim) namotajima, pri čemu se mere:

- naponi na svim fazama;
- struja magnećenja napajane faze;
- svi međufazni naponi.

Korišćeni voltmetar mora biti sa veoma visokim unutrašnjim otporom (reda $M\Omega$). U protivnom se treba koristiti otpornik za uravnoteženje magnetomotornih sila (MMS) čiji otpor mora biti jednak unutrašnjem otporu korišćenog voltmetra. Ovaj otpornik se mora priključiti na suprotnu nenapajanu fazu u odnosu na onu na koju je priključen voltmetar.

Struju magnećenja u ovom slučaju treba meriti pri isključenom voltmetru i otporniku za uravnoteženje MMS.

Utvrdjivanje relativnih odnosa magnetnih reluktansa grana magnetnog kola.

Magnetno kolo možemo predstaviti kao složeno kolo, sačinjeno od tri grane spojene u krajnje čvorove. Svakoj grani pripada po jedan stub, i odgovara-

jući delovi gornjeg i donjeg jarma. Po svakom od stubova može delovati odgovarajuća magnetomotorna sila, m_a ($\alpha = A, B, C$) Svaka grana magnetnog kola suprotstavlja korespondentnu reluktansu r_a . Delovanjem skupa magnetnih sila na ovo magnetno kolo će se uspostaviti fluksevi f_a . Na osnovu ovoga se može napisati sledeći skup jednačina za konture magnetnog kola:

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

odakle su:

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

Ukoliko se pobuđuje samo po jedno jezgro, dobijaju se izrazi kao članovi sledeće tabele:

Tabela izraza za udele flukseva po granama pri pojedinačnoj pobudi grana:

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

odakle su:

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

Usvajajući m_B i r_B kao bazne vrednosti u relativnom iznosu od 1 000, možemo odrediti numeričke vrednosti reluktansa r_A i r_C .

4. 2. Ispitivanja u kratkom spoju

Ispitivanja u kratkom spoju transformatora sprege zvezda-zvezda- (Yy -) se izvode po metodi faza po faza, napajanjem iz monofaznog izvora sa primarne strane svake faze sukcesivno, pri čemu je sekundar trofazno i prema zvezdištu kratko spojen.

Pri ovome se mere naponi svih faza sa primarne strane, struja napajanja i snage pod uticajem struje napajanja i napona svake faze ponaosob, kao i struje kratkog spoja na sekundaru, prema odgovarajućim ispitnim šemama:

Utvrdjivanje faznih impedansa transformatora sprege Yd - se izvodi na bazi izmerenih vrednosti napona i struja na strani namotaja spregnutih u zvezdu, pri njihovom unifaznom napajanju (pri čemu se ovi namotaji kratko spoje, i napajaju iz monofaznog izvora priključenog između tačke kratkog spoja i zvezdišta).

Utvrđivanje matrice faznih impedansa

Na osnovu ovih merenja se utvrđuje matrica faznih impedansa (i njenih faznih stavova, odnosno omskog i induktivnog otpora):

$$Z_f = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix}$$

pri čemu su:

$$Z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2}; \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$a, b = A, B, C$$

Utvrđivanje matrice impedansa simetričnih sistema

Saglasno ispitivanjima po metodi faza po faza, sračunavaju se impedanse simetričnih sistema prema sledećim matricnim relacijama:

$$Z_s = F Z_f F^{-1}$$

gde su:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{3} & 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a & \end{bmatrix}; \quad F^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}; \quad \frac{1}{2} j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

a impedanse simetričnih sistema:

$$Z_s = \begin{bmatrix} Z^{hh} & Z^{hd} & Z^{hi} \\ Z^{dh} & Z^{dd} & Z^{di} \\ Z^{ih} & Z^{id} & Z^{ii} \end{bmatrix}$$

Ovde (*h*) označava homopolarni, (*d*) direktni, a (*i*) inverzni sistem impedansa.

Ovu matricu možemo razložiti na dve matrice:

$$Z_s = \begin{bmatrix} Z^{hh} & 0 & 0 & 1 & h d & h i \\ 0 & Z^{dd} & 0 & d h & 1 & d i \\ 0 & 0 & Z^{ii} & i h & i d & 1 \end{bmatrix}$$

pa je:

$$Z_s = Z_{s_i} \cdot 1$$

gde su:

Z_{s_i} – dijagonalna matrica simetričnih impedansa,

1 – jedinična matrica, i

– matrica stepena nesimetričnosti impedansa.

Matrica stepena nesimetričnosti može se nazvati i matrica stepena međusobne spregnutosti impedansa simetričnih sistema, odnosno matrica međusobnog uticaja simetričnih sistema.

Što je ova matrica bliža nultoj vrednosti, to posmatrani objekat ima potpuniju simetričnost.

5. SVODNI PREGLED REZULTATA ISPITIVANIH TRANSFORMATORA

Ispitivanje simetričnosti parametara magnetnog kola transformatora je u prvo vreme izvedeno pretežno u fabričkim uslovima, u fabrici transformatora u Ripnju, postupkom demagnetizacije (koji je predložio i razvijao autor ovog rada u saradnji sa Institutom „Nikola Tesla”, TENT-om i Elektroistok-om).

Postupkom demagnetizacije (koji u ovom radu nije opisan) je u prvom redu ispitivana homogenost magnetnog kola. Ovim postupkom je ispitivano više transformatora velikih snaga, kao što su:

- Transformator 30 MVA TE „Morava”
- Blok transformator 725 MVA TENT B
- Autotransformator 150 MVA TS „Kraljevo”
- Autotransformator 300 MVA TS „Niš”

U terenskim uslovima prema ovde opisanim postupcima oslonjenih na metodu faza po faza, ispitivan je veći broj energetskih transformatora sa ciljem utvrđivanja stepena nesimetrije pre, odnosno nakon opravke izvedene na licu mesta.

(Metodom faza po faza su, inače, svojevremeno izmereni i proračunati parametri vodova 400 kV Obrenovac - Ernestinovo, i Niš - bugarska granica).

Rezultati ispitivanja velikih energetskih transformatora izvedenih u periodu 2000 – 2002. godina su dati u sledećoj tabeli :

Redni broj	Sn MVA	uk %	Sprega	Magnetni parametri				Električni parametri		
				εd	εq	r _A	r _C	R	X	uk*
1.	150		Yyod	0,364	0,014	3,90	6,58	0,602	34,56	10,71
2.	40		Yodd	0,082	0,050	5,45	4,68	1,94	34,16	11,29
3.	400	11,08	Yyod	0,037	0,037	2,72	2,50	1,42	47,16	11,78
4.	250	9,97	Yyod	0,043	0,098	5,85	7,30	0,863	18,41	9,52
5.	380	12,53	Yodd	0,017	0,066	1,28	1,24	1,74	57,99	12,52
6.	380	12,30	Yodd	0,071	0,052	4,05	3,47	1,04	12,26	12,26

1-T2 u TS Kraljevo 3; 2 - T1 u TS Bor 3; 3 -T1 u TS Bgd 8; 4 - T1 u TS Bgd 5; 5 i 6 HE Đerdap
uk* predstavlja sračunatu vrednost napona kratkog spoja na bazi [Z_s]

Uočava se zadovoljavajuća približnost između tabličnih i sračunatih vrednosti uk i uk^* .

Na osnovu podataka za r_A i r_C , (pošto r_B ima vrednost 1,00), reluktanse magnetnog kola se mogu predstaviti grafički, u vidu dva pravougaonika sa zajedničkom stranom r_B , (koja predstavlja srednji stub (B)) magnetnog kola, a veličine:

$$l_A = (r_A - 1)/2 \quad \text{i} \quad l_C = (r_C - 1)/2$$

predstavljaju „udaljenost” osa stubova A i C od ose stuba B, a r_B , „visinu” stuba B.

Izgled ovako dobijene figure može ukazati u prvom redu na stepen kompaktnosti, odnosno rastrešenosti ispitivanog magnetnog kola, a zatim, i spojeva među limovima.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženog, mogu se utvrditi:

- Fazne impedanse transformatora,
- Impedanse simetričnih sistema (direktne, inverzne i homopolarne impedanse),
- Stepen podužne i poprečne nesimetričnosti (e_1 i e_2)
- Matrica stepena nesimetričnosti simetričnih impedansa transformatora.

Prema navedenim vrednostima i stepenima nesimetrije, može se procenjivati obim smetnje odno-

sno oštećenja, i tako doprineti potpunijem dijagnosticiranju stanja ispitivanog transformatora.

Za preporuku je da se pre puštanja u pogon, a i nakon izvedenih remonata, izvrši provera parametara transformatora i stepena nesimetrije.

Podrazumeva se da se nakon pojave smetnji ili kvara utvrde vrednosti parametara i stepena nesimetrije i uporede sa početnim, odnosno prethodnim stanjem.

7. LITERATURA

- [1] JEDNA METODA ZA EKSPERIMENTALNO UTVRĐIVANJE REDNIH PARAMETARA VOĐOVA I NJIHOVIH SIMETRIČNIH KOMPONENTATA - „Elektrodistribucija” - br. 2; 1981. godina - Beograd.
- [2] UTVRĐIVANJE STEPENA NESIMETRIJE KARAKTERISTIKA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA - Zbornik radova na temu: „Opravljanje energetskih transformatora na terenu” - „Elektroistok” - jun 2000. godine.
- [3] ISPITIVANJA BLOK TRANSFORMATORA SNAGE 380 MVA NA HE ĐERDAP 1, U CILJU POVEĆANJA SNAGE (II DEO) - R 12 - 12; 26 savetovanje JUKO CIGRE - 2003. godine.
- [4] Časopis „Elektroprivreda”, br. 2, 2003. godine.

Rad je primljen u uredništvo 15. 07. 2003. godine



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

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

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

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

Vladica Mijailović

Održavanje energetskih transformatora – pogonska iskustva –

Pregledni rad
UDK: 621.314.212; 621.313

Rezime:

U radu je dat pregled najvažnijih rezultata i praktičnih iskustava koje saopštavaju velike evropske i japanske elektroprivredne kompanije, a koji se odnose na način održavanja i obnavljanja energetskih transformatora. Navedene su metode koje pojedini korisnici primenjuju u cilju utvrđivanja stanja transformatora i komentari o ekonomskoj opravdanosti primene sistema za kontinualni nadzor.

Ključne reči: *energetski transformator, održavanje na osnovu stanja, obnavljanje na mestu polaganja, sistem za kontinualni nadzor*

Abstract:

POWER TRANSFORMERS MAINTENANCE
- operational experiences-

The paper gives an overview of the most important results and practical experiences, presented by electric power companies from European countries and Japan, with regards to the concept of power transformers maintenance and repair. Methods used by some users for transformers' condition evaluation are quoted, as well as commentary on profitability of on-line condition monitoring systems application.

Key words: *power transformer, condition based maintenance, on site repair, on line monitoring*

1. UVOD

Ako se izuzmu investicije za izgradnju novih elektroenergetskih objekata, troškovi održavanja elemenata postrojenja predstavljaju najvažniju stavku u poslovanju elektroprivrednih preduzeća. S obzirom na cenu, broj i posledice koje se mogu imati zbog njihovog ispada pogona, održavanje energetskih transformatora je od posebnog značaja.

Dobro koncipirana strategija održavanja omogućava da transformator uvek bude u ispravnom stanju, čime se obezbeđuje neprekidnost napajanja

potrošača, snižava verovatnoća nastanka kvarova čije otklanjanje je skupo i dugo traje i, u izvesnoj mери, produžava tehnički i ekonomski vek eksploatacije transformatora.

Prema dosadašnjoj praksi, preventivno održavanje elemenata postrojenja je sprovedeno u fiksnim vremenskim intervalima ili nakon dostignutog određenog broja operacija. Ovaj način održavanja obično omogućava ostvarenje željenog nivoa raspoloživosti, ali ne uvek na najekonomičniji način. Važno je istaći da je kvalitet obavljenih radova prevažno uslovljen ljudskim faktorom.

Dr Vladica Mijailović, docent – Tehnički fakultet, 32 000 Čačak, Svetog Save 65

Koncepcija koja je poslednjih 10-tak godina zastupljena kod velikih elektroprivrednih kompanija je održavanje elemenata postrojenja na osnovu **stanja**. Stanje predstavlja kvalitativnu procenu ispravnosti elementa i do njega se dolazi postupkom monitoringa (nadzora), koji se može sprovesti kontinualno ili povremeno i postupkom dijagnosticiranja.

Korisnici koji održavanje elemenata postrojenja sprovode na osnovu njihovog stanja konstatovali su niz pogodnosti, od kojih su najznačajnije sledeće:

- detekcijom kvarova u ranoj fazi, obim neophodnih kvarova se svodi na najmanju moguću meru, čime se snižava i cena vraćanja elementa u ispravno stanje. Sprovođenje otklanjanja poremećaja se može planirati, tako da se minimiziraju nepovoljni efekti prekida napajanja potrošača;
- detekcijom kvarova u ranoj fazi, sprečava se oštećenje ostalih komponenti elementa i nastanak kvarova koji bi doveli do oštećenja susednih elemenata u postrojenju, čime se produžava vek eksploatacije elementa. Na taj način se odlaže eventualna nabavka novog elementa i omogućava da se, po isteku planiranog veka eksploatacije obavi revitalizacija istog, što u oba slučaja predstavlja znatne uštede;
- skraćanjem vremena trajanja otklanjanja detektovanih poremećaja, omogućava se da šteta koju korisnik postrojenja trpi zbog neisporučene električne energije bude niža od štete koja bi se imala za slučaj otklanjanja kvara nakon ispada elementa iz pogona;
- primena uređaja za monitoring i dijagnosticiranje u velikoj meri minimizira uticaj ljudskog faktora na kvalitet obavljenih poslova, jer se, pre ponovnog stavljanja elementa u pogon, vrši provera vrednosti svih parametara elementa;
- primena uređaja za monitoring i dijagnosticiranje, u velikoj meri minimizira potrebu držanja velikog broja rezervnih delova.

Bez obzira da li se vrši otklanjanje kvara ili se sprovodi revitalizacija transformatora, svi korisnici teže da se potrebne aktivnosti obave u postrojenju, a ne u fabrici, što je znatno jeftinije i kraće traje, a kvalitet obavljenih poslova je sličan.

U nastavku rada je dat pregled najvažnijih rezultata i praktičnih iskustava koje saopštavaju velike evropske i japanske elektroprivredne kompanije, a koji se odnose na način održavanja i obnavljanja energetskih transformatora. Navedene su metode koje pojedini korisnici primenjuju u cilju utvrđivanja stanja transformatora i komentari o ekonomskoj opravdanosti primene sistema za kontinualni nadzor.

2. PRAKSA VELIKIH KOMPANIJA

[1] Kompanije iz Nemačke i Brazila preporučuju upotrebu sistema za kontinualni nadzor energet-

skih transformatora, mada je, u ekonomskom smislu, ovo veoma diskutabilno rešenje. Savremen sistem za kontinualni nadzor energetskih transformatora se sastoji od senzora koji omogućavaju:

1. **merenje temperature ulja na vrhu kotla,**
2. **merenje temperature ambijenta,**
3. **merenje radne struje u svakoj fazi,**
4. **merenje međufaznog napona.** Vrednost napona na koji je priključen transformator se meri na mernom izvodu provodnog izolatora kapacitivnog tipa, upotrebom naponskog senzora. Pri tome, kapacitivnost provodnog izolatora ima ulogu kapacitivnog delila. To omogućava ne samo merenje radnog napona, već i detekciju prenapona, jer naponski senzori imaju frekventni opseg od nekoliko MHz.
5. **merenje pritiska ulja/napona na provodnim izolatorima.** Pad pritiska ulja u provodnim izolatorima impregnisanim uljem može dovesti do proboja unutrašnje izolacije, a što se može sprečiti praćenjem vrednosti pritiska. Pošto je vrednost pritiska zavisna od temperature, pritisak u provodnom izolatoru se poredi sa vrednostima u ostale dve faze, da bi se eliminisao uticaj temperature zavisnosti.

Na provodnim izolatorima kapacitivnog tipa uzrok kvarova je, veoma često, parcijalno pražnjenje između metalnih folija, koje se koriste za oblikovanje električnog polja unutar izolatora. Parcijalna pražnjenja ne dovode do trenutnog kvara izolatora već se šire od sloja do sloja dok naprezanje ne bude toliko da izazove potpuni proboj izolatora. Ako dođe do parcijalnog pražnjenja na jednom sloju kapacitivnost provodnog izolatora će se povećati za ΔC , prema tabeli 1.

Tabela 1.

U_n (kV)	Broj folija (slojeva)	ΔC (%)
123	28	3,6
245	42	2,4
400	60	1,7
500	70	1,4

Promena ΔC kapacitivnosti provodnog izolatora se može detektovati upoređenjem izlaza naponskog senzora sa prosečnim vrednostima sa druge dve faze.

6. **merenje nivoa vlage u ulju.** Koriste se senzori bazirani na tehnologiji „kapacitivnih slojeva”. Imajući u vidu činjenicu da voda nastaje i kao subprodukt razlaganja papira, nivo vlage u ulju predstavlja važan pokazatelj stanja izolacije namotaja. Primera radi, ispitivanjima je dokazano da ako se u papirnoj izolaciji nalazi 4 % vode re-

lativni intenzitet starenja se povećava 20 puta. Merenje nivoa vlage se naročito preporučuje za transformatore koji su dugo u pogonu ili koji rade u ambijentu sa povišenom temperaturom. U zavisnosti od temperature, dolazi do promene odnosa rastvorene vode u ulju i njenog sadržaja u papirnoj izolaciji. Moguće je, za datu vrednost temperature, izračunati tzv. „ravnotežni sadržaj vlage” (*equilibrium of moisture*) u ulju i u papirnoj izolaciji, što je važno u postupku utvrđivanja vremena kratkotrajnog preopterećenja. Postojanje vlage u papirnoj izolaciji snižava opteretivost transformatora, zbog rizika nastanka mehurova. Takođe, dozvoljena vrednost temperature najtoplije tačke je uslovljena sadržajem vlage u papirnoj izolaciji.

7. merenje koncentracije gasova rastvorenih u ulju. Koristi se Hydranov senzor koji prati koncentraciju vodonika. U slučaju porasta koncentracije mora se obaviti DGA-analiza (u beznaponskom stanju) da bi se utvrdila vrsta poremećaja. (DGA– *dissolved gas analysis* (gasna hromatografija)).

8. utvrđivanje položaja regulatora napona. Beleženje promena položaja regulatora napona i vrednosti radne struje omogućava da se utvrdi broj sklopnih operacija i zbirna vrednost struje opterećenja pri kojoj je obavljena sklopna operacija. Kod regulatora napona divertorskog tipa habanje kontakata je funkcija struje opterećenja. Ova informacija je potrebna radi utvrđivanja stanja i, shodno tome, sprovođenja potrebnih mera održavanja. Ako su kontakti pohabani, a to nije detektovano, može doći do njihovog topljenja. Da bi se ovo izbeglo, predloženo je merenje: broja operacija, kumulativne struje prebacivanja i vremena koje je regulator proveo u pogonu.

9. merenje pogonskog momenta motornog pogona regulatora napona,

10. utvrđivanje radnog statusa ventilatora i pumpe.

Podaci o relativnom broju kvarova d_{CM} (%) koje sistem za kontinualni nadzor može da detektuje na pojedinim komponentama energetskog transformatora su navedeni u tabeli 2 (d_{CM} predstavlja odnos broja detektovanih i broja svih kvarova koji su se dogodili na posmatranoj komponenti).

Tabela 2.

Komponenta	d_{CM} , (%)
Namotaji i jezgro	70
Regulator napona	75
Provodni izolatori	80
Kotao	Nema podataka
Ostali pribor	100

Zbirni intenzitet kvarova energetskih transformatora 245 kV i 400 kV je 0,016 3 1/god. Za usvojenu cenu otklanjanja kvara od $0,5 \cdot C_{new}$ (C_{new} - nabavna cena novog transformatora) konstatuje se da se tokom perioda eksploatacije sistema za monitoring od 10 godina ostvari ušteda zbog nižih očekivanih troškova otklanjanja kvara od $0,058 \cdot C_{new}$. **Ovo je podatak koji je apsolutno neprihvatljiv.**

Usvojena cena otklanjanja kvara je preterano visoka. Veliki broj autora smatra da se najsloženiji kvar na transformatoru može obaviti po ceni $(0,15 \div 0,20) \cdot C_{new}$, a da se nakon perioda eksploatacije od 40 godina transformator može revitalizovati po ceni od $(0,5 \div 0,6) \cdot C_{new}$.

Za intenzitet kvarova od 0,02 1/god, sprovođenjem jednostavnih proračuna dobija se da očekivani godišnji trošak zbog otklanjanja kvarova iznosi $(0,003 \div 0,004) \cdot C_{new}$.

Cena napred opisanog sistema je oko 66 000 evra, a u transformatorskim stanicama je tipično instalirano po dva transformatora, tako da sniženje očekivanih troškova otklanjanja kvara ni u kom slučaju ne može biti opravdanje za primenu sistema za monitoring. Takođe, ako ispad jednog transformatora nema posledica po napajanje potrošača primena napred opisanog sistema nije opravdana. U ostalim slučajevima i u zavisnosti od ugovornog odnosa isporučioaca električne energije i potrošača treba izvršiti analizu troškova i koristi.

Jednostavniji sistemi za kontinualni nadzor koštaju 15 000 ÷ 20 000 evra, ali iz do sada publikovanih radova nije poznato koje parametre takvi sistemi mogu da prate da bi se mogla izvršiti analiza opravdanosti njihove primene.

[2] Kompanije iz skandinavskih zemalja praktikuju utvrđivanje stanja transformatora u beznaponskom stanju. Posebnu pažnju posvećuju obnavljanju na mestu polaganja (u transformatorskoj stanici) i održavanju ulja i namotaja u dobrom stanju.

Ulje i papirna izolacija su izloženi starenju. Glavni mehanizam koji uzrokuje slabljenje karakteristika ulja je oksidacija. Oksidacija uzrokuje stvaranje niza subprodukata, od kojih su najvažniji mulj, kiseline i voda. Ovi subprodukti su važni u smislu da njihovo postojanje u izvesnim količinama dovodi do slabljenja izolacionih karakteristika ulja. Mada se proces oksidacije može usporiti (sprečavanjem prodora kiseonika, upotrebom visoko-stabilnog ulja,...), nakon određenog perioda eksploatacije potrebno je ili zameniti ulje ili izvršiti njegovo obnavljanje (filtriranje i sušenje).

Na razlaganje papirne izolacije utiču temperatura, vlaga i kiseline.

Procesi degradacije ulja i papirne izolacije su međusobno snažno uslovljeni. Subprodukti jednog procesa pospešuju drugi, pri čemu često dolazi do akumulacije ovih subprodukata u drugoj komponenti (subprodukti razlaganja ulja se akumuliraju u papirnoj izolaciji i obratno). Na primer, neke kiseline koje nastaju zbog oksidacije ulja upija papir, a furanska jedinjenja, koja su posledica razlaganja papira, rastvaraju se u ulju. Krajnji efekat ovih procesa je veoma teško predvideti, jer su interakcije i detalji pomenutih mehanizama još uvek nedovoljno istraženi. Međutim, nema sumnje da održavanje ulja u dobrom stanju doprinosi i produženju tehničkog veka papirne izolacije.

Stanje ulja se prati merenjem velikog broja parametara: kiselost (neutralizacioni broj), probojni napon, boja, međupovršinski napon u funkciji sadržaja vode, vrednost $tg\delta$, sadržaj inhibitora. Za svaki od pomenutih parametara utvrđeni su intervali dozvoljenih vrednosti izvan kojih je potrebno preduzeti odgovarajuće mere održavanja. Širina i granične vrednosti pomenutih intervala zavise od vrste opreme i naponskog nivoa.

Postoji veliki broj definisanih graničnih vrednosti za pojedine parametre u međunarodnim i nacionalnim standardima, sa uputstvima za nadzor i održavanje ulja u energetskim transformatorima. Preporučene granične vrednosti za pojedine parametre prema različitim standardima, za transformatore u eksploataciji, navedene su u tabeli 3 i tabeli 4.

Radi ilustracije efikasnosti mera i aktivnosti koje se sprovode na mestu polaganja transformatora, u tabeli 5, je dat uporedni pregled vrednosti pojedinih parametara pre i posle sprovedenog obnavljanja ulja, kao i vrednosti koje su propisane standardima.

Pranje i sušenje čvrste izolacije su veoma važni kod otklanjanja kvarova koji zahtevaju otvaranje kotla i/ili kod transformatora koji su dugo bili u pogonu, pa je neophodna njihova revitalizacija. Najvažnije karakteristike procesa pranja i sušenja čvrste izolacije su sledeće: (naizmenično) trajanje faze zagrevanja i faze vakuuma zavisi od mehaničkih svojstava papira, sadržaja vlage i mulja. Vrednosti temperature i pritiska u pojedinim fazama zavise od vrednosti referentnih (kontrolnih) parametara. Primera radi, nakon tretiranja čvrste izolacije na transformatorima 110 kV starim oko 40 godina, otpor izolacije namotaja je porastao (2,5 ÷ 5,5) puta, vrednost $tg\delta$ je snižena 2 puta a sadržaj vlage je opao za više od 2 puta.

[3] Korisnici u Švajcarskoj imaju veoma kompleksan pristup planiranju održavanja energetskih transformatora. Odluke o obimu i vrsti aktivnosti koje će biti sprovedene se donose nakon opsežnih analiza koje obuhvataju, između ostalog, ponašanje

Tabela 3.

Parametar	Standard	< 72,5 kV	72,5 ÷ 170 kV	> 170 kV
Kiselost (mg KOH/g)	IEC 62021	0,30	0,15	0,15
Probojni napon (dielektrična čvrstoća)	IEC 60156	30	40	50
Međupovršinski napon (mN/m)	ISO 6295	22	22	22
$tg\delta$	IEC 247	0,2	0,1	0,1

Tabela 4.

Granične vrednosti pojedinih parametara prema izdanju IEEE C57.106

Parametar	≤ 69 kV	69 ÷ 230 kV	≥ 230 kV
Kiselost (mg KOH/g)	0,20	0,15	0,10
Međupovršinski napon (mN/m)	25	30	32

Tabela 5

Podaci za 247 transformatora kojima je obnavljano ulje u Norveškoj i Švedskoj

- (1) – Kiselost (mg KOH/g). (2) – vlaga (mg/kg);
 (3) – probojni napon (kV/2,5 mm);
 (4) – $tg\delta$ pri temperaturi od 90 °C;
 (5) – međupovršinski napon (mN/m).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Pre obnavljanja	0,157	13,7	68	0,081	23,5
Posle obnavljanja	0,009	6,4	80	0,003	46,0
IEC 60422	0,03	10-15	40-60	0,01-0,015	35
ANSI/IEEE	0,05	15-35	30	-	35

transformatora u prethodnom periodu eksploatacije, važnost transformatora i posledice koje mogu nastati u slučaju njegovog ispada, procena stanja primenom savremenih dijagnostičkih metoda. Koja metoda će, eventualno, biti primenjena zavisi od rezultata DGA-analize, jer ova metoda omogućava detekciju poremećaja u najranijoj fazi. (Za utvrđivanje stanja papirne izolacije primenjuje se metoda merenja stepena polimerizacije, što zahteva uzimanje uzorka papira. Analiza sadržaja furanskih jedinjenja se koristi kao alternativna metoda.) Dakle, u zavisnosti od rezultata DGA-analize primenjuju se sledeće metode: – analiza frekventnog odziva (*Frequency Response Analysis*). Vršiti se merenje vrednosti admitanse namotaja u funkciji učestanosti, a radi utvrđivanja pomenosti ili deformacija namotaja.

- merenje dielektričnog odziva (merenje dielektričnih karakteristika sistema izolacije u funkciji učestanosti, u opsegu 10 mHz ÷ 1 000 Hz). Metoda omogućava utvrđivanje nivoa vlage u papirnoj izolaciji, provodnosti ulja i vrednosti $tg\delta$ ulja.
- akustična detekcija parcijalnih pražnjenja i
- merenje buke i vibracija.

Podaci o stanju transformatora predstavljaju osnovu za sprovođenje ekonomskih analiza tokom kojih se, najčešće, analiziraju sledeće opcije:

- revitalizacija analiziranog transformatora,
- revitalizacija+ugradnja sistema za kontinualni nadzor,
- revitalizacija+nabavka rezervnog transformatora,
- revitalizacija+nabavka rezervnog transformatora ugradnja sistema za kontinualni nadzor.

Kao primer, navedeni su podaci o analizama sprovedenim za blok-transformatore u elektranama u Švajcarskoj i USA, starim (10 ÷ 40) godina. Varijanta b) ima period otplate kraći od 1 godine (obuhvaćeni su očekivani troškovi otklanjanja kvarova i štete zbog neisporučene električne energije za slučaj ispada transformatora). Ovako kratak period otplate se opravdava očekivanim smanjenjem cene otklanjanja budućih kvarova za 85 % i vremena trajanja otklanjanja kvarova za 75 %.

[4,5] Francuski korisnici, takođe, veoma studiozno analiziraju tehno-ekonomske efekte različitih koncepcija održavanja energetskih transformatora, ali su zaključili koje oni saopštavaju dijametralno suprotni od švajcarskih. Bez obzira na mesto transformatora u sistemu i njegovu starost, primena sveobuhvatnog sistema za kontinualni nadzor nema ekonomskog opravdanja. Prihvatljiva je sledeća opcija: kontinualno praćenje samo nekih parametara na transformatorima koji su u prethodnom periodu eksploatacije bili izloženi velikom broju kvarova, nakon sprovedenih analiza troškova i koristi.

Kada je u pitanju održavanje i nadzor transformatora izloženih povećanom broju kvarova proizvođači predlažu sledeću koncepciju:

- Za kontinualni nadzor koristiti sistem koji se sastoji od senzora za praćenje koncentracije vodonika u ulju (Hydranov senzor) i uređaja za registrovanje visokofrekventnih prelaznih procesa.
- Za procenu stanja: periodično sprovođenje DGA-analize.
- U zavisnosti od rezultata DGA-analize ili u slučaju ispada transformatora, radi utvrđivanja vrste kvara: merenje intenziteta parcijalnih pražnjenja, analiza frekventnog odziva, upotreba termovizijske kamere, merenje stepena polimerizacije papirne izolacije, sprovođenje standardnih merenja

(merenje impedanse, kapacitivnosti, struje praznog hoda,...)

[6] Podatke slične francuskim, saopštavaju i korisnici iz Britanije.

[7] Korisnici u Irskoj održavanje sprovode uz korišćenje podataka tipa „otisak prsta” (*finger print*). Na osnovu rezultata rutinske provere stanja donose se odluke o narednim merama. Rutinska provera stanja se zasniva na sprovođenju DGA-analiza svakih 6 meseci do 2 godine, zavisno od naponskog nivoa i važnosti transformatora. Od ostalih metoda primenjuju se: analiza prisustva furanskih jedinjenja, merenje stepena polimerizacije papirne izolacije, merenje nivoa vlage papirne izolacije, merenje vrednosti $tg\delta$, merenje otpora namotaja, merenje struje magnećenja, merenje induktivnosti namotaja, snimanje polarizacionog spektra, analiza frekventnog odziva i snimanje termičke slike.

[8] Najveći napredak kada je u pitanju održavanje na osnovu stanja načinili su korisnici u Japanu. Njihovi kriterijumi za parametre kojima se definiše stanje su znatno strožiji od onih koji se primenjuju u Evropi i Americi, ali je kod njih minimalna dužina veka eksploatacije interkonektivnih transformatora - 45 godina, a prosečan intenzitet kvarova - 0,001 1/god.

Na osnovu dugogodišnjih istraživanja, uspostavljena je analitička zavisnost između vremena t koje je transformator bio u pogonu i vrednosti stepena polimerizacije $DP(t)$:

$$DP(t) = (1 - 0,014 \cdot t) \cdot DP(0) \quad (1)$$

Pošto karakteristike papirne izolacije nije moguće izmeriti tokom pogona transformatora (neophodno je uzeti uzorak), o njima se zaključuje na osnovu subprodukata koji su posledica razlaganja papira. Ključni pokazatelji razlaganja papirne izolacije su ugljen-dioksid CO_2 , ugljen-monoksid CO i furanska jedinjenja. Uspostavljene su veoma precizne relacije između vrednosti stepena polimerizacije i koncentracije CO_2 i CO , odnosno koncentracije furanskih jedinjenja. Na primer:

- ako je vrednost stepena polimerizacije u opsegu (450 ÷ 800) treba vršiti češće kontrole transformatora. Isto treba uraditi i ako je koncentracija ($CO + CO_2$) dostigla vrednost od 0,2 ml/g, ili ako je koncentracija furanskih jedinjenja - 0,001 5 mg/g.
- ako je vrednost stepena polimerizacije u opsegu (250 ÷ 450) treba što pre izvršiti revitalizaciju ili zamenu transformatora. Isto treba uraditi i ako je koncentracija ($CO + CO_2$) dostigla vrednost od 2,0 ml/g, ili ako je koncentracija furanskih jedinjenja - 0,015 mg/g.

3. ZAKLJUČAK

Održavanje energetskih transformatora na osnovu njihovog stanja je i tehnički i ekonomski veoma efikasno. Takođe, sprovođenje preventivnog održavanja ili otklanjanje kvarova na mestu polaganja umesto u fabrici ima svoje puno opravdanje. Veliki broj razvijenih metoda omogućava da se na bilo kojoj komponenti transformatora izvrši brza i precizna detekcija i dijagnosticiranje kvara i da se nakon obavljene intervencije izvrši provera kvaliteta obavljenih radova. Jedino pitanje oko kojeg nema saglasnosti je upotreba sistema za kontinualni nadzor. Sistem kojim se mogu pratiti sve komponente i njihovi parametri je veoma skup, a procenjeni period eksploatacije je 10 godina, tako da je njegova upotreba skoro isključena bez obzira na starost i mesto transformatora u EES-u (intenzitet kvarova pojedinih komponenti transformatora je izuzetno mali). Selektivna upotreba jednostavnijih sistema (praćenje pojedinih parametara odabranih komponenti [9]) zahteva dobro poznavanje ponašanja transformatora u prethodnom periodu eksploatacije i sprovođenje tehno-ekonomskih analiza, uz obuhvatanje niza parametara, radi utvrđivanja opravdanosti njihove primene. Ovde je bitno istaći da su pokušaji autora da kod velikih proizvođača sistema za kontinualni nadzor dođe do podataka o cenama komponenti sistema, radi sprovođenja analiza o opravdanosti primene istih, ostali bez uspeha.

4. LITERATURA

- [1] S. Tenbohlen et al., EXPERIENCE-BASED EVALUATION OF ECONOMIC BENEFITS OF ON-

LINE MONITORING SYSTEMS FOR POWER TRANSFORMERS, CIGRE Session, Paris 2002, paper 12-110

- [2] O. Berg et al., EXPERIENCES FROM ON-SITE TRANSFORMER OIL RECLAIMING, CIGRE Session, Paris 2002, paper 12-103
- [3] P. Boss et al., LIFE ASSESSMENT OF POWER TRANSFORMERS TO PREPARE A REHABILITATION BASED ON A TECHNICAL-ECONOMICAL ANALYSIS, CIGRE Session, Paris 2002, paper 12-106
- [4] J. P. Patelli et al., FRENCH EXPERIENCE WITH DECISION MAKING FOR DAMAGED TRANSFORMERS, CIGRE Session, Paris 2002, paper 12-111
- [5] A. Le Du et al., ON-LINE MONITORING AND DIAGNOSIS: EDF PRACTICES AND ORIENTATIONS, CIGRE Symposium, Berlin 1993, paper 230-07
- [6] T. Breckenridge et al., THE IMPACT OF ECONOMIC AND RELIABILITY CONSIDERATIONS ON DECISIONS REGARDING THE LIFE MANAGEMENT OF POWER TRANSFORMERS, CIGRE Session, Paris 2002, paper 12-115
- [7] T. Noonan, POWER TRANSFORMER ON-SITE CONDITION ASSESSMENT TESTING, CIGRE Session, Paris 2002, paper 12/23/34-05
- [8] N. Amano et al., IMPROVEMENT IN MAINTENANCE AND INSPECTION AND PURSUIT OF ECONOMICAL EFFECTIVENESS OF TRANSFORMERS IN JAPAN, CIGRE Session, Paris 2002, paper 12-107
- [9] J. Nahman, V. Mijailović, ODABRANA POGLAVLJA IZ VISOKONAPONSKIH POSTROJENJA, Elektrotehnički fakultet & Akademska misao, Beograd, 2002.

Rad je primljen u uredništvo 15. 08. 2002. godine



Vladica Mijailović je rođen 1966. godine u Kraljevu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Na Energetskom odseku elektrotehničkog fakulteta u Beogradu je diplomirao 1991. godine. Magistrirao je i doktorirao na istom fakultetu 1995. i 1999. godine, respektivno. Nakon diplomiranja zaposlio se na Tehničkom fakultetu u Čačku, gde je i sada zaposlen u zvanju docenta, na Katedri za Industrijsku Energetiku.

Kao autor ili koautor do sada je objavio 2 rada u vodećim međunarodnim časopisima, 2 rada u vodećem nacionalnom časopisu i 12 radova na domaćim konferencijama i savetovanjima. Koautor je jednog univerzitetskog udžbenika, jedne zbirke zadataka i jedne monografije nacionalnog značaja. Učestvovao je na dva projekta finansirana od strane MNTR.

Aleksandar R. Katančević

Poređenje modela farme vetrogeneratora na bazi analize prelaznih stanja

Stručni rad
UDK: 621.311.24; 620.91; 620.92

Rezime:

Ovaj rad prikazuje poređenje ponašanja različitih modela simulacija - jednog naspram više vetrogeneratora kod analize prelaznog stanja u slučaju kvara. Analiza je urađena za slučaj kvara u lokalnoj mreži na koju je farma vetrogeneratora priključena. Studija razmatra dva moguća rešenja sa mašinama naizmjenične struje (indukcionim (asinhronim) i sinhronim). Rezultati ukazuju na mogućnost uprošćenja modela farme vetrogeneratora za studije tranzijentne analize. Predstavljeni rezultati su verifikovani jedino sa aspekta kompjuterskih simulacija.

Ključne reči: modeli simulacije, tranzijent, farme vetrogeneratora

Abstract:

WIND FARM'S MODEL COMPARISON ON THE BASIS OF ANALYSES OF TRANSIENT STATES

This paper gives comparison on single versus multi units represented wind farm model in terms of transient analyses. Analyses were performed for fault placement in the local power grid. A study was done concerning two possible types of AC machines (induction (asynchronous) and synchronous). Results aim at possible simplifications of transient stability study for wind farm models. Results presented here are verified only in terms of computer simulations.

Key words: simulation models, transients, wind farms

1. UVOD

Iskorišćenje resursa vetra u elektroenergetske svrhe beleži zapažen razvoj u Evropi i svetu [1]. Vetrogeneratori nisu nikakva novina sa stanovišta znanja i tehnološkog vremena kome pripadamo, dok je njihova intenzivnija primena poslednjih godina zasigurno napredak vredan pažnje. Ta primena može se okarakterisati aspektom profita s' jedne i tehničkim a i ekonomskim preprekama s' druge strane.

Potencijalni biznis (tj. mogućnost zarade i povlašćeni status pri prodaji energije proizvedene vetrom) za učesnike na otvorenim tržištima električne energije u svetu i Evropi je glavni pokretač razvoja ove elektroenergetske grane. S' druge strane pak, tehnički aspekt (nivo dostupnog znanja, tehnologija izrade, zadovoljenje delikatnih tehničkih uslova za prijem projekta), kao i ekonomski aspekt (spora otplata uloženog kapitala i visoka cena proizvedenog kilovatačasa električne energije koja je direktna posledica

Mr Aleksandar Radovan Katančević, dipl. el. ing. – Power Systems Laboratory, Helsinki University of Technology, 02150, Espoo - Helsinki, Otakaari 5A.

cene investicije) usporava integraciju vetrogeneratora u elektroenergetsku mrežu.

Po pitanju (priključenja) farme vetrogeneratora, ili pak samo jednog vetrogeneratora, na električnu mrežu, postoje sledeće vrste rešenja:

- Jednog vetrogeneratora na izolovani niskona-ponski električni sistem,
- jednog vetrogeneratora na niskonaponsku distributivnu električnu mrežu,
- farme vetrogeneratora na viskonaponsku električnu mrežu (preko kraćeg dalekovoda srednjeg napona u slučaju da je farma postavljena na udaljenom i nenaseljenom mestu,)
- kao i moguća priključenja farme vetrogeneratora direktno na distributivnu mrežu (što je izuzetno redak slučaj i zahteva, pre svega, veću investiciju za ojačanje postojeće mreže.)
- među skuplja i ujedno najkvalitetnija tehnička rešenja spadaju priključci farme vetrogeneratora sa korišćenjem konvertora (AC/DC/AC konekcija). Ova rešenja zbog visoke cene investicije (cene konvertora) trenutno zaobilaze pažnju investitora (vlasnika) generatorskih jedinica koji proizvedenu električnu energiju prodaju na otvorenim (deregulisanim) tržištima električne energije. Visoka cena investicije implicira visoku cenu proizvedenih kilovatsata električne energije, te ta proizvodnja nije konkurentna sa nižim cenama koje nude ostali proizvođači, a takođe treba uočiti da skuplja investicija zahteva duže vreme za otplatu.

Sa aspekta povezivanja farme vetrogeneratora na električnu mrežu, navedeni načini se najčešće koriste.

Tehnički problemi koji ograničavaju ubranu primenu pridruženi su procesu integracije vetrogeneratora (farme vetrogeneratora) na mrežu. Integracija podrazumeva izrađen tehnički zakon sa tehničkim uslovima koji se moraju ispuniti za priključak na elektroenergetsku mrežu. Neophodni tehnički uslovi (preporuke) ne predstavljaju samo zakonsku nužnost, već u celoj svojoj meri predstavljaju neophodne tehničke karakteristike koje farma vetrogeneratora mora zadovoljiti kako bi bila sposobna da radi u normalnom režimu ispunjavajući istovremeno sve zahteve za kvalitet isporučene energije.

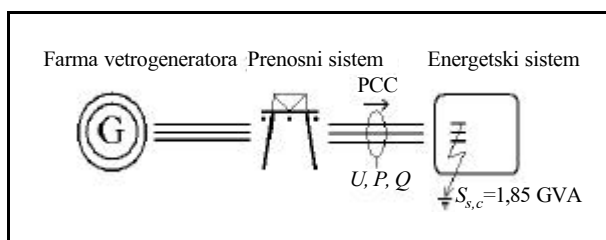
Jedan od osnovnih zahteva, a ujedno i osnovni problem istraživačke analize prilikom izrade zakonskih akata, za priključak na električnu mrežu jeste tranzijentna i dinamička analiza funkcionisanja sistema farme vetrogeneratora i elektroenergetske mreže. Takođe analiza ponašanja farme vetrogeneratora u tranzijentnom i dinamičkom periodu predstavlja istraživački problem za proizvođače (kao i za korisnike) farmi vetrogeneratora. Razlozi tranzijenta mogu biti različiti, ali glavni uslov koji je od intere-

sa jeste da farma vetrogeneratora treba da podnese privremeni kvar u elektroenergetskoj mreži, u trajanju od 0,1 do 0,25 sekunde, a da se prilikom otklona kvara vrati u stabilni režim.

Ovaj rad, usko gledano, predstavlja deo projekta gore navedenog tipa, u kome je vršeno ispitivanje tranzijentnog ponašanja farme vetrogeneratora u slučaju kvara u lokalnoj električnoj mreži. Široko pak gledano, ovaj rad pripada tipu studija koje se bave i istražuju proces integracije farme vetrogeneratora na elektroenergetski sistem.

2. RAZMATRANI SISTEM

Združeni sistem farme povezanog vetrogeneratora i elektroenergetskog sistema, preko prenosnog sistema naizmenične struje, prikazan je na slici 1. Kao tačka konekcije farme vetrogeneratora, označeno je mesto PCC (Point of Common Coupling), gde lokalni prenosni sistem srednjeg napona prilazi višem naponskom nivou (dok to mesto u deregulisanom sistemu predstavlja početak mreže operatera prenosnih sistema (TSO - Transmission System Operator).



Slika 1. Farma vetrogeneratora, lokalni prenosni sistem srednjeg napona, energetski sistem, kao i konekciona tačka (PCC) zaključno sa naznačenim referentnim smerom za merenja napona i snaga

Na mestu konekcije, (PCC,) u kompjuterskoj simulaciji, postavljena su merenja za linijski napon, protok aktivne i reaktivne snage za naznačeni referentni smer, slika 1.

Kompjuterska simulacija je kompletno urađena softverom za elektromagnetsku tranzijentnu analizu elektroenergetskih sistema PSCAD/EMTDC, kanadske proizvodnje (o softveru detaljnije u [2]). Električna konstrukcija farme vetrogeneratora je urađena u skladu sa praktičnim preporukama IEEE-a izdatim u [3].

3. TRANZIJENTNA ANALIZA

U cilju lakše evaluacije učinjenih simulacija, određeni tehnički parametri su održavani konstantnim za sve testirane modele:

- Impedansa kvara je podešena da predstavlja udaljenost 10 km od mesta konekcije (PCC.)

– Vrednost konstante inercije za rotorski sistem (uključujući krila elise vetrogeneratora i osovinu mašinerije sa svim obrtnim masama (zupčanicima) iznosila je $H = 3,5$ s (što predstavlja jako dobru aproksimaciju stvarne vrednosti i preporučuje se za korišćenje (pomenuta vrednost odgovara vremenskoj konstanti inercije $T_i = 2H$))

$$H = \frac{T_m T_e}{2} \quad (1)$$

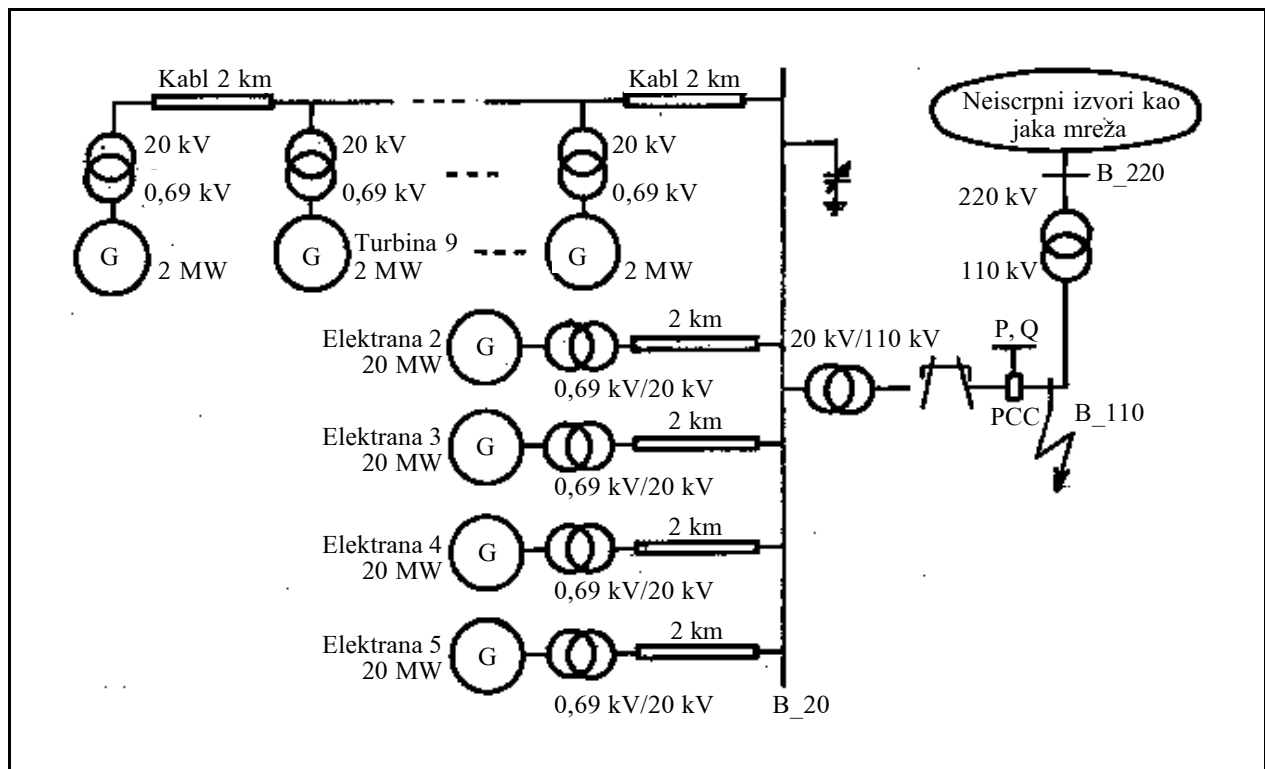
gde je T_m - mehanički (obrotni) moment (koji predstavlja snagu vetra) e - ubrzanje rotora, T_e - električni (otporni) moment.

Konstantu inercije, kao i ostale konstrukcione parametre važne za mašinu sa aspekta stabilnosti, jako je teško utvrditi sa velikom preciznošću, a uz to se čuvaju kao tajna i nisu javno dostupni u konstrukcionim karakteristikama koje se dostavljaju kupcima. – Mehaničko opterećenje sa kojim deluje vetar na krila elise vetrogeneratora, radi poređenja, je $|T_m| = 0,8$ pu. Ova vrednost predstavlja 80 % snage vetra (od ukupno 100 %) pod kojom turbina može da radi. Ovaj parametar je odabran tako da predstavlja čestu situaciju za nominalni režim na terenu, a ujedno pri ovakvoj situaciji sam vetrogenerator nije podvrgnut maksimal-

nom stresu koji može da pretrpi prilikom kvara u lokalnoj mreži za slučaj 100% ulazne snage vetra. Valja napomenuti da ova studija ima za cilj upoređenje modela što jedino znači da fer (jednaki) uslovi moraju biti postavljeni za sve modele. U ni jednom slučaju to ne znači da moraju biti na granicama svojih radnih režima. Kao još jedan sporedan, a interesantan detalj, valja napomenuti da za 80 % ulazne snage vetra, izlaz aktivne snage vetrogeneratora iznosi oko 70 % nominalne prividne električne snage. Glavni razlog umanjene vrednosti jesu gubici u konverziji kao i konstrukcioni razlozi (vrednost faktora snage same mašine.)

4. POREĐENJE MODELA FARME VETROGENERATORA

Dva različita simulaciona modela za farmu vetrogeneratora sa istom izlaznom aktivnom snagom i konstantama inercije su testirani i upoređeni. Prvi (uprosćeni) model farme vetrogeneratora je predstavljen sa samo jednom mašinom (vetrogeneratorom) nazivne snage 100 MVA (ovo nije realan primer, jer se radi o simulaciji). Drugi (detaljniji - realniji) model iste farme je predstavljen sa više mašina različitih nazivnih snaga koje u zbiru iznose, takođe, 100 MVA. U tabe-



Slika 2. Drugi model (detaljniji - realniji) farme vetrogeneratora, lokalni prenosni sistem srednjeg napona, energetski sistem, kao i konekciona tačka (PCC) zaključno sa naznačenim referentnim smerom za merenja napona i snaga

Tabela 1.

Poređenje jedinstvenog naspram više jediničnog modela farme vetrogeneratora; slučaj sinhronog generatora; *referiše na vrednost u nominalnom režimu a za referentni smer kao na slici 1, ** minimalna dostignuta vrednost u tranzijentnom periodu,^R referentni smer kao na slici 1

Udaljenost mesta kvara od PCC-a (km)	Napon (pu)						Tok ^R reaktivne snage na PCC -u (pu)		Stabilno?	Model
	0,69 kV		20 kV		110 kV PCC		norm*	kvar**		
	norm*	kvar**	norm*	kvar**	norm*	kvar**				
10	+1,07	+0,32	+1,05	+0,24	+1,02	+0,15	+0,09	-0,81	DA	Jedan generator
	+1,07	+0,29	+1,05	+0,23	+1,02	+0,15	+0,09	-0,82	DA	Vise generatora

lama i slikama za izlaznu nazivnu snagu farme vetrogeneratora od 100 MVA odgovara vrednosti od 1 pu. Preciznije, model broj dva, farme vetrogeneratora sastoji se od 10 vetrogeneratorskih jedinica nazivne snage 2 MVA (dostupne u realnosti) i 4 jedinica nazivne snage 20 MVA (nerealnih, koje služe da pojednostave model farme i skrate vreme simulacije.)

Ovaj test je nezavisno urađen, kako za indukcione (asinhronne), tako i za sinhronne vetrogeneratore.

4.1. Model farme vetrogeneratora sa indukcionim (asinhronim) generatorima

Za slučaj indukcionih vetrogeneratora vreme otklona kvara je bilo podešeno na 0,15 sekundi. Od važnijih električnih parametara za indukcionu mašinu sa aspekta tranzijentne stabilnosti, a koji su bili odabrani i podešeni u setup-u simulatora jeste: vrednost električnog obrtnog momenta pri startu mašine kad ona radi kao motor $T_{eSTART} = 1$ pu, a za nominalnu vrednost napona na krajevima generatora, ako i maksimalna vrednost obrtnog električnog momenta, $T_{eMAX} = 2$ pu. Ovi parametri su važni jer modeluju električnu karakteristiku indukcionne mašine. U ovom slučaju date vrednosti odgovaraju za motorni režim, a poznato je da je za slučaj generatorskog režima ova karakteristika inverzno (centralno) simetrična. Veoma precizno, za slučaj generatorskog rada maksimalni električni otporni momenat (mreže) biće nekih 5 % manji od istog obrtnog električnog momenta za slučaj motornog režima. Dok analogna definicija za početni električni momenat teško može biti urađena možda je najlakše to povezati sa dinamičkom vrednošću električne karakteristike pri klizanju od $s = -1$, i ta vrednost iznosi 0,6 pu za testirani kompjuterski model. Ovako definisana i opisana električna karakteristika korišćenog indukcionog generatora odgovara isključivo korišćenom modelu. Možeće je da se u praksi te vrednosti razlikuju.

Korišćeni modeli indukcionih generatora su opremljeni kompenzacionim baterijama, na lokalnom nivou.

Rezultati dobijeni simulacijom su dati na slici 3, a numerički očitani i dati u tabeli 1. Na slici 1 jasno se mogu uporediti oblici signala dva moguća test modela farme vetrogeneratora. Međutim, u tabeli 1 isti signali se mogu i numerički uporediti sa tačnošću od dve decimale. Treba primetiti da su merne veličine u radnim opsezima u okvirima propisanih, tako da radna vrednost za napon ne prelazi 1,1 pu od nominalne vrednosti ni za jednu tačku kako u farmi tako i na prenosnom sistemu. Tok reaktivne snage je takođe sveden na nulu tj. 0,09 pu, što odgovara dobrim radnim uslovima. Kad se kvar dogodi, signali (tj. vrednosti) za napone opadaju na minimum određen sa mestom kvara, tj. impedansom kvara. Dostignuti minimum za napon je niži ukoliko je mesto u električnom smislu bliže mestu kvara, pa tako na 110 kV (PCC-u) imamo +0,15 pu, dalje na 20 kV je +0,23 pu, dok na samim terminalima generatora iznosi +0,32 pu.

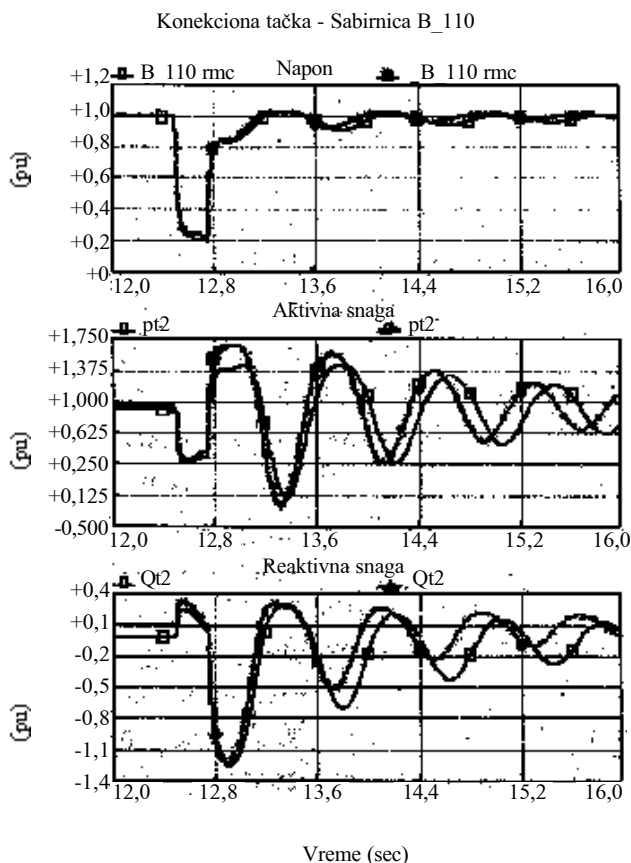
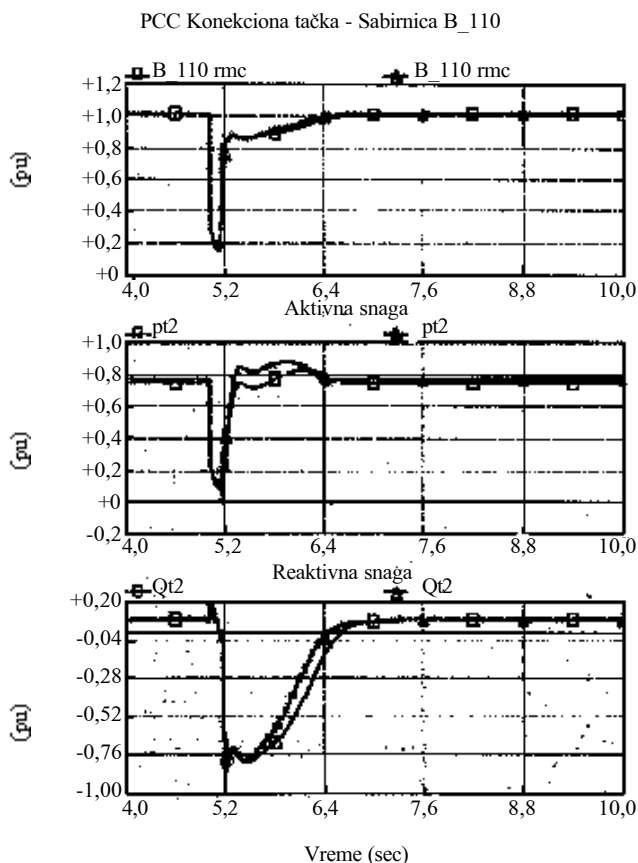
Na dubinu kvara pored impedanse i mesta kvara u velikoj meri utiče i kompenzacija (tj. moguće generisanje) reaktivne snage pre nastanka, a i u toku kvara. Ukoliko je kompenzacija veća jasno je da će napon opasti na višu vrednost nego kod slučaja sa manjom kompenzacijom. Napon, pak, dalje direktno utiče na električnu karakteristiku indukcionog generatora, što, pak, uslovljava stabilnost samog generatora; u ovom slučaju tranzijentnu stabilnost samog generatora, a ujedno i cele farme.

Model farme testiran i prikazan ovde, a za slučaj indukcionih generatora, je opremljen i fiksnim promenljivim kondenzatorima na naponu od 20 kV za razlog kompenzacije reaktivne snage. Ovo je ujedno i najjeftinije rešenje koje služi za podešavanje toka reaktivne snage u nominalnom režimu. Možeće je, pak, ugraditi i skuplje rešenje, brze prekidne kondenzatore koji mogu da budu uključeni ili isključeni od strane automatike u delovima sekunde, i tako brzo poboljšaju nastalu situaciju i za slučaj prolaznog kvara. Ovakvi uređaji mogu poboljšati tranzijentnu stabilnost, i kvalitet rešenja farme, ali i direktno utiču na cenu celog projekta.

4.2. Model farme vetrogeneratora sa sinhronim generatorima

Za slučaj modela sa sinhronim generatorima, vreme trajanja kvara je bilo podešeno na 0,25 s. Poželjno testiranje na duži vremenski interval, od 0,25 s za prethodni slučaj indukcionog generatora je iziskivao preispitivanje nekih od korišćenih pa-

rametara, a ukoliko se ne bi preispitalo to bi dalje uslovalo njihovo nerealan poređenje sa sinhronim generatorima za slučaj tranzijentne analize. Kako bi se taj nedostatak otklonio, indukcionim generatorima su testirani za kraće vreme kvara od 0,15 s. Ova razlika ni u čemu ne osporava međusobno upoređenje jednog naspram više modelovanih generatora u okviru farme istog tipa, što jeste glavni cilj



Slika 3. Poređenje farme generatora modelovane sa jednim naspram modela sa više nezavisnih indukcionih (asinhronih) generatorskih jedinica. Tamnom bojom linije (markiranom kvadratićem \square) označen je model sa jednim generatorom, dok je svetlom bojom linije (markiranom trouglićem Δ) označen model koji sadrži više generatorskih jedinica.

Slika 4. Poređenje farme generatora modelovane sa jednim naspram modela sa više nezavisnih sinhronih generatorskih jedinica. Tamnom bojom linije (markiranom kvadratićem \square) označen je model sa jednim generatorom, dok je svetlom bojom linije (markiranom trouglićem Δ) označen model koji sadrži više generatorskih jedinica.

Tabela 2.

Poređenje jedinstvenog naspram više jediničnog modela farme vetrogeneratora; slučaj sinhronog generatora; *referiše na vrednost u nominalnom režimu a za referentni smer kao na slici 1, ** minimalna dostignuta vrednost u tranzijentnom periodu, ^R referentni smer kao na slici 1

Udaljenost mesta kvara od PCC-a (km)	Pobuda V_{ref} (pu)	Napon (pu)						Tok ^R reaktivne snage na PCC - u (pu)		Stabilno?	Model
		0,69 kV		20 kV		110 kV PCC		norm.*	kvar**		
		norm.*	kvar**	norm.*	kvar**	norm.*	kvar**				
10	1,135	+1,12	+0,74	+1,03	+0,41	+1,00	+0,20	-0,01	-1,25	DA	Jedan generator
	1,135	+1,12	+0,68	+1,06	+0,47	+1,01	+0,21	+0,12	-1,24	DA	Više generatora

ovoga rada; a u pravoj meri onemogućuje poređenje različitih tipova generatora sa pogleda njihovih performansi (karakteristika,) što zapravo nije ni najmanji cilj ovoga rada.

Blok diagram korišćene pobude veoma važnog bloka za stabilnost i kontrolu sinhronog generatora, je dat na slici 5 u dodatku, na kraju ovoga rada.

Rezultati dobijeni simulacijom su dati na slici 4, a numerički predstavljeni u tabeli 2.

5. ZAKLJUČAK

Detaljni višemašinski modeli farmi vetrogeneratora, korišćenih za svrhu dinamičkih simulacija, uglavnom u okviru softvera za dinamičke simulacije, mogu se slobodno zameniti sa manje detaljnim, ili čak jedinstvenim modelom za slučajeve kada je glavni cilj ispitivanje kratkih tranzijenata, ali samo u okviru softvera sa modelovanim tranzijentnim karakteristikama. Zaključak je izveden na osnovu sledećih pokazatelja: za iste postavke simulacija oba modela farme imaju istu zadovoljavajuću stabilnost, vremenski tok napona, aktivne i reaktivne snage na mestu priključka (PCC) farme na električnu mrežu se poklapaju u velikom procentu. Kao mali nedostatak (tj. odstupanje od idealnog) je različitost učestalosti oscilovanja vremenskog toka nakon otklona kvara, kod modela farme sa sinhronim vetrogeneratorima. Utisak je da je taj nedostatak očigledan u smislu oblika ali nebitan sa stanovišta traženih rezultata (zadovoljenja stabilnosti.)

6. PRIMENA

Overeni rezultati u simulacijama imaju za cilj da potvrde iskustvene pretpostavke o mogućnosti korektnog modelovanja koherentne grupe (farme) generatora (u ovom slučaju vetrogeneratora) za potrebe tranzijentne analize. Da bi se ova uprošćenja primenila, neophodno je imati u vidu kako održanje istih vrednosti konstante inercije, tako i nazivne snage farme vetrogeneratora.

Urađeni rad je originalan u celom svom domenu, a sa stanovišta ideja i prikazanih rezultata.

7. ZASLUGE

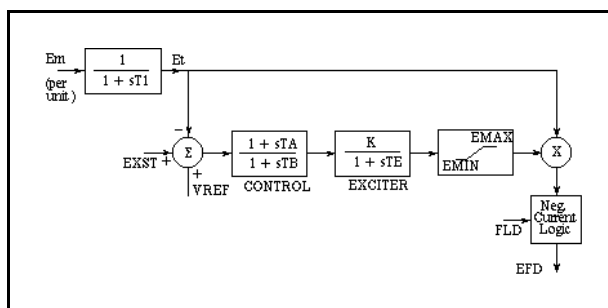
Autor neizmerno zahvaljuje dr Zoranu Božiću iz Western Power kompanije u Australiji, gospodinu Matti Lahtinenu, iz Fingrid Oyj. kompanije u Finskoj, doc. dr Ritvi Hirvonen, direktoru nacionalnog istraživačkog instituta, VTT, za sektor energetike, u Finskoj, na njihovim iskustvenim i tehničkim save-

tima kao i ukazanoj pažnji prilikom naučne saradnje. Takođe autor neizmerno zahvaljuje katedri za elektroenergetske sisteme na tehnološkom univerzitetu u Helsinkiju na finansijskoj pomoći i odlične ponuđene tehničke i istraživačke uslove. Autor, dalje, zahvaljuje naučnim resursima IEEE-a, kao i redakciji časopisa „Elektroprivreda” i gospodinu Branislavu Boškoviću na brznoj, korektnoj i izdašnoj saradnji.

8. DODATAK

U dodatku rada daje se par napomena. Korišćena frekvencija je $f_s = 50$ Hz.

Prikazani blok dijagram, slika 5, je korišćena pobuda kod sinhronog vetrogeneratora.



Slika 5. Blok dijagram korišćenog modela pobude, „IEEE solid state exciter - SCRX19,” [2]

Matematički modeli korišćenih mašina za simulacije prikazane ovde su prvi put pomenuti u [4]. Bazirani su na tzv. Generalnoj teoriji električnih mašina po kojoj se svaki tip električne mašine može prikazati kao idealizovana dvopolna mašina. Ova vrsta modelovanja električnih mašina kasnije je korišćena u EMTP tipu softvera a malo kasnije je iz te vrste proizašao i PSCAD/EMTDC, [2]. Detaljnije o samim modelima može se naći i u [5].

9. LITERATURA

- [1] D. Mikičić Ž. Đurišić, B. Radičević, VETROGENERATORI - PERSPEKTIVNI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE, Elektroprivreda, broj 4, Beograd, Srbija i Crna Gora, 2003.
- [2] PSCAD/EMTDC - V3, THE PROFESSIONAL'S ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS TOOL FOR POWER SYSTEM SIMULATION, Manitoba HVDC Research Centre Inc, info@pscad.com, www.pscad.com, www.hvdc.ca.
- [3] IEEE Standards Coordinating Committee 23, IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR THE ELEC-

- TRICAL DESIGN AND OPERATION OF WIND FARM GENERATING STATIONS, April 1991.
- [4] B. Adkins, R.G. Harley, THE GENERAL THEORY OF ALTERNATING CURRENT MACHINES, Chapman & Hall, London, c 1975.
- [5] A. R. Katančević, TRANSIENT AND DYNAMIC STABILITY ON WIND FARMS, - Master's Thesis, strane od 25. do 28. Dostupno preko interneta: <http://www.hut.fi/katale/publications>.

Rad je primljen u uredništvo 17. 03. 2003. godine



Aleksandar R. Katančević je rođen 12. avgusta 1977. godine u Pirotu, Republika Srbija. Diplomom Master of Science in Electrical Engineering (magistar elektrotehnike) je dobio u martu 2003. godine na katedri za elektroenergetske sisteme tehnološkog fakulteta u Helsinkiju. Apsolvirao je 2000. godine na energetskom smeru Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Srednju elektrotehničku školu završio je 1996. godine na smeru Automatike.

U periodu od 2000. do 2003. godine radio je kao student praktikant u ABB Power Systems AB kompaniji u Švedskoj, ABB Corporate Research Ltd u Švajcarskoj, zaposlen u kompaniji Fingrid Oyj u Finskoj. Naučno-istraživačkim radom na temu integracija farmi vetrogeneratora, pri fakultetu u Helsinkiju, bavio se u 2002. i 2003. godini.

Termička naprežanja OPGW pri zemljospoju u prenosnim mrežama Elektroprivrede Srbije

Stručni rad
UDK: 621.315; 621.316.99

Rezime:

Korektna procena maksimalne temperature optičkih vlakana u zaštitnim užadima tipa OPGW predstavlja preduslov za normalan rad ove vrste telekomunikacionih prenosnih puteva. Za ovu procenu potrebno je poznavanje impedansi zaštitnih užadi, čije se vrednosti kod velikih struja kvara razlikuju od vrednosti pri redovnom pogonu nadzemnog voda. U radu su izloženi aproksimativni postupci za procenu impedansi zaštitnih užadi u uslovima zemljospoja, kao i postupci za procenu maksimalnih temperatura njihovih sastavnih delova, a posebno optičkih vlakana.

Ključne reči: OPGW (zaštitna užad sa optičkim vlaknima), impedanse zaštitnih užadi, raspodela struje zemljospoja

Abstract:

OPGW TEMPERATURE RISE DURING GROUND FAULTS IN THE TRANSMISSION SYSTEM OF EPS

Proper estimate of OPGW temperature rise during the ground fault is an unavoidable condition for the normal operation of that kind of communication lines. Good knowledge of the ground wire and OPGW impedances is needed for that purpose, especially because resistances and reactances in the ground fault regime differ significantly from the ones in normal operation of transmission lines. An approximative procedure for ground wire impedances evaluation is presented and methods for a rough estimation of the OPGW component temperature rise are discussed.

Key words: OPGW, ground wire impedances, ground fault current distribution

1. UVOD

Zaštitno uže sa optičkim vlaknima (Optical Ground Wire - OPGW) predstavlja telekomunikacionu (TK) vezu izuzetno velike propusne moći. Postavljanjem zaštitne užadi ovog tipa na nadzemne vodove 110 kV, 220 kV i 400 kV u mreži Elektroprivrede Srbije (EPS) ne samo da se kvantitativno povećava obim postojeće mreže prenosnih TK puteva,

već se u značajnoj meri poboljšava kvalitet i brzina prenosa informacija. Time se omogućava brza i pouzdana razmena velikih količina podataka od značaja za rad celog elektroenergetskog sistema, čime se povećava stabilnost i sigurnost njegovog rada.

Pošto se deo podataka dobijenih preko TK mreže koristi za rad u realnom vremenu, svako oštećenje ili prekid OPGW, pored toga što ugrožava rad voda kome pripada, direktno ili indirektno ugrožava

i rad proizvodno - prenosnog sistema. Upravo ta okolnost nameće potrebu za detaljnom analizom svih faktora koji bi mogli da se negativno odraze na normalni pogon ove vrste zaštitnih užadi.

OPGW, kao i svako konvencionalno zaštitno uže, izloženo je mehaničkim i termičkim napreznjima. Kako u redovnom pogonu nadzemnog voda u zaštitnim provodnicima praktično ne postoji nikakva struja, termička napreznja zbog struje u njima nastaju samo pri atmosferskim pražnjenjima i za vreme zemljospoja. Ne upuštajući se u problematiku koja se odnosi na prvu vrstu od dva napreznja, u ovom izlaganju bavićemo se pojavama koje su u vezi sa zagrevanjem zaštitnih užadi zbog struja industrijske učestanosti.

Mreže 110 kV, 220 kV i 400 kV u elektroenergetskom sistemu EPS-a rade sa direktno uzemljenom neutralnom tačkom, te magnitude struja jednofaznih kratkih spojeva, tj. zemljospojeva, u njima dostižu znatne vrednosti. Štaviše, zbog ugradnje direktno uzemljenih transformatora velike snage u sistemu postoje mesta u kojima struje zemljospoja po vrednosti prevazilaze struje trolejne kratke veze [1]. U mrežama 400 kV i 220 kV ta mesta se po pravilu nalaze u blizini većih proizvodnih kapaciteta (Obrenovac, Đerdap, Kolubara), dok se u mreži 110 kV pojavljuju i na drugim mestima [2]. U nekim razvodnim postrojenjima 110 kV očekuje se da će se do 2010. godine struje zemljospoja sasvim približiti nivou od 31 kA [2] prema kome je standardizovana rasklopna oprema [1]. S druge strane, analize [1] pokazuju da u istom vremenskom periodu u mrežama 220 kV i 400 kV struje kratkog spoja (pa i zemljospoja) neće premašiti nivo od 40 kA, te da neće biti potrebno izvršiti prelaz i standardizaciju opreme na sledeći viši nivo od 63 kA.

Za ispravan rad zaštitnog užeta tipa OPGW neophodno je zaštititi ga od prekomernih zagrevanja. Kod nas još ne postoje propisi, niti standardi koji definišu granične temperature optičkih vlakana u OPGW. Proizvođači ove vrste užadi garantuju njihov normalan rad ako temperature pri kratkom spoju nisu iznad 150 °C do 160 °C. Što su struje kvara veće, to su veće i šanse da se ova granica dostigne i pređe, pa navedeni podaci o strujama zemljospoja koje u elektroenergetskom sistemu EPS-a nisu male, ukazuju da su tačne procene termičkih napreznja i pravilan izbor OPGW preduslovi za normalno funkcionisanje elektroprivredne TK mreže.

2. IMPEDANSE ZAŠTITNIH UŽADI PRI STRUJAMA ZEMLJOSPOJA

2.1. Prethodne napomene

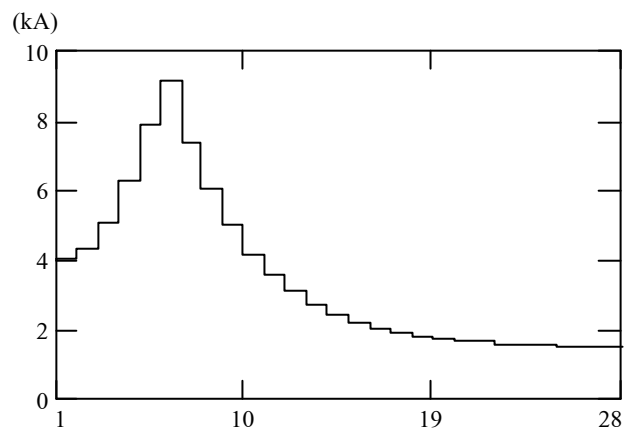
Za termičku proveru provodnika neophodno je poznavati maksimalnu struju koja se očekuje u tom

provodniku, a da bi se znala ta struja mora se poznavati raspodela struja u mreži kojoj provodnik pripada. Međutim, svaka valjana analiza raspodele struja u električnoj mreži pretpostavlja dobro poznavanje impedansi sa kojima se izvodi proračun. Posebno ako se radi o zaštitnim užadima, kod izbora vrednosti impedansi merodavnih za proračun treba voditi računa o nekim eksploatacionim specifičnostima ove vrste provodnika.

Prvo, u zaštitnim užadima struja industrijske učestanosti postoji samo za vreme zemljospoja u mreži kojoj ona pripadaju, zbog čega se može uzeti da je početna temperatura za proračun zagrevanja provodnika jednaka temperaturi okoline.

Drugo, zbog zanemarivo malih otpornosti uzemljenja na oba kraja prenosnog nadzemnog voda, struja kroz zaštitnu užad ista je u svim njegovim rasponima samo tada kada se zemljospoj događa negde u mreži van trase voda. Ako je zemljospoj nastao u opsegu trase voda, struje kroz zaštitnu užad u okolini stuba sa kvarom razlikuju se od raspona do raspona (slika 1).

Izuzetno, na deonicama trase koje su dovoljno udaljene od mesta kvara i od oba kraja voda (rasponi br. 26 i 27 na slici 1), struje zaštitnih užadi u susednim rasponima gotovo se ne razlikuju.



Ordinate: efektivne vrednosti struje u zaštitnim užadima

Apscisa: redni brojevi raspona

Zemljospoj na stubu broj 6

Ukupan broj raspona na vodu 60

Slika 1. Tipičan grafik raspodele struje u zaštitnim užadima za vreme zemljospoja na vodu

Treće, za vreme zemljospoja gustina struje u zaštitnim užadima zbog njihovog manjeg preseka značajno je veća od gustine struje u faznim provodnicima. Pošto je temperatura provodnika za vreme kratkog spoja eksponencijalna funkcija kvadrata gustine struje [3], zaštitni provodnik će se više zagrejati nego fazni, pa će i pojave koje prate porast temperatu-

re biti daleko više izražene nego kod faznih provodnika. Drugim rečima, dok se proračun raspodele struja kroz fazne provodnike može sprovesti kao da se otpornost faznih provodnika tokom kratkog spoja ne menja, ignorisanje povećanja otpornosti zaštitnih užadi može da dovede do grešaka.

Četvrto, zaštitna užad izvode se od provodnih materijala različitih električnih i toplotnih osobina. Zbog toga se za vreme kratkog spoja pojedine komponente užadi različito zagrevaju.

Peto, u svim provodnim komponentama užadi tipa OPGW za vreme zemljospoja razvija se toplota, usled čega njihova temperatura u trenutku isključenja kvara može biti znatna. Nasuprot tome, optička vlakna, koja ne provode struju i u kojima se ne razvija nikakva toplota, gotovo se ne zagrevaju dok traje kvar. Njihova temperatura počinje primetno da raste tek nakon isključenja struje, da bi posle dvadesetak sekundi dostigla zajedničku vrednost koju u procesu međusobne razmene toplote dostižu provodne i neprovodne komponente užeta.

Šesto, zaštitna užad su ili u celosti izvedena od čeličnih pocinkovanih žica, ili sadrže komponente u kojima značajan deo preseka pripada čeliku (alumoveld, na primer). Zbog toga njihova sopstvena induktivnost nije konstantna, već zavisi od struje, što znači da su im i sopstvene reaktanse funkcije struje.

Sedmo, zbog relativno malog spoljnog prečnika (reda 15 mm) srednja vrednost magnetskog polja u zaštitnom užetu već pri strujama reda 2 kA dostiže približno 22 kA/m. Kriva magnetčenja $B=B(H)$ čeličnih materijala od kojih se izrađuju užad za nadzemne vodove ima koleno za $H=3$ do 5 kA/m [7,9], tako da se za vreme zemljospoja sa strujama kroz uže iznad 5 kA čelični delovi preseka nalaze u oblasti zasićenja. Zbog toga se sopstvena induktivnost užeta smanjuje sa porastom struje, pa će se i reaktansa merodavna za proračun smanjivati sa porastom struje.

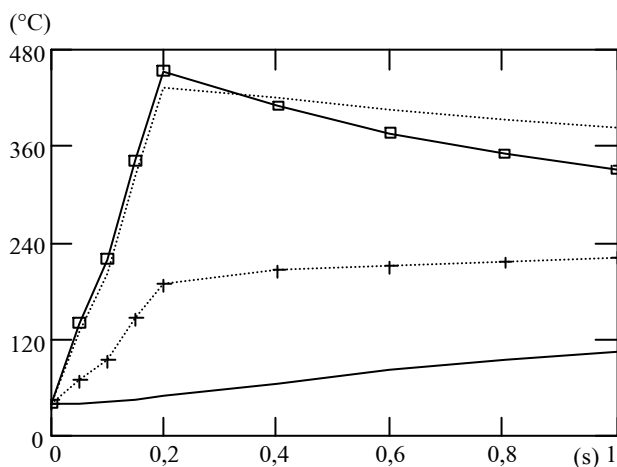
U narednom izlaganju detaljnije će biti razmotrene posledice navedenih osobenosti na impedanse zaštitnih užadi.

2.2. Toplotni procesi u zaštitnim užadima i užadima OPGW za vreme zemljospoja

Pre nastanka zemljospoja sve sastavne komponente zaštitnog užeta nalaze se na približno istoj temperaturi, koja je ili jednaka temperaturi okolnog vazduha, ili je zbog sunčevog zračenja nešto veća. Za vreme zemljospoja u svim provodnim komponentama razvija se toplota, pa temperature delova užeta počinju da rastu. Pri tom, zbog različitih otpornosti, gustine struja u pojedinim delovima užeta neće biti jednake i zato će se njegove komponente različito zagrevati. Najveću temperaturu tokom ovog

procesa dostiže komponenta koja ima najmanju otpornost. Usled tako nastalih temperaturnih razlika, paralelno sa zagrevanjem odvija se i proces razmene toplote ne samo između užeta i okoline, već i između različito zagrejanih njegovih komponenti. Fizička priroda ovih procesa je takva da se zagrevanje žica usled struje u njima odvija znatno brže nego zagrevanje i hlađenje delova užeta zbog međusobne razmene toplote, pa su uticaji razmene toplote na temperaturu utoliko manje izraženi, ukoliko je vreme zemljospoja kraće. Blagodareći ovome u praksi se toplotne pojave u užadima prenosnih mreža za vreme kratkog spoja uz sasvim mali rizik greške mogu tretirati kao čisto adijabatske.

U svrhu ilustracije procesa o kojima je reč na slikama 2 i 3 prikazane su u funkciji vremena temperature sastavnih delova užeta tipa OPGW kod koga su optička vlakna smeštena u aluminijumskom tubusu čija se osa poklapa sa osom užeta. Pretpostavljeno je da je oko tubusa namotan jedan sloj od dve vrste žica - od alumovelda i od legure AlMgSi. Nadalje je pretpostavljeno da u užetu u vremenskom intervalu od 200 ms postoji naizmenična struja od 14 kA, a da je temperatura užeta u trenutku nastanka struje 40 °C. Krive prikazane na slikama 2 i 3 dobijene su na bazi aproksimativnih formula koje uzimaju u obzir i međusobnu razmenu toplote [4].



- Puna linija: optička vlakna
- Isprekidana linija: legura AlMgSi
- Puna linija sa kvadratićima: aluminijum
- Isprekidana linija sa krstićima: alumoveld

Slika 2. Temperatura u OPGW užadima i nakon zemljospoja na vodu

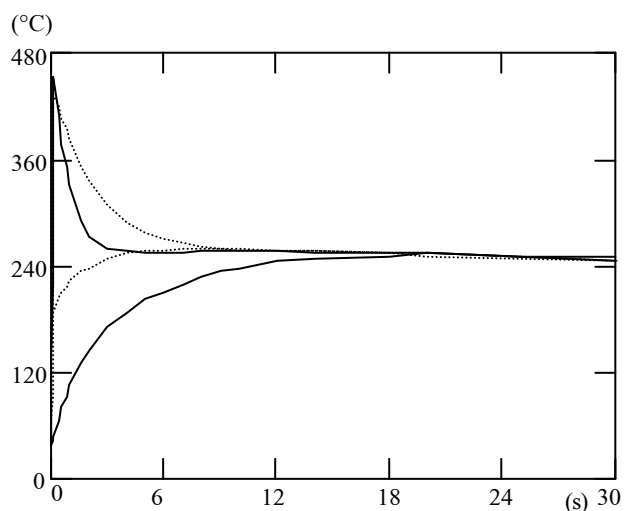
Na slici 2 se vidi da su tri provodne komponente (aluminijum, alumoveld i legura AlMgSi) u trenutku prestanka struje (0,2 s) dostigle međusobno različite temperature koje su znatno iznad njihove početne zajedničke temperature (40 °C). Četvrta

komponenta koja je neprovodna (optička vlakna) za to vreme jedva da se nešto malo zagrejala od toplote razvijene u njenom neposrednom okruženju - aluminijumskom tubusu.

Budući da ima najmanju otpornost, aluminijumski tubus u trenutku prekida struje dostiže najveću temperaturu i predstavlja najtoplije mesto užeta. Sasvim malo iza njega po zagrejanosti je legura Al-MgSi, a od sve tri provodne komponente najnižu temperaturu u trenutku prestanka struje dostiže alumoveld čija je otpornost najveća.

Sa prestankom struje prestaje i generacija toplote, ali se nastavlja njena razmena, pre svega između različito zagrejanih delova užeta, a u manjoj meri i između užeta i okolnog vazduha. U tom delu procesa dve najtoplije komponente (aluminijum i legura) odaju toplotu i počinju da se hlade, dok komponenta od alumovelda i optička vlakna nastavljaju da se zagrevaju.

Sa dijagrama na slici 3 vidi se da se pri tome i hlađenje i zagrevanje različitih materijala odvija na različite načine. Tako se aluminijum, čija je temperatura na početku hlađenja bila gotovo jednaka temperaturi legure, vidljivo brže hladi od legure, a optička vlakna se brže zagrevaju od alumovelda. U ovim pojavama značajnu ulogu, pored ostalog, igraju i toplotne pojave na graničnim površinama između različitih materijala. Transfer toplote sa toplijeg aluminijumskog tubusa na hladnija optička vlakna odvija se kondukcijom preko cele unutrašnje cilindrične površine tubusa, dok se toplota sa tubusa na žice u sloju neposredno prenosi kondukcijom samo



- Puna donja linija: optička vlakna
- Puna gornja linija: aluminijum
- Isprekidana donja linija: alumoveld
- Isprekidana gornja linija: legura AlMgSi

Slika 3. Temperature u OPGW nakon zemljospoja na vodu

preko mesta na kojima okrugle žice dodiruju spoljašnju cilindričnu površinu tubusa. Preostala razmena toplote između tubusa i sloja odvija se zračenjem i konvekcijom posredstvom vazduha u šupljinama između žica i tubusa. U procesu hlađenja „najbrži“ aluminijum veoma brzo postaje hladniji od legure, a potom i od alumovelda, tako da se uspostavlja prenošenje toplote od legure i alumovelda prema aluminijumu. Posledica toga je ne samo usporavanje hlađenja tubusa, već i njegovo kratkotrajno zagrevanje, nakon čega se ponovo uspostavlja proces hlađenja i stabilnog približavanja zajedničkoj temperaturi užeta kojoj teže sve četiri komponente.

Ove pojave ukazuju da se u nehomogenim zaštitnim užadima u toku njihovog hlađenja nakon zemljospoja zajednička temperatura uspostavlja preko više ili manje izraženih prelaznih procesa koje prate oscilovanja temperatura pojedinih komponenti. Zbog toga može da se dogodi da maksimalna vrednost temperature optičkih vlakana jedno kratko vreme bude iznad maksimalne zajedničke temperature svih komponenti, što ne treba izgubiti iz vida pri termičkim proverama užadi tipa OPGW.

Opisane pojave koje se događaju u užetu za vreme i neposredno po prestanku struje sugerišu sledeće:

- za termičku proveru optičkih vlakana merodavna je maksimalna zajednička temperatura koju sve komponente dostižu nakon prestanka struje
- za proračun otpornosti provodnih komponenti i celog užeta merodavna je srednja otpornost za vreme trajanja struje
- za proračun induktivnosti i reaktansi provodnih komponenti i celog užeta merodavne su srednja vrednost induktivnosti i reaktansi za vreme trajanja struje
- za proveru mehaničke čvrstoće komponente nakon zagrevanja merodavna je maksimalna temperatura koju komponenta dostiže u vremenskom intervalu od trenutka nastanka struje pa do prestanka međusobne razmene toplote u užetu.

Računska analiza pojava u zaštitnim užadima za vreme i nakon zemljospoja koja uvažava sve pomenute fenomene kao što su zagrevanje zbog Džulove toplote, istovremena razmena toplote između komponentata i okoline putem kondukcije, konvekcije i zračenja, zatim, koja uvažava toplotne procese na dodirnim mestima i površinama između susednih komponenti, zasigurno zahteva veoma složene numeričke procedure. Pretpostavka o adijabatskoj prirodi toplotnih pojava u užadima za vreme kratkih spojeva umnogome pojednostavljuje računске procese, ali zato unosi grešku u rezultate, pa je za praktične primene od interesa procena reda veličine te greške.

2.3. Otpornost i temperatura zaštitnih užadi za vreme zemljospoja

Razmotrimo, najpre, kako se za vreme zemljospoja menjaju otpornost i temperatura jednog homogenog zaštitnog užeta uz pretpostavku da se svi toplotni procesi u užetu odvijaju čisto adijabatski.

Ako je R_{20} otpornost užeta (Ω/km) na temperaturi 20°C , R_a i q_a otpornost i temperatura užeta u trenutku nastanka kratkog spoja, a R_k i q_k otpornost i temperatura užeta u trenutku eliminacije kratkog spoja, tada vrede relacije

$$R_a = R_{20} [1 + \alpha_{20} (a - 20)] \quad (1)$$

$$R_k = R_{20} [1 + \alpha_{20} (k - 20)] \quad (2)$$

gde je α_{20} - temperaturni koeficijent otpornosti ($1/^\circ\text{C}$).

Na osnovu pretpostavke o adijabatskoj prirodi toplotnih pojava moguće je izraziti vezu između gustine struje kroz homogeno uže J u A/mm^2 , vremena trajanja struje T u s, početne temperature provodnika q_a u $^\circ\text{C}$ i krajnje temperature q_k u $^\circ\text{C}$ dostignute u trenutku prestanka struje pomoću sledeće formule [3]:

$$J^2 = \frac{C}{20 - T} \ln \frac{1 + \alpha_{20} (k - 20)}{1 + \alpha_{20} (a - 20)} \quad (3)$$

Ovde je

g - specifična masa užeta u g/cm^3

C - specifična toplota užeta u $\text{J}/\text{g}^\circ\text{C}$

R_{20} - specifična otpornost užeta pri 20°C u $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Kada se (3) reši po q_k dobija se formula pomoću koje se za datu početnu temperaturu q_a pri datoj gustini istruje može izračunati temperatura užeta nakon isteka vremena T :

$$q_k = \frac{1 + \alpha_{20} (a - 20) e^{\frac{J^2 T}{C}}}{1 + \alpha_{20} (k - 20)} \quad (4)$$

gde je

$$F = \frac{J^2 T}{C} \quad (5)$$

Iz relacije (1) i (2) i iz formule (3) neposredno sledi da je

$$J^2 = \frac{C}{20 - T} \ln \frac{R_k}{R_a} \quad (6)$$

Pomoću poslednjeg izraza može se izračunati otpornost R_k užeta na temperaturi q_k kada se zna njegova otpornost R_a na temperaturi q_a i obrnuto, dakle:

$$R_k = R_a e^{\frac{J^2 T}{C}} \quad (7)$$

pri čemu je F definisano sa (5).

Osim što vrede za homogeno uže, formule (1) do (7) vrede i za svaku sastavnu komponentu nehomogenog užeta, naravno, uz napred učinjenu pretpostavku da u posmatranom sistemu nema nikakve razmene toplote.

Iz prethodnog se naslućuje da kod nehomogenih zaštitnih provodnika koji se sastoje od dva ili više materijala, proces povećavanja otpornosti celog užeta i njegovih komponenti zbog zagrevanja pri kratkotrajnim strujama, nije jednostavan. Različiti materijali imaju različite specifične otpornosti zbog čega će se i gustine struja u njima razlikovati kako u samom momentu nastanka struje kroz uže, tako i tokom njenog trajanja. Pošto su gustine struja u pojedinim komponentama različite, a pošto porast temperature u komponentama zavisi od gustine struje, svaka komponenta će se različito zagrevati, pa će se i otpornosti komponenti različito povećavati. Različito povećavanje otpornosti komponenti kontinualno menja raspodelu ukupne struje užeta po njegovim komponentama, pa se time kontinualno menjaju i vrednosti gustina struje u njima. Nove razlike u gustinama struje izazivaju dalja povećavanja razlika otpornosti komponenti, što ima za posledicu novu preraspodelu ukupne struje po preseku užeta, odnosno, po njegovim komponentama, a time i nove razlike u gustinama struje, itd, itd.

Iz ovoga proizilazi da kod nehomogenih užadi nisu samo temperatura i otpornost funkcije vremena, već je to i gustina struje, tako da se može pisati

$$J = J(t), \quad T = T(t), \quad R = R(t) \quad (8)$$

za svako t iz opsega $0 \leq t \leq T$. Za komponentu „i“ funkcija F iz formule (5) ima oblik

$$F_i(t) = \frac{J_i^2(t) T}{C^{(i)}} \quad (9)$$

iz čega se, dalje, zaključuje da su i temperatura i otpornost složene eksponencijalne funkcije vremena. U takvim uslovima kao merodavna otpornost za proračun impedanse nameće se ona vrednost koja u vremenskom opsegu $0 \leq t \leq T$ ima najveću pojavnu verovatnoću. Statistički gledano to je matematičko očekivanje veličine $R_i(t)$, ili što je isto, njena srednja vrednost

$$\bar{R}_i = \frac{1}{T} \int_0^T R_a^{(i)} \exp \left[-\frac{J_i^2(t) T}{C^{(i)}} \right] dt \quad (10)$$

Srednja otpornost celog užeta $R(q_a, T, I)$ koja je, dakle, funkcija početne temperature q_a , vremena trajanja struje T i intenziteta struje I , može se u vremenskom opsegu $0 \leq t \leq T$ u prvoj približnosti odrediti prema izrazu

$$\frac{1}{R(a, T, I)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_p} R_i}, \quad (11)$$

gde je N_p broj provodnih komponenti užeta.

Za procenu impedanse zaštitnog užeta merodavne za proračun raspodele struje zemljospoja duž nadzemnog voda, otpornosti njegovih komponenti, kao i način i brzine hlađenja komponenti posle prestanka struje nemaju nikakvog značaja. Međutim, toplotne pojave nakon prestanka zemljospoja značajne su sa aspekta procene maksimalne zajedničke temperature q_e kojoj teže sve komponente u procesu njihovog hlađenja. Kao što je napomenuto ranije, pomoću ove temperature proverava se termičko naprezanje optičkih vlakana u užadima tipa OPGW. Ako se zanemari razmena toplote užeta sa okolnim vazduhom, maksimalna zajednička temperatura q_e može se dobiti tako što se ukupna toplota proizvedena u svim provodnim komponentama za vreme trajanja struje u njima, izjednači sa toplotom koju i provodne i neprovodne komponente imaju u trenutku prestanka toplotne razmene u užetu. Kada se tako dobijena jednačina reši po q_e , dobija se izraz

$$q_e = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} m_i C_i (q_i - q_a)}{\sum_{i=1}^N m_i C_i} + q_a, \quad (12)$$

gde su m_i podužna masa (g/cm) komponente „i”, C_i njena specifična toplota (J/g °C), q_i temperatura (°C) provodne komponente u trenutku prestanka struje, q_a (°C) temperatura užeta u trenutku nastanka struje, N_p ukupan broj provodnih komponenti i N ukupan broj svih komponenti u užetu. U izrazu (12) sumiranje u brojitelju na desnoj strani sprovodi se samo po provodnim komponentama, dok se sumiranje u imenitelju sprovodi i po provodnim i po neprovodnim komponentama, što znači da ova poslednja suma kod užadi OPGW sadrži član tipa $m_{OPGW} C_{OPGW}$.

Pošto se funkcije $J_i(t)$ ne mogu predstaviti pomoću jednostavnijih analitičkih izraza, integral u formuli (10) izračunava se numerički. Jedan od mogućih numeričkih postupaka započinje, na primer, tako što se najpre za početnu temperaturu q_a izračuna raspodela ukupne date struje kroz uže po komponentama, kao i gustine struja u pojedinim komponentama. Potom se ukupno vreme trajanja struje T u užetu podeli na pogodan broj (na primer, 20) jednakih podintervala dužine Δt . Za svaki od vremenskih podintervala pomoću (4), (5) i (7) sračunava se temperatura i otpornost komponente na početku i na kraju podintervala, a zatim i njihova aritmetička sredina. Takođe se za svaki od podintervala izračunava srednja

gustina struje u svakoj komponenti. Zatim se krajnja temperatura podintervala uzme kao početna temperatura narednog i gustina struje prethodnog podintervala kao gustina struje narednog podintervala, pa se proračun ponavlja na istovetan način. Aritmetička sredina otpornosti svih podintervala uzima se kao srednja otpornost provodnika u vremenu T .

Ovim postupkom se, pored oblika zavisnosti otpornosti od vremena, dobijaju i zavisnosti temperatura svih provodnih komponenti od vremena, kao i vrednosti krajnje temperature komponenti dostignute u trenutku prekida struje.

Numerički primeri urađeni na nekoliko realnih zaštitnih užadi tipa OPGW sa kratkotrajnim strujama iz opsega 10 do 20 kA pokazuju da računica sa konstantnim gustinama struje komponenti daje maksimalne temperature aluminijumskih komponenti koje su za 15 % - 20 % manje od temperatura dobijenih uz uvažavanje promenljivosti gustina struje u vremenu. Iste računice za alumoveld daju razlike koje su reda 100 %, a za leguru AlMgSi reda 50 % od temperatura dobijenih sa promenljivim gustinama struje. Sudeći prema ovim rezultatima, pretpostavka o nepromenljivosti gustine struje komponenti u vremenu može da dovede do primetnih grešaka u proceni temperature u zaštitnom užetu.

Temperature dobijene napred opisanim postupkom u kome se uvažavaju promene struja komponenti u vremenu, ipak se razlikuju od stvarnih, jer je u formulama (1) do (7) potpuno zanemarena razmena toplote između komponentata, kako za vreme zemljospoja, tako i nakon njegove eliminacije. Zbog toga treba imati u vidu da je stvarna temperatura komponente u trenutku prestanka struje nešto manja od sračunate, ako je opisanom računicom dobijena vrednost veća od zajedničke temperature q_e prema (12), a da je nešto veća od sračunate, ako je računom dobijena vrednost manja od q_e . Razume se, razlike su utoliko veće, ukoliko je vreme trajanja zemljospoja duže. Prema grubim procenama, orijentaciono se može uzeti da za struje reda 10 - 15 kA, čije trajanje nije duže od 200 ms, ove razlike ne prelaze 10 % vrednosti izračunate temperature.

Isto tako, ne treba zaboraviti da zbog prelaznih toplotnih pojava u toku procesa hlađenja, maksimalna temperatura optičkih vlakana može biti veća od temperature q_e procenjene prema (12). Na osnovu poređenja rezultata numeričkih analiza napravljenih za realnu zaštitnu užad sa vrednostima koje za istu užad daju njihovi proizvođači, procenjuje se da se ovo poslednje povećanje kod struja koje ne traju duže od 200 ms, kreće od 5 % do najviše 15 % od vrednosti koja se dobija pomoću (12).

Navedeni procenti govore da zanemarivanje promena struje u komponentama nehomogenog za-

štitnog užeta u vremenu može da unese veću računsku grešku u proceni temperature negoli zanemari vanje razmene toplote između njegovih komponenta za vreme trajanja struje kvara. Ovo ide u prilog stavu da se kod kratkih spojeva koji ne traju duže od 100 ms do 200 ms, dovoljno tačne procene zagrevanja zaštitnih užadi mogu dobiti i pomoću postupaka koji se zasnivaju na pretpostavci o adijabatskoj prirodi toplotnih procesa u užetu.

2.4. Induktivnost zaštitnih užadi za vreme zemljospoja

Kada su u pitanju električne karakteristike zaštitnih užadi, njihovi proizvođači po pravilu ne daju nikakve zvanične podatke o induktivnostima ili o reaktansama, već se mahom ograničavaju na podatke o podužnim otpornostima na 20 °C pri jednosmernoj struji, na dozvoljene jednosekundne struje i osnovne podatke o konstrukciji užadi. Ovo se odnosi kako na konvencionalnu užad, tako i na OPGW. Budući da je poznavanje reaktansi isto tako neophodan preduslov za procenu raspodele struja kroz zaštitnu užad kao i poznavanje otpornosti, ove veličine se moraju koliko-toliko korektno sračunati.

Zaštitna užad koja se primenjuju u prenosnim mrežama EPS-a sadrže čeličnu komponentu, pa im je unutrašnja induktivnost funkcija struje. Zbog toga i sopstvene reaktanse ovih užadi nisu konstante, već su funkcije struje kroz uže [5,6]. Pored toga, unutrašnja induktivnost zaštitnog užeta, kao i unutrašnja induktivnost bilo kog lineičnog provodnika nezavisno od toga od kakvog je materijala, zavisi i od raspodele struje po površini preseka [7, 8], tj. zavisi od gustine struje po preseku užeta. Kako smo ranije videli, gustina struje kod nehomogenih zaštitnih užadi je funkcija vremena, što znači da se i unutrašnja induktivnost menja u vremenu. Osim toga, raspodela struje po komponentama užeta zavisi od otpornosti komponenti, a otpornost komponente pored toga što zavisi od vremena zavisi i od početne temperature q_a . Induktivnosti nehomogenih zaštitnih užadi zavise, dakle, i od struje, i od vremena trajanja struje, i od početne temperature q_a , pa se za procenu unutrašnje induktivnosti merodavne za procenu impedanse može koristiti postupak analogan ranije izloženom postupku za procenu otpornosti.

Bez obzira na to da li se radi o konvencionalnom zaštitnom užetu ili o OPGW, njegova srednja ukupna sopstvena induktivnost (u H/km) iznosi

$$\overline{L}(\overline{a}, T, I) = \overline{L}_u(\overline{a}, T, I) + L_{sp}, \quad (13)$$

gde je $\overline{L}_u(\overline{a}, T, I)$ srednja unutrašnja induktivnost užeta u H/km, a L_{sp} spoljašnja induktivnost, takođe

u H/km. Spoljašnja induktivnost ne zavisi od unutrašnje konstrukcije, već samo od spoljnog poluprečnika užeta a (u m) i daljine D (u m) do koje se induktivnost računa. (Kod nadzemnih vodova D je rastojanje između ose užeta čija se induktivnost računa i ose njemu odgovarajućeg fiktivnog provodnika kojim se ekvivalentira zemlja kao povratni vod.) Spoljašnja induktivnost uz gornja obeležavanja računa se prema izrazu

$$L_{sp} = \frac{\mu_0}{2} \ln \frac{D}{a}, \quad (14)$$

gde je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ H/km.

Unutrašnja induktivnost bitno zavisi od geometrije, odnosno, konstrukcije užeta. Konvencionalna zaštitna užad sastoje se od jezgre i sloja (ili slojeva) žica namotanih oko jezgre. Užad tipa OPGW takođe se sastoje od jezgre i slojeva žica namotanih oko jezgre, s tom razlikom što jezgra ili ima pun presek, ili je šuplja. Ako jezgra ima pun presek, optička vlakna postavljaju se u tubus, koji zauzima mesto jedne od žica jezgre i koji ima isti prečnik kao žice u jezgri. Ako jezgra ima šupljinu, optička vlakna se postavljaju u tu šupljinu. Za sve navedene konstrukcije srednja unutrašnja induktivnost jednaka je zbiru srednje induktivnosti jezgre $\overline{L}_j = \overline{L}_j(\overline{a}, T, I)$ i srednje induktivnosti sloja $\overline{L}_s = \overline{L}_s(\overline{a}, T, I)$ i može se izraziti relacijom

$$\overline{L}_u(\overline{a}, T, I) = \overline{L}_j(\overline{a}, T, I) + \overline{L}_s(\overline{a}, T, I), \quad (15)$$

u kojoj oblik izraza za \overline{L}_j i \overline{L}_s zavisi od konstruktivnog rešenja užeta.

Srednja vrednost (matematičko očekivanje) induktivnosti jezgre u vremenu T dobija se u H/km pomoću izraza

$$\overline{L}_j = \frac{1}{T} \int_0^{a_j} m_j(x, t) h_j(x, t) c_j(x, t) dx dt, \quad (16)$$

gde se uzima da je $a = 0$ kada je jezgra puna, i $a = a_{ju}$ kada je jezgra šuplja.

Analogno, srednja vrednost induktivnosti sloja (ili slojeva) dobija se u H/km pomoću izraza

$$\overline{L}_s = \frac{1}{T} \int_0^a m_s(x, t) h_s(x, t) c_s(x, t) dx dt. \quad (17)$$

U izrazima (16) i (17) a_j je poluprečnik jezgre (u m), a_{ju} poluprečnik šupljine u jezgri (u m), a spoljni poluprečnik užeta (u m) i T vreme trajanja struje I kroz uže.

Funkcije $m_j(x, t) \approx I$ i $m_s(x, t) \approx I$, koje su bez dimenzije, određuju matematičko očekivanje relativne permeabilnosti u jezgri i sloju (slojevima) na rastojanju x od ose užeta i definisane su sa

$$m_j(x,t) = \mu_r(H_j(x,t))P_j(x \in Fe) \quad P_j(x \notin Fe) \quad (18)$$

$$m_s(x,t) = \mu_r(H_s(x,t))P_s(x \in Fe) \quad P_s(x \notin Fe). \quad (19)$$

Ovde su $H_j(x,t)$ i $H_s(x,t)$ magnetska polja (u A/m) u jezgri i sloju (slojevima) na rastojanju x od ose užeta i u trenutku t . Ako je $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ H/km, funkcija $m(H) = 1000 B/(m_0 H)$ je bez dimenzija, a definisana je krivom magnetćenja $B=B(H)$ koja vredi za čelične komponente zaštitnih užadi. Neimenovani brojevi $P_j(x \in Fe)$ i $P_s(x \in Fe)$ su verovatnoće da materija u tačkama na rastojanju x od ose užeta poseduje feromagnetska svojstva. Protivne verovatnoće ovim verovatnoćama su $P_j(x \notin Fe)$ i $P_s(x \notin Fe)$.

Funkcije $h_j(x,t)$ i $h_s(x,t)$ imaju dimenziju 1/m i definisane su kao odnosi

$$h_j(x,t) = H_j(x,t)/I \quad (20)$$

$$h_s(x,t) = H_{sj}(x,t)/I. \quad (21)$$

U skladu sa definicijama (18) i (19) funkcije m po svojoj prirodi odgovaraju relativnoj permeabilnosti μ_r , a funkcije h definisane prema (20) i (21) predstavljaju magnetska polja na rastojanju x obračunata po jedinici struje kroz uže, tako da izraz

$$\int_0^{a_j} m(x,t) h(x,t) dx \quad (22)$$

predstavlja elementarni sopstveni magnetiski fluks po jedinici dužine i po jedinici struje na rastojanju x od ose užeta.

Funkcije $c_j(x,t)$ i $c_s(x,t)$ su bez dimenzija i definišu odnos broja elementarnih fiktivnih strujnih niti u kojima fluks (22) indukuje elektromotorne sile, prema ukupnom broju fiktivnih strujnih niti koliko ih ima u struji kroz uže I [7,8].

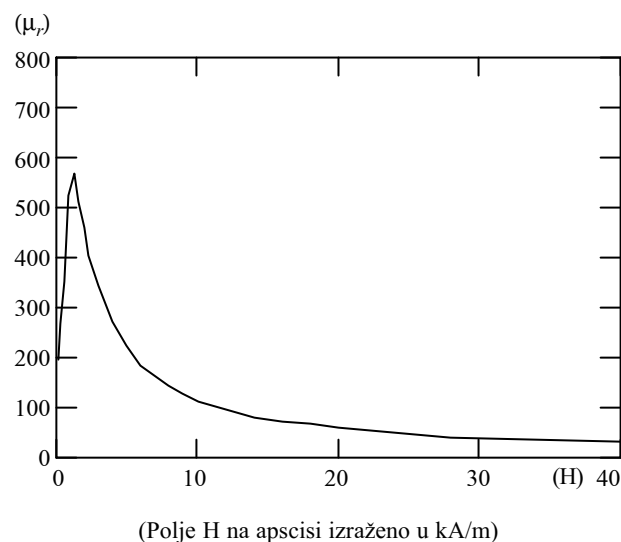
Za praktičnu primenu formula (18) i (19) neophodno je i poznavanje krive $B=B(H)$ koja vredi za materijal upotrebljen u užetu čija se induktivnost računa. U nedostatku direktnih izvora korišćeni su (dosta oskudni) podaci iz raspoložive literature [7,9] na osnovu kojih se došlo do aproksimativne krive koja je numerički predstavljena sledećim vrednostima:

H (kA/m)	0,7	1	2	5	7
B (T)	0,385	0,712	1,150	1,400	1,434

H (kA/m)	8	9	10	14	20
B (T)	1,444	1,450	1,455	1,475	1,500

H (kA/m)	45	125	350	600	1 200
B (T)	1,550	1,625	1,680	1,700	1,710

Ovako dobijena kriva može da posluži kao prva orijentacija za procenu induktivnosti čeličnih materijala, čije se čvrstoće kreću oko 1 200 N/mm². Relativna permeabilnost u funkciji magnetskog polja sračunata iz gornjih vrednosti prikazana je na slici 4. Sa dijagrama se vidi da za magnetska polja reda veličine 1 kA/m relativna permeabilnost čelika dostiže velike vrednosti. To, međutim, nema nekih praktičnih posledica, pošto se takva polja u čeličnom užetu 50 mm², na primer, postižu već sa strujama reda 60 A, koje su daleko ispod struja realnih zemljospojeva. Kod struja reda 600 A vrednosti za μ_r kreću se oko 100, a kod 6 000 A nalaze se u opsegu 10 - 15.



Slika 4. Relativna permeabilnost čelične komponente zaštitnog užeta kao funkcija magnetskog polja H

Analitički izrazi podintegralnih funkcija u (16) i (17) zavise od toga da li se radi o užetu sa punom ili sa šupljom jezgrom.

Zaštitna užad sa punom jezgrom

Magnetsko polje u jezgri $h_j(x,t)$ obračunato po jedinici struje kroz uže I za $0 \leq x \leq a_j$ određeno je sa (20) i iznosi

$$h_j(x,t) = \frac{\chi_j(t)}{2 a_j^2} x, \quad (23)$$

gde vremenska funkcija $\chi_j(t)$ izražava odnos između struje kroz jezgru $I_j(t)$ u trenutku t i ukupne struje kroz uže I :

$$\chi_j(t) = I_j(t)/I. \quad (24)$$

Magnetsko polje (u A/m) u jezgri za $0 \leq x \leq a_j$ je

$$H_j(x,t) = h_j(x,t) I. \quad (25)$$

Magnetsko polje u sloju (ili slojevima) $h_s(x,t)$ obračunato po jedinici struje kroz uže I za $a_j < x \leq a$ određeno je sa (21) i iznosi

$$h_s(x,t) = \frac{j(t)}{2} \frac{1}{x} - \frac{s(t)}{2} \frac{1}{(a^2 - a_j^2)} x \frac{a_j^2}{x} \quad (26)$$

gde je analogno sa (24)

$$s(t) = I_s(t)/I. \quad (27)$$

Magnetsko polje (u A/m) u sloju (ili slojevima) za $a_j < x \leq a$ je

$$H_s(x,t) = h_s(x,t) I. \quad (28)$$

Ako je S_{jFe} (u m²) udeo čelika u preseku jezgre, a S_{sFe} (u m²) udeo čelika u preseku sloja, tada je približno

$$P_j(x \in Fe) = \frac{S_{jFe}}{a_j^2} \quad (29)$$

$$P_s(x \in Fe) = \frac{S_{sFe}}{(a^2 - a_j^2)}. \quad (30)$$

Funkcije $c(x,t)$ imaju oblik

$$c_j(x,t) = \frac{x^2}{a_j^2} j(t) \quad (31)$$

$$c_s(x,t) = j(t) \frac{x^2 - a_j^2}{a^2 - a_j^2} s(t). \quad (32)$$

Zaštitna užad sa šupljom jezgrom

Magnetsko polje u jezgri $h_j(x,t)$ obračunato po jedinici struje kroz uže I za $a_{ju} \leq x \leq a_j$ je

$$h_j(x,t) = \frac{j(t)}{2} \frac{1}{(a_j^2 - a_{ju}^2)} x \frac{a_{ju}^2}{x} \quad (33)$$

Magnetsko polje u sloju (ili slojevima) $h_s(x,t)$ obračunato po jedinici struje kroz uže I za $a_j < x \leq a$ određeno je sa (26), a funkcije $c_j(t)$ i $c_s(t)$ sa (24) i (27). Magnetska polja $H_j(x,t)$ i $H_s(x,t)$ (u A/m) dobijaju se respektivno množenjem $h_j(x,t)$ i $h_s(x,t)$ sa I .

Verovatnoća $P_j(x \in Fe)$ definisana je sa

$$P_j(x \in Fe) = \frac{S_{jFe}}{(a_j^2 - a_{ju}^2)}, \quad (34)$$

a verovatnoća $P_s(x \in Fe)$ sračunava se prema (30).

Funkcija $c_j(x,t)$ ima oblik

$$c_j(x,t) = \frac{x^2 - a_{ju}^2}{a_j^2 - a_{ju}^2} j(t), \quad (35)$$

a funkcija $c_s(x,t)$ definisana je sa (32).

Sa ovako definisanim podintegralnim funkcijama iz (16) i (17) može se numerički izračunati srednja unutrašnja induktivnost užeta.

Srednja ukupna sopstvena induktivnost užeta (u H/km) računa se prema (13), a njegova srednja sopstvena reaktansa u Ω/km za učestanost f je

$$\overline{X(a, T, I)} = 2 f \overline{L(a, T, I)}. \quad (36)$$

Srednja ekvivalentna relativna permeabilnost užeta računa se preko njegove srednje reaktanse prema izrazu

$$\mu_{re} = 4 \frac{\overline{X(a, T, I)}}{f} \ln \frac{D}{a}, \quad (37)$$

a srednji geometrijski poluprečnik prema

$$SGP = a \exp \frac{1}{4} \frac{1}{\mu_{re}}. \quad (38)$$

2.5. Impedanse OPGW u funkciji struje i vremena njenog trajanja

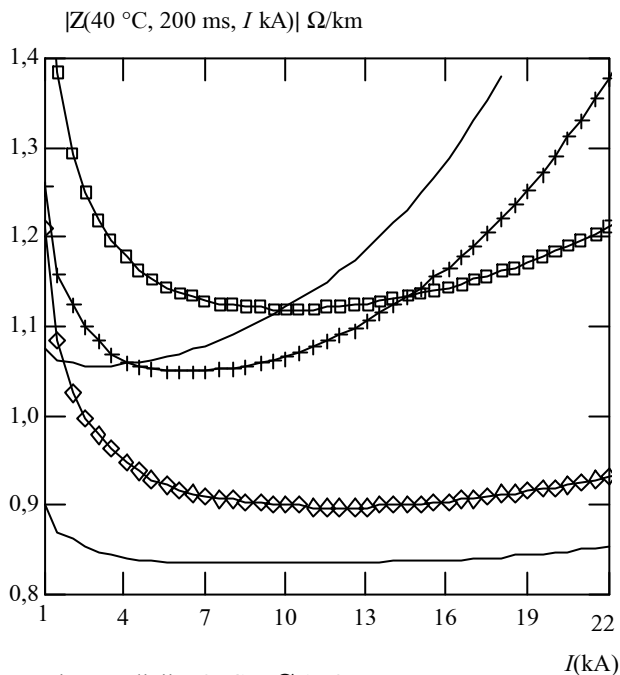
Iz prethodnog izlaganja sledi da su srednje vrednosti impedanse zaštitnih provodnika funkcije početne temperature q_a , vremena trajanja struje T i vrednosti struje kroz provodnik I , tj. da je

$$Z = Z(a, T, I) \frac{\overline{R(a, T, I)}}{j \overline{X(a, T, I)}}. \quad (39)$$

Pomoću napred prikazanih numeričkih postupaka sračunati su moduli impedansi u funkciji struje za tri užeta OPGW koja se nalaze u proizvodnom programu dva renomirana inostrana proizvođača. Rezultati su prikazani dijagramima na slici 5.

Prvo uže OPGW prečnika 15,8 mm ima jezgru od 6 žica od alumovelda SA1A u kojoj je umesto sedme žice postavljen čelični tubus $\varnothing 3,6$ mm sa optičkim vlaknima. Preko jezgre namotan je sloj od 16 žica od legure AlMgSi. Dozvoljena jednosekundna struja koju garantuje proizvođač je 12,1 kA. Drugo uže OPGW prečnika 15 mm kao jezgru ima centralno postavljen aluminijumski tubus $\varnothing 9$ mm sa optičkim vlaknima preko koga je namotan sloj od ukupno 12 žica od alumovelda 25/75 i legure AlMgSi. Dozvoljena jednosekundna struja koju garantuje proizvođač je 9,9 kA. Treće uže OPGW prečnika 12,5 mm takođe ima centralno postavljen aluminijumski tubus $\varnothing 8,3$ mm sa optičkim vlaknima preko koga je namotan sloj od ukupno 15 žica od alumovelda 25/75 i legure AlMgSi. Dozvoljena jednosekundna struja koju garantuje proizvođač je 6,6 kA.

Radi poredenja pored tri OPGW na slici 5 takođe su prikazani u funkciji struje za $q_a = 40$ °C i za $T=200$ ms i moduli impedansi dva konvencionalna zaštitna užeta. Prvo od ta dva užeta prečnika 10,5 mm (puna gornja linija na slici 5) ima jezgru od 7 žica od alumovelda preko koje je namotan sloj od 12



- Donja puna linija: OPGW Ø 15,8 mm
- Linija sa rombovima: OPGW Ø 15 mm
- Linija sa krstićima: OPGW Ø 12,5 mm
- Gornja puna linija: kombinacija ACS+AlMgSi Ø 10,5 mm
- Linija sa kvadratima: alumoveld (ACS) 126 mm²

Slika 5. Modul srednje vrednosti impedanse zaštitnog užeta u funkciji struje I za $\rho_s = 40\text{ }^\circ\text{C}$ i $T = 200\text{ ms}$

žica od legure AlMgSi. Drugo uže (linija sa kvadratima), alumoveld nazivnog preseka 126 mm², čiji je spoljni prečnik 14,55 mm, usvojeno je kao tipsko rešenje u 400 kV mreži EPS-a. Slika pokazuje da za struje manje od 10 kA prvo uže ima manju impedansu od alumovelda, a da se u opsegu struja do 16 kA relativno malo razlikuje od OPGW prečnika 12,5 mm. Vreme 200 ms za koje su računane impedanse, jednako je ukupnom trajanju struje zemljospoja kod neuspešnog automatskog ponovnog uključivanja (APU), kada je zaštita tako podešena da isključuje kvar za 100 ms.

Svih pet zaštitnih užadi karakteriše pad vrednosti modula impedanse kada struja počne da raste preko 1 000 A, nakon čega pri daljem porastu struje dolazi do rasta modula impedansi. Zbog toga svih pet krivih prolaze kroz ekstremum i imaju manje ili više izražen konkavan oblik. Pojava je posledica značajnog prisustva čelika u ukupnom preseku užeta, zbog čega se unutrašnja induktivnost, a zato i ukupna reaktansa menja u zavisnosti od struje. Pri strujama od 1 kA do 5 kA promena reaktanse (preciznije, njeno opadanje) po vrednosti nadmašuje porast otpornosti zbog zagrevanja i ukupna impedansa se smanjuje. Pri daljem rastu struje čelični delovi užeta sve više ulaze u zasićenje, pa su promene unutra-

šnje induktivnosti i sopstvene reaktanse sve manje, tako da dominantnu ulogu u promenama ukupne impedanse preuzima otpornost. Ona stalno raste, te i ukupna impedansa užeta počinje da raste. Forma grafika impedanse zaštitnog užeta sa naglašenim ekstremumom utoliko je više izražena, ukoliko je udeo čelika u preseku veći. Tako se, na primer, kod alučeličnih užadi sa odnosom Al/Če 6:1 ekstremum računom ne može konstatovati.

Radi poređenja u prilogu su u zavisnosti od struje tabelarno date impedanse, ekvivalentne relativne permeabilnosti i najviše dostignute temperature za tri konvencionalna i dva OPGW zaštitna užeta.

3. IZRAČUNAVANJE STRUJE U ZAŠTITNIM UŽADIMA

Uzemljivački sistem nadzemnog voda je sistem koga čine uzemljenja svih stubova, koja su paralelno vezana preko zaštitnih užadi. Struje u zaštitnim užadima za vreme zemljospoja na nadzemnomvodu dobijaju se rešavanjem lestvičaste mreže koju čini uzemljivački sistem voda. Lestvičasta mreža se sastoji od rednih impedansi i otočnih admitansi, pri čemu su redne impedanse ove mreže impedanse kontura koje čine zaštitna užad u rasponima i zemlja kao povratni vod, a otočne admitanse su uzemljenja stubova voda.

Grafik sa slike 1 pokazuje da su u opštem slučaju struje kroz zaštitnu užad u svakom rasponu različite, a dijagrami sa slike 5 pokazuju da različitim strujama kroz zaštitnu užad odgovaraju različite impedanse užadi. Odatle sledi da se za vreme zemljospoja impedanse zaštitnih užadi u rasponima razlikuju ne samo zbog različitih dužina raspona, već i zbog toga što su struje u rasponima različite. Prema tome, ako se želi tačan proračun, lestvičasta mreža treba da bude rešena tako da impedansa užeta u svakom rasponu odgovara struji kroz uže u tom rasponu. Ovakav pristup podrazumeva složen numerički postupak u kome se iterativnim putem dolazi do rezultata. Numeričke provere sprovedene na nekoliko vodova 220 kV i 400 kV iz sistema EPS-a ukazuju da ovaj postupak konvergira relativno brzo (5 do 10 iteracija).

Iste provere su takođe pokazale da se računom sa jednakim impedansama zaštitnih užadi u svim rasponima može napraviti greška u proceni struja kroz užad koja može dostići i 30 %. Istovremeno je uočeno da kod zemljospoja na prvom stubu greška u proceni struje u prvom rasponu po pravilu ne prelazi 3 %. Pošto je upravo ova struja merodavna za termičku proveru, komplikovani iterativni postupci za procenu maksimalnih struja u zaštitnim užadima dolaze u obzir pre svega u graničnim slučajevima, tj. tada kada

su očekivane vrednosti struja u blizini dozvoljenih i kada bi greške u proceni mogle da dovedu do nepotrebnih troškova. Ako se prethodnim grubim procenama dobije da se struja kroz uže razlikuje od dozvoljene struje za manje od 5 %, može se smatrati da se radi o graničnom slučaju.

U postupku izračunavanja struja uzemljivačkog sistema u zavisnosti od primenjene metode događa se da ukupnu struju I_{GU} kroz oba užeta treba razložiti na struju I_{G1} kroz prvo uže i struju I_{G2} kroz drugo uže. Ako se pri tom zahteva veća preciznost procene (granični slučajevi), ne treba izgubiti iz vida da struje u zaštitnim užadima zavise i od toga u kojoj fazi je nastao zemljospoj. Uticaj struje u faznom provodniku utoliko je veći ukoliko je veća nesimetrija geometrijskog rasporeda faznih i zaštitnih provodnika. Kada su kompleksne struje faznih provodnika za vreme zemljospoja I_{f1} , I_{f2} i I_{f3} , razlaganje se može sprovesti pomoću sledeće dve formule

$$I_{G1} = I_{GU} \frac{Z_{f1G1}}{Z_{G2}} \frac{Z_{f1G2}}{Z_{G12}} I_{f1} + I_{GU} \frac{Z_{f2G1}}{Z_{G2}} \frac{Z_{f2G2}}{Z_{G12}} I_{f2} + I_{GU} \frac{Z_{f3G1}}{Z_{G2}} \frac{Z_{f3G2}}{Z_{G12}} I_{f3} \quad (40)$$

U prvoj od dve navedene formule x_{GE} je veličina bez dimenzije definisana kao

$$x_{GE} = \frac{Z_{G2}}{Z_{G1}} \frac{Z_{G12}}{2Z_{G12}} \quad (41)$$

Impedanse Z_{G1} i Z_{G2} su sopstvene impedanse dva zaštitna užeta, a Z_{G12} njihova međusobna impedansa. Impedanse Z_{f1G1} i Z_{f1G2} su međusobne impedanse između provodnika prve faze i prvog zaštitnog užeta, odnosno, između provodnika prve faze i drugog zaštitnog užeta. Analogno vredi i za preostala dva para međusobnih impedansi. Sopstvene i međusobne impedanse provodnika računaju se kao impedanse kontura koje čine provodnici i zemlja kao povratni provodnik.

Za grublje procene raspodele ukupne struje kroz dva užeta može se zanemariti uticaj struja faznih provodnika, tj. treba staviti da je

$$I_{f1} = I_{f2} = I_{f3} = 0, \quad (42)$$

tako da se dobija

$$I_{G1} = I_{GU} \quad (43)$$

4. DOZVOLJENE TEMPERATURE ZAŠTITNIH UŽADI PRI ZEMLJOSPOJU

Domaćim standardom [10] propisane su najviše temperature provodnika u slučaju kratkog spoja u nazivničnim sistemima nazivnog napona do 72,5 kV. Ovim standardom za mehanički opterećene aluminijumske provodnike propisana je najviša temperatura od 200 °C, a za provodnike od aluminijumske legure temperatura od 170 °C. Za čelične provodnike standard pravi razliku između mehanički opterećenih i neopterećenih provodnika, pa za opterećene provodnike zahteva 250 °C, a za neopterećene 300 °C. Razlika je posledica promena u strukturi materijala koje nastaju pri zagrevanju, a koje mogu da smanje njegovu mehaničku čvrstoću, pa se zbog sigurnosti za zategnute provodnike zahteva niža temperatura. Kako ovaj standard važi za sisteme nazivnog napona do 72,5 kV, navedene temperature očigledno nisu obavezne za zaštitnu užad nadzemnih vodova 110 kV, 220 kV i 400 kV.

Međutim, pojedini inostrani standardi ne prave ograničenja prema nazivnim naponima i prema mehaničkim opterećenjima provodnika. Tako se, na primer, u [3] pri kratkom spoju propisuje 200 °C kao najviša dozvoljena temperatura za sve vrste aluminijumskih provodnika i 300 °C za sve vrste čeličnih provodnika, bez obzira na to da li su ili nisu mehanički opterećeni. U vezi sa navedenim temperaturnim granicama u [3] se navodi da kratkotrajno zagrevanje provodnika do ovih temperatura može da prouzrokuje zanemariva smanjenja mehaničke čvrstoće koja na osnovu iskustvenih podataka ne mogu da ugroze pogonsku sigurnost. Isti propis eksplicitno ne navodi najviše dozvoljene temperature za provodnike od aluminijumskih legura.

Za užad od alumovelda proizvođači deklarišu 300 °C kao najvišu dozvoljenu temperaturu pri kratkotrajnim prekomernim strujama, što znači da se alumoveld tretira isto kao čelik.

Iz podataka koje daju proizvođači OPGW može se zaključiti da se najviše dozvoljene temperature optičkih vlakana i neprovodnog materijala koji ih okružuje, kreću u opsegu 150 - 160 °C. Isto tako, ovi proizvođači dozvoljavaju kratkotrajno zagrevanje aluminijumske komponente užadi OPGW i iznad 200 °C, ali samo tada kada je uže mehanički dimenzionisano kao da ta komponenta ne postoji.

Kada se za naznačene jednossekundne struje i vreme 0,2 s na užad OPGW prečnika 15 mm i 12,5 mm, koja imaju aluminijumski tubus, a koja su ranije navedena u 2.5, primeni metodologija izložena u 2.3, dobijaju se sledeće maksimalne temperature komponenti: za aluminijum 264 °C i 281 °C, za leguru AlMgSi 189 °C i 201 °C, a za alumoveld i op-

tička vlakna 146 °C i 147 °C. Za oba użeta proizvođač navodi da aluminijumski tubus nije uzet u obzir pri mehaničkom dimenzionisanju. Istim postupkom za uže OPGW prečnika 15,8 mm koje ima čelični tubus, dobijene su maksimalne temperature 249 °C za leguru i 161 °C za alumoveld i optička vlakna.

Uz podsećanje da su dobijeni uz zanemarivanje razmene toplote, ovi rezultati potvrđuju da se kod prenosnih nadzemnih vodova za najveću dozvoljenu temperaturu legure AlMgSi u zaštitnim užadima sa dovoljnom rezervom može usvojiti temperatura od 200 °C.

Termičku proveru zaštitnog użeta treba sprovesti polazeći od toga da uže sigurno neće biti ugroţeno zbog zagrevanja pri kratkom spoju, ako se nijedna od njegovih komponenti ne zagreje iznad najviše dozvoljene temperature za tu komponentu. Napred citirani standardi kao i navedeni podaci upućuju da u mreţama 110 kV, 220 kV i 400 kV EPS-a maksimalne dozvoljene temperature komponenti zaštitnih uţadi treba da budu:

- 200 °C za aluminijum i leguru AlMgSi
- 300 °C za čelik i alumoveld
- 160 °C za optička vlakna.

Za aluminijumske delove koji nisu uzeti u obzir pri mehaničkom dimenzionisanju użeta, dozvoljene su temperature iznad 200 °C pod uslovom da to ne izaziva nedozvoljeno zagrevanje ostalih komponenti i optičkih vlakana.

5. NAZNAČENE JEDNOSEKUNDNE STRUJE OPGW I STRUJE ZEMLJOSPOJA U PRENSNOJ MREŢI

Kao i svako konvencionalno zaštitno uže i OPGW je najviše opterećeno strujom za vreme zemljospoja na prvim stubovima od napojnog kraja nadzemnog voda. Ovi kvarovi se na vodovima 110 kV, 220 kV isključuju delovanjem distantne zaštite u dva stepena, a na vodovima 400 kV u osnovnom vremenu. U mreţi EPS-a vreme prvog stepena (osnovno vreme) je 100 ms, dok je ukupno vreme drugog stepena 400 ms. Kod kvarova na prvim stubovima struja koja se isključuje u drugom stepenu toliko je manja od struje koja se isključuje u prvom stepenu, da praktično ne utiče na dalje povećanje ranije dostignute temperature provodnika. Zbog toga se orijentaciona provera zagrevanja može sprovesti samo prema struji koju isključuje prvi stepen distantne zaštite.

Izbor i provera OPGW na zagrevanje sprovodi se prema naznačenoj jednosekundnoj struji I_{thr} koju daje proizvođač.

U mreţama EPS-a nazivnog napona 220 kV i 400 kV primenjuju se stubovi sa dva zaštitna użeta, dok na vodovima 110 kV stubovi tipa „jela” imaju

jedno, a portalni stubovi i stubovi tipa „bure” imaju dva zaštitna użeta.

5.1. OPGW u mreţi 110 kV

Ako se pođe od toga da nivo perspektivnih struja zemljospoja u 110 kV mreţi neće biti iznad 31 kA, tada će uže OPGW sa naznačenom jednosekundnom strujom od $I_{thr} \approx 13$ kA termički zadovoljiti u svim tačkama mreţe, pod uslovom da se pri normalnom radu zaštitnih uređaja kratki spojevi isključuju za 100 ms. Sa ovim uţetom primena dodatnih mera za smanjenje struje kroz OPGW nigde neće biti potrebna. Razume se, na vodovima 110 kV na kojima su perspektivne struje manje od 31 kA, kao i na vodovima koji imaju dva zaštitna użeta mogu se primenjivati i OPGW sa manjim jednosekundnim strujama, ali uz prethodnu proveru maksimalnih očekivanih struja.

5.2. OPGW u mreţi 220 kV

Prema postojećem stanju u 220 kV mreţi dolaze u obzir pre svega sledeće kombinacije dva zaštitna użeta:

- OPGW i čelično uže 50 mm²
- OPGW i alučelično uže 75/80 mm²
- OPGW i uže na bazi legure AlMgSi.

Kombinacija: OPGW i čelično uže 50 mm²

Kada je naznačena jednosekundna struja użeta OPGW $I_{thr} = 12$ kA pomoću (40) se dobija da se ukupna struja od 30 kA pribliţno deli u odnosu 89 % ili 26,7 kA kroz OPGW i 11 % ili 3,3 kA kroz čelik. Ako je ukupno trajanje struje 200 ms, tada struji kroz OPGW odgovara jednosekundna struja $26,7 \sqrt{0,2} = 11,9$ kA < 12 kA. Numeričke provere zagrevanja pokazuju da se za to vreme temperatura čeličnog użeta praktično neće ni promeniti. Sa istom kombinacijom, ali sa strujom od 40 kA dobija se da se ukupna struja dva użeta deli u odnosu 88,6 % ili 35,4 kA kroz OPGW i 11,5 % ili 4,6 kA kroz čelik. Struji kroz OPGW sada odgovara jednosekundna struja $35,4 \sqrt{0,2} = 15,8$ kA > 12 kA. Prema tome, kombinacija OPGW sa $I_{thr} \approx 12$ kA i čeličnim uţetom preseka 50 mm² dolazi u obzir na mestima u mreţi 220 kV na kojima struje zemljospoja nisu veće od 30 kA, dok je za nivo struja zemljospoja od 40 kA potrebno ili izabrati OPGW sa većom naznačenom jednosekundnom strujom, ili čelično uže zameniti uţetom čija je provodnost veća (na primer, Ax/SA1A).

Kombinacija: OPGW i alučelično uže 75/80 mm²

Kada je naznačena jednosekundna struja użeta OPGW $I_{thr} = 7$ kA analognim postupkom se dobija da se ukupna struja od 30 kA pribliţno deli u odno-

su 41,7 % ili 12,5 kA kroz OPGW i 58,7 % ili 17,6 kA kroz alučelik. Za ukupno trajanje struje od 200 ms, struji kroz OPGW odgovara jednosekundna struja od 5,6 kA. Sa OPGW čija je naznačena jednosekundna struja 10 kA i sa strujom od 40 kA dobija se da se ukupna struja dva užeta približno deli u odnosu 50 %/50 %. Struji kroz OPGW sada odgovara jednosekundna struja $20 \sqrt{0,2} = 8,9 \text{ kA} < 10 \text{ kA}$.

Kombinacija u kojoj OPGW ima $I_{thr} = 7 \text{ kA}$ dolazi u obzir na mestima u mreži 220 kV na kojima struje zemljospoja nisu veće od 30 kA, dok je za nivo struja zemljospoja od 40 kA potrebno da OPGW ima naznačenu jednosekundnu struju $I_{thr} = 10 \text{ kA}$ ili veću. Kod ove kombinacije treba imati u vidu da umesto temperature optičkih vlakana ograničavajući faktor može da bude temperatura aluminijuma u užetu AlČe 75/80 mm².

Kombinacija: OPGW i uže na bazi legure AlMgSi

U mreži EPS-a do sada nisu tipizirana zaštitna užad na bazi legure AlMgSi, tako da se za ovu kombinaciju ne mogu procenjivati potrebne jednosekundne struje OPGW. Neka praktična iskustva dobijena računskim proverama na 220 kV vodovima EPS-a ukazuju da i u ovoj kombinaciji konvencionalno zaštitno uže može da se zagreje iznad dozvoljene temperature, dok istovremeno temperature OPGW ostaju u propisanim granicama.

5.3. OPGW u mreži 400 kV

U 400 kV mreži EPS-a zaštitno uže izvodi se sa dva provodnika od alumovelda nazivnog preseka 126 mm². Kada uže OPGW ima naznačenu jednosekundnu struju 10 kA ukupna struja kroz oba užeta intenziteta 40 kA deli se u odnosu 58 % ili 23,2 kA kroz OPGW i 43 % ili 17,2 kA kroz alumoveld. Ovoj struji kroz OPGW odgovara jednosekundna struja od 10,4 kA. Numeričkom proverom zagrevanja dobija se da struja od 17,2 kA za 200 ms podiže temperaturu alumovelda sa 40 °C na 141 °C, što je upola manje od dozvoljene temperature.

Prema tome, kombinacija OPGW sa naznačenom jednosekundnom strujom koja nije manja od 10 kA i užetom od alumovelda preseka 126 mm² bez ikakvih dodatnih mera termički zadovoljava u svim tačkama mreže 400 kV, pod uslovom da se pri normalnom radu zaštitnih uređaja kratki spojevi isključuju za 100 ms.

5.4. Dodatne mere za smanjenje struje kroz OPGW

Kada naznačena jednosekundna struja OPGW ne odgovara očekivanoj struji zemljospoja na mestu ugradnje, takvo uže ipak se može ugraditi na tom

mestu, ako se mogu izvesti određeni dodatni radovi. Postoji nekoliko načina za realizaciju ovih radova.

a) Postavljanje zaštitnog užeta koje ima veću provodnost. Zavisno od raspodele struje zemljospoja duž dalekovoda, ova mera se primenjuje ili na nekoliko prvih raspona od krajeva voda, ili na celoj trasi nadzemnog voda koji ima dva zaštitna užeta. Pošto OPGW u kombinaciji sa postojećim zaštitnim užetom ne izdržava termička naprezanja pri kvaru, drugo uže zamenjuje se novim, čija impedansa omogućava potrebno strujno rasterećenje OPGW. Prema dosadašnjim iskustvima, za ovu svrhu najprikladnija su užad izvedena od alumovela i legure AlMgSi.

b) Postavljanje dva paralelna OPGW. Ova mera takođe je moguća samo na dalekovodima sa dva zaštitna užeta. Njena primena dolazi u obzir ili na prvom rasponu od postrojenja koja napajaju vod, ili na prvom zateznom polju od tih postrojenja. Drugo uže OPGW u pogledu postavljanja i uzemljavanja u svemu se izvodi kao i prvo, s tom razlikom što se ne stavlja u funkciju. Na oba svoja kraja drugo uže mora biti zaštićeno od atmosferilija kako bi u bilo kom trenutku moglo da se iskoristi kao zamena za prvo uže. U odnosu na meru pod a) ova mera ima izvesne prednosti, jer je na mestima gde je OPGW termički najviše ugroženo (prvi rasponi od krajeva voda) obezbeđena stopostotna „hladna” rezerva.

c) Polaganje zemljovoda. U kontekstu razmatranja dodatnih mera za smanjenje struje kroz OPGW, pod zemljovodom se podrazumeva lineični provodnik položen u zemlju po trasi nadzemnog voda, koji je galvanski povezan sa uzemljivačima stubova i uzemljenjem postrojenja koje napaja vod. Mera se primenjuje kako kod vodova sa jednim, tako i kod vodova sa dva zaštitna užeta i dolazi u obzir samo na prvim rasponima od krajeva nadzemnog voda. Polaganje zemljovoda predstavlja izuzetno efikasnu meru za strujno rasterećenje OPGW, jer se za svaku struju zemljospoja uvek kao zemljovod može izabrati provodnik dovoljno velikog preseka koji će bez pregrevanja preuzeti dovoljno veliki deo ukupne struje zaštitnih užadi. Osnovni nedostatak zemljovoda je njegova nedovoljna pouzdanost. Naime, zemljovodni provodnik može zbog nepažnje biti oštećen ili prekinut tokom izvođenja zemljanih radova ispod nadzemnog voda. Pored toga nadzemni delovi zemljovoda (priklučci na konstrukciji stuba) nalaze se, kao i stubovi, na javnim površinama i dostupni su nepozvanim licima koji ih mogu oštetiti. Zato se tokom eksploatacije moraju striktno sprovoditi mere nadzora i periodične kontrole. Ekonomičnost zemljovoda pada sa brojem raspona na kojima je primenjen, tako da kada je broj raspona veći od 5 treba detaljnije ispitati opravdanost primene ove mere.

d) Primena električno pojačane izolacije. Kada je zbog bilo kakvih razloga ili neekonomično, ili nemoguće na drugi način ostvariti strujno rasterećenje OPGW, tada treba smanjiti verovatnoću nastanka zemljospoja na kritičnim mestima, što se postiže primenom električno pojačane izolacije. Tu, međutim, treba imati u vidu da za razliku od mere pod c) ova mera ne garantuje stopostotnu efikasnost, jer električno pojačavanje izolacije samo smanjuje verovatnoću nastanka zemljospoja, ali ga potpuno ne isključuje. Efikasnost mere se smanjuje sa povećanjem broja stubova na kojima se ona primenjuje. U praktičnim primenama može se uzeti da ova mera ima efekta ako broj susednih stubova na kojima se primenjuje pojačana izolacija nije veći od 5. Uže OPGW najviše je ugroženo kada se zemljospoj događa na prvim stubovima od krajeva voda. Međutim, pojačavanje izolacije na prvom i drugom stubu od postrojenja ugrozilo bi koordinaciju izolacije postrojenja, tako da ovu meru treba primenjivati u kombinaciji sa merom pod c). U tom smislu zemljovod treba položiti u prvom rasponu, ili u prva dva raspona, a pojačanu izolaciju treba primeniti na stubovima broj 3 i 4 (eventualno i na stubu broj 5). Na taj način OPGW bi merom c) bilo zaštićeno od zemljospojeva na prvom i drugom stubu, a na naredna dva do tri stuba verovatnoća nastanka zemljospoja bila bi gotovo isključena, ili u najgorem slučaju značajno smanjena. Mera se primenjuje kako na vodovima sa jednim, tako i na vodovima sa dva zaštitna užeta.

6. ZAKLJUČAK

(I) Računske provere zaštitnih užadi na termička naprezanja pri zemljospoju mogu se sprovoditi i uz zanemarivanje razmene toplote, pod uslovom da vreme eliminacije kvara nije duže od 200 ms.

(II) Kod proračuna zagrevanja zaštitnih užadi veća tačnost postiže se ako se uvažava činjenica da impedansa užeta zavisi od struje kroz užu i da se gustina struje u žicama menja u vremenu.

(III) Zaštitno uže neće biti ugroženo zbog zagrevanja pri zemljospoju, ako se nijedna od njegovih komponenti ne zagreje iznad najviše dozvoljene temperature za tu komponentu. Za nadzemne vodove 110 kV, 220kV i 400 kV u mreži EPS-a najviše dozvoljene temperature komponenti zaštitnih užadi pri kratkom spoju treba da iznose: 200 °C za aluminijum i leguru AlMgSi, 300 °C za čelik i alumoveld i 160 °C za optička vlakna.

(IV) U interesu ekonomičnije gradnje i eksploatacije potrebno je za nadzemne vodove 110 kV, 220 kV i 400 kV tipizirati kako OPGW užad, tako i zaštitnu užad izvedenu kombinacijom alumovelda i legure AlMgSi.

7. PRILOZI

U tabelama 2 do 6 navedene su srednje vrednosti impedansi u funkciji struje za pet vrsta zaštitnih užadi koja se primenjuju u mreži EPS-a. Sve vrednosti sračunate su pod pretpostavkom da se toplotni procesi u užadima tokom trajanja struja u njima odvijaju čisto adijabatski, a da trajanje struje iznosi 0,2 s. Ekvivalentna relativna magnetska permeabilnost m_e izračunata je prema (37). U tabeli 1 date su fizičke osobine materijala od kojih se izvođe zaštitna užad.

Tabela 1.

Fizičke osobine materijala za zaštitnu užad^{*)}

	ρ_{20} ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	α ($1/^\circ\text{C}$)	γ (g/cm^3)	C^{**} ($\text{J}/\text{g}^\circ\text{C}$)
Aluminijum	0,028 264	0,004 03	2,703	0,910
Alumoveld(SA1A)	0,084 800	0,003 60	6,590	0,586
AlMgS (tip B)	0,032 530	0,003 60	2,703	0,921
Čelik	0,191 570	0,004 50	7,780	0,480

^{*)} Karakteristike užadi dobijaju se posebnim proračunom.

^{**)} Sve vrednosti u tabeli osim vrednosti za C su prema IEC.

Tabela 2.

Impedanse užeta Če 50 mm²;
Početna temperatura 40 °C;
 q_{max} - maksimalna dostignuta temperatura užeta

I (kA)	Z (Ω/km)	$ Z $ (Ω/km)	m_e	q_{max} (°C)
1,0	4,258+j 1,313	4,456	35,0	45
1,5	4,306+j 1,146	4,456	24,0	50
2,0	4,374+j 1,063	4,501	19,0	59
2,5	4,464+j 1,006	4,576	15,0	70
3,0	4,578+j 0,967	4,679	13,0	84
4,0	4,886+j 0,920	4,972	10,0	124
5,0	5,324+j 0,892	5,399	8,0	184
6,0	5,935+j 0,872	5,998	6,5	272
6,3	6,160+j 0,867	6,221	6,2	306

Tabela 3.

Impedanse užeta od alumovelda 126 mm²;
Početna temperatura 40 °C;
 q_{max} - maksimalna dostignuta temperatura užeta

I (kA)	Z (Ω/km)	$ Z $ (Ω/km)	m_e	q_{max} (°C)
1	0,731+j 1,389	1,570	41,0	40
2	0,732+j 1,068	1,295	21,0	41
4	0,737+j 0,919	1,178	12,0	45
5	0,740+j 0,884	1,152	9,2	47
8	0,754+j 0,834	1,124	5,7	62
10	0,767+j 0,816	1,120	4,9	71
12	0,783+j 0,804	1,122	4,1	85
14	0,803+j 0,795	1,130	3,6	104
16	0,827+j 0,790	1,143	3,2	126
18	0,855+j 0,785	1,161	3,0	152
20	0,888+j 0,782	1,183	2,7	184
25	0,997+j 0,775	1,263	2,3	294

Tabela 4.

Impedanse užeta OPGW Ø 15 mm;
Početna temperatura 40 °C;
Naznačena jednosjekundna struja 9,9 kA;
Optička vlakna smeštena u aluminijumski tubus
Ø 9 mm
 q_{opt} - maksimalna dostignuta temperatura
optičkih vlakana

I (kA)	Z (Ω/km)	$ Z $ (Ω/km)	m_e	q_{max} (°C)
1	0,406+j 1,139	1,209	25,6	40
2	0,407+j 0,942	1,026	13,0	41
4	0,410+j 0,854	0,947	7,4	43
5	0,412+j 0,831	0,928	6,0	45
8	0,421+j 0,801	0,905	4,1	54
10	0,429+j 0,790	0,899	3,4	62
12	0,440+j 0,783	0,898	2,9	73
14	0,453+j 0,777	0,899	2,6	86
16	0,467+j 0,774	0,904	2,3	102
18	0,485+j 0,771	0,911	2,2	122
20	0,505+j 0,769	0,920	2,1	146
22	0,527+j 0,768	0,931	2,0	174 ⁾

⁾ Sa početnom temperaturom 20 °C temperatura optičkih vlakana umesto 174 °C iznosi 144 °C.

Tabela 5.

Impedanse užeta OPGW Ø 12,5 mm;
Početna temperatura 40 °C;
Naznačena jednosjekundna struja 6,6 kA;
Optička vlakna smeštena u aluminijumski tubus
Ø 8,3 mm
 q_{max} - maksimalna dostignuta temperatura
optičkih vlakana

I (kA)	Z (Ω/km)	$ Z $ (Ω/km)	m_e	q_{max} (°C)
1	0,628+j 1,089	1,257	21,7	41
2	0,631+j 0,930	1,124	11,6	42
3	0,635+j 0,878	1,083	8,2	44
4	0,641+j 0,845	1,061	6,2	48
5	0,649+j 0,828	1,052	5,1	52
6	0,658+j 0,818	1,050	4,4	58
7	0,670+j 0,809	1,050	3,9	65
8	0,683+j 0,802	1,054	3,4	73
10	0,715+j 0,792	1,067	2,8	94
12	0,756+j 0,786	1,091	2,4	122
13	0,780+j 0,784	1,106	2,3	140
14	0,807+j 0,782	1,124	2,2	160
15	0,836+j 0,781	1,144	2,1	183 ⁾

⁾ Sa početnom temperaturom 20 °C temperatura optičkih vlakana umesto 183 °C iznosi 153 °C.

Tabela 6.

Impedanse užeta AlČe 75/80 mm²;
Početna temperatura 40 °C;
 q_{max} - maksimalna dostignuta
temperatura aluminijuma

I (kA)	Z (Ω/km)	$ Z $ (Ω/km)	m_e	q_{max} (°C)
1	0,419+j 0,814	0,915	5,2	40
3	0,421+j 0,768	0,876	2,3	43
5	0,424+j 0,757	0,868	1,6	48
7	0,430+j 0,752	0,866	1,3	57
9	0,437+j 0,750	0,868	1,1	68
13	0,437+j 0,750	0,877	1,0	101
16	0,478+j 0,748	0,888	1,0	136
18	0,495+j 0,748	0,897	1,0	166
20	0,514+j 0,748	0,908	1,0	201

8. LITERATURA

- [1] B. Ribar Brajić, A. Martinoli, GRANIČNI NIVOI STRUJA KRATKOG SPOJA POSLE 2000. GODINE, ELEKTROPRIVREDA, br. 1, 1997.
- [2] B. Ribar Brajić, L. Mitrović, STUDIJA PARAMETARA KRATKOG SPOJA ZA 2010. GODINU, Direkcija za razvoj EPS-a, februar 1995.
- [3] DIN VDE 0103, BEMESSUNG VON STARKSTROMANLAGEN AUF MECHANISCHE UND THERMISCHE KURZSCHLUSSFESTIGKEIT, April 1988.
- [4] OPGW version 4.03, User's Manual, VEIKI Electric Large Laboratories LTD, Budapest, March, 2003.
- [5] J. Surutka, ELEKTROMAGNETIKA, Građevinska knjiga, Beograd, 1965.
- [6] B. Popović, ELEKTROMAGNETIKA, Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
- [7] J. Edminister, ELECTROMAGNETICS, McGraw-Hill Book Company, 1979.
- [8] S. Despotović, OSNOVI ANALIZE ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, Zajednica Jugoslovenske elektroprivrede, Beograd, 1962.
- [9] Tehnički priručnik, četvrto izdanje, SOUR Rade Končar, Zagreb, 1980.
- [10] JUS N.B9.805, Elektroenergetika, PRORAČUN EFEKATA STRUJA KRATKOG SPOJA, 1990.

Rad je primljen u uredništvo 01. 07. 2003. godine



Vladimir I. Balkovoj je rođen 1934. godine. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1960. godine. Od 1962. godine pa do kraja aktivne službe bio je zaposlen u Projektnom birou Elektrovojvodine u Novom Sadu, gde je radio na projektovanju srednjenaponskih vodova i transformatorskih stanica. Uporedo sa operativnim projektantskim poslovima bavio se širom problematikom uzemljenja u distributivnim mrežama. Posebnu oblast njegovog stručnog interesovanja predstavljaju pojave vezane za tokove i raspodelu nultih struja pri zemljospoju u visokonaponskim mrežama i analitičke metode za procenu opasnosti i štetnih uticaja koji zbog ovih struja mogu nastati na elementima mreže i objektima u okruženju.



Miomir M. Dutina je rođen 1940. godine. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini 1973. godine. Prva praktična iskustva stekao je u REH kombinatu „Kosovo”. Nakon diplomiranja radio je u Trepči i u Elektrosrbiji u Kraljevu. Od 1976. godine zaposlen je u Elektroistoku u Novom Sadu. Aktivno se bavi problematikom visokonaponskih nadzemnih vodova, sa posebnim interesom za njihovu revitalizaciju, kao i za izbor faznih provodnika i zaštitne užadi (naročito za prelaze velikih reka). Analize ponašanja nadzemnih vodova 110 kV, 220 kV i 400 kV, kako u redovnom pogonu tako i za vreme havarijskih režima, takođe su predmet njegovog višegodišnjeg interesovanja.

Duško Bekut,
Borislav Mihić i Zoran Grahovac

Proračuni režima sa kratkim spojevima/prekidima u radijalnim distributivnim mrežama

Originalni naučni rad
UDK: 621.316; 621.311.1

Rezime:

U radu je prikazan jedinstveni model za proračun režima sa kvarom - kratkim spojem/prekidom faza u radijalnoj distributivnoj mreži. Predloženi model je baziran na ekvivalentima mreže koji se jednostavno i vrlo efikasno izračunavaju. Korišćenjem ekvivalenata postignuto je da se pri proračunu režima sa prekidom faza ne uvodi novi - dodatni čvor, što je praktično nezaobilazan korak kod standardnih proračuna. Ekvivalenti se izračunavaju samo pri promeni topologije mreže, dok se kod proračuna režima sa prekidom faza oni moraju izračunavati i pri eventualnim značajnijim promenama režima razmatrane mreže. Efikasnost modela je na nivou savremenih svetskih rešenja ili bolja, s obzirom na to da se kod ponovljenih proračuna za zadataku topologiju/režim mogu izostaviti neki delovi proračuna (proračun ekvivalenata) i direktno započeti sa proračunom režima, čime se značajno dobija na efikasnosti proračuna. Posebna pogodnost je što se proračuni mogu ograničiti samo na deo mreže od interesa. Na kraju su sva razmatranja ilustrovana primerima.

Ključne reči: kvar, kratak spoj, prekid faza, distributivna mreža

Abstract:

ANALYSIS OF SHORT CIRCUITS/PHASE INTERRUPTIONS IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS

This paper deals with the unified model for fault analysis (short circuits/phase interruptions) in radial distribution networks. The model is based on network equivalents which are calculated very simply and efficiently. The application of equivalents eliminates the necessity for introduction of a new node in the procedure for phase interruption analysis (this step is unavoidable in standard approaches). In addition, this means that equivalents are calculated only after changes in network topology and after significant changes of network state (this is valid for phase interruption analysis). The efficiency of the model is on the same or higher level or greater than leading world models. Especially, the model has significantly higher efficiency for multiple calculations for the same network structure and topology. In this case, calculations of equivalents are performed only once and the calculations of the network state are performed directly. An additional convenience is the possibility of performing of efficient calculations of network state in arbitrary selected parts of the network. All considerations are illustrated by examples.

Key words: fault, short circuit, phase interruption, distribution network

*V. prof. dr Duško Bekut, – Fakultet tehničkih nauka, 21 000 Novi Sad, Fruškogorska 11
Borislav Mihić, dipl. ing. – Elektrotehnički institut DEC, 23 000 Zrenjanin, Saveznička 5
Zoran Grahovac, dipl. ing. – „EPS” JP „Elektrovojvodina” – „Elektrodistribucija Zrenjanin”, 23 000 Zrenjanin, Pančevačka 46*

1. UVOD

Standardni algoritmi za proračun kvarova (kratkih spojeva, prekida faze) se zasnivaju na primeni matrice admitansi [1,2,3]. Primenom ovakvih algoritama u distributivnoj mreži nailazi se na dva problema [4]. Prvi se odnosi na numeričku nestabilnost matrice admitansi pri faktorizaciji. Drugi problem je velika dimenzija matrice s obzirom na realne dimenzije distributivnih mreža od više stotina ili hiljada čvorova, gde se bez obzira na primenu tehnike retnih matrica ne može postići prihvatljiva efikasnost. Napred navedeni razlozi značajno utiču na kvalitet proračuna i uslovili su razvoj specijalizovanih algoritama za proračune kvarova u distributivnoj mreži. To su, pre svega, modeli za proračun režima sa kratkim spojevima [5,6,7], a zatim i model [4] za proračun režima sa prekidom faza. U modelu [4] iskorišćene su sve dobre osobine koje su ustanovljene kod modela za proračun režima sa kratkim spojevima, pa je na taj način obezbeđeno jedno efikasno rešenje za proračun režima sa prekidima u distributivnoj mreži.

Kao prirodan korak u daljoj obradi problematike kvarova predstavlja razvoj i konstituisanje jedinstvenog modela za proračun režima sa kvarom (kratkim spojem/prekidom faza) u distributivnoj mreži. To je ujedno i glavni predmet obrade ovog rada, gde su predložena sledeća rešenja/unapređenja vezana za proračune režima sa kvarom:

1. Iskorišćene su sve dobre osobine modela [4,5,6,7].
2. Korišćenje ekvivalenata pri proračunu. Kod radijalnih mreža, svaki čvor deli mrežu na dva disjunktna dela: na deo mreže od tog čvora ka korenu (mesto odakle se mreža napaja) i ostali deo (deo mreže ka krajevima). Algoritam koji se koristi u ovom radu bazira se na proračunu odgovarajućih ekvivalenata mreže za ova dva pomenuta dela mreže. U opštem slučaju, korišćenje ekvivalenata omogućava da se dimenzija problema koji se rešava redukuje, a proračun učini efikasnijim. Polazeći od ovako definisanih ekvivalenata mreže, lako se izračunava vrednost ekvivalentne impedanse sa mesta prekida ili kratkog spoja. Dodatna pogodnost je da postojanje dva ekvivalenta za jedan čvor implicitno sadrži podelu na dva čvora, što omogućuje da se kod proračuna režima sa prekidom faza izbegne eksplicitno uvođenje novog (dodatnog čvora) i promena topologije kola pri proračunu. Pošto nema promene topologije, izračunati ekvivalenti se ne menjaju pri promeni mesta kvara. Na taj način je stvorena osnova da se postupak proračuna razdvoji na dva dela: na deo u kome se izračunavaju pomenuti ekvivalenti i na

deo u kome se proračunava režim sa kvarom. Ovakvom organizacijom proračuna obezbeđuje se visoka efikasnost, a posebno u slučaju višestrukih proračuna na razmatranoj mreži, što je npr. slučaj kod proračuna vezanih za potrebe relejne zaštite.

3. Opis kvarova (kratkih spojeva/prekida) izveden je u zatvorenoj (kanoničnoj) formi te se na taj način obezbeđuje generisanje jednačina za opis kvara u formi algoritma [5,6,7]. To je postignuto uvođenjem otočnog i rednog modula za opis otočnih kvarova (kratkih spojeva) i rednih kvarova (prekidna faza) [5,6,7]. Ovaj algoritam u tom smislu predstavlja novo rešenje, pošto je namenjen za proračune u radijalnim mrežama, pri čemu se u njemu prvi put primenjuju ti moduli.
4. Proračun režima samo u delu mreže od interesa - lokalnoj mreži¹⁾.
5. Razvoj ovakvog jednog modela predstavlja nezaoobilazan korak u razvoju modela za proračun režima sa simultanim kvarovima (više jednovremenih kratkih spojeva i/ili prekida).

Razmatranja vezana za jedinstveni model za proračun kvarova započinju u drugom delu rada, gde se daju osnovne pretpostavke i napomene vezane za ovaj proračun. Pre svega se uvodi pretpostavka da je kolo linearno. U slučaju proračuna režima sa prekidom faza se uvodi pretpostavka da se potrošači mogu dovoljno kvalitetno modelovati (zameniti) odgovarajućom admitansom (impedansom) [7]. U tom delu se objašnjava i primena principa superpozicije za proračune režima sa kvarom. U trećem delu je obrađeno modelovanje kola za proračune i postupci za proračun odgovarajućih ekvivalenata mreže za svaki od čvorova mreže. U četvrtom delu prikazan je postupak za proračun režima na mestu kvara, gde je detaljno izložena ideja i način primene otočnog i rednog modula za opis otočnih i rednih kvarova. U tom delu je izložen i postupak za rešavanje režima na mestu kvara. Proračun režima u delu mreže od interesa - lokalnoj mreži izložen je u petom delu. U šestom delu su dati primeri, dok su u završnim delovima dati zaključak i literatura korišćena za pisanje ovog rada.

2. PRORAČUNI REŽIMA SA KVAROM

Svi navedeni modeli za proračune režima sa kvarom [4,5,6,7] pre svega su namenjeni proračunima u mrežama sa radijalnom strukturom, dok se slabopetljane mreže (mreže sa malim brojem petlji)

¹⁾ U opštem slučaju, lokalnu mrežu može da čini i cela distributivna mreža.

rešavaju svođenjem na radijalnu strukturu i primenom kompenzacione tehnike.

Razmatrana distributivna mreža se normalizuje primenom generalizovanog sistema relativnih vrednosti [1], pri čemu se svi parametri elemenata mreže svode na jedinstveni naponski nivo (i eliminišu eventualni fazni pomeraji koji potiču od transformatora), a sami elementi se prikazuju u formi grana („ π ” šemama) ili otoka vezanih za čvorove. Standardno se primenjuju šeme u domenu simetričnih komponenti. Na tako dobijenu strukturu mreže primenjuje se numeracija čvorova i grana sukcesivno po lejerima (nivoima) od korena mreže ka krajevima [4]. To je bitan preduslov za efikasan proračun ovim modelima. Grane su pri tome orijentisane - svaka ima „gornji” i „donji” kraj - čvor (pri čemu je gornji onaj čvor koji je bliži korenu). Prethodno opisani način numerisanja formiranja mreže kao i proračun odgovarajućih pomoćnih veličina je opisan u trećem delu rada.

Nezavisno od tipa kvara algoritam za proračun režima sa kvarom, započinje sa standardnom dekompozicijom režima sa kvarom, na režim distributivne mreže pre kvara i režim tzv. fiktivnog (Δ) kola koji je u opštem slučaju trofazan nesimetričan sa nesimetrijom istog tipa kao što je i nesimetrija režima distributivne mreže sa kvarom. Fiktivno kolo je pasivno osim na mestu kvara. Superponiranjem režima fiktivnog (Δ) kola i režima pre kvara dobija se režim distributivne mreže sa kvarom. Upravo modelovanje fiktivnog kola i proračun njegovog režima predstavlja jedan od glavnih predmeta obrade ovog rada.

Kod proračuna režima sa kvarom potrošači mogu biti tretirani dvojako. Prva varijanta je da se postojanje potrošača zanemari u fiktivnom kolu, a da se njihov uticaj uvaži superponiranjem režima pre kvara. Ova varijanta se češće primenjuje jer parametri fiktivnog kola ne zavise od režima pre kvara. Druga varijanta je da se u fiktivnom kolu potrošači zamene sa odgovarajućom admitansom (impedansom) izračunatom na osnovu parametara režima pre kvara. Naravno, režim pre kvara se i u ovom slučaju superponira. Ova varijanta je nešto složenija jer se zahteva proračun parametara potrošača i njihovo uvažavanje u proračunu, ali je ona praktično nezaobilazna za proračune režima sa prekidom provodnika. Kada bi se potrošači mogli tretirati kao zaista konstantne admitanse (impedanse), ovom varijantom bi se dobijali precizniji proračuni. Može se smatrati da su za praktične proračune obe varijante dovoljno dobre i tačne.

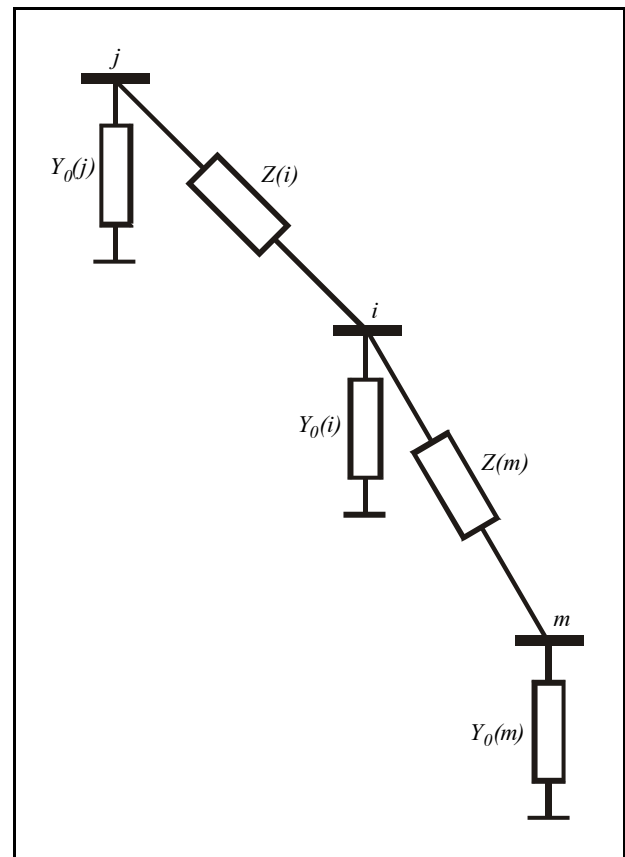
Predloženim algoritmom se sa istom efikasnošću rešavaju problemi proračuna režima sa kratkim spojem: jednopolnim, dvopolnim, dvopolnim sa

zemljom i trolnim, kao i režimi sa prekidom faza: prekid jedne i prekid dve faze. Proračuni višestrukih i složenih kvarova (npr. kratki spoj sa prekidom faze) izlaze iz okvira ovog rada.

U delu koji sledi izračunavaju se pomenuta dva ekvivalentna mreže za svaki od čvorova.

3. EKVIVALENTI MREŽE

Razmatra se radijalna distributivna mreža sa n čvorova koja je svedena na jedinstven naponski nivo. Kao što je u prethodnom delu pomenuto, za svaki od čvorova ove mreže (npr. p -ti čvor) izračunavaju se dva ekvivalenta - ekvivalentna admitansa na gore (ka korenu) $Y_u(p)$ i ekvivalentna admitansa na dole (ka krajevima) $Y_d(p)$. Algoritam proračuna ovih admitansi se sastoji iz tri koraka.



Slika 1. Mreža sa sažetim otočnim admitansama

1. korak: Za svaki od n čvorova se sabiraju sve otočne admitanse vezane za čvor. Potrošači po definiciji mogu biti vezani samo u čvorovima kao otočne admitanse $Y_{pot}(p)$. Kod proračuna režima sa kratkim spojem uzima se da je $Y_{pot}(p)=0$, dok kod proračuna režima sa prekidom faza ove admitanse imaju odgovarajuće brojne vrednosti koje su različite od nule u čvorovima sa potrošnjom $Y_{pot}(p) \neq 0$. Kao

rezultat ovog koraka, u svakom čvoru dobija se samo po jedna otočna admitansa $Y_0(p)$, $p=1, \dots, n$ - slika 1.

2. korak: U ovom koraku se izračunavaju vrednosti Y_d za svaki od čvorova mreže. Prvo se inicijalno svim čvorovima dodeljuje da je:

$$Y_d = Y_0 \quad (1)$$

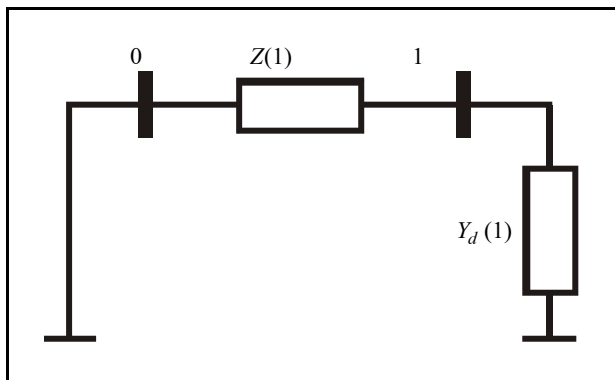
Zatim se proračun odvija sukcesivno od krajnjih čvorova prema korenu mreže. Ako je razmatrani m -ti čvor ($m=n, n-1, \dots, 1$) tada je - slika 1:

$$Y_d(i) = Y_d(i) \frac{1}{Z(m) + 1/Y_d(m)} \quad (2)$$

što znači da se postojećoj vrednosti $Y_d(i)$ otočne admitanse kod gornjeg čvora dodaje ekvivalentne grane i njene otoke sa donjeg kraja. Praktično mreža se na ovaj način „zamotava“.

3. korak: U ovom koraku izračunavaju se vrednosti Y_u za svaki od čvorova mreže. Postupak započinje proračunom vrednosti $Y_u(1)$ za prvi čvor - slika 2.

Pošto je čvor sa indeksom 0 (koren) na nultom (referentnom) potencijalu, vrednost $Y_u(1)$ se izračunava kao:

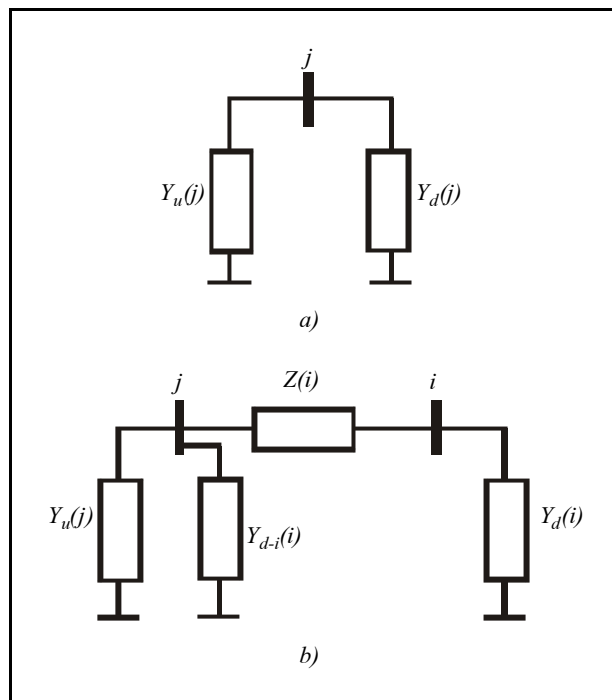


Slika 2. Proračun vrednosti $Y_u(1)$

$$Y_u(1) = \frac{1}{Z(1)} \quad (3)$$

Postupak proračuna vrednosti Y_u je sukcesivan - dakle, podrazumeva se da je pri proračunu vrednosti Y_u za donji čvor poznata vrednost Y_u za gornji čvor te grane. Postupak proračuna vrednosti $Y_u(i)$ je prikazan na primeru i -te grane koja se nalazi između j -tog i i -tog čvora - slika 3. Za j -ti čvor su prethodno izračunate vrednosti $Y_u(j)$ i $Y_d(j)$ - slika 3a. Za proračun vrednosti $Y_u(i)$, potrebno je iz ekvivalentne mreže predstavljenog preko admitanse $Y_d(j)$ izdvojiti i -tu granu kod koje se na donjem čvoru nalazi ekvivalent ostalog dela mreže $Y_d(i)$ - slika 3b. Kao rezultat ove operacije, u čvoru j umesto vrednosti $Y_d(j)$ sada figuriše vrednost $Y_{d-i}(j)$ (vrednost

$Y_{d-i}(j)$ bi bila jednaka vrednosti $Y_d(j)$ kada bi i -ta grana bila prekinuta).



Slika 3. Okruženje j -tog čvora mreže
a) ekvivalentni mreže
b) sa izdvojenom i -tom granom

Vrednost $Y_{d-i}(j)$ se izračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$Y_{d-i}(j) = Y_d(j) \frac{1}{\frac{1}{Y_d(i)} + Z(i)} \quad (4)$$

Na osnovu ove vrednosti izračunava se $Y_u(i)$:

$$Y_u(i) = \frac{1}{\frac{1}{Y_u(j)} + \frac{1}{Y_{d-i}(j)} + Z(i)} \quad (5)$$

odnosno, uvrštavanjem izraza (4) u (5):

$$Y_u(i) = \frac{1}{\frac{1}{Y_u(j)} + \frac{1}{Y_d(j) \frac{1}{\frac{1}{Y_d(i)} + Z(i)}} + Z(i)} \quad (6)$$

Prethodno navedena procedura se ponavlja za kolo za inverzni i nulti režim sa odgovarajućim pa-

rametrima². Na ovaj način se dobijaju odgovarajuće vrednosti Y_d i Y_u za sva tri simetrična režima, direktni, inverzni i nulti što se simbolično označava sa $Y_d^{d,i,0}$ i $Y_u^{d,i,0}$.

Potrebno je naglasiti da ovakva forma ekvivalentna ispunjava sve potrebne preduslove za primenu za proračune režima sa kvarom. Vrednosti ekvivalentnih impedansi na mestu kvara se dolazi na sledeći način:

- kada se na osnovu ekvivalentnih admitansi izračunaju odgovarajuće impedanse i dobijene vrednosti saberu, tada se kao rezultat dobija ekvivalentna redna impedansa „viđena” sa mesta prekida;
- kada se admitanse saberu, a zatim se izračuna odgovarajuća impedansa, tada se dobija ekvivalentna otočna impedansa „viđena” sa mesta kratkog spoja.

U svim dosadašnjim razmatranjima se podrazumevalo da je mesto kvara u nekom od čvorova mreže. Ako to nije slučaj, nije teško pokazati da se u radialnoj mreži iz vrednosti ekvivalenta za čvorove grane može dobiti i odgovarajući ekvivalent za mesto kvara na grani.

Ovde je potrebno naglasiti da se proračun pomenutih ekvivalenta izvodi samo jednom za dato uklopno stanje/režim mreže. U numeričkom smislu obim proračuna je jednak izvođenju jednog proračuna unapred i unazad modelima [5,6,7]. Ako se ima u vidu da su režimi i promena topologije u distributivnoj mreži relativno retki, onda ova činjenica dobija posebno na značaju i predstavlja realnu osnovu za dobijanje vrlo efikasnog proračuna pri višestrukim proračunima nad istom topologijom/režimom mreže³ (npr. kod analize rada relejne zaštite).

4. PRORAČUN REŽIMA NA MESTU KVARA

U prethodnom delu su prikazani postupci za proračun ekvivalenti. Mesto kvara u fiktivnom kolu se modeluje rednim ili otočnim modulom u zavisnosti od vrste kvara [1,2,3]. Uvođenjem modula omogućuje se opisivanje bilo kog tipa kvara u zatvorenoj kanoničnoj formi. S obzirom da je fiktivno kolo linearno i da ne postoje kontrolisani izvori, svi proračuni su direktni (neiterativni), čime se omogućuje veoma efikasan proračun režima sa kvarom. Proračun režima sa kvarom se sastoji iz dva dela:

- Proračun režima na mestu kvara.

² Ako se uvede pretpostavka da su parametri kola za direktni i inverzni režim identični, onda se proračun vrednosti Y_d i Y_u za inverzni režim može izostaviti i koristiti se vrednostima za direktni režim.

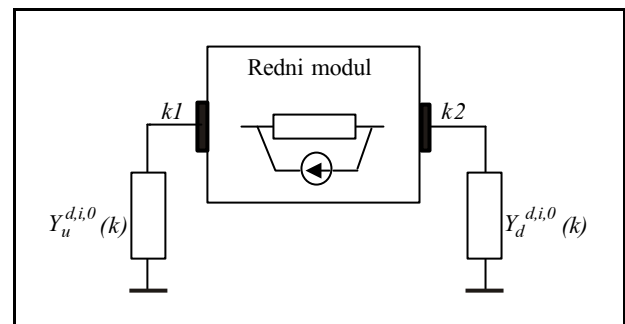
³ Ovo naročito dolazi do izražaja kod proračuna za potrebe provere funkcionalnosti i podešenja relejne zaštite gde je zbog provere „pokriivenosti” zaštitom mreže potrebno simulacije izvoditi u svim delovima mreže.

- Proračun režima u lokalnoj mreži.

Superponiranjem režima pre kvara i režima fiktivnog kola dobija se režim distributivne mreže u uslovima kvara.

4.1. Proračun režima na mestu prekida faza

Kada se proračunava režim sa prekidom faze u radialnoj mreži, nije potrebno insertovati novi čvor na mestu prekida već je to inherentno modelu, jer se redni modul insertuje redno između ekvivalenta $Y_d^{d,i,0}$ i $Y_u^{d,i,0}$ za taj čvor. Neka je za razmatranja koja slede k -ti čvor kod koga se događa prekid samo formalno podeljen na čvorove $k1$ i $k2$. Ovaj slučaj je prikazan na slici 4.



Slika 4. Načelni prikaz mesta sa prekidom faze sa insertovanim rednim modulom

Sistem od 9 jednačina kojim se opisuje režim na mestu prekida se može napisati u sledećoj formi u domenu simetričnih komponenti:

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{E}, \quad (7)$$

koja u razvijenoj formi ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} Y_u(k) & 0 & I & U(k1) & 0 \\ 0 & Y_d(k) & I & U(k2) & 0 \\ B^U & B^U & B^I & I_p(k) & B^0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{E}, \quad (8)$$

gde su elementi vektora \mathbf{X} definisani kao:

$$\begin{aligned} & - U(k1) \quad U^d(k1) \quad U^i(k1) \quad U^0(k1)^T \\ & U(k2) \quad U^d(k2) \quad U^i(k2) \quad U^0(k2)^T, \\ & - I_p(k) \quad [I_p^d(k) \quad I_p^i(k) \quad I_p^0(k)]^T, \end{aligned}$$

dok su elementi matrice definisani kao:

$$- Y_u(k) \quad \text{diag}[Y_u^d(k) \quad Y_u^i(k) \quad Y_u^0(k)] \text{ i}$$

$$Y_d(k) \text{ diag}[Y_d^d(k) \quad Y_d^i(k) \quad Y_d^0(k)]$$

dok su matrice B^U , B^I i B^0 definisane na sledeći način [1,2,3]:

$$- \quad B^U \quad \text{diag}[B_{L1}^U \quad B_{L2}^U \quad B_{L3}^U] A^{-1},$$

$$- \quad B^I \quad \text{diag}[B_{L1}^I \quad B_{L2}^I \quad B_{L3}^I] A^{-1},$$

$$- \quad B^0 \quad [B_{L1}^0 \quad B_{L2}^0 \quad B_{L3}^0]^T,$$

gde je:

$$B_i^U \quad \begin{matrix} 1 & z_i^p & KB \\ 0 & z_i^p & \end{matrix} \quad i \quad L1, L2, L3,$$

$$B_i^I \quad \begin{matrix} z_i^p & z_i^p & KB \\ 1 & z_i^p & \end{matrix} \quad i \quad L1, L2, L3,$$

$$B_i^0 \quad \begin{matrix} z_i^p I_i(k) & z_i^p & KB \\ I_i(k) & z_i^p & \end{matrix} \quad i \quad L1, L2, L3,$$

pri čemu je: z_i^p vrednost impedanse u i -toj fazi na mestu prekida, KB je oznaka za skup brojeva sa konačnim vrednostima; struja $I_i(k)$ je struja u grani sa prekidom pre prekida koja je poznata iz režima pre prekida faze.

Matrica A^{-1} je standardna matrica transformacije iz faznog u domen simetričnih komponenti, dok su matrice I , θ i θ definisane kao:

$$I \quad \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1]; \quad \theta \quad \text{diag}[0 \quad 0 \quad 0];$$

$$\theta \quad [0 \quad 0 \quad 0]^T.$$

Režim na mestu prekida se dobija rešavanjem sistema linearnih jednačina (izraz (7)) po vektoru X :

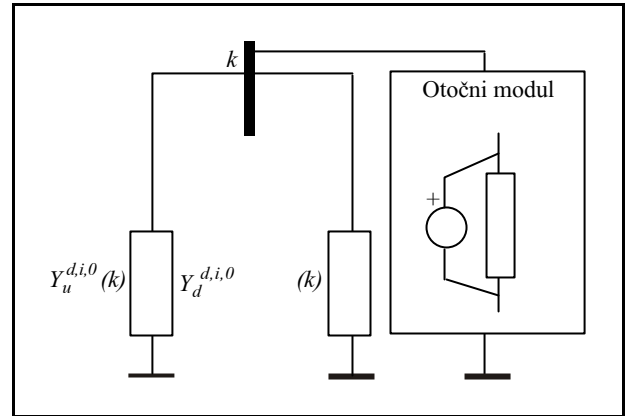
$$X = D^{-1} \cdot E, \quad (9)$$

čime su dobijeni naponi i injektirane struje u čvorovima prekida. Inverzija matrice D se samo načelno izvodi (sistem jednačina se obično rešava primenom neke od faktorizacionih (LU) metoda).

Kada je poznat režim na mestu prekida, tada se može izračunati režim i u lokalnoj mreži fiktivnog kola.

4.2. Proračun režima na mestu kratkog spoja

Kod proračuna režima sa kratkim spojem u izabranom čvoru potrebno je izračunati odgovarajuće vrednosti ekvivalentnih admitansi sa mesta kratkog spoja. Te vrednosti se izračunavaju sabiranjem (paralelnim vezivanjem) admitansi $Y_d^{d,i,0}$ i $Y_u^{d,i,0}$. To je prikazano na slici 5.



Slika 5. Načelni prikaz mesta sa kratkim spojem sa insertovanim otočnim modulom

Analogno kao kod proračuna režima sa prekidom faza i proračun režima sa kratkim spojem može biti definisan preko sistema od 7 jednačina u sledećoj formi [1,2,3]:

$$F \cdot X = G, \quad (10)$$

koja u razvijenoj formi ima sledeći oblik:

$$\begin{matrix} Y(k) & I & \theta & U(k) & \theta \\ A^U & A^I & A^v & I_{ks}(k) & A^0 \\ \theta^T & C^I & C^v & v(k) & C^0 \end{matrix}, \quad (11)$$

gde su napon i struja na mestu kvara, respektivno:

$$- U(k) \quad [U^d(k) \quad U^i(k) \quad U^0(k)]^T,$$

$$- I_{ks} \quad [I_{ks}^d \quad I_{ks}^i \quad I_{ks}^0]^T,$$

dok je $v(k)$ napon internog čvora otočnog modula.

Elementi matrice F su definisani kao:

$$- Y(k) \quad Y_u(k) \quad Y_d(k)$$

$$\text{diag}[Y^d(k) \quad Y^i(k) \quad Y^0(k)],$$

$$- A^U \quad \text{diag}[A_{L1}^U \quad A_{L2}^U \quad A_{L3}^U] A^{-1},$$

$$- A^I \quad \text{diag}[A_{L1}^I \quad A_{L2}^I \quad A_{L3}^I] A^{-1},$$

$$- A^v \quad [A_{L1}^v \quad A_{L2}^v \quad A_{L3}^v]^T,$$

$$- A^0 \quad [A_{L1}^0 \quad A_{L2}^0 \quad A_{L3}^0]^T,$$

$$- C^I \quad [C_{L1}^I \quad C_{L2}^I \quad C_{L3}^I] A^{-1},$$

$$- \theta^T \quad [0 \quad 0 \quad 0],$$

gde su [1,2,3]:

$$A_i^U \quad \begin{matrix} 1 & z_i & KB \\ 0 & z_i & \end{matrix} \quad i \quad L1, L2, L3,$$

$$\begin{aligned}
A_i^I & \begin{matrix} z_i & z_i & KB \\ 1 & z_i & \end{matrix} i \quad L1, L2, L3, \\
A_i^V & \begin{matrix} 1 & z_i & KB \\ 0 & z_i & \end{matrix} i \quad L1, L2, L3, \\
A_i^0 & \begin{matrix} U^i(k) & z_i & KB \\ 0 & z_i & \end{matrix} i \quad L1, L2, L3, \\
C_{L1}^I & \begin{matrix} C_{L2}^I & C_{L3}^I & z_{jn} & z_{jn} & KB \\ & & 1 & z_{jn} & \end{matrix}, \\
C^V & \begin{matrix} 1 & z_{jn} & KB \\ 0 & z_{jn} & \end{matrix}, \\
C^0 & \begin{matrix} z_{jn} & I_{jn} & z_{jn} & KB \\ I_{jn} & z_{jn} & & \end{matrix},
\end{aligned}$$

pri čemu: z_i je vrednost impedanse između i -te faze i internog čvora otočnog modula, z_{jn} je vrednost impedanse između internog čvora otočnog modula i neutralne tačke, KB je oznaka za skup brojeva sa konačnim vrednostima.

Napon na mestu kratkog spoja $U_i(k)$ i struja inherentna samom mestu kratkog spoja I_{jn} su poznati iz režima pre kratkog spoja [5,6,7].

Režim u čvoru sa kvarom dobija se rešavanjem jednačine (10) po vektoru X :

$$X = F^{-1} \cdot G, \quad (12)$$

čime su dobijeni naponi i injektirane struje u čvoru sa kratkim spojem. Kod rešavanja ovog sistema važe iste napomene kao kod izraza (9).

Kada je poznat režim na mestu prekida, tada se može izračunati režim i u lokalnoj mreži fiktivnog kola, što je predmet obrada u delu koji sledi.

5. PRORAČUN REŽIMA U LOKALNOJ MREŽI

Proračun režima u lokalnoj mreži podrazumeva sledeća dva proračuna u lokalnoj mreži:

- proračun na gore,
- proračun na dole.

Proračun na gore se primenjuje za proračune režima u delovima lokalne mreže koji se nalaze na putu između mesta kvara i korena, dok se u svim ostalim delovima lokalne mreže primenjuje proračun na dole. Kod proračuna na gore mora biti poznat napon na donjem kraju grane dok se napon na gornjem kraju izračunava, tako da proračun na gore može započeti samo od čvora sa kvarom. Dalji proračun na gore se odvija sukcesivno po granama lokalne mreže koje se nalaze na pomenutom putu ka korenu.

Kod proračuna na dole napon mora biti poznat na gornjem kraju grane, dok se napon na donjem kraju izračunava. Proračun na dole može biti započet ili sa mesta kvara (naravno u smeru na dole), ili iz bilo kojeg čvora čija je vrednost napona izračunata pri proračunu na gore. Proračun na dole se sukcesivno odvija po granama koje se nalaze između čvora iz kojeg je započet proračun i krajnjeg čvora za koji se želi izračunati režim.

Sledeće relacije se koriste za proračun na gore kod npr. (i)-te grane - slika 1:

Struja u (i)-toj grani (pri čemu je napon $U(i)$ na donjem kraju poznat) je:

$$J(i) = Y_u(i) U(i). \quad (13)$$

Napon gornjeg čvora j te grane je:

$$U(j) = U(i) + Z(i) J(i). \quad (14)$$

Za proračun na dole koristi se sledeća relacija za proračun struje u grani (neka je to sada proračun na (m)-toj grani - slika 1), pri čemu se i ovde podrazumeva da je napon gornjeg čvora $U(i)$ poznat:

$$J(m) = \left(\frac{1}{Z(m)} \right) U(i), \quad (15)$$

pa je napon donjeg čvora:

$$U(m) = U(i) + Z(m) J(i). \quad (16)$$

Izrazi (13), (14), (15), (16) primenjuju se za proračun direktnog, inverznog i nultog režima. Na osnovu izračunatih vrednosti napona i struja mogu se, po potrebi, izračunati i odgovarajuće fazne veličine.

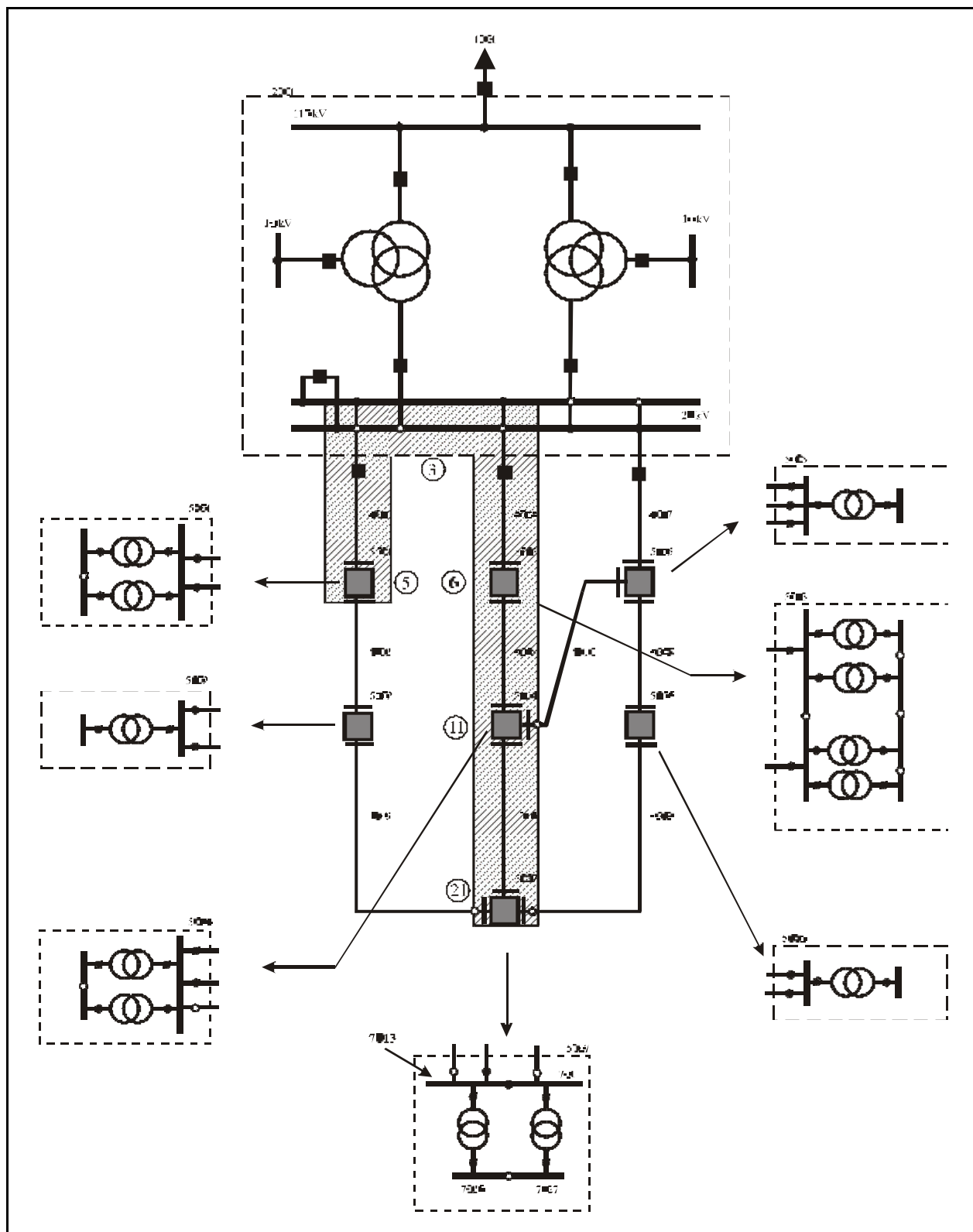
Očigledno je da primenom gore navedenog postupka može lako (bez nepotrebnog testiranja i pretraživanja) proračunati režim u lokalnoj mreži, što nije slučaj kod modela [5,6,7]. Ova mogućnost je veoma značajna za primenu kod proračuna za potrebe relejne zaštite gde se npr. proračun ograničava samo na mesto kvara i deo mreže gde se nalaze releji čije se delovanje analizira.

6. PRIMERI

U ovom delu je prikazan primer proračuna režima sa prekidom faza i primer proračuna režima sa kratkim spojem. Razmatrana distributivna mreža (slika 6) se sastoji od jedne transformatorske stanice 110/20/10 kV/kV/kV i sedam distributivnih transformatorskih stanica 20/0,4 kV/kV. Sve transformatorske stanice su povezane 20 kV kablovskim deonicama.

- Razmatraju se dva proračuna u ovoj mreži:
1. Prekid dve faze kod čvora 21,
 2. Jednopolni kratak spoj u čvoru 21.

Potrebno je za navedene kvarove proračunati režim na mestu kvara i režim u lokalnoj mreži, koja je na slici 6 označena šrafurom.



Slika 6. Distributivna test mreža

6.1. Proračun režima sa prekidom faza

U razmatranoj distributivnoj mreži (slika 6) analiziran je prekid faza L1 i L2 u čvoru 21 (na kraju deonice između čvorova 11 i 21). Indeksi čvorova su označeni brojevima u kružićima.

Mreža je normalizovana, a svakom čvoru mreže su dodeljene admitanse Y_d i Y_u . Čvor sa prekidom (čvor 21) formalno je podeljen na čvorove 21' (čvor bliži korenu mreže) i 21'' (čvor dalji od korena mreže). Redni modul se formalno insertuje između čvorova 21' i 21''.

Brojne vrednosti ekvivalentnih admitansi su:

$$Y_u^d(21) \quad Y_u^i(21) \quad (35,8652 - j46,9361) [r.j.],$$

$$Y_u^0(21) \quad (1,0329 + j0,0944) [r.j.],$$

$$Y_d^d(21) \quad Y_d^i(21) \quad (0,0000 + j0,0147) [r.j.],$$

$$Y_d^0(21) \quad (0 + j0,0088) [r.j.].$$

Za normalizaciju su korišćenje sledeće bazne veličine: $S^b=3,15$ MVA (ova snaga je izabrana kao 10 % od nominalne snage napojnih transformatora); dok su vrednosti napona:

$$(V_{20}^b)^d \quad (V_{20}^b)^i \quad (V_{20}^b)^0 \quad V_{20}^b$$

$$20[kV] \quad 0 \quad (2 \cdot 10^1 \quad j0)[kV].$$

$$(V_{110}^b)^d \quad (V_{110}^b)^i \quad (V_{110}^b)^0 \quad V_{110}^b$$

$$110[kV] \quad 0 \quad (1.1 \cdot 10^2 \quad j0)[kV].$$

Za razmatrani tip prekida impedanse prekida su:

$$Z_{L1}^p, Z_{L2}^p, Z_{L3}^p = 0.$$

Sistem jednačina formiran na osnovu izraza (8)

je:

$$\begin{matrix} Y_u(21) & \mathbf{0} & \mathbf{I} & U(21') & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & Y_d(21) & \mathbf{I} & U(21'') & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}^U & \mathbf{B}^U & \mathbf{B}^I & I_p(21) & \mathbf{B}^0 \end{matrix} .$$

Ovaj izraz je detaljno prikazan na slici 7. Na ovoj slici je $a=(-0,5+j0,8660)$, dok je $I(21)$ je struja na mestu prekida pre prekida je poznata i ona iznosi:

$$I(21) \quad (3,77 \cdot 10^{-1} \quad j6,3019 \cdot 10^{-2}) [r.j.] .$$

Rešavanjem prethodno navedenog sistema jednačina dobija se:

$$U(21') \quad \begin{matrix} 0,0048 + j0,0043 \\ -0,0001 + j0,0000 \end{matrix} [r.j.],$$

$$0,0082 + j0,0000$$

$$-0,8939 + j0,3719$$

$$U(21'') \quad \begin{matrix} 0,0088 - j0,0197 \\ -0,1012 + j0,9600 \end{matrix} [r.j.],$$

$$-0,3737 + j0,0708$$

$$I_p(21) \quad \begin{matrix} 0,0050 - j0,0069 \\ -0,0084 - j0,0009 \end{matrix} [r.j.].$$

$$-0,0084 - j0,0009$$

Kada je poznat napon u čvoru 21', napon u čvoru 11 se računa na osnovu izraza (14) i iznosi:

$$U^d(11) \quad U^d(21') \quad z^d(21) \quad I_p^d(21)$$

$$(0,0048 \quad j0,0043)$$

$$(0,0033 + j0,0018) \quad (0,3737 \quad j0,0708)$$

$$(0,0062 + j0,0048) [r.j.].$$

Prethodno izloženi postupak predstavlja proračun režima mreže ka korenu. Na isti način se dobijaju naponi u čvorovima 6 i 3. Struja grane između čvorova 3 i 5 izračunava na osnovu izraza (15):

$$I^d(5) \quad \frac{1}{\frac{1}{Y_d^d(5)} \quad z^d(5)} \quad U^d(3)$$

$$(0,0024 + j0,0043)$$

$$\frac{1}{(0,0016 + j0,0009)}$$

$$(0,5504 + j0,1905) \quad (0,0005 + j0,0028) [r.j.],$$

$Y_u^d(21)$						1			$U^d(21')$	0
	$Y_u^i(21)$						1		$U^i(21')$	0
		$Y_u^0(21)$						1	$U^0(21')$	0
			$Y_d^d(21)$			1			$U^d(21'')$	0
				$Y_d^i(21)$			1		$U^i(21'')$	0
					$Y_d^0(21)$			1	$U^0(21'')$	0
						1	1	1	$I_p^d(21)$	$I(21)$
						a^2	a	1	$I_p^i(21)$	$a^2 I(21)$
a	a^2	1	a	a^2	1				$I_p^0(21)$	0

Slika 7. Detaljni prikaz sistema jednačina

napon u čvoru 5 se izračunava na osnovu izraza (16):

$$U^d(5) \quad U^d(3) \quad z^d(5) \quad I^d(5) \\ (0,0024 + j0,0043) \\ (0,0016 + j0,0009) \quad (0,0005 + j0,0028) \\ (0,0024 + j0,0043)[r.j.]$$

Proračun za inverzni i nulti režim analogan je proračunu za direktni režim. Vrednosti u inverznom i nultom režimu iznose:

$$U^i(11) \quad (0,0062 + j0,0048)[r.j.], \\ U^0(11) \quad (0,0083 + j0,0002)[r.j.], \\ I^i(5) \quad (0,0005 + j0,0028)[r.j.], \\ I^0(5) \quad (5,0936e-006 + j4,6704e-004)[r.j.], \\ U^i(5) \quad (0,0024 + j0,0043)[r.j.], \\ U^0(5) \quad (0,0081 - j0,0001)[r.j.]$$

Na osnovu izračunatih vrednosti za napone i struje za sva tri simetrična režima, primenom matrice transformacije iz domena simetričnih komponenti u fazni domen izračunavaju se vrednosti napona i struja u faznom domenu.

Za proračun apsolutnih vrednosti potrebno je koristiti odgovarajuće (pofazne) vrednosti baznih napona:

$$(U_{20}^b)^d \quad (U_{20}^b)^i \quad (U_{20}^b)^0 \quad \frac{V_{20}^b}{\sqrt{3}} \\ \frac{(2 \cdot 10^4 - j0)}{\sqrt{3}} \quad (11,5470 - j0)[kV],$$

i bazne struje:

$$(I_{20}^b)^d \quad (I_{20}^b)^i \quad (I_{20}^b)^0 \quad \frac{S^b}{\sqrt{3} V_{20}^b} \\ \frac{3,15 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0} \quad (9,0933 \cdot 10^{-2} - j0)[kA],$$

Da bi se izračunale struje na mestu prekida (čvor 21'), potrebno je na direktni režim fiktivnog kola superponirati režim pre kvara.

Struja prekida u faznom domenu u čvoru 21' je:

$$I_{L1}(21') \quad I(21) \quad (I_{20}^b)^d \\ I_{L2}(21') \quad a^2 I(21) \quad (I_{20}^b)^i \\ I_{L3}(21') \quad a I(21) \quad (I_{20}^b)^0 \\ \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & I_p^d & (I_{20}^b)^d & 0 & j0 \\ a^2 & a & 1 & I_p^i & (I_{20}^b)^i & 0 & j0 \\ a & a^2 & 1 & I_p^0 & (I_{20}^b)^0 & -2,3045 - j0,2429 \end{matrix} \quad [A],$$

dok su moduli ovih struja:

$$\begin{matrix} |I_{L1}(21')| & 0 \\ |I_{L2}(21')| & 0 & [A]. \\ |I_{L3}(21')| & 2,3173 \end{matrix}$$

Da bi se izračunali naponi na mestu prekida, potrebno je na direktni režim fiktivnog kola superponirati režim pre kvara.

Napon u čvoru 21 pre kvara je:

$$U_{pre}(21) \quad (9,9266 \cdot 10^{-1} - j2,7638 \cdot 10^{-3})[r.j.]$$

Napon u čvoru 21' je:

$$\begin{matrix} U_{L1}(21') & 1 & 1 & 1 \\ U_{L2}(21') & a^2 & a & 1 \\ U_{L3}(21') & a & a^2 & 1 \end{matrix} \\ (U^d(21') \quad U_{pre}(21) \quad (U_{20}^b)^d \\ U^i(21') \quad (U_{20}^b)^i \\ U^0(21') \quad (U_{20}^b)^0 \\ (11,6104 + j0,0183) \\ (-5,6476 - j9,9841) \quad [kV]. \\ (-5,6788 + j9,9673)$$

dok su moduli:

$$\begin{matrix} |U_{L1}(21')| & 11,6105 \\ |U_{L2}(21')| & 11,4707 \quad [kV]. \\ |U_{L3}(21')| & 11,4715 \end{matrix}$$

Vrednosti napona u čvoru 21'' se analogno izračunavaju i te vrednosti su:

$$\begin{matrix} |U_{L1}(21'')| & 15,1202 \\ |U_{L2}(21'')| & 8,4336 \quad [kV]. \\ |U_{L3}(21'')| & 11,4715 \end{matrix}$$

Nakon proračuna napona čvorova sa jedne i sa druge strane prekida nije teško izračunati modul razlike napona na samom mestu prekida:

$$\begin{matrix} |\ddot{A} U_{L1}| & |U'_{L1} \quad U''_{L1}| & 19,0036 \\ |\ddot{A} U_{L2}| & |U'_{L2} \quad U''_{L2}| & 19,7361 \quad [kV]. \\ |\ddot{A} U_{L3}| & |U'_{L3} \quad U''_{L3}| & 0 \end{matrix}$$

Analognim proračunom se na osnovu relativnih izračunavaju apsolutne vrednosti struja i napona i u ostalim čvorovima i granama (proračun je detaljno opisan na primeru kratkog spoja). Napon u čvoru 5, uz uvažavanje da je

$$U_{pre}(5) = (9,9901 \cdot 10^{-1} \quad 4,7637 \cdot 10^{-4}) [r.j.]$$

se dobija kao:

$$\begin{aligned} |U_{L1}(5)| &= 11,5826 \\ |U_{L2}(5)| &= 11,4442 \text{ [kV]}, \\ |U_{L3}(5)| &= 11,4431 \end{aligned}$$

čime je izračunat traženi napon u čvoru 5, koji je krajnji čvor lokalne mreže u odnosu na izabrano mesto kvara.

6.2. Proračun režima sa kratkim spojem

U razmatranoj distributivnoj mreži (slika 6) analiziran je kratak spoj faze L2 u čvoru 21. Mreža je normalizovana, a svakom čvoru mreže su dodeljene admitanse Y_d i Y_u . Čvoru sa kvarom (čvor 21) je dodeljen otočni modul. Brojne vrednosti admitansi su:

$$Y_d^d(21) \quad Y_d^i(21) \quad (3,845 \cdot 10^{-1} \quad j8,08 \cdot 10^{-2}) [r.j.],$$

$$Y_u^d(21) \quad Y_u^i(21) \quad (3,5883 \cdot 10^{-1} \quad j4,6892 \cdot 10^{-1}) [r.j.],$$

$$Y_d^0(21) \quad (0 \quad j8,88 \cdot 10^{-3}) [r.j.],$$

$$Y_u^0(21) \quad (1,0329 \quad j9,4404 \cdot 10^{-2}) [r.j.],$$

Normalizacija sistema je identična kao u primeru prekida faze. Impedansa kvara u čvoru 21 za direktni, inverzni i nulti režim je:

$$Y^{d,i,0}(21) \quad Y_u^{d,i,0}(21) \quad Y_d^{d,i,0}(21).$$

Smatra se da je u pitanju metalni kratak spoj tako da je:

$$Z_{L1} \quad , \quad Z_{L2} \quad 0, \quad Z_{L3} \quad , \quad Z_{jn} \quad 0.$$

Sistem jednačina formiran na osnovu izraza (11) je:

$$\begin{aligned} Y(k) & \quad I \quad 0 \quad U(k) \quad 0 \\ A^U & \quad A^I \quad A^V \quad I_{ks}(k) \quad A^0, \\ 0^T & \quad C^I \quad C^V \quad v(k) \quad C^0 \end{aligned}$$

odnosno:

$$\begin{aligned} Y^d(21) & & & & & & U^d(21) & & 0 \\ & Y^i(21) & & & & & U^i(21) & & 0 \\ & & Y^0(21) & & & & U^0(21) & & 0 \\ & & & 1 & 1 & 1 & I_{ks}^d(21) & & 0 \\ a^2 & a & 1 & & & & I_{ks}^i(21) & U_{pre}(21) & \\ & & & a & a^2 & 1 & I_{ks}^0(21) & & 0 \\ & & & & & & 0 & v(21) & 0 \end{aligned}$$

gde je $U_{pre}(21)$ je napon na mestu kvara pre kvara:

$$U_{pre}(21) = (-0,4987 - j0,8583) [r.j.]$$

Rešavanjem gore navedenog sistema jednačina dobija se:

$$U^d(21) = -0,0095 - j0,0142$$

$$U^i(21) = 0,0170 - j0,0012 \quad r.j. ,$$

$$U^0(21) = -0,5137 \quad j0,8276$$

$$I_{ks}^d(21) = 1,0089 \quad j0,0684$$

$$I_{ks}^i(21) = -0,5637 \quad j0,8395 \quad r.j. ,$$

$$I_{ks}^0(21) = -0,4452 \quad j0,9079$$

$$[v(21)] = 0 \quad r.j. .$$

Proračun apsolutnih vrednosti na mestu kratkog spoja kao i proračun u lokalnoj mreži analogni su onim kod proračuna režima sa prekidom faza tako da se u nastavku daju samo neki od rezultati proračuna. Tako su moduli struje u faznom domenu na mestu kvara:

$$|I_{L1ks}(21)| = 0$$

$$|I_{L2ks}(21)| = 0,2758 \text{ [kA]},$$

$$|I_{L3ks}(21)| = 0$$

dok su naponi:

$$|U_{L1}(21)| = 19,8234$$

$$|U_{L2}(21)| = 0,0000 \text{ [kV]}.$$

$$|U_{L3}(21)| = 19,3244$$

Na kraju, data je i vrednost modula napona u čvoru 5 (pomenuti krajnji čvor lokalne mreže):

$$|U_{L1}(5)| = 19,8902$$

$$|U_{L2}(5)| = 0,3124 \text{ [kV]}.$$

$$|U_{L3}(5)| = 19,2344$$

7. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan jedinstveni model za proračun režima sa kratkim spojem/prekidom faza u radialnoj distributivnoj mreži. Proračun modelom je baziran na korišćenju ekvivalenata mreže. Forma ekvivalenata je izabrana tako da je izbegnuta potreba da se na mestu sa prekidom faza uvodi novi - dodatni čvor, što je praktično nezaobilazan korak kod standardnih proračuna. To je u nastavku omogućilo da se ekvivalenti ponovo proračunavaju tek posle promene topologije, a kod prekida i tek posle značajnijih promena režima. Relativna nepromenljivost ekvivalenata omogućuje da se proračun modelom razdvoji na dva dela. U prvom se proračunavaju ekvivalenti, dok se u drugom računa režim u izabranoj lokalnoj mre-

ži. Tako je postignuto da se kod više (ponovljenih) proračuna (npr. za analizu rada relejne zaštite) za zadatu topologiju/režim može izostaviti prvi deo i direktno započeti sa proračunom režima, čime se značajno dobija na efikasnosti proračuna. Dodatna efikasnost se obezbeđuje kroz mogućnost da se proračun može lako ograničiti samo na deo mreže od interesa. U modelu su uvedeni i moduli za opis kvarova: otopni za kratke spojeve, a redni za prekide faza. Svrha uvođenja ovih modula je dvojaka - opis kvarova u zatvorenoj kanoničnoj formi i stvaranje pretpostavki - prvog koraka ka proračunu proizvoljnih složenih (simultanih) kvarova koji se uvek mogu definisati preko ova dva tipa modula. Na ovaj način je postavljena osnova za dalji razvoj modela za proračune režima sa simultanim (višestrukim) kvarovima u radijalnim ili slaboupetljivim mrežama.

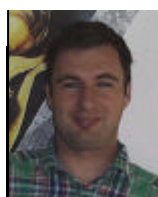
8. LITERATURA

- [1] V. Strezoski, D. Bekut: A CANONICAL MODEL FOR THE STUDY OF FAULTS IN POWER SYSTEMS, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 4, Nov. 1991, pp. 1493-1499.
- [2] V. Strezoski, G. Švenda, D. Bekut: EXTENSION OF THE CANONICAL MODEL TO THE GROUNDING PARTS OF POWER SYSTEMS UNDER FAULT CONDITIONS, EPSR 2003.
- [3] V. Strezoski, D. Bekut: KANONIČNI MODEL ZA PRORAČUN OPŠTE KLASA USLOVA KVARA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA; Elektroprivreda; broj 10-12, 1991, str. 430-438.
- [4] D. Bekut, S. Kuzmanović: PRORAČUN REŽIMA SA PREKIDOM FAZA U RADIJALNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, Elektroprivreda, br.4, 2002, str. 3-12.
- [5] X. Zhang, F. Soudi, D. Shirmohammadi, C. Cheng: A DISTRIBUTION SHORT CIRCUIT ANALYSIS APPROACH USING HYBRID COMPENSATION METHOD, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, 1995, pp. 2053-2059.
- [6] A. Tan, W. H. Liu, D. Shirmohammadi: TRANSFORMER AND LOAD MODELING IN SHORT CIRCUIT ANALYSIS FOR DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Trans. on PS, Vol. 12, No. 3, Aug. 1997, pp. 1315-1322.
- [7] D. Rajačić, R. Taleski: TWO NEW METHODS FOR RADIAL AND WEAKLY-MESHED NETWORK ANALYSIS, Electric Power System Research, 48, (1998), pp. 79-87.

Rad je primljen u uredništvo 12. 06. 2003. godine



Duško Bekut je rođen 1962. godine u Novom Sadu. Fakultet tehničkih nauka je završio 1986. godine, dok je 1990. godine magistrirao, a 1994. godine doktorirao na elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od 1986. godine je zaposlen na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, gde je sada vanredni profesor. Oblasti rada i angažovanja su vezane za relejnu zaštitu, analizu elektroenergetskih sistema, lokaciju kvara na vodovima, distributivni menadžment sistem, itd.



Borislav Mihić je rođen 1971. godine u Sremskoj Mitrovici. Fakultet tehničkih nauka je završio 1978. godine u Novom Sadu. Od 2000-2002. godine je zaposlen u JP Elektrovojvodina – Elektrodistribucija Zrenjanin. Od 2002. godine zaposlen je u Elektrotehničkom Institutu DEC u Zrenjaninu. Oblasti rada i angažovanja su vezane za merenje i ispitivanje opreme u elektroenergetici, relejna zaštita, projektovanje u elektroenergetici itd.



Zoran Grahovac je rođen 1970. godine u Zrenjaninu. Fakultet tehničkih nauka je završio 1998. godine u Novom Sadu. Od 1998. godine je zaposlen u EPS – JP „Elektrovojvodina” Novi Sad – „Elektrodistribucija” – Zrenjanin na mestu glavnog dispečera. Oblasti rada i angažovanja su vezane za upravljanje distributivnom mrežom, analiza distributivne mreže itd.

Fazi („Fuzzy”) pristupi proračunu gubitaka električne energije u distributivnim mrežama

Stručni rad
UDK: 621.316; 621.31.1; 621.3.017

Rezime:

U radu su razvijena dva pristupa za proračun gubitaka električne energije u distributivnim mrežama, od kojih se jedan zasniva na fazi („fuzzy”) pristupu proračunu tokova snaga a drugi na tehnici „fuzzy” klasterovanja. Posebna pažnja posvećena je formiranju „fuzzy” brojeva koji reprezentuju opterećenja potrošačkih čvorova. Pri tome se vodilo računa o dostupnim podacima na osnovu merenja koja se vrše u odgovarajućim transformatorskim stanicama. Analizom gubitaka na test primeru, pokazano je da defazifikaciju treba vršiti metodom jednakih površina. Kod tehnike „fuzzy” klasterovanja određen je opseg u kojem treba da se nalazi vrednost koeficijenta koji određuje rasplinitost klasterovanja, kao i broj klastera sa kojim se dobija zadovoljavajući rezultat. Analize pokazuju da vrednost ovog koeficijenta treba da bude u granicama od 1,1 do 2, kao i da potreban broj klastera nije veći od 20.

Ključne reči: gubici, električna energija, „fuzzy”, klasterovanje

Abstract:

FUZZY APPROACHES TO DISTRIBUTION ENERGY LOSSES CALCULATION

Two approaches to calculating distribution energy losses are developed in this paper. The first one is based on the fuzzy load flow, and the second one on the fuzzy clustering technique. In the first approach attention is devoted to forming the fuzzy numbers that represent loads. Data accessible from the measurement in corresponding substations are considered in this process. The analyses made on the test example are showed that bisector defuzzification method gives the best results. In the second approach, a range of the coefficient that defines fuzziness of clustering is determined, as well as an optimal number of clusters. Analyses have shown that the best results are obtained for a coefficient in the range of 1.1-2, and the number of clusters up to 20.

Key words: losses, electrical energy, fuzzy, clustering

1. UVOD

Gubici snage i električne energije neminovna su posledica prenosa električne energije od mesta proizvodnje do mesta potrošnje. Pri tome gubici energije mogu da iznose desetak, pa i više procenata u od-

nosu na proizvedenu električnu energiju. Pošto se gubici ne mogu izbeći, nameće se zadatak njihove pravilne procene, tj. izračunavanja, ali istovremeno sa njim i zadatak njihovog smanjivanja u cilju racionalnog korišćenja električne energije. Kao osnovne aktivnosti u realizaciji navedenih zadatka mogu se

izdvojiti: razdvajanje tehničkih od komercijalnih gubitaka, određivanje raspodele gubitaka po elementima mreže i naponskim nivoima, lociranje mesta koja predstavljaju „žarišta” gubitaka, analiza uzroka gubitaka, izbor mera za smanjenje gubitaka itd. Očigledno je da se sve navedene aktivnosti baziraju na proračunu gubitaka snage i energije, što znači da proračunate vrednosti gubitaka moraju biti bliske stvarnim.

Da bi se izvršio tačan proračun gubitaka energije neophodno je poznavanje dijagrama opterećenja svakog elementa mreže. Jasno je da ovo nije moguće, s obzirom na to da se merenja snage i energije vrše samo na određenim mestima u mreži.

Nemogućnost poznavanja dijagrama opterećenja svakog elementa mreže uslovlila je razvoj različitih pristupa proceni gubitaka energije. Ovi pristupi se mogu svrstati u dve osnovne grupe: determinističke i probabilističke. Zavisno od toga koje se uticajne veličine, pri određivanju gubitaka energije, ističu u prvi plan u svakoj od ove dve osnovne grupe moguća je podela na određene podgrupe. Kao posledica davanja prednosti nekoj od uticajnih veličina razvijen je veliki broj metoda za proračun gubitaka električne energije, ali to ujedno ukazuje i na složenost zadatka određivanja gubitaka energije i nemogućnost njegovog jedinstvenog rešenja.

Treba istaći da se za određivanje gubitaka električne energije u distributivnim mrežama često koriste: metod baziran na ekvivalentnom vremenu trajanja maksimalnih gubitaka, metod ekvivalentne električne otpornosti, metod srednje struje, metod srednje kvadratne struje, kao i regresioni metod. Ove metode mogu u pojedinim slučajevima da daju rezultate koji znatno odstupaju od realnih, a ograničena je i mogućnost njihove primene za određivanje gubitaka po elementima mreže. To je i razlog zbog čega treba raditi na poboljšanju ovih metoda ili na razvoju novih pristupa koji će dovesti do boljih rezultata.

S obzirom na to da u distributivnim mrežama u mnogim potrošačkim čvorovima nisu poznate tačne vrednosti opterećenja, to su razvijeni „fuzzy” pristupi za proračun tokova snaga [1,2], koji na određeni način uvažavaju činjenicu da snage potrošnje nisu strogo poznate, a u [5] je ukazano i na mogućnost određivanja gubitaka energije „fuzzy” pristupom. Zbog toga je, polazeći od „fuzzy” pristupa proračunu tokova snaga u ovom radu razvijen postupak za proračun gubitaka električne energije. Pri tome je posebna pažnja posvećena određivanju „fuzzy” brojeva koji karakterišu opterećenja potrošačkih čvorova.

Imajući u vidu prostornu rasprostranjenost, kao i veliki broj elemenata distributivne mreže, u poslednje vreme se radi na razvoju postupaka za određivan-

je gubitaka energije koji su zasnovani na primeni tehnike klasterovanja [8,9,10]. Iako pristupi zasnovani na tehnici klasterovanja daju zadovoljavajuće rezultate to se, zbog činjenice da snage potrošnje nisu strogo poznate, javlja potreba za razvojem novih metoda. Zato je u ovom radu razvijen i pristup koji se bazira na tehnici „fuzzy” klasterovanja, čime je uvažena činjenica da se skup raspoloživih podataka ne može podeliti na strogo nezavisne podskupove.

2. PRISTUP BAZIRAN NA „FUZZY” PRORAČUNU TOKOVA SNAGA

„Fuzzy” proračun tokova snaga polazi od realne činjenice da snage potrošnje u mnogim čvorovima distributivne mreže nisu u potpunosti poznate, već se na određeni način procenjuju. Ovo iz razloga što se merenja snage i energije u distributivnim mrežama vrše samo kod industrijskih potrošača, kao i na transformaciji visoki/srednji napon, dakle na mestima kupoprodaje električne snage i energije, a broj takvih mernih mesta u distributivnoj mreži je mali.

Pošto snage potrošnje nisu strogo poznate, to je pogodno tretirati ih kao „fuzzy” brojeve. U prilog ovoj konstataciji ide i činjenica da se na osnovu iskustva mogu sa velikom tačnošću za svaki potrošački čvor pretpostaviti granice između kojih se nalazi snaga potrošnje. Pored snaga potrošnje, kao „fuzzy” broj se može posmatrati i napon napojne tačke. Kada se odrede „fuzzy” brojevi kojima se predstavljaju snage potrošnje i napon napojne tačke, uz uslov da su poznati parametri elemenata mreže, proračun napona i tokova snaga može se vršiti pomoću postupaka predloženih u [1,2]. Operacije koje se vrše sa „fuzzy” brojevima tokom proračuna su: sabiranje, oduzimanje, množenje i deljenje. Ove operacije se, polazeći od odgovarajućih funkcija pripadnosti, mogu za svaki α -nivo poverenja iskazati pomoću sledećih relacija:

$$C \quad A \quad () B \quad [A_1^{(\cdot)} \quad B_1^{(\cdot)}; A_2^{(\cdot)} \quad B_2^{(\cdot)}], \quad (1)$$

$$C \quad A \quad () B \quad [A_1^{(\cdot)} \quad B_2^{(\cdot)}; A_2^{(\cdot)} \quad B_1^{(\cdot)}], \quad (2)$$

$$C \quad A \quad () B \quad [\min[A_1^{(\cdot)} \quad B_1^{(\cdot)}, A_2^{(\cdot)} \quad B_1^{(\cdot)}, A_1^{(\cdot)} \quad B_2^{(\cdot)}, A_2^{(\cdot)} \quad B_2^{(\cdot)}]; \max[A_1^{(\cdot)} \quad B_1^{(\cdot)}, A_2^{(\cdot)} \quad B_1^{(\cdot)}, A_1^{(\cdot)} \quad B_2^{(\cdot)}, A_2^{(\cdot)} \quad B_2^{(\cdot)}]], \quad (3)$$

$$C \quad A \quad (/) B \quad [\min[A_1^{(\cdot)} / B_1^{(\cdot)}, A_2^{(\cdot)} / B_1^{(\cdot)}, A_1^{(\cdot)} / B_2^{(\cdot)}, A_2^{(\cdot)} / B_2^{(\cdot)}]; \max[A_1^{(\cdot)} / B_1^{(\cdot)}, A_2^{(\cdot)} / B_1^{(\cdot)}, A_1^{(\cdot)} / B_2^{(\cdot)}, A_2^{(\cdot)} / B_2^{(\cdot)}]]. \quad (4)$$

Treba istaći da se sabiranjem i oduzimanjem „fuzzy” brojeva predstavljenih trapeznim ili trougaonim oblikom (koji se najčešće koriste za modelovanje snaga potrošnje) ne deformiše oblik funkcije pripadnosti, dok kod množenja ili deljenja oblik funkcije pripadnosti proizvoda (količnika) odstupa od oblika funkcija pripadnosti „fuzzy” brojeva koji se množe (dele) i u slučajevima kada dolazi do više uzastopnih množenja (deljenja) njen analitički oblik skoro je nemoguće odrediti.

Kao rezultat proračuna, dobijaju se naponi čvorova i tokovi snaga/struja kao „fuzzy” brojevi. Zatim se, znajući snagu odnosno struju kroz svaki element mreže, određuju gubici snage kao „fuzzy” broj. Defazifikacijom ovog broja dobija se deterministička vrednost snage gubitaka koja, pomnožena sa brojem sati za razmatrani period (za godinu dana 8 760 h, odnosno 8 784 h ako je godina prestupna) daje vrednost gubitaka energije za dati period. Defazifikacija se može vršiti na više načina, a autori ovog rada su konstatovali da je pogodno koristiti metod jednakih površina (bisector method).

Problem koji se ovde javlja je kako formirati „fuzzy” brojeve kojima se modeluje snaga potrošnje, kao i kako se struja napojne deonice raspodeljuje po potrošačkim čvorovima. Zbog toga se u ovom radu predlaže jedan novi način za formiranje „fuzzy” brojeva snaga potrošnje koji, kako će se videti iz test primera, daje zadovoljavajuće rezultate za potrebe proračuna gubitaka energije.

Polazna pretpostavka u procesu estimacije snaga potrošnje kao „fuzzy” brojeva je da su poznati sledeći podaci:

- vremenski dijagram struje napojne deonice,
- procenjene maksimalne snage (struje) potrošačkih čvorova,
- tipični dnevni dijagrami opterećenja pojedinih kategorija potrošača,
- procentualno učešće pojedinih kategorija potrošača u snazi potrošačkog čvora,

Vremenski dijagram struje napojne deonice je obično poznat na osnovu merenja koja se obavljaju u odgovarajućoj transformatorskoj stanici. Što se tiče maksimalnih snaga, odnosno struja potrošačkih čvorova, one se mogu dosta dobro proceniti na osnovu nominalne snage transformatora u datom čvoru i eksploatacionog iskustva o opterećenjima pojedinih delova mreže. S obzirom na to da potrošnju čine različite kategorije potrošača (npr. domaćinstva, industrija, trgovina, administrativni centri i dr.) to je poželjno znati njihove dnevne dijagrame opterećenja i udeo pojedinih kategorija potrošača u ukupnoj potrošnji datog čvora. Do ovih podataka se može doći pomoću eksperimenta na određenim lo-

kacijama i analizom eksploatacionih podataka iz dužeg vremenskog perioda.

Na osnovu dnevnih dijagrama opterećenja pojedinih kategorija potrošača, njihovog udela u snazi potrošačkog čvora i vrednosti struje napojne deonice, moguće je odrediti „fuzzy” brojeve koji karakterišu pojedine kategorije potrošača. Pri tome, prvo se određuje dijagram ukupne struje svake od kategorija potrošača. Ukupna struja potrošača kategorije x u satu t u toku godine (njemu odgovara sat j u toku dana) može se proceniti pomoću relacije:

$$I_x(t) = k(j) I_{nd}(t) p_x^d(j) \prod_i k_{x_i} k_{i} I_{ni}; \quad x \in p, \quad (5)$$

gde je:

$I_{nd}(t)$ – struja napojne deonice u satu t u toku godine,

$p_x^d(j)$ – relativna vrednost opterećenja potrošača kategorije x u toku sata j ,

$k_i \cdot I_{ni}$ – maksimalna struja i -tog distributivnog transformatora,

k_{x_i} – relativno učešće kategorije potrošača x u ukupnoj snazi/struji čvora i ,

\mathbf{b} – skup potrošačkih čvorova,

\mathbf{a}_p – skup svih kategorija potrošača,

$k(j)$ – odgovarajući koeficijent.

Koeficijent $k(j)$ se određuje pomoću relacije [7]:

$$k(j) = \frac{1}{\prod_i k_i I_{ni} \prod_x p_x^d(j) \prod_p k_{x_i}}. \quad (6)$$

Ako se dijagram struje $I_x(t)$ normalizuje pomoću relacije:

$$I_x(t) = \frac{I_x(t)}{\max_t I_x(t)}, \quad (7)$$

onda se nakon diskretizacije dijagrama $I_x(t)$ i određivanja raspodele gustine verovatnoće, u skladu sa „possibility-probability” principom [3] formira funkcija pripadnosti „fuzzy” broja \tilde{I}_x koja reprezentuje struju opterećenja potrošača kategorije x . Ova funkcija pripadnosti je najčešće složenog oblika, ali se često može aproksimirati nekim jednostavnim krivama. U test primeru koji je analiziran u ovom radu, aproksimacija je vršena pomoću tri prave.

Kada se odrede „fuzzy” brojevi svih kategorija potrošača, struja i -tog čvora kao „fuzzy” broj određuje se pomoću relacije:

$$\tilde{I}_i = \prod_x k_i I_{ni} \prod_p \tilde{I}_x k_{x_i}. \quad (8)$$

Da bi se procenila greška koja se čini pri proračunu gubitaka električne energije na napred izložen način, u ovom radu se na konkretnom primeru vrši

poređenje tako dobijenih rezultata sa rezultatima do kojih se dolazi kada se opterećenja tretiraju kao deterministička.

U tom slučaju intenzitet struje i -tog čvora u satu t u toku godine procenjuje se pomoću relacije:

$$I_i(t) = k(j) I_{nd}(t) + k_i I_{ni} + k_{x_i} p_x^d(j). \quad (9)$$

Zatim se, smatrajući da su opterećenja u toku jednog sata konstantna, izvrši 8 760 (odnosno 8 784) proračuna tokova snaga prema postupku prezentovanom u [4]. Sumiranjem gubitaka snage za svaki sat dobijaju se gubici energije u toku godine. Ovde treba napomenuti da se kod „fuzzy” proračuna vrši samo jedan proračun tokova snaga, što je njegova prednost u odnosu na deterministički pristup.

3. PRISTUP ZASNOVAN NA TEHNICI „FUZZY” KLASTEROVANJA

Klasterovanje je jedan od postupaka za analizu i obradu obimnih i nedovoljno dobro poznatih skupova podataka. Pod klasterovanjem se podrazumeva postupak razvrstavanja skupa podataka u podskupove, odnosno klasterne na osnovu definisane mere sličnosti [7÷10]. Time se generiše skup karakterističnih stanja kojima se opisuje razmatrani proces. Podaci se pri tome mogu matematički tretirati kao vektori čiji su elementi (obeležja) iz skupa realnih brojeva ili su binarnog karaktera.

Kod klasičnog klasterovanja, klasteri se nalaze u obliku podskupova od skupa za koje se zahteva da je stepen povezanosti veliki za podatke unutar podskupa a mali za podatke u različitim podskupovima. Međutim ovakav zahtev je suviše strog u mnogim praktičnim primenama, i poželjno je zameniti ga nekim manje strogim zahtevom. Kada se zahtev za čvrstom podelom skupa X zameni slabijim zahtevom za „fuzzy” podelom ili „fuzzy” pseudo podelom, dolazi se u oblast „fuzzy” klasterovanja. „Fuzzy” pseudo podela se često naziva i „fuzzy” c -podela, gde c označava broj „fuzzy” klasa u podeli.

Postoje dva osnovna metoda „fuzzy” klasterovanja. Jedan od njih koji se zasniva na „fuzzy” c -podeli naziva se „fuzzy c -means” metod klasterovanja [11].

Algoritam koji se predlaže u ovom radu polazi od pretpostavke da su poznati zadati broj klastera, realan broj $m \in (1, \infty)$ i mali pozitivni broj ϵ koji određuje kriterijum zaustavljanja algoritma. Neka je $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ dati skup podataka. U slučaju koji se ovde razmatra X je skup koji čine podaci o aktivnim i reaktivnim snagama svih čvorova mreže i napon napojne tačke za svaki sat u toku godine. „Fuzzy” pseudoparticija ili „fuzzy” c -particija od X je famili-

ja „fuzzy” podskupova od X , označena sa $P = \{A_1, A_2, \dots, A_c\}$ koja zadovoljava:

$$\sum_{i=1}^c A_i(x_k) = 1, \quad (10)$$

za svako $k \in N_n, N_n = \{1, 2, \dots, n\}$, i

$$\sum_{k=1}^n A_i(x_k) = n, \quad (11)$$

za svako $i \in N_c$, gde je c pozitivan ceo broj a N_c skup celih brojeva $N_c = \{1, 2, \dots, c\}$.

Algoritam se sastoji iz sledećih koraka:

1. korak

Neka je $q = 0$. Bira se početna pseudo particija $P^{(0)}$.

2. korak

Proračunava se c centara klastera $v_1^q, v_2^q, \dots, v_c^q$ korišćenjem izraza:

$$v_i^q = \frac{\sum_{k=1}^n [A_i^q(x_k)]^m x_k}{\sum_{k=1}^n [A_i^q(x_k)]^m}, \quad (12)$$

za $P^{(q)}$ i izabranu vrednost koeficijenta m .

3. korak

Izračunava se $P^{(q+1)}$ na sledeći način: Za svako $x_k \in X$, ako je $|x_k - v_i^q| > 0$ za svako $i \in N_c$, tada je:

$$A_i^{(q+1)}(x_k) = \frac{|x_k - v_i^{(q)}|^{\frac{1}{m-1}}}{\sum_{j=1}^c |x_k - v_j^{(q)}|^{\frac{1}{m-1}}}, \quad (13)$$

a ako je $|x_k - v_i^{(q)}| = 0$ za neko $i \in I \subseteq N_c$, tada se definiše $A_i^{(q+1)}(x_k)$ za svako $i \in I$ kao realni ne negativni broj koji zadovoljava

$$\sum_{i \in I} A_i^{(q+1)}(x_k) = 1, \quad (14)$$

a $A_i^{(q+1)}(x_k) = 0$ za $i \in N_c \setminus I$.

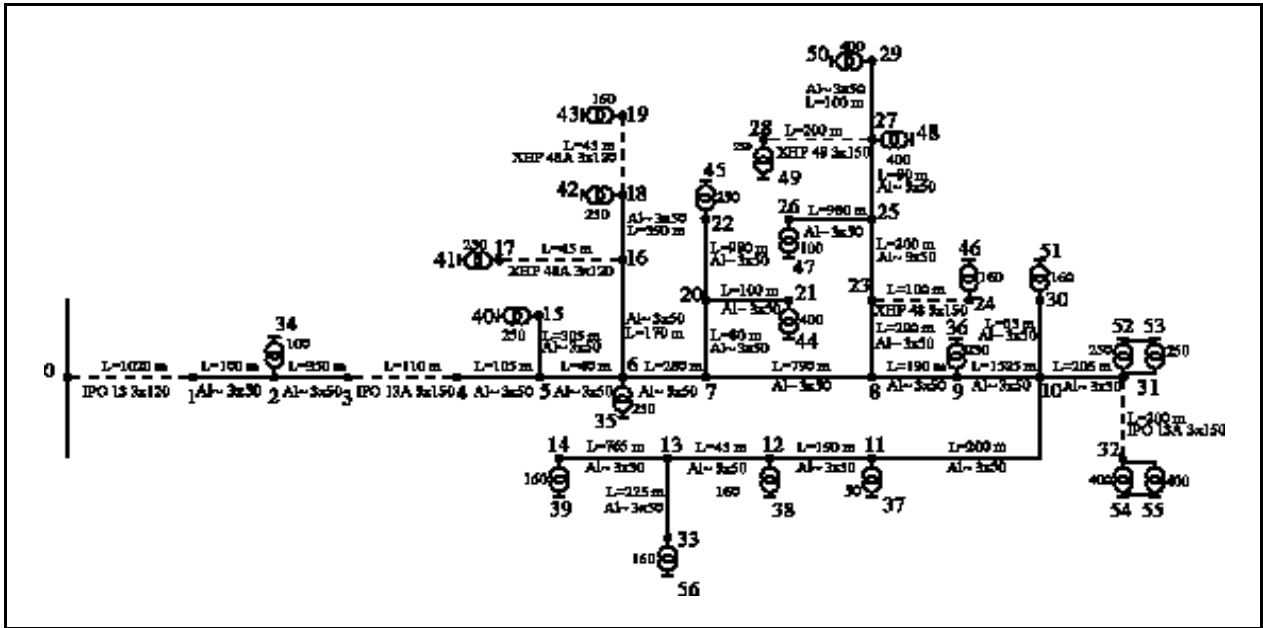
4. korak

Porede se $P^{(q)}$ i $P^{(q+1)}$. Ako je $|P^{(q+1)} - P^{(q)}| \leq \epsilon$ zaustavlja se algoritam, inače se prelazi na korak 2.

Na koraku 4, $|P^{(q+1)} - P^{(q)}|$ označava rastojanje između $P^{(q)}$ i $P^{(q+1)}$ u prostoru R^{nc} koje se izračunava prema relaciji:

$$\left| P^{(q+1)} - P^{(q)} \right| = \max_{i \in N_c, k \in N_n} \left| A_i^{(q+1)}(x_k) - A_i^{(q)}(x_k) \right|. \quad (15)$$

U algoritmu se vrednost koeficijenta m bira u skladu sa konkretnim problemom koji se rešava. Povećanjem m podela postaje rasplinitija. Za sada ne postoji teorijska osnova za optimalan izbor vrednosti parametra m , međutim algoritam konvergira za svaku vrednost $m \in (1, \infty)$.



Slika 1. Test mreža

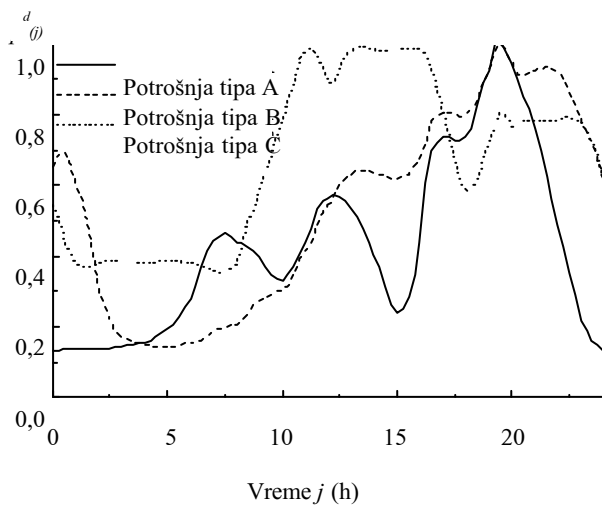
4. TEST PRIMER

Napred izloženi pristupi primenjeni su za proračun godišnjih gubitaka električne energije u distributivnoj mreži prikazanoj na slici 1. Pretpostavljeno je da se potrošači mogu razvrstati u tri kategorije, koje su radi opštosti obeležene sa A, B i C ($a_p = \{A, B, C\}$). Na slici 2 prikazani su pretpostavljeni normalizovani dnevni dijagrami ova tri tipa potrošača, koji su preuzeti iz [6]. U tabeli 1 date su vrednosti maksimalnih snaga potrošačkih čvorova, faktora snage i procentualnog učešća pojedinih kategorija potrošača u ukupnoj snazi datog čvora.

Tabela 1.

Maksimalne snage potrošačkih čvorova i učešće pojedinih kategorija potrošača

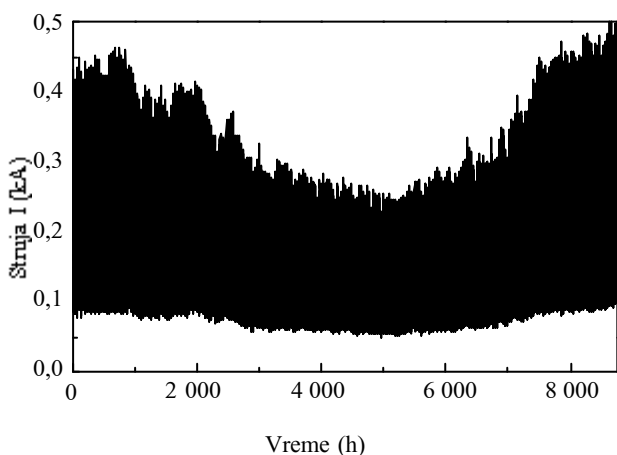
Broj čvorova	A (%)	B (%)	C (%)	$S_{max-NAVA}$	$\cos j$
24	70	20	0	0,200	0,96
25	60	20	20	0,220	0,96
26	100	0	0	0,140	0,95
27	20	20	60	0,220	0,97
28	20	0	80	0,170	0,99
29	0	20	80	0,170	0,96
40	20	50	30	0,180	0,94
41	20	70	0	0,180	0,92
42	0	20	0	0,200	0,99
44	60	40	0	0,200	0,96
45	0	0	10	0,180	0,95
46	0	0	10	0,170	0,99
47	10	20	70	0,05	0,99
48	10	10	80	0,250	0,96
49	0	20	80	0,220	0,97
50	20	20	60	0,280	0,95
51	20	20	60	0,160	0,96
52	20	0	80	0,270	0,94
53	20	0	80	0,270	0,94
54	20	20	60	0,280	0,97
55	20	20	60	0,280	0,97
56	10	50	40	0,160	0,96



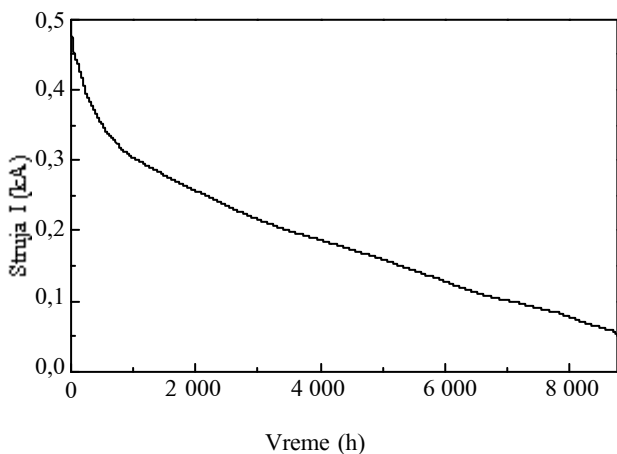
Slika 2. Dnevni dijagrami opterećenja tri hipotetička tipa potrošača

Na osnovu dnevnih dijagrama opterećenja navedenih kategorija potrošača i hronološkog dijagrama struje napojne deonice koji je prikazan na slici 3, odnosno uređenog dijagrama trajanja struje napojne deonice (slici 4) određeni su „fuzzy” brojevi koji reprezentuju opterećenje datih kategorija potrošača. Ovi „fuzzy” brojevi su prikazani na slikama 5÷7. Sa slika se vidi da su oni aproksimirani sa tri prave. Aproksimacija je izvršena metodom minimuma kvadrata odstupanja. Korišćenjem ovih „fuzzy” brojeva određeno je opterećenje svakog potrošačkog čvora kao „fuzzy” broj, a zatim izvršen „fuzzy” proračun tokova snaga i određeni gubici snage kao „fuzzy” broj. Da bi se izračunali gubici energije, vrši se defazifikacija „fuzzy” broja koji reprezentuje gubitke snage. Iako je već napomenuto, ovde se opet ističe da su autori konstatovali da je, za potrebe određivanja gubitaka energije, pogodno defazifikaciju vršiti metodom jednakih površina (bisector method).

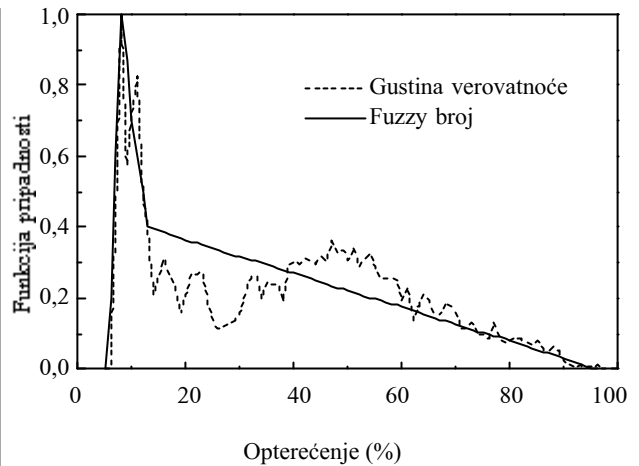
Kod proračuna gubitaka električne energije tehnikom „fuzzy” klasterovanja, variran je broj klastera i vrednost koeficijenta m kojim se određuje rasplnutost klasterovanja.



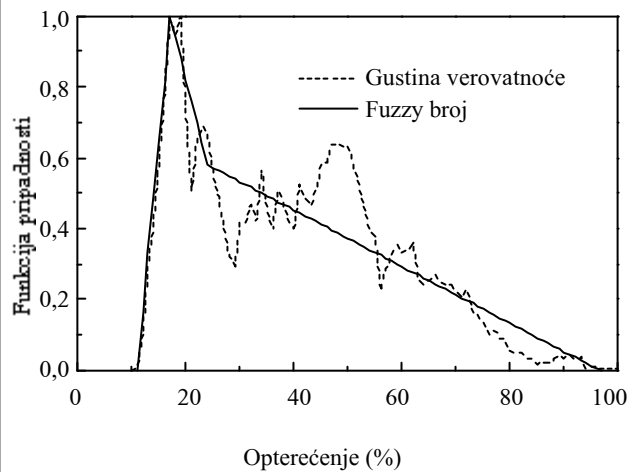
Slika 3. Hronološki dijagram struje napojne deonice



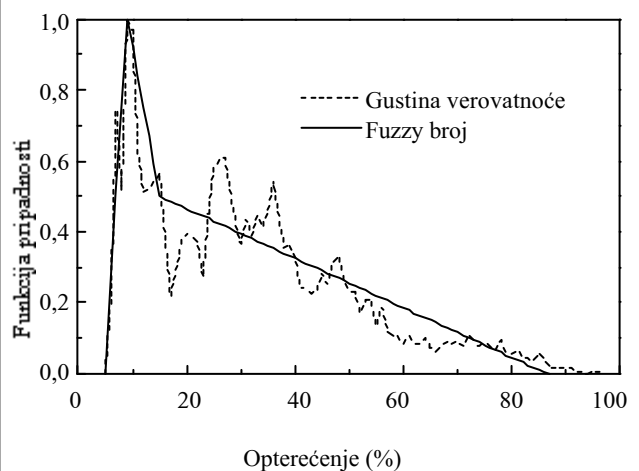
Slika 4. Dijagram trajanja struje napojne deonice



Slika 5. Fuzzy opterećenje potrošača kategorije A



Slika 6. Fuzzy opterećenje potrošača kategorije B



Slika 7. Fuzzy opterećenje potrošača kategorije C

Tabela 2.

Rezultati proračuna gubitaka električne energije

		Ukupni gubici		Gubici u vodovima		Gubici u transformatorima		Gubici voda 4-5		Gubici voda 9-10		Gubici u transformatoru 30-51		
		MWh	MVArh	MWh	MVArh	MWh	MVArh	MWh	MVArh	MWh	MVArh	MWh	MVArh	
Estimacija		780,2	709,2	530,9	321,0	249,3	388,2	30,98	18,50	75,40	45,02	9,795	13,30	
Fuzzy proračun		794,1	735,3	560,7	339,1	255,0	396,2	33,20	19,80	70,10	41,90	7,80	10,30	
Fuzzy klasterovanje	m=1,1 broj klastera	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69
		2	744,0	665,1	504,5	305,0	239,4	360,0	29,46	17,59	71,81	42,88	9,485	14,51
		3	763,4	686,0	520,0	314,4	243,4	371,6	30,37	18,13	73,93	44,14	9,643	14,91
		5	769,4	693,9	524,0	316,8	245,3	377,0	30,61	18,27	74,36	44,40	9,690	15,03
		10	774,5	701,0	527,3	318,8	247,2	382,2	30,79	18,38	74,82	44,67	9,720	15,11
		20	777,1	705,1	528,9	319,8	248,2	385,3	30,87	18,43	75,10	44,83	9,766	15,22
	m=1,25 broj klastera	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69
		2	743,1	665,0	504,5	305,1	239,4	359,9	29,46	17,58	71,82	42,89	9,478	14,48
		3	764,4	687,0	520,8	314,9	243,6	372,1	30,41	18,16	74,03	44,20	9,643	14,91
		5	769,1	693,6	523,8	316,7	245,3	376,9	30,58	18,26	74,36	44,40	9,682	15,01
		10	773,3	700,4	526,2	318,1	247,2	382,2	30,72	18,34	74,70	44,60	9,724	15,12
		20	777,5	705,5	529,2	320,0	248,3	385,4	30,88	18,44	75,16	44,87	9,763	15,22
	m=1,5 broj klastera	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69
		2	744,0	665,0	504,6	305,1	239,4	359,9	29,45	17,58	71,84	42,89	9,469	14,47
		3	765,0	687,4	521,3	315,2	243,7	372,2	30,43	18,17	74,09	44,23	9,626	14,87
		5	769,6	693,8	524,3	317,0	245,3	376,8	30,59	18,26	74,49	44,47	9,675	14,99
		10	771,3	698,0	524,6	317,2	246,7	380,9	30,62	18,28	74,51	44,49	9,710	15,08
		20	776,6	704,0	528,7	319,7	247,9	384,4	30,84	18,41	75,09	44,83	9,739	15,16
	m=2 broj klastera	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69
		2	721,3	640,5	486,4	294,1	234,8	346,4	28,35	16,93	69,44	41,46	9,277	13,97
		3	742,0	662,9	502,9	304,1	239,0	358,8	29,35	17,53	71,66	42,78	9,468	14,47
		5	770,1	693,0	525,3	317,6	244,8	375,3	30,59	18,26	74,90	44,72	9,670	14,98
		10	769,3	693,9	523,8	316,7	245,5	377,2	30,50	18,21	74,41	44,42	9,602	14,81
		20	771,2	697,2	524,8	317,3	246,4	379,9	30,57	18,25	74,76	44,64	9,703	15,06
m=5 broj klastera	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69	
	2	696,5	613,8	466,6	282,1	229,7	331,7	27,15	16,21	66,92	39,95	9,083	13,48	
	3	744,6	665,4	505,2	305,5	239,4	359,9	29,44	17,57	72,30	43,16	9,520	14,61	
	5	729,6	649,2	493,1	298,2	236,4	351,0	28,71	17,14	70,64	42,18	9,379	14,24	
	10	665,7	581,2	443,1	267,3	223,5	313,9	25,71	15,35	63,70	38,03	8,868	12,94	
	20	668,3	584,0	444,3	268,6	224,1	315,4	25,84	15,42	64,00	38,20	8,887	12,99	

Da bi se mogla konstatovati tačnost rezultata do kojih dovode navedeni pristupi, izvršena je estimacija opterećenja potrošačkih čvorova kao determinističkih vrednosti i proračun tokova snaga (a samim tim i gubitaka) za svaki sat u godini. Jasno je da je ovde za određivanje godišnjih gubitaka električne energije trebalo izvršiti 8 760 (za prestupnu godinu 8 784) proračuna tokova snaga. Rezultati do kojih se na ovaj način dolazi smatraće se tačnim.

Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 2. U tabeli su pored ukupnih gubitaka aktivne i reaktivne energije date i vrednosti gubitaka u vodovima i transformatorima, kao i u odabranim elementima mreže sa ciljem upoređenja rezultata koji se dobijaju ovim pristupima. Pri upoređenju tačnim se smatraju rezultati dati u vrsti označenoj sa „estimacija”.

Iz table 2 se vidi da pristup zasnovan na „fuzzy” proračunu tokova snaga daje zadovoljavajuće rezultate kod proračuna ukupnih gubitaka električne energije, kao i gubitaka u elementima koji su bliže napojnom čvoru. Kod ovih proračuna greška je manja od nekoliko procenata. Inače, greška se povećava kod proračuna gubitaka energije u elementima koji su dosta udaljeni od napojnog čvora, a samim tim i manje opterećeni.

Pomoću rezultata u tabeli 2 lako se zaključuje da tačnost rezultata dobijenih „fuzzy” klasterovanjem osim od broja klastera zavisi i od vrednosti koeficijenta m kojim je definisana rasplinitost klasterovanja. Najbolji rezultati dobijaju se za vrednosti m iz opsega 1,1÷2. U slučaju da je koeficijent m veći od 2

(velika rasplinitost) tačnost rezultata opada sa povećanjem broja klastera, što je u suprotnosti sa očekivanjima. Rezultati koji se dobijaju pri proračunu samo sa jednim klasterom ne zavise od koeficijenta m i niži su od stvarnih gubitaka, pošto je ovaj slučaj ekvivalentan proračunu sa srednjim vrednostima struja potrošačkih čvorova. Treba primetiti da se u slučaju jednog klastera isti rezultat dobija i tehnikom klasičnog klasterovanja. Inače, pri malom broju klastera (do 5) „fuzzy” klasterovanje daje približno iste ili nešto bolje rezultate u odnosu na klasično klasterovanje. Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 2, kao i na osnovu činjenice da proračunsko vreme kod „fuzzy” klasterovanja veoma malo zavisi od odabranog broja klastera (zavisi samo broj neophodnih proračuna tokova snaga i naponskih prilika), izvodi se zaključak da je pogodno izabrati manju vrednost koeficijenta m (naprimer 1,25) i raditi sa 10÷20 klastera. Ovakav izbor broja klastera posledica je činjenice da se povećanjem broja klastera iznad 20 ne dobija značajno poboljšanje izlaznih rezultata.

5. ZAKLJUČAK

U radu su izložena dva pristupa za proračun gubitaka električne energije u distributivnim mrežama, od čega se jedan zasniva na „fuzzy” proračunu tokova snaga a drugi na tehnici „fuzzy” klasterovanja. Ovi pristupi uvažavaju realnu činjenicu da podaci potrebni za proračun gubitaka energije nisu strogo poznati. Inače, oba pristupa omogućavaju da se pored ukupnih odrede i gubici po elementima mreže.

Na osnovu analize test primera primećuje se da je greška koja se čini ovim pristupima relativno mala (manja od nekoliko procenata). Pri tome treba imati u vidu da kod „fuzzy” proračuna tokova snaga greška zavisi i od načina defazifikacije „fuzzy” broja koji reprezentuje snagu gubitaka. Na osnovu brojnih simulacija konstatovano je da defazifikaciju treba vršiti metodom jednakih površina (bisector method).

Kod proračuna gubitaka energije tehnikom „fuzzy” klasterovanja greška zavisi od izbora vrednosti koeficijenta m koji određuje rasplinitost klasterovanja i broja klastera. Analize pokazuju da vrednost koeficijenta m treba biti u granicama od 1,1 do 2, kao i da broj klastera ne treba biti veći od 20.

6. LITERATURA

[1] A. Sarić, M. Čalović, FUZZY PRISTUP PRORAČUNU TOKOVA SNAGA U DISTRIBUTIVNIM

- MREŽAMA, I Savetovanje JUKO CIRED, R - 6.01, Zlatibor, 5-8. Oktobar 1998.
- [2] D. Tasić, M. Stojanović, PRORAČUN GUBITAKA SNAGE U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI PRI NEPOTPUNOM POZNAVANJU SNAGA POTROŠNJE, Elektrodistribucija, Br. 1, 2002, str. 16-25
- [3] R. F. Chang, R. C. Leou, C. N. Lu, DISTRIBUTION TRANSFORMER LOAD MODELING USING LOAD RESEARCH DATA, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, pp. 655-661.
- [4] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, A COMPENSATION-BASED POWER METHOD FOR WEAKLY MESHED DISTRIBUTION AND TRANSMISSION NETWORKS, IEEE Trans. On Power Systems, Vol.3, No. 2, May, 1988, pp. 753-762.
- [5] N. Rajaković, D. Tasić, M. Stojanović, UPOREDNA ANALIZA RAZLIČITIH PRISTUPA PROCENI GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, III savetovanje JUKO CIRED, R-6.14, Vrnjačka Banja, oktobar 2002.
- [6] Hang-Ching Kuo, Yuan-Yih Hsu, DISTRIBUTION SYSTEM LOAD ESTIMATION AND SERVICE RESTORATION USING A FUZZY SET APPROACH, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 8, No. 4, October 1993.
- [7] N. Rajaković, M. Stojanović, D. Tasić, AN IMPROVED METHOD FOR THE ELECTRIC ENERGY LOSSES ASSESSMENT IN DISTRIBUTION NETWORKS, 3rd Mediterranean Conference Med Power 2002, Athens, November 4-6, 2002.
- [8] ***, ANALIZA GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U PRENSOJ MREŽI EPS-a I INICIRANJE MERA ZA NJIHOVO SNIŽENJE, Studija urađena za EPS, Beograd, 2000.
- [9] M. Stojanović, N. Rajaković, D. Tasić, PRIMENA METODA KLASTEROVANJA KOD PRORAČUNA GUBITAKA ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, XLVI Konferencija ETRAN, Banja Vrućica, 5-8. Juna 2002.
- [10] N. Rajaković, D. Tasić, M. Stojanović, A CLUSTERING TECHNIQUE FOR DISTRIBUTION LOSSES CALCULATION IN DEREGULATED ENVIRONMENT, proceedings of 2nd Balkan Power Conference, Beograd, June 19-21, 2002.
- [11] G. J. Klir, B. Yuan, FUZZY SETS AND FUZZY LOGIC: THEORY AND APPLICATIONS, Prentice Hall, New Jersey, 1995.

Rad je primljen u uredništvo 26. 03. 2003. godine



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



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

Tomislav Milanov

Prostorne prognoze vršnog opterećenja TS VN/SN i mikroreona na konzumu JP „Elektrodistribucija – Beograd”

Stručni rad
UDK: 621.311.1; 621.316.1

Rezime:

Radom se prikazuje metodologija za izradu globalne i prostorne prognoze razvoja vršnog opterećenja TS VN/SN i mikroreona koja se primenjuje u JP „Elektrodistribucija Beograd” (JP EDB). Metodologija je prvi put primenjena 1991. godine i danas je njena primena nediskutabilna u JP EDB.

Osnovna karakteristika ovog načina prognoziranja vršnog opterećenja je uređivanje velikih baza podataka, sa višeparametarskom prognozom specifičnih parametara (opterećenja po stanovniku i površinske gustine opterećenja). Na ovaj način se prati, kako prirodan rast opterećenja kod postojećih potrošača, tako i mehanički priraštaj opterećenja zbog novih potrošača.

Na primeru dva mikroreona, naselja Železnik i postojeće TS 35/10 kV/kV Ripanj, prikazuju se osnovne karakteristike ovog načina izrade prognoza vršnog opterećenja.

Ključne reči: dugoročni planski programi, prognoze vršnih snaga naselja

Abstract:

SPACE FORECASTS OF PEAK LOAD OF HIGH VOLTAGE SUBSTATIONS AND MICROREGION IN THE NETWORK OF PUBLIC ENTERPRISE ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD

The paper deals with the methodology for preparation of the global and space forecasts of development of peak load of high voltage/medium voltage substations and microregions applied in Public Enterprise „Elektrodistribucija Beograd”.

The basic characteristic of this kind of peak load forecasting is establishment of large data bases, with multiparametre forecast of specific parametres (per capita load and surface density load). In this mode, natural load pick-up as well as the load of existing consumers is monitored along with the mechanical load pick-up owing to new consumers.

On the example of two microregions, the settlement of Železnik and the existing substation 35/10 kV/kV Ripanj, the basic characteristics of this mode of peak load forecasting are illustrated.

Key words: long-term planning schedules, peak load forecasts of settlements

1. UVOD

Razvoj vršnog opterećenja i potrošnje električne energije na konzumu Javnog preduzeća Elektro-

distribucije Beograd (JP EDB) u periodu od 1950. godine do danas bio je veoma intenzivan, što je praćeno veoma dinamičnom izgradnjom mreža na svim naponskim nivoima. Vršno opterećenje i potrošnja

Tomislav Milanov, dipl. el. ing. – „EPS” JP „Elektrodistribucija-Beograd”, 11 000 Beograd, Gospodar Jevremova 26

električne energije u ovom periodu se povećalo preko 12,8 puta, a kapaciteti mreža u proseku i preko te vrednosti. Svakako da je u ovim uslovima mreža građena „planski” te se u tom smislu zapažaju dve tipske faze u izgradnji mreža.

Naime, prema prvom dugoročnom planu iz 1957. godine [1] beogradski elektroenergetski čvor se napaja putem prenosnih mreža 110 kV i 220 kV, a distribuiranje električne energije ostvaruje preko mreža 35 kV, 10 kV i 0,4 kV. Prva TS 110/35 kV/kV je već bila izgrađena 1953. godine (TS Beograd II, 2x20 MVA), dok je prva TS 220/110 kV/kV u pogonu oko 1960. godine (TS Beograd III, 2x150 MVA).

U periodu do 1970. godine izgrađen je značajan broj TS 110/35 kV/kV, 35/10 kV/kV i 10/0,4 kV/kV, a te 1970. godine u pogonu je i prva TS 400/220 kV/kV (Beograd VIII, 2x400 MVA).

Intenzivan razvoj potrošnje električne energije nametnuo je izradu novih prognoza razvoja vršnog opterećenja do 2000. godine [2], izradu novog dugoročnog plana [3], kao i promenu koncepcija napajanja potrošača. Sada su osnovni naponski nivoi u mrežama: 400 kV, 110 kV, 10 kV i 0,4 kV; prva TS 110/10 kV/kV (sa „direktnom transformacijom”) je u pogonu već 1971. godine a do 1980. godine je izgrađeno još 5 TS 110/10 kV/kV.

Danas se na gradskom delu konzuma JP EDB distribuira električna energija uglavnom putem TS 110/10 kV/kV (cca 70 % potrošnje) dok je u pogonu i tridesetak TS 35/10 kV/kV sa značajnim procentualnim učešćem u ukupnim kapacitetima svih mreža.

Na prigradskom i vangradskom delu konzuma dominantna je mreža 35 kV sa TS 110/35 kV/kV i 35/10 kV/kV, a od 1991. godine u pogonu su i dve TS 110/35/10 kV/kV/kV sa „tronaponskom transformacijom”. Ove TS su izgrađene kao „iznuđena rešenja”, ali su pokazale mnoge i neočekivano dobre strane, koje leže u činjenici da na nivou mreže i transformacije 110/X kV/kV pružaju stopostotno sigurno napajanje. Svakako da će sa daljom dogradnjom mreže 35 kV ove dobre performanse još više doći do izražaja.

2. OSNOVNI PRINCIPI ZA IZRADU DUGOROČNIH PLANSKIH PROGRAMA RAZVOJA ELEKTRODISTRIBUTIVNIH MREŽA

Kao što je već napomenuto, sve elektrodistributive mreže na konzumu JP EDB su u periodu od 1950. godine do danas izgrađivane planski - na osnovu dugoročnih, srednjoročnih i godišnjih planskih programa. Ovi programi su obuhvatali razne studije vezane za proračune struja kratkih spojeva u postojećim i perspektivnim mrežama, studije vezane za regulaciju napona u mrežama, globalne i prostorne

prognoze razvoja vršne snage i potrošnje električne energije, studije pouzdanosti, studije vezane za optimalno ograničenje nivoa Jouleovih gubitaka u mrežama, studije vezane za dimenzionisanje elemenata mreža sa aspekta ukupnog broja potrošača koji njima mogu biti napajani, izbor karakteristika vodova i transformatora i sve promene druge prateće opreme, studije vezane za daljinsko upravljanje elementima TS 110/10 kV/kV, 35/10 kV/kV i 110/35 kV/kV... itd.

Ovako sveobuhvatni planski programi su implicirali izgradnju veoma racionalnih mreža, pre svega na gradskim područjima, a takođe i na prigradskim i vangradskim područjima. Sigurno je da je tome itekako doprinela planska izgradnja Beograda i manjih gradova na konzumu JP EDB (sa više od 20 000 stanovnika), za razliku od prigradskih i vangradskih naselja koja su izgrađivana uglavnom stihijski (zato su i mreže na ovom području izgrađivane radi postizanja optimalnih finansijskih efekata na širokom prostoru od cca 2 500 km²).

Sa aspekta optimalne izgradnje svih mreža, naročito su značajne prognoze vršne snage i potrošnje električne energije - o čemu će biti govora u tački 3 i 4 ovog rada.

3. GLOBALNE PROGNOZE VRŠNE SNAGE NA KONZUMU JAVNOG PREDUZEĆA ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD

Globalne prognoze razvoja vršnog opterećenja na konzumu JP EDB baziraju se na uređivanju velikih baza podataka i višeparametarskoj ekstrapolacionoj prognozi razvoja raznih parametara.

Uređivanje velikih baza podataka je neophodno da bi se došlo do trendova razvoja opterećenja po stanovniku (u W/stanovniku) i površinske gustine opterećenja (u MW/km²). Pri tome, ove baze obuhvataju kako prethodni dvadesetogodišnji period, tako i postojeće stanje, i, naravno, prognozirani period. Njima je sistematizovan dosadašnji razvoj vršnog opterećenja svih mikroreona i TS VN/SN, ukupan broj stanovnika, domaćinstava i stanova (sa i bez centralnog grejanja) na svakom mikroreonu, učešće velikih potrošača (sa snagom većom od 100 kW) u vršnom opterećenju, njihova potrošnja električne energije, ukupan broj zaposlenih, ostvareni kapaciteti u mrežama (pre svega ukupan broj i ukupna instalisana snaga TS 10/0,4 kV/kV - kako distributivnih tako i „privatnih”), površinska gustina opterećenja, ... itd. Svi parametri se nezavisno prognoziraju prema analizama stručnjaka i eksperata raznih profila znanja.

Na taj način se dolazi i do prirodnog priraštaja opterećenja kod postojećih potrošača (merenog u W/stanovniku), i do mehaničkog priraštaja opterećenja zbog novih potrošača (mereno brojem stanovnika, stanova,

zaposlenosti, ... itd. na svakom od mikroreona); pri tome je naročito značajno i praćenje trendova rasta površinske gustine opterećenja (u MW/km²) koje određuje optimalnu izgradnju mreže sa aspekta izbora nazivne snage TS VN/SN i njene mikrolokacije [5].

Ovde je u tabeli 1 prikazana globalna prognoza razvoja vršne snage konzuma JP EDB do 2020. godine, sa osnovnim pokazateljima i o dosadašnjem razvoju mreže. Očigledan je linearan zakon u razvoju specifičnog opterećenja i površinske gustine opterećenja u dosadašnjem periodu, što se po istoj stopi pretpostavlja i za prognozirani period do 2010. i 2020. godine.

4. PRIMERI PROSTORNE PROGNOZE RAZVOJA VRŠNOG OPTEREĆENJA ZA NASELJE ŽELEZNIK I TS 35/10 kV/kV RIPANJ

Metodologija za praktičnu prostornu prognozu vršne snage mikroreona na konzumu JP EDB ovde će biti prikazana na dva primera: za naselje Železnik (grad sa cca 20 000 stanovnika na konzumu JP EDB) i TS 35/10 kV/kV Ripanj (sa nekoliko seoskih naselja na konzumu).

Za prethodni tridesetogodišnji period, vršna opterećenja naselja i TS VN/SN su iz dokumentacije

JP EDB; ukupan broj stanovnika, domaćinstava i stanova je prema zvaničnim rezultatima popisa stanovništva iz 1971, 1981, 1991. i 2002. godine; podaci o velikim potrošačima su takođe iz dokumentacije JP EDB, kao i podaci o kapacitetima mreža (pre svega o ukupnom broju i ukupnoj instaliranoj snazi TS 10/0,4 kV/kV); zaposlenost i površine mikroreona su iz dokumentacije gradskog Zavoda za planiranje i Republičkog geodetskog zavoda.

Prognozirani parametri (stanovništvo, stanovi, zaposlenost) su takođe dobijeni od gradskog Zavoda za planiranje i urbanizam, dok su prognozirana opterećenja najvećih potrošača dobijena u direktnom kontaktu sa njima; kapaciteti mreža pri tome podležu planerskim aktivnostima u JP EDB.

Prognoza specifičnih parametara za razvoj vršne snage pri tome podleže linearnom zakonu - jer su takve tendencije iz dosadašnjih perioda razvoja. Naime, razvoj specifičnog opterećenja (opterećenje po stanovniku u W/stanovnika) u dosadašnjim periodima (sa vremenskim pomakom od 10 godina) za gradski, te prigradski i vangradski deo konzuma JP EDB je prikazan u tabeli 2. Očigledan je stalan rast specifičnog opterećenja na svim delovima konzuma JP EDB, što se pretpostavlja i za naredne periode do 2010. i 2020. godine. S obzirom i na pokazatelje ra-

Tabela 1.

Dosadašnji razvoj konzuma „Elektrodistribucije Beograd” sa prognozom razvoja do 2020. godine

Redni broj	Parametri	Ostvareno								Prognoza		
		1961.	1965.	1971.	1975.	1981.	1985.	1991.	1995.	2001.	2011.	2021.
1.	Stanovnika	853 515	(1 022 409)	1 163 685	(1 259 850)	1 419 200	(1 450 312)	1 490 163	(?)	1 645 100	1 800 000	2 000 000
2.	Domaćinstava	287 693		319 451		468 206		497 106		569 114	610 000	700 000
3.	Stanova sa centralnim grejanjem	?		35 945		100 744		171 572		230 791	270 000	320 000
4.	Stanova bez centralnog grejanja	?		344 055		347 285		354 722		378 107	400 000	450 000
5.	Veliki potrošači (MW)	?		150		300		470		440	600	700
6.	Veliki potrošači (MWh)	?		500 000		920 715		1 132 000		840 000	1 000 000	2 000 000
7.	Zaposlenost	279 000	316 000	374 000	469 000	571 000	610 000	621 000	526 000	484 000	640 000	700 000
8.	Vršno opterećenje konzuma	134	237	426	600	912	1 059	1 269	1 614	1 631,32	2 000	2 500
9.	Specifično opterećenje	157	(232)	366	(476)	643	(730)	852	(?)	992	1 100	1 250
10.	Površina konzuma (km ²)*	2 501	2 501	2 501	2 501	2 501	2 840	2 840	2 840	2 840	2 840	2 840
11.	Površinska gustina opterećenja (MW/km ²)	0,053 5	0,094 8	0,170 3	0,240	0,364 7	0,372 9	0,446 8	0,568 3	0,574 4	0,819	0,951
12.	Ukupno TS 110/35 kV/kV (kom)	2	5	6	7	10	11	11	11	11		
13.	Ukupno TS 110/35 kV/kV (MVA)	50	427,5	550,5	705	928,5	1 106	1 320,5	1 320,5	1 406		
14.	Ukupno TS 35/10 kV/kV (kom)	28	35	48	52	64	73	78	79	80		
15.	Ukupno TS 35/10 kV/kV (MVA)	47,975**	407	660	1 098,7	1 265,2	1 426,7	1 558,1	1 638	1 638		
16.	Ukupno TS 110/10 kV/kV (kom)	0	0	1	1	4	8	12	13	13		
17.	Ukupno TS 110/10 kV/kV (MVA)	0	0	40	40	309	595	698	875	875		
18.	Ukupno TS 110/35 kV/kV (kom)	0	0	0	0	0	0	1	2	2		
19.	Ukupno TS 110/35/10 kV/kV/kV (MVA)	0	0	0	0	0	0	63	126	126		
20.	Ukupno TS 10/0,4 kV/kV (kom)	950	1 176	1 842	2 593	3 307	4 021	4 699	5 663	6 364		
21.	Ukupno TS 10/0,4 kV/kV (MVA)	154,8**	540	850	1 600	2 111	2 780	3 180	3 479	3 833		
22.	Od toga privatne TS 10/0,4 kV/kV (kom)	?	cca 480	cca 520	cca 875	cca 962	cca 1 080	cca 1 283	cca 1 342	cca 1 424		
23.	Od toga privatne TS 10/0,4 kV/kV (MVA)	?	cca 300	cca 400	cca 700	cca 856	cca 1 059	cca 1 150	cca 1 210	cca 1 290		

* Konzum JP „Elektrodistribucije Beograd” prostire se na teritoriji beogradske opštine bez opština Lazarevac i Mladenovac do 1985. godine, a posle 1985. godine sa opštinom Mladenovac

** Deo potrošnje se odvijao preko TS 6/0,4 kV/kV i 3/0,4 kV/kV

sta u drugim elektroprivredama u svetu, za sada se ne sagledava zasićenje rasta specifičnog opterećenja i površinske gustine opterećenja na svim mikroreovima konzuma JP EDB.

Za konzum naselja Železnik specifično opterećenje danas iznosi oko 1 000 W/stanovniku, a prognozirano u 2020. godini oko 1 270 W/stanovniku; površinska gustina opterećenja danas je oko 4,1 MW/km², a prognozira se njen rast do 7,7 MW/km² na površini od cca 5 km².

Za konzum TS 35/10 kV/kV Ripanj treba napomenuti da je površina konzuma u 1971. godini bila

preko 370 km², dok je danas oko 100 km². Specifično opterećenje (opterećenje po stanovniku) danas iznosi oko 520 W/stanovniku, a prognozira se njegov rast do 720 W/stanovniku. Površinska gustina opterećenja na konzumu TS 35/10 kV/kV Ripanj danas u proseku iznosi 0,095 MW/km², a prognozira se njen rast do u proseku 0,16 MW/km² do 2020. godine.

Ove prognoze, treba napomenuti, impliciraju investicionu izgradnju mreže sa TS 110/10 kV/kV Železnik do 2010. godine, i TS 35/10 kV/kV Ripanj - Brđani, takođe do 2010. godine.

Tabela 2.

Razvoj specifičnog opterećenja potrošača na nivou TS X/10 kV/kV na konzumu JP EDB u periodu od 1971. do 2001. godine

Specifično opterećenje [W/st.]	Gradski konzum JP EDB				Prigradski i vangradski konzum JP EDB			
	1971.	1981.	1991.	2001.	1971.	1981.	1991.	2001.
do 200	0	0	0	0	11	2	0	0
200-400	14	1	0	0	5	11	4	2
400-600	7	12	4	1	1	10	5	9
600-800	3	6	9	3	1	3	17	10
800-1 000	0	6	7	13	0	3	5	9
1 000-1 200	0	0	4	4	2	1	1	5
1 200-1 400	0	4	2	4	0	0	3	3
1 400-1 600	0	0	3	5	0	0	3	2
1 600-1 800	0	1	0	1	0	0	0	0
1 800-2 000	0	0	2	0	0	1	0	1
više od 2 000	0	0	4	6	0	0	0	0
Ukupno TS X/10 kV/kV	24	30	35	37	20	31	38	41

Tabela 3.

Dosadašnji razvoj i prognoza vršnog opterećenja za naselje Železnik

Redni broj	Parametri	Ostvareno						Prognoza		
		1970/'71.	1975/'76.	1980/'81.	1985/'86.	1990/'91.	1995/'96.	2000/'01.	2010/'11.	2020/'21.
1.	Stanovnika	16 510	-	19 730	-	19 950	-	20 850	24 850	30 600
2.	Domaćinstva	4 776	-	5 863	-	5 885	-	6 990	7 000	9 200
3.	Stanova sa centralnim grejanjem	-	-	1 150	-	1 353	-	1 588	3 000	4 500
4.	Stanova bez centralnog grejanja	-	-	4 097	-	4 735	-	5 100	5 200	5 500
5.	Veliki potrošači (MW)	3,7	6,3	7,4	7,8	10,9	10,0	10,0	12	13
6.	Veliki potrošači (MWh)	-	-	-	-	30 500	32 000	38 000	50 000	70 000
7.	Zaposlenost	-	-	-	-	5 770	-	6 000	6 600	7 325
8.	Max opterećenje TS (MVA)	6,9	11,5	16,5	19,9	21,7	27,4	24,1	31	42
9.	Jednovremeno opterećenje TS (MW)	6	10	12,1	17	18,3	20,6	20,7	29,1	38,8
10.	Opterećenje po stanovniku (W/st)	365	-	610	-	920	-	1 010	1.170	1 270
11.	Ukupno TS 10/0,4 kV/kV (kom)	11	31	34	42	52	63	67	-	-
12.	Ukupno TS 10/0,4 kV/kV (kVA)	-	-	15 420	24 510	33 590	37 840	41 970	-	-
13.	Od toga privatne TS 10/0,4 kV/kV (kom)*	-	-	12	12	15	17	17	-	-
14.	Od toga privatne TS 10/0,4 kV/kV (MVA)*	-	-	6 640	6 640	8 930	12 500	12 500	-	-
15.	Površina konzuma (km ²)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
16.	Površinska gustina opterećenja (MW/km ²)	1,2	2,0	2,4	3,4	3,7	4,1	4,1	5,8	7,7

* Nepoznat ukupan broj i instalisana snaga transformatora 6/0,4 kV/kV u fabrikama

Prognoza opterećenja za TS 35/10 kV/kV Ripanj (2x8 MVA)

Redni broj	Parametri	Ostvareno							Prognoza	
		1970/'71.	1975/'76.	1980/'81.	1985/'86.	1990/'91.	1995/'96.	2000/'01.	2010/'11.	2020/'21.
1.	Stanovnika	34 470	-	18 220	-	17 235	-	17 780	20 550	22 000
2.	Domaćinstva	7 985	-	5 240	-	4 955	-	5 780	6 500	7 000
3.	Stanova sa centralnim grejanjem	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.	Stanova bez centralnog grejanja	-	-	-	-	6 940	-	7 520	8 200	9 000
5.	Veliki potrošači (MW)	-	-	-	-	2,6	-	3,5	4,5	6
6.	Veliki potrošači (MWh)	-	-	-	-	5 400	-	6 000	8 000	10 000
7.	Zaposlenost	-	-	-	-	2 250	-	3 200	3 235	3 500
8.	Max opterećenje TS (MVA)	4	3,2	5,0	8,7	10,5	10,2	9,5	15	17
9.	Jednovremeno opterećenje TS (MW)	3,4	3,0	4,3	7,7	8,3	10	9,2	13,9	15,8
10.	Opterećenje po stanovniku (W/st)	95	-	235	-	480	-	520	680	720
11.	Ukupno TS 10/0,4 kV/kV (kom)	66	54	83	70	75	63	67	-	-
12.	Ukupno TS 10/0,4 kV/kV (kVA)	-	-	20 260	22 790	24 300	21 680	22 980	-	-
13.	Od toga privatne TS 10/0,4 kV/kV (kom)*	-	-	-	-	26	24	24	-	-
14.	Od toga privatne TS 10/0,4 kV/kV (MVA)*	-	-	-	-	9 560	9 380	9 380	-	-
15.	Površina konzuma (km ²)	378	165	165	138	138	110	100	100	100
16.	Površinska gustina opterećenja (MW/km ²)	0,01	0,02	0,031	0,063	0,08	0,092	0,095	0,14	0,16

Kao što prikazane tabele kazuju, kapaciteti u TS 10/0,4 kV/kV na konzumu EDB su na svim mikroneonima konzuma barem dvostruko veći nego adekvatno vršno opterećenje. To je zbog toga što faktori jednovremenosti na nivou manjih grupa potrošača imaju značajno manje vrednosti, te su i korespondentni kapaciteti u svim mrežama neuporedivo veći nego jednovremeno vršno opterećenje konzuma EDB.

5. OSETLJIVOST PROGNOZA VRŠNOG OPTEREĆENJA NA VARIJACIJU ULAZNIH PARAMETARA

Metodologija za izradu prognoze razvoja vršnog opterećenja naselja i TS VN/SN na konzumu JP EDB je u stalnoj primeni od 1991. godine [4] i iz godine u godinu se proverava njena osetljivost od varijacije i ulaznih parametara. Naime, s obzirom na činjenicu da se pri izradi prognoza vodi računa o velikom broju parametara relevantnih za veličinu vršnog opterećenja manje ili veće grupe potrošača, to su i prognoze veoma stabilne u smislu krajnjeg rezultata.

Varijacije ulaznih parametara su itekako postojale na mnogim mikroneonima konzuma; svakako da se najveća nestabilnost ulaznih parametara ispoljavala na područjima sa veoma intenzivnom, tzv. „stihijskom”, izgradnjom naselja - što je u periodu od 1991. do 2003. godine bilo itekako prisutno i na mnogim mikroneonima na konzumu JP EDB. Međutim, s obzirom na činjenicu da JP EDB priključuje svakodnevno ovakve potrošače na mrežu (još u fazi

izgradnje stanova i kuća) to se o ovom problemu itekako vodi računa u praksi. Zato se može reći da su sva područja i mikroneoni na konzumu JP EDB „pod kontrolom” stručnih planerskih službi i da u tom smislu gotovo da nema većih iznenađenja. Radi toga se i prate skoro svake godine prognozirani parametri, i, radi optimalnog investiranja u mrežu, preduzimaju odgovarajuće intervencije.

Sigurno je da prognoze razvoja vršnog opterećenja, naročito dugoročne, ne mogu da ispoljavaju stopostotnu tačnost. Na to utiče veliki broj nepredvidivih faktora. Međutim, s obzirom na značaj prognoza na optimalno investiranje u mrežu, neophodna je veća pažnja pri izradi prognoza, a ovaj pristup je, čini se - dovoljno sveobuhvatan.

6. ZAKLJUČAK

Izradi dugoročnih i srednjoročnih prognoza vršne snage mikroneona, naselja i TS VN/SN na konzumu JP EDB se poklanja velika pažnja, jer su jedna od osnova za optimalno investiranje u izgradnju mreža. Prognoze su višeparametarske, sa neophodnim uređivanjem velikih baza podataka.

U dosadašnjem periodu, ovakve prognoze su bile veoma stabilne i veoma malo osetljive na varijaciju ulaznih parametara. Ovde se na dva konkretna primera prikazuju prognozni efekti.

Ukoliko ovaj rad doprinese izradi prognoza na sličnim metodološkim principima i u drugim elektro-distributivnim preduzećima u Srbiji - dobiće pun smisao.

7. LITERATURA

- [1] Elektrosrbija Beograd, PERSPEKTIVNI PROGRAM INVESTICIONE IZGRADNJE ELEKTRIČNE MREŽE GRADA I SREZA BEOGRAD; Studija, Beograd, 1955/57. godina.
- [2] Dragutin Stanojević, dipl. ing. el., Slobodan Vučić, el. teh, PROGNOZA POTREBNE SNAGE I POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE U ELEKTRODISTRIBUCIJI BEOGRAD DO 2000. GODINE; časopis „Elektrodistribucija”, br. 2, 1972, br. 3.
- [3] Prof. dr Gojko Muždeka, OSNOVNE KONCEPCIJE PERSPEKTIVNOG NAPAJANJA BEOGRADA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM DO 2000. GODINE; časopis „Elektrodistribucija”, broj 3, decembar 1977.
- [4] EDB, ETI „Nikola Tesla”, IDEJNI PROJEKTI PERSPEKTIVNOG RAZVOJA MREŽE 110 kV I 35 kV BEOGRADA DO 2005. I 2010. GODINE; studije, Beograd, 1986. i 1993. godina.
- [5] Vesna Živanović, dipl. ing. el, PROSTORNA PROGNOZA VRŠNE SNAGE NA KONZUMU JP EDB METODOM PROSTORNE PROGNOZE POVRŠINSKE GUSTINE VRŠNE SNAGE; JUKO CIREC, II Savetovanje, 2000. godine, R. 6.9.
- [6] Zbornik radova: ENERGETIKA BEOGRADA - STANJE I PERSPEKTIVE; Savez društava inženjera i tehničara Beograda, oktobar 1993. godine.

Rad je primljen u uredništvo 28. 01. 2003. godine



Tomislav Milanov, dipl. el. ing. Roden u Beogradu, 03. 11. 1951. godine. Diplomirao je 1975. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Zaposlen u preduzeću „Elektrodistribucija Beograd” od januara 1976. godine i obavlja poslove u operativnoj energetici dispečerskog centra i Sektora za tehnički razvoj i istraživanje. Objavio oko 50 stručnih radova u časopisima „Elektroprivreda” i „Elektrodistribucija”, kao i na savetovanjima JUKO CIGRE i JUKO CIREC. Oženjen je i ima dvoje punoletne dece.

Mirjana Stojanović

Novi pristup projektovanju elektroprivrednih telekomunikacionih mreža

Originalni naučni rad
UDK: 621.39

Rezime:

U ovom radu je izložen pristup projektovanju elektroprivrednih multiservisnih mreža sa tehnologijom Internet protokola i podrškom više nivoa kvaliteta servisa. Prikazane su faze projektovanja mreže i principi klasifikacije servisa. Predlog izbora mehanizama za implementaciju kvaliteta servisa u korisničkoj ravni i pridruženih parametara ilustrovan je simulacionom analizom. Sledi pregled mehanizama za implementaciju kvaliteta servisa u kontrolnoj ravni. Organizovanje saobraćaja i rutiranje kvaliteta servisa su dodatni mehanizmi, neophodni za realizaciju željenih ukupnih performansi mreže. Na kraju su razmatrani aspekti realizacije kvaliteta servisa pri međusobnom povezivanju elektroprivrednih IP mreža.

Ključne reči: *kvalitet servisa, diferencirani servisi, MPLS, uređivanje, vremensko raspoređivanje, upravljanje redovima, broker propusnog opsega, organizovanje saobraćaja, rutiranje kvaliteta servisa, povezivanje IP domena*

Abstract:

A NOVEL APPROACH TO DESIGN OF TELECOMMUNICATION NETWORKS IN THE POWER UTILITIES

This paper presents an approach to planning and design of Internet Protocol multiservice networks in the power utility environment, providing different levels of quality of service. Design stages and service classification principles have been outlined. A proposal for selection of data path quality of service mechanisms and associated parameters has been illustrated through a simulation analysis. A brief overview of control path quality of service mechanisms is also supplied. Traffic engineering and quality of service routing are emphasized as additional mechanisms for providing the overall network performance. Finally, inter-domain quality of service aspects have been addressed.

Key words: *Quality of Service, DiffServ, MPLS, Policing, Scheduling, Queue Management, Bandwidth Broker, Traffic Engineering, QoS Routing, Inter-domain QoS*

1. UVOD

Operativni i poslovni elektroprivredni telekomunikacioni servisi postavljaju određen broj specifičnih zahteva telekomunikacionom sistemu, u po-

gledu performansi i tehničkih karakteristika. Za operativne servise karakteristični su strogi zahtevi za pouzdanost, raspoloživost i kašnjenje, pri čemu se, sa pojavom multimedijalnih servisa, javljaju i novi zahtevi: za veći propusni opseg, za sinhronizaciju

Mr Mirjana Stojanović, dipl. ing. – Institut Mihajlo Pupin, 11 000 Beograd, Volgina 15

informacija različitog tipa i dr. Operativni servisi ne generišu promenljive i nepredvidljive količine saobraćaja, ali postoji opasnost da kvalitet ovih servisa bude degradiran od aplikacija koje zahtevaju velike propusne opsege ili usled dužeg prisustva eksplozivnog saobraćaja (*traffic bursts*).

Poslovne servise karakteriše obogaćivanje tradicionalnih servisa novim uslugama. Za poslovnu telefoniju zahtevaju se usluge kao što su govorna pošta, automatska distribucija poziva i računarska telefonija. Za servis prenosa poslovnih podataka mreža treba da podrži različite tipove saobraćaja, u zavisnosti od prirode aplikacija. Interaktivni multimedijalni servisi obuhvataju servise u realnom vremenu (videotelefonija, videokonferencije i dr.) i servise za razmenu i manipulaciju multimedijalnim dokumentima. Ove aplikacije zahtevaju velike propusne opsege.

Zahtevi pojedinih elektroprivrednih telekomunikacionih servisa za performanse specificirani su u dokumentima CIGRÉ [1], [2]. S obzirom na raznorodnost servisa i aplikacija koje ih koriste, podrška različitih nivoa kvaliteta servisa (*QoS – Quality of Service*) je jedan od preduslova za primenu IP tehnologije u elektroprivrednim telekomunikacionim mrežama [3].

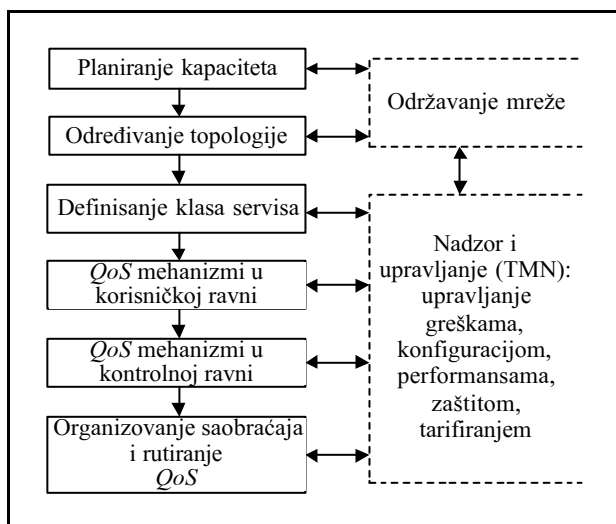
U ovom radu je izložen pristup projektovanju elektroprivrednih multiservisnih IP (internet protokol) mreža sa podrškom više nivoa kvaliteta servisa. Predložene su faze projektovanja mreže i izloženi principi klasifikacije servisa sa dve karakteristične varijante pridruživanja pojedinih operativnih i poslovnih servisa klasama *QoS*. S obzirom na zahteve za skalabilnost mreže, razmatranja u radu odnose se na arhitekturu diferenciranih servisa i na mreže sa MPLS tehnologijom, kao i njihove potencijalne kombinacije. Predložen je izbor mehanizama u korisničkoj ravni i principi konfigurisanja parametara, što je ilustrovano simulacionom analizom. Zatim je prikazan kraći pregled mehanizama *QoS* u kontrolnoj ravni. Organizovanje saobraćaja i rutiranje kvaliteta servisa su dodatni mehanizmi, neophodni za realizaciju željenih ukupnih performansi *QoS* mreže. Na kraju su razmatrani aspekti realizacije *QoS* u međusobnom povezivanju elektroprivrednih telekomunikacionih mreža.

Osnovni cilj ovog rada je da se pokaže da, bez obzira na neka otvorena pitanja, postoji solidna teorijska (modeli i mehanizmi *QoS*) i praktična (komercijalno raspoloživa oprema) osnova, koja uz pravilno planiranje, projektovanje i održavanje mreže omogućava realizaciju multiservisnih elektroprivrednih telekomunikacionih mreža sa IP tehnologijom i podrškom više nivoa kvaliteta servisa.

2. FAZE PROJEKTOVANJA MULTISERVISNE IP MREŽE SA VIŠE NIVOA KVALITETA SERVISIA

U procesu projektovanja multiservisne elektroprivredne IP mreže sa više nivoa *QoS* mogu se identifikovati sledeće faze (slika 1):

1. Planiranje kapaciteta, u skladu sa planiranim brojem korisnika i predviđenim servisima.
2. Određivanje topologije mreže, koje obuhvata lokacije čvorova, spojne puteve i specifikacije pristupnih interfejsa, način pristupa globalnom Internetu, povezivanje sa drugim IP domenima (npr. sa elektroprivrednim IP mrežama drugih zemalja).
3. Definisane nivoa *QoS* (klasa servisa) i pridruživanje operativnih i poslovnih servisa odgovarajućim klasama.
4. Izbor mehanizama *QoS* u korisničkoj ravni i definisanje parametara.
5. Implementacija mehanizama *QoS* u kontrolnoj ravni.
6. Organizovanje saobraćaja i rutiranje kvaliteta servisa.
7. Projektovanje sistema za nadzor i upravljanje u skladu sa konceptima TMN.
8. Specifikacija uslova i načina redovnog održavanja mreže, što obuhvata efikasan oporavak od ispada, uklanjanje uskih grla i blagovremeno proširivanje kapaciteta.



Slika 1. Faze projektovanja mreže

3. DEFINISANJE KLASA SERVISIA

Jedan od osnovnih zahteva za mrežu sa IP tehnologijom je skalabilnost, koja predstavlja sposobnost efikasnog proširivanja mreže u smislu povećanja

nja broja čvorova, broja putanja u tabelama rutiranja, broja tokova IP saobraćaja i dr. Zbog toga je tendencija da se primenjuju arhitekture *QoS* koje se zasnivaju na agregatnom pristupu po klasi servisa, čija je suština da paketi koji imaju slične zahteve za *QoS* mogu da budu grupisani u jednu klasu iako pripadaju različitim tokovima saobraćaja. Složene operacije izvršavaju se u ivičnim ruterima IP domena, dok se u ruterima jezgra izvršavaju brze i jednostavne operacije, što presudno doprinosi skalabilnosti mreže.

Uzimajući u obzir zahteve operativnih i poslovnih servisa, u multiservisnoj elektroprivrednoj mreži sa IP tehnologijom moguća je sledeća klasifikacija nivoa *QoS*:

1. **Premijalni servis** - visoko raspoloživ servis sa garantovanim vršnim protokom, malim kašnjenjem i džiterom;
2. **Servis sa sigurnim prosleđivanjem** koji pruža statističke garancije o isporuci IP datagrama dogovorenim protokom. U okviru ovog servisa se može definisati više klasa sa različitim prioritetima;
3. **Servis najboljeg pokušaja** (*best effort*), bez garancija o kvalitetu, koji odgovara servisu raspoloživom u današnjem globalnom Internetu.

Ovakav pristup klasifikaciji servisa je potpuno saglasan sa:

- *QoS* arhitekturom diferenciranih servisa - DiffServ (*Differentiated Services*) [4] i modelima servisa koje ona definiše [5], [6],
- Mogućom klasifikacijom servisa [7], [8] u mrežama sa MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) tehnologijom, [9].

Moguće su razne varijante pridruživanja pojedinih operativnih i poslovnih elektroprivrednih telekomunikacionih servisa različitim nivoima *QoS*. U nastavku su navedene i obrazložene dve karakteristične varijante, pri čemu se ne isključuju i druge mogućnosti klasifikacije.

Prva varijanta, prikazana u tabeli 1, je realistična sa stanovišta dosadašnjih praktičnih iskustava. Definisana je manji broj klasa servisa, što omogućava efikasniju implementaciju *QoS*. Pretpostavljeno je da se servisi telezaštite i operativne telefonije ne realizuju preko multiservisne IP mreže. Za realizaciju telezaštite u mrežama sa IP tehnologijom ne postoje praktična iskustva. Većina elektroprivreda je rezervisana prema integraciji telezaštite sa ostalim servisima, kao i prema realizaciji ovog servisa u mrežama sa komutacijom paketa. Za operativnu telefoniju, VoIP (*Voice over IP*) još uvek ne zadovoljava stroge zahteve za kašnjenje i džiter.

Premijalnom servisu su pridruženi poslovni servisi u realnom vremenu: poslovna telefonija (VoIP), interaktivni multimedijalni servisi u realnom vreme-

nu sa konstantnim bitskim protokom, kao i servisi akvizicije poslovnih podataka u realnom vremenu (npr. daljinsko očitavanje brojila).

Servis sa sigurnim prosleđivanjem realizuje se uz pomoć jedne klase - zlatni servis, sa dva prioriteta. Višem prioritetu se pridružuju operativni servis daljinskog upravljanja, operativni video servisi i interaktivni multimedijalni servisi u realnom vremenu sa promenljivim bitskim protokom. Servisi prenosa poslovnih podataka pridruženi su zlatnom servisu nižeg prioriteta i servisu najboljeg pokušaja. Tokovi saobraćaja za zlatni servis markiraju se za niži prioritet mehanizmom poliranja, ako su van definisanog profila saobraćaja (videti poglavlje 4.1). To znači da se multimedijalni dokumenti, EDI dokumenti, X.400 i dr. prenose sa većom verovatnoćom odbacivanja paketa samo ako je njihov ulazni protok veći od zadatog ili saobraćaj eksplozivniji od dozvoljenog za zlatni servis. Ako to nije slučaj, prenos se obavlja sa višim prioritetom.

Tabela 1.
Klasifikacija operativnih i poslovnih servisa:
varijanta 1

Klasa		Operativni/poslovni TK servis
Premijalni		Poslovna telefonija Interaktivni multimedijalni servisi u realnom vremenu sa konstantnim bitskim protokom Akvizicija poslovnih podataka u realnom vremenu
Zlatni	Viši prioritet	Operativni servis daljinskog upravljanja Operativni video Interaktivni multimedijalni servisi u realnom vremenu sa promenljivim bitskim protokom
	Niži prioritet	Razmena multimedijalnih dokumenata Elektronska razmena dokumenata (EDI) Servisi za rukovanje porukama (X.400)
Najbolji pokušaj		Pretraživanje informacija (poslovni podaci) Internet servisi

U drugoj varijanti (tabela 2) uzeti su u obzir svi operativni i poslovni servisi. Ova varijanta je hipotetična sa stanovišta realizacije dva vremenski najkritičnija operativna servisa i neophodne su iscrpne dodatne analize i praktična iskustva. Premijalnom servisu pridruženi su servisi telezaštite i operativne telefonije.

Servis sa sigurnim prosleđivanjem realizuje se u formi tzv. Olimpijskog servisa sa tri klase: zlatni, srebrni i bronžani servis. Mrežni resursi za tokove IP datagrama koji pripadaju zlatnom servisu se dimenzionišu tako da budu manje saobraćajno opterećeni u odnosu na resurse za srebrni servis, što omogućava dobre performanse u pogledu kašnjenja. Iz tih razloga se poslovni servisi u realnom vremenu

mogu pridružiti ovoj klasi. Resursi za srebrni servis se dimenzionišu po istom principu u odnosu na resurse za bronzani servis. Srebrnom servisu se pridružuju vremenski nekritični operativni servisi. Prenos poslovnih podataka (izuzev akvizicije podataka u realnom vremenu) pridružuje se bronзанom servisu ili servisu najboljeg pokušaja. I u ovom slučaju je moguće definisanje prioriteta u sklopu zlatnog, srebrnog i bronзанog servisa.

Tabela 2.

Klasifikacija operativnih i poslovnih servisa: varijanta 2

Klasa	Operativni/poslovni TK servis
Premijalni	Telezaštita, operativna telefonija
Zlatni	Poslovna telefonija Interaktivni multimedijalni servisi u realnom vremenu Akvizicija poslovnih podataka u realnom vremenu
Srebrni	Operativni servis daljinskog upravljanja Operativni video
Bronzani	Razmena multimedijalnih dokumenata Elektronska razmena dokumenata (EDI), Servisi za rukovanje porukama (X.400)
Najbolji pokušaj	Pretraživanje informacija (poslovni podaci) Internet servisi

4. IZBOR MEHANIZAMA U KORISNIČKOJ RAVNI I PRINCIPI KONFIGURISANJA PARAMETARA

Mehanizmi za implementaciju *QoS* u korisničkoj ravni obuhvataju klasifikaciju paketa, kondicioniranje saobraćaja (markiranje, merenje, uređivanje, uobličavanje), vremensko raspoređivanje paketa i upravljanje redovima (baferima). Klasifikacija paketa i kondicioniranje saobraćaja obavljaju se u grančnim ruterima.

4.1. Uređivanje saobraćaja

Uređivanje saobraćaja (*traffic policing*) je proces odbacivanja saobraćaja koji ne odgovara unapred definisanom profilu¹⁾ ili markiranja takvog saobraćaja za drugi profil - nižeg prioriteta. Za premijalnu klasu servisa u procesu uređivanja obavezno je odbacivanje paketa sa vršnim protokom većim od dozvoljenog. Na taj način se za saobraćaj u profilu garantuje raspoloživost predvide-

¹⁾ Profil saobraćaja (vršni protok, prosečan protok, burst) definiše se u okviru statičkog ili dinamičkog sporazuma o nivou servisa - SLA (Service Level Agreement) između korisnika i provajdera. Za korisnike korporacijske mreže se profil saobraćaja, mere performansi i dr. mogu konfigurisati statički ili dinamički, npr. u okviru brokera propusnog opsega i/ili sistema za nadzor i upravljanje.

nih resursa u mreži (propusni opseg, memorijski prostor) i dobre performanse. Za klase servisa sa sigurnim prosleđivanjem i više nivoa prioriteta, saobraćaj van profila se markira sa nižim prioriteto. Najpoznatiji takav mehanizam je „token bucket“, u kome se uređivanje saobraćaja obavlja na bazi određenog protoka (CIR - *Committed Information Rate*) i dozvoljene najveće količine informacija čiji se prenos garantuje u nekom intervalu (CBS - *Committed Burst Size*).

4.2. Vremensko raspoređivanje paketa

Vremensko raspoređivanje paketa (*scheduling*) omogućava deljenje raspoloživog propusnog opsega izlaznog linka između više tokova saobraćaja i implementira se u svim čvorovima mreže. Postoji nekoliko poznatih disciplina raspoređivanja paketa, koje se implementiraju u komercijalno raspoloživoj mrežnoj opremi sa podrškom *QoS* [10]. U nastavku je dat praktičan pristup za konfigurisanje parametara za dve karakteristične grupe disciplina [5], [8]. Princip koji treba poštovati pri konfigurisanju parametara je da se svakoj klasi servisa dodeljuje zaseban memorijski prostor - fizički red. Ako je u okviru jedne klase servisa definisano više prioriteta, u fizičkom redu koji pripada toj klasi definiše se odgovarajući broj virtuelnih redova.

Prva grupa disciplina se zasniva na raspoređivanju po prioritetima i podrazumeva da se klasama servisa, u procesu konfigurisanja parametara, dodeljuju prioriteta prosleđivanja po izlaznom linku. Na taj način se postižu vrlo dobre performanse kašnjenja i džitera za premijalni servis. Ograničavanjem raspoloživog propusnog opsega za datu klasu, izbegava se da prioritetni saobraćaj potpuno zauzme resurse saobraćaju nižeg prioriteta, što je bitno u ekstremnim slučajevima, kao što je preusmeravanje saobraćaja usled ispada nekog linka ili grupe linkova. Pri tome, propusni opseg treba da bude dovoljan da se omogući određena rezerva, odnosno da faktor iskorišćenja servera, $r^{(2)}$, bude manji od 1. Nedostatak je u tome što deo propusnog opsega, u najvećem procentu vremena, ostaje neiskorišćen. Međutim, za elektroprivredni telekomunikacioni sistem koji se zasniva na sopstvenoj infrastrukturi i mrežnoj opremi, ovaj nedostatak nije presudan u odnosu na dobitak u performansama.

Druga grupa disciplina se zasniva na opsluživanju redova određenim algoritmom (*Round Robin*, *Fair Queuing* i dr.) uz dodeljivanje određenog težinskog faktora svakom fizičkom redu, čime se zapravo dodeljuju relativni prioriteta u opsluživanju poje-

²⁾ Faktor iskorišćenja servera definiše se kao odnos brzine dolazaka paketa, ar , i brzine opsluživanja reda, sr , odnosno $r = ar/sr$.

dinih klasa saobraćaja. Brzina opsluživanja fizičkog reda i , $sr(q_i)$, određuje se iz izraza:

$$sr(q_i) = C * \frac{w(q_i) * ar(q_i)}{w(q_i) * ar(q_i)}, \quad (1)$$

gde je C - ukupan kapacitet izlaznog linka, $w(q_i)$ - težinski faktor za red i , a $ar(q_i)$ - brzina dolazaka paketa u red i . Na ovaj način se postiže bolje iskorišćenje propusnog opsega u odnosu na discipline zasnovane na prioritetima, na račun slabijih performansi kašnjenja i džitera za premijalni saobraćaj, što je ilustrovano simulacijama opisanim u poglavlju 4.4.

Dobar kompromis postiže se kombinovanjem dva pristupa, tako što se fizički red sa paketima iz premijalne klase servisa opslužuje sa apsolutnim prioritetom i rezervisanim propusnim opsegom, dok se metode sa konfigurisanjem težinskih faktora primenjuju za saobraćaj iz ostalih klasa (slika 2).

Veličina reda za premijalnu klasu servisa, q_length (PS), izražena u bajtovima (By), određuje se iz sledećeg izraza:

$$q_length (PS) = (1/8) * [sr (PS) * q_delay (PS)_{MAX}] \quad (2)$$

gde je $sr (PS)$ - brzina opsluživanja reda u b/s, $q_delay (PS)_{MAX}$ - najveće dozvoljeno čekanje u redu izraženo u sekundama.

Za zlatnu klasu servisa sa sigurnim prosleđivanjem može se primeniti formula (2) sa odgovarajućim najvećim dozvoljenim čekanjem u redu, dok za ostale klase servisa redovi mogu da budu duži, sa ciljem da se apsorbiruje eksplozivni saobraćaj i minimizira odbacivanje paketa.

4.3. Upravljanje redovima

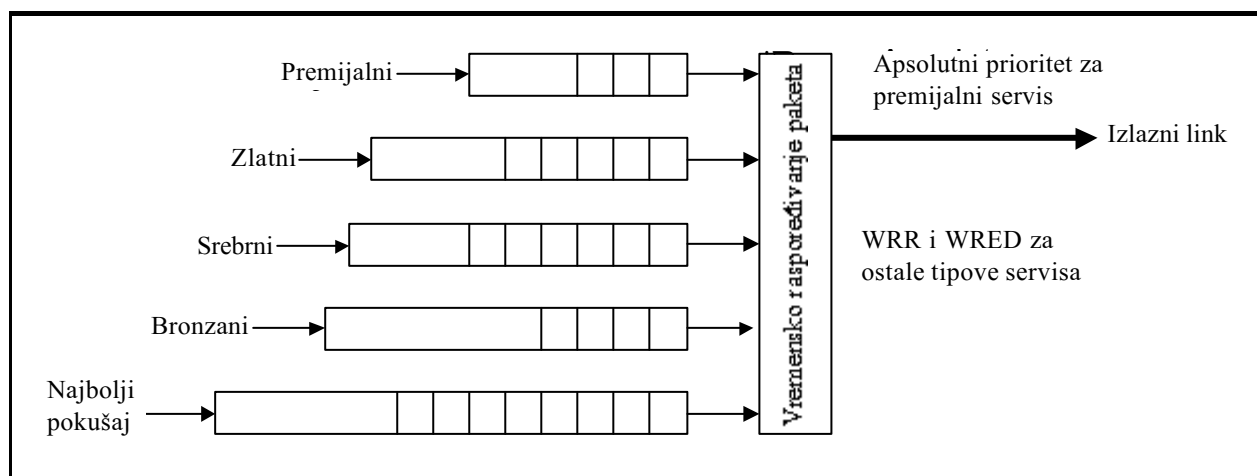
Upravljanje redovima (*queue management*) se primenjuje sa ciljem da se izbegne pojava zagušenja

u mreži ili minimizira njegovo trajanje, a implementira se u svim čvorovima mreže. Premijalni servis treba da se realizuje bez odbacivanja paketa, što se postiže uređivanjem saobraćaja u ulaznom ruteru i obezbeđivanjem rezervnog propusnog opsega. Odbacivanje paketa iz ove klase smatra se ozbiljnom degradacijom servisa i predstavlja alarmni događaj za sistem za nadzor i upravljanje [5].

Među algoritmima za upravljanje redovima u *QoS* IP ruterima najpoznatiji predstavnik je RED (*Random Early Detect*) [11]. Algoritam RED se zasniva na probabilističkom odbacivanju paketa, a podrazumeva estimaciju prosečne popunjenosti reda, a zatim poređenje sa dva konfigurisana praga: donjim i gornjim. Kada je popunjenost reda ispod donjeg praga ne vrši se markiranje paketa. Ako je popunjenost reda između dva praga, paketi se markiraju sa verovatnoćom koja je funkcija prosečne popunjenosti reda. Pri tome se unapred konfiguriraju najveća dozvoljena verovatnoća markiranja paketa. Iznad gornjeg praga markira se svaki paket. Markirani paketi se slučajno odbacuju u trenutku zagušenja.

Postoji više implementacija RED algoritma u komercijalno raspoloživoj mrežnoj opremi [10], kao i njegovih varijanti za podršku više klasa *QoS*. Na primer, algoritam WRED (*Weighted RED*) kombinuje RED sa različitim scenarijima klasifikacije servisa. WRED je vrlo efikasan za klase i pridružene prioritete servisa sa sigurnim prosleđivanjem. Odgovarajućim konfigurisanjem parametara za svaku klasu/prioritet (pragovi i najveća verovatnoća markiranja paketa) postiže se diferencijacija performansi, selektivnim odbacivanjem saobraćaja nižeg prioriteta u trenutku zagušenja u mreži. Ova konstatacija je ilustrovana simulacijama, opisanim u poglavlju 4.4.

Teorijske postavke za konfigurisanje (W)RED parametara je vrlo teško izvesti [8], a praktične pre-



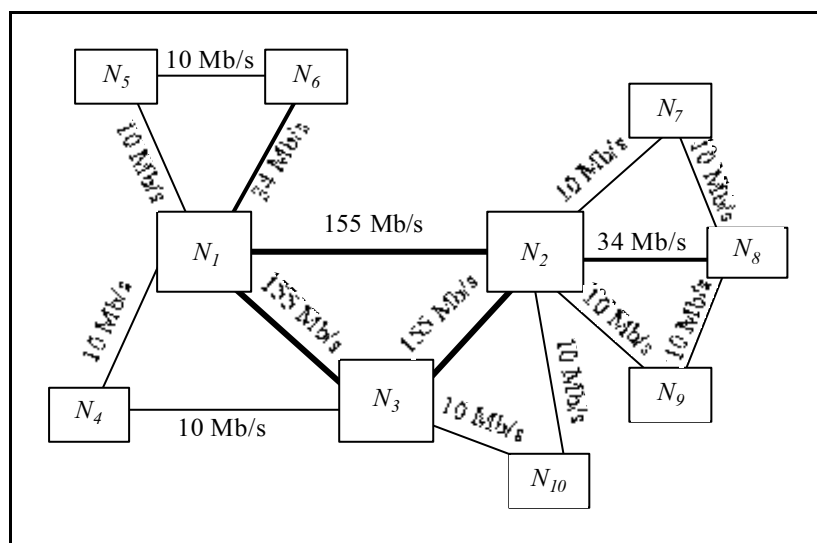
Slika 2. Primer realizacije vremenskog raspoređivanja paketa i upravljanja redovima

poruke, zasnovane na empirijskim podacima u konkretnim mrežama, nisu publikovane. U svakom slučaju, mrežni administrator treba periodično da obavlja podešavanje parametara, na osnovu kooperacije sa TMN entitetom (analiza rezultata nadzora performansi).

4.4. Simulacija i rezultati

Sa ciljem da se ilustruje uticaj izbora i konfigurisanja mehanizama u korisničkoj ravni na diferencijaciju performansi za različite klase/prioritete servisa izvršeno je nekoliko simulacionih eksperimenata. Korišćen je mrežni simulator **ns-2** i alat za vizualizaciju simulacije **NAM** [12]. Rezultati koji se odnose na džiter i kašnjenje dobijeni su uz pomoć analizatora **Trace Graph** [13].

Posmatrana je topologija IP mreže koja je originalno planirana za potrebe prenosa poslovnih podataka [14] i pretpostavljena je njena nadgradnja do multiservisne mreže. Mreža se sastoji od 10 čvorova, kao što je ilustrovano na slici 3. Tri čvora istovremeno vrše funkciju čvorova jezgra i ivičnih čvorova, dok su ostalih sedam ivični čvorovi. Nazivi fizičkih lokacija su izostavljeni jer nisu relevantni za dalju analizu.



Slika 3. Topologija mreže (čvorovi jezgra: N_1-N_3 ; ivični čvorovi: N_4-N_{10})

Klasifikacija telekomunikacionih servisa izvršena je u skladu sa varijantom 1, opisanom u poglavlju 4. Dva nivoa prioriteta za zlatni servis definisana su uz pomoć mehanizma poliranja „token bucket”.

Eksperimenti se odnose na putanje koje potencijalno sadrže „uska grla” (*bottleneck links*), kao što su na primer: $N_6-N_1-N_2-N_7$, $N_8-N_2-N_3-N_4$, $N_6-N_1-N_3-N_{10}$ i dr.

U prvoj grupi eksperimenata ispitivane su vrednosti najdužeg čekanja na opsluživanje u čvoru jezgra koji prosleđuje pakete preko kritičnog izlaznog linka (npr. N_2-N_7 , N_3-N_4 , N_3-N_{10}) i najveće varijacije džitera.

Pretpostavljeni su FTP (fajl transfer) izvori saobraćaja sa veličinama paketa 160 By i 1 000 By i ulaznim protokom 512 kb/s. FTP izvori koriste transportni protokol TCP, sa veličinom prozora 25. Za premijalni servis broj izvora saobraćaja (broj tokova u agregatu) variran je od 2 do 10, a za zlatni servis i servis najboljeg pokušaja pretpostavljeno je po 5 tokova saobraćaja po agregatu. Najveća vrednost faktora iskorišćenja servera je 0,95 (nema odbacivanja paketa iz bilo koje klase servisa).

Vremensko raspoređivanje paketa izvršeno je uz pomoć sledećih disciplina:

- Opsluživanje po prioritetima, pri čemu je raspoloživi propusni opseg za svaku klasu saobraćaja po 1/3 ukupnog propusnog opsega linka;
- *Weighted Round Robin* - WRR (6,3,1), sa težinskim faktorima 6, 3 i 1 za premijalni, zlatni i servis najboljeg pokušaja, respektivno;
- WRR (4,3,3) - sa težinskim faktorima 4, 3 i 3 za premijalni, zlatni i servis najboljeg pokušaja, respektivno.

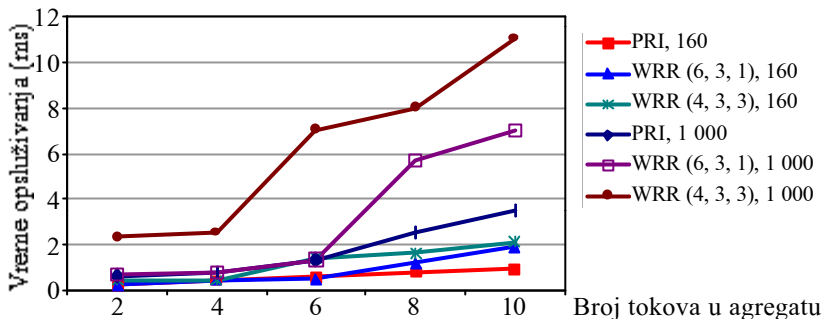
Dužine fizičkih redova su 4 000 By za premijalni servis (najveće dozvoljeno kašnjenje iznosi 10 ms), 10 000 By za zlatni servis i 15 000 By za servis najboljeg pokušaja.

Na slikama 4 i 5 prikazani su najduže vreme opsluživanja odnosno najveća varijacija džitera u čvoru jezgra u funkciji broja tokova u agregatu premijalnog servisa, za različite discipline opsluživanja i veličine paketa.

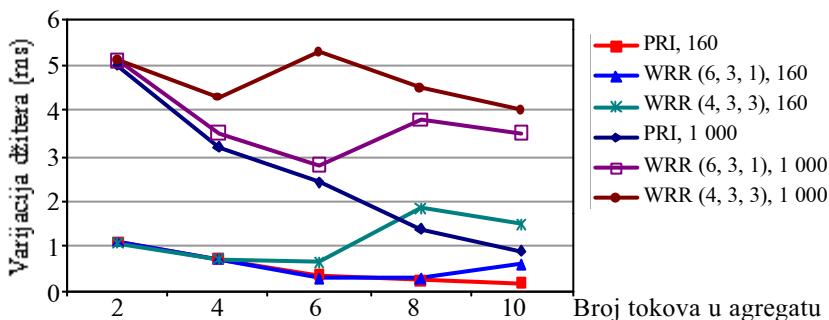
Najbolji rezultati dobijeni su za opsluživanje po prioritetima, iako premijalni servis ne koristi više od 1/3 raspoloživog propusnog opsega linka. Za disciplinu opsluživanja sa prioritetima i za WRR (6,3,1) zadovoljen je zahtev da čekanje na opsluživanje u redu ne prelazi 10 ms. Duži paketi imaju u apsolutnom iznosu veći džiter i kašnjenje, s obzirom na duže vreme obrade u čvoru. Međutim, relativno tj. u odnosu na trajanje paketa, obe veličine su kritičnije za kraće pakete. Za ulazni protok od 512 kb/s, trajanja paketa (*packet-time*, T_p) su 2,5 ms i 15,6 ms za dužine paketa 160 By i 1 000 By, respektivno. U slučaju opsluživanja po prioritetima varijacija džitera ne prelazi vrednost 0,5 T_p za

manje pakete, odnosno 0,3 T_p za veće pakete. U realnoj situaciji agregat može da bude kombinacija paketa različitih veličina, što je nepovoljniji slučaj za kraće pakete.

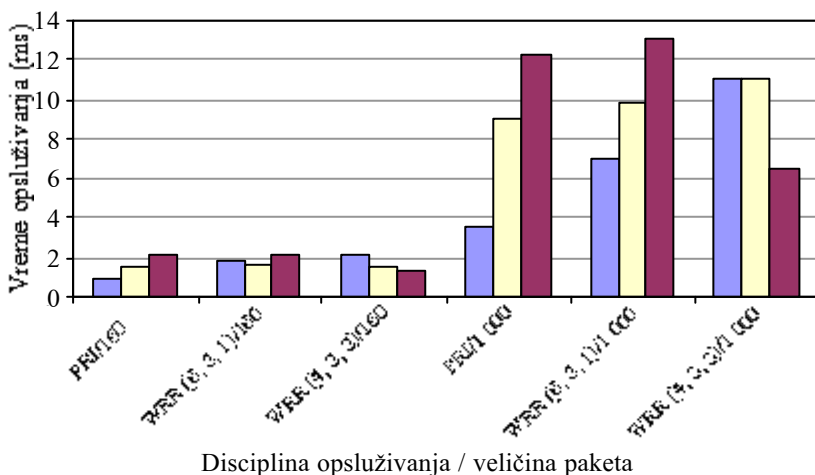
Na slikama 6 i 7 prikazani su najduže vreme opsluživanja odnosno najveća varijacija džitera u čvoru jezgra za različite klase servisa, različite discipline opsluživanja i veličine paketa od 160 By i 1 000 By.



Slika 4. Najduže vreme opsluživanja u čvoru jezgra u funkciji broja tokova u agregatu (premijalni servis) za različite discipline opsluživanja i veličine FTP paketa 160 By i 1 000 By



Slika 5. Najveća varijacija džitera u čvoru jezgra u funkciji broja tokova u agregatu (premijalni servis) za različite discipline opsluživanja i veličine FTP paketa 160 By i 1 000 By



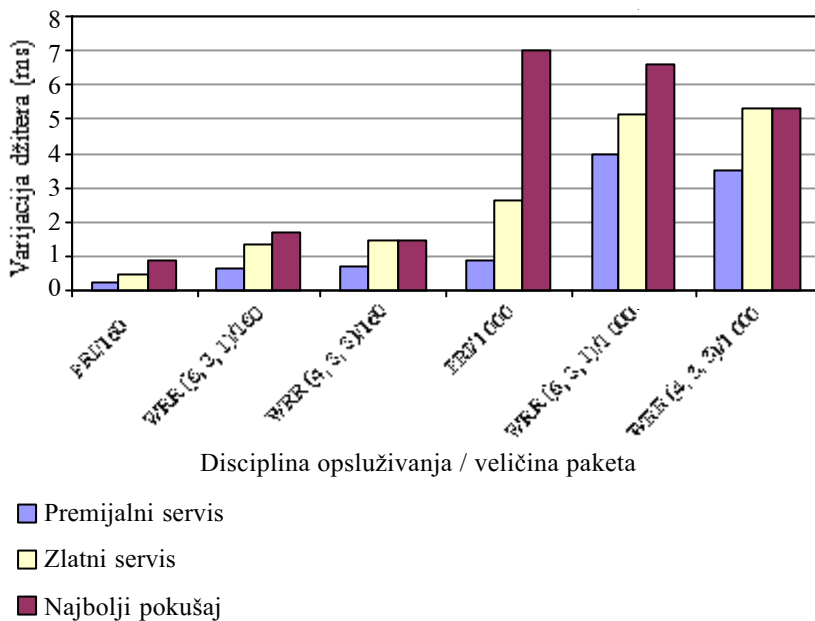
Slika 6. Najduže vreme opsluživanja u čvoru jezgra za različite klase servisa: 10 tokova za premijalni servis i po 5 tokova za zlatni i servis najboljeg pokušaja

Pretpostavljeni faktor iskorišćenja servera je $r = 0,95$, pri čemu se 10 tokova saobraćaja markira za premijalni servis, a po 5 za zlatni servis i servis najboljeg pokušaja.

Rezultati simulacije pokazuju da se dobitak pri opsluživanju po prioritetima za tokove markirane za premijalni servis ostvaruje na račun tokova markiranih za druge klase servisa. Slično tome, WRR disciplina obezbeđuje zadovoljavajuće performanse kašnjenja i džitera za premijalni servis samo ako je pripadajući težinski faktor veliki. Rezultati posredno ukazuju na neophodnost striktnog dodeljivanja srazmerno malog dela ukupnog propusnog opsega linka tokovima premijalnog servisa, kojima se pri tome daje apsolutni prioritet ili veliki težinski faktor pri opsluživanju. Na taj način se postiže da premijalni servis ni u jednom trenutku ne blokira prenos saobraćaja iz ostalih klasa. Drugim metodama (organizovanje saobraćaja, rutiranje QoS) može se postići ravnomerno saobraćajno opterećenje svih fizičkih linkova u mreži.

Druga grupa eksperimenata se odnosi na prevenciju zagušenja u mreži. Pretpostavljeno je po 5 FTP izvora po klasi servisa, sa dužinom paketa 160 By i primenjen je transportni protokol TCP. Disciplina opsluživanja redova je WRR (6,3,1). U skladu sa pristupom izloženim u poglavlju 4.3. nema odbacivanja paketa iz premijalnog servisa u izlaznim redovima, jer se u procesu poliranja u ulaznom ruteru dozvoljava pristup u mrežu samo paketima koji su u definisanom profilu.

Za tokove markirane za zlatni servis i servis najboljeg pokušaja pretpostavljen je ulazni protok 1,2 Mb/s, što može dovesti do zagušenja linka najmanjeg kapaciteta



Slika 7. Najveća varijacija džitera u čvoru jezgra za različite klase servisa: 10 tokova za premijalni servis i po 5 tokova za zlatni i servis najboljeg pokušaja

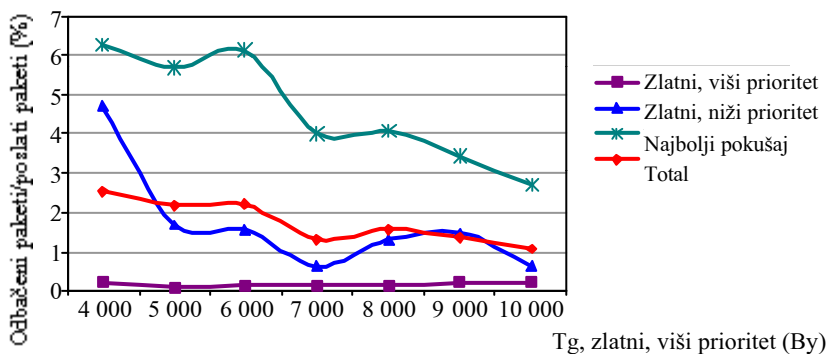
(opterećenje servera je do 45 % veće od brzine opsluživanja). Parametri „token bucket” mehanizma poliranja su konfigurisani tako da se približno 30 % ulaznog saobraćaja za zlatni servis markira za niži prioritet. Algoritam WRED je primenjen za zlatni servis i servis najboljeg pokušaja. Pretpostavljene su veličine fizičkih redova od 10 000 By. Konfigurabilni WRED parametri su: donji i gornji pragovi i najveća verovatnoća markiranja paketa.

U prvom eksperimentu ispitivan je uticaj varijacije WRED pragova na procenat odbačenih paketa. Pretpostavljene su sledeće relacije: gornji prag je dvostruko veći od donjeg praga za sve klase servisa, pragovi zlatnog servisa višeg prioriteta su 1,33 puta veći od odgovarajućih pragova zlatnog servisa nižeg prioriteta, a 2 puta veći od pragova servisa najboljeg pokušaja. WRED verovatnoća markiranja paketa je ista za sve klase servisa i iznosi 0,03.

Rezultati simulacije su prikazani na slici 8. Sa povećanjem vrednosti pragova procenat ukupno odbačenih paketa (kriva „total”) opada više od 2,5 puta. Pri tome je za zlatni servis višeg prioriteta procenat odbačenih paketa približno konstantan (između 0,1 % i 0,2 %), što je 5 do 10 puta manje od procenta odbačenih paketa markiranih za niži prioritet. Za veće vrednosti pragova procenat odbačenih paketa markiranih za zlatni servis nižeg prioriteta približno prati procenat ukupno odbačenih paketa. Za servis najboljeg pokušaja, za koji su konfigurisani srazmerno najniži pragovi, evidentno je opadanje procenta odbačenih paketa sa povećanjem vrednosti pragova. Iz toga se može zaključiti da se podešavanjem gornjih i donjih pragova i uspostavljanjem odgovarajućeg odnosa između vrednosti ovih parametara za pojedine klase servisa može postići dobra diferencijacija performansi.

U sledećem eksperimentu je ispitivan uticaj konfigurisanja najveće dozvoljene WRED verovatnoće markiranja paketa na procenat odbačenih paketa. Pretpostavljen je isti odnos veličine pragova za pojedine klase servisa kao u prethodnom eksperimentu, pri čemu su donji i gornji pragovi: 4 000/8 000 By za zlatni servis višeg prioriteta, 3 000/6 000 By za zlatni servis nižeg prioriteta i 2 000/4 000 By za servis najboljeg pokušaja. Najveća verovatnoća markiranja paketa za zlatni servis višeg prioriteta je $P_{mark1} = 0,03$. Verovatnoće markiranja paketa za zlatni servis nižeg prioriteta, P_{mark2} , i servis najboljeg pokušaja, P_{mark3} , su varirane prema sledećoj relaciji:

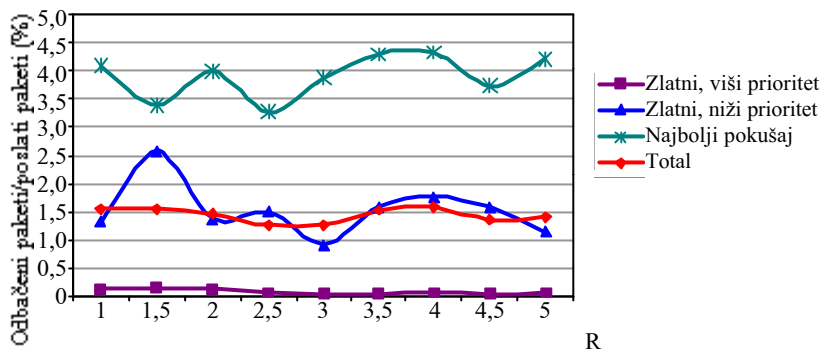
$$P_{mark3} = R * P_{mark2} = R2 * P_{mark1}, \quad (3)$$



Slika 8. Procenat odbačenih paketa u funkciji promene WRED pragova

gde faktor R uzima vrednosti iz skupa {1,5}.

Rezultati simulacije prikazani su na slici 9. Procenat svih odbačenih paketa (kriva „total”) je približno konstantan. Međutim, za vrednosti $R \geq 3$ postignuta je vrlo dobra diferencijacija performansi, jer procenat odbačenih paketa iz zlatnog servisa višeg prioriteta opada približno za red veličine i iznosi 0,02 - 0,03 %, prvenstveno na račun povećanog procenta odbačenih



Slika 9. Procenat odbačenih paketa u funkciji odnosa WRED verovatnoće markiranja između pojedinih klasa

paketa markiranih za najbolji pokušaj. Takođe, za $R \geq 2$, procenat odbačenih paketa markiranih za zlatni servis nižeg prioriteta je reda veličine procenta ukupno odbačenih paketa.

5. IZBOR MEHANIZAMA U KONTROLNOJ RAVNI

Funkcije mehanizama u kontrolnoj ravni su konfigurisanje čvorova mreže, kontrola pristupa tokova saobraćaja mreži i upravljanje logičkim resursima.

Kontrolom pristupa se novom IP toku dozvoljava prolaz kroz mrežu samo ako se time ne remeti definisani nivo kvaliteta servisa za tokove koji su već prisutni u mreži. Procedura kontrole pristupa može da bude statička, dinamička ili zasnovana na merenjima.

Poznat mehanizam za upravljanje resursima u DiffServ domenu je broker propusnog opsega (*bandwidth broker*), a to je logički entitet koji kontroliše ivične rutere, dodeljuje resurse unutar domena i uspostavlja sporazume o nivou servisa sa susednim domenima [3], [15]. Broker propusnog opsega se može realizovati kao zaseban uređaj ili u sklopu opreme za nadzor i upravljanje mrežom. Koncept se može primeniti i na mreže sa MPLS tehnologijom, kao i na kombinacije DiffServ i MPLS.

Koncepcija kontrole resursa zasnovana na nekoj unapred definisanoj politici operatora ili korporacije (*Policy based networking*) je noviji pristup automatizovanju nadzora i upravljanja mrežom [16]. Politika se definiše posredstvom skupova pravila, pomoću kojih se upravlja odlukama o ponašanju mreže, uključivanju grupa elemenata mreže, funkcionalnim celinama TMN-a, resursima mreže, servisima i grupama korisnika. Na primer, određena politika upravljanja propusnim opsegom može se primenjivati na definisani skup rutera, politika kvaliteta servisa sadrži pravila za primenu i kontrolu mehanizama *QoS* i dr. Definisane okvirne zadatke obuhvata

konceptualni, funkcionalni i informacioni model, sa ciljem da se kroz standardizovana rešenja obezbedi dinamičko upravljanje i tako doprinese skalabilnosti mreže.

U ovom radu ne daje se striktna preporuka za izbor mehanizama u kontrolnoj ravni. Razlozi za to su stanje u standardizaciji (mali broj standarda ili je rad još u toku) i nedovoljna praktična iskustva. Može se zaključiti da se implementacija mehanizama u kontrolnoj ravni još uvek pretežno zasniva na specifičnim rešenjima koja nude pojedini proizvođači mrežne opreme (*vendor-specific solutions*).

6. ORGANIZOVANJE SAOBRAĆAJA I RUTIRANJE KVALITETA SERVISA

Organizovanje saobraćaja - TE (*Traffic Engineering*) je proces uređivanja tokova saobraćaja kroz mrežu, sa ciljem da se izbegne zagušenje ili minimizira njegovo trajanje i tako optimizuju performanse operativne mreže u smislu povećanja raspoloživosti i propusne moći, minimiziranja gubitka paketa i optimizacije iskorišćenja resursa. Koncept TE je razvijen da bi se eliminisali nedostaci današnjeg Interneta, koji prvenstveno proističu iz karakteristika protokola i algoritama rutiranja. Prvi nedostatak je što se rutiranje saobraćaja u domenu odvija po najkraćim putanjama (*paths*) od ulaznog do izlaznog rutera, što može da prouzrokuje neravnomerno saobraćajno opterećenje mreže, odnosno zagušenje pojedinih linkova. Drugi nedostatak je što se optimizacije putanja vrše lokalno, na nivou pojedinačnih čvorova, bez globalnog sagledavanja uticaja na resurse celokupne mreže.

Koncept **rutiranja *QoS*** se odnosi na algoritme i protokole koji pronalaze i selektuju optimalne putanje za tokove IP saobraćaja, na osnovu određenog poznavanja raspoloživosti resursa u čvorovima, pri čemu treba da budu zadovoljeni zahtevi za *QoS*. Nadgradnja rutiranja *QoS* uzimanjem u obzir i drugih uslova ili ograničenja (pored zahteva za *QoS*) pri izboru putanja, kao što je raspoloživost linkova ili određena politika administratora, dovela je do razvoja koncepta *constrained-based* rutiranja.

***Constrained-based* rutiranje** pruža značajne prednosti za organizovanje saobraćaja, u smislu podrške *QoS* i efikasnog korišćenja mrežnih resursa. Ono je komplementarno sa arhitekturom DiffServ, koja specificira samo ponašanje pojedinačnih čvorova mreže. Nedostaci *constrained-based* rutiranja su kompleksna implementacija i mala skalabilnost: al-

goritmi rutiranja mogu da budu veoma složeni, neophodno je proširivanje strukture tabela rutiranja, kao i kooperacija sa TMN entitetom radi blagovremenog prikupljanja informacija o stanju mrežnih resursa.

MPLS tehnologija pruža veoma dobre mogućnosti za TE, koje će ovde biti ukratko izložene, dok se detaljna razmatranja mogu pronaći npr. u [17]. U MPLS mreži, moguće je uspostavljanje više virtuelnih putanja - LSP (*Label Switched Path*) između ulaznog i izlaznog rutera, po različitim fizičkim putevima. LSP-ovima se mogu pridružiti tzv. atributi - zahtevi za rezervisanje propusnog opsega, administrativna ograničenja (npr. zabrana korišćenja pojedinih fizičkih linkova), prioritet u dodeljivanju resursa mreže, atributi fizičkih linkova i dr. Time se omogućava i efikasno kombinovanje sa *constrained-based* protokolima rutiranja, koji mogu da dobiju precizne i ažurne informacije o saobraćaju po svakom LSP-u.

Moguć pristup organizovanju saobraćaja u MPLS mreži sa više nivoa kvaliteta servisa, koji je u potpunosti primenljiv na elektroprivredne telekomunikacione mreže, je da se između svakog para rutera (ulaz/izlaz) definišu po dva LSP-a, od kojih se jedan koristi samo za saobraćaj koji pripada premijalnoj klasi servisa, a drugi za ostale klase servisa [8]. Da bi se izbegla koncentracija premijalnog saobraćaja po pojedinim fizičkim linkovima, postavlja se gornja granica propusnog opsega za svaki pojedinačni link. Raspoloživost premijalnog servisa može se povećati korišćenjem MPLS mehanizma brzog preusmeravanja (*fast reroute*), koji podrazumeva mogućnost automatskog rekonfigurisanja LSP-a u slučaju ispada nekog fizičkog linka ili rutera. Prin-

cip primene mehanizma brzog preusmeravanja je ilustrovan na slici 10 i predstavlja, u kontekstu elektroprivrednih mreža, značajnu mogućnost za zaštitu i ispunjenje zahteva za raspoloživost vremenski kritičnih operativnih i poslovnih servisa. Proces brzog preusmeravanja traje tipično 50-100 ms, a saobraćaj se prenosi po rekonfigurisanom LSP-u do oporavka od ispada ili dok se TE mehanizmom ne proračuna novi LSP sa optimalnim atributima za premijalnu klasu servisa.

7. POVEZIVANJE SA DRUGIM IP MREŽAMA

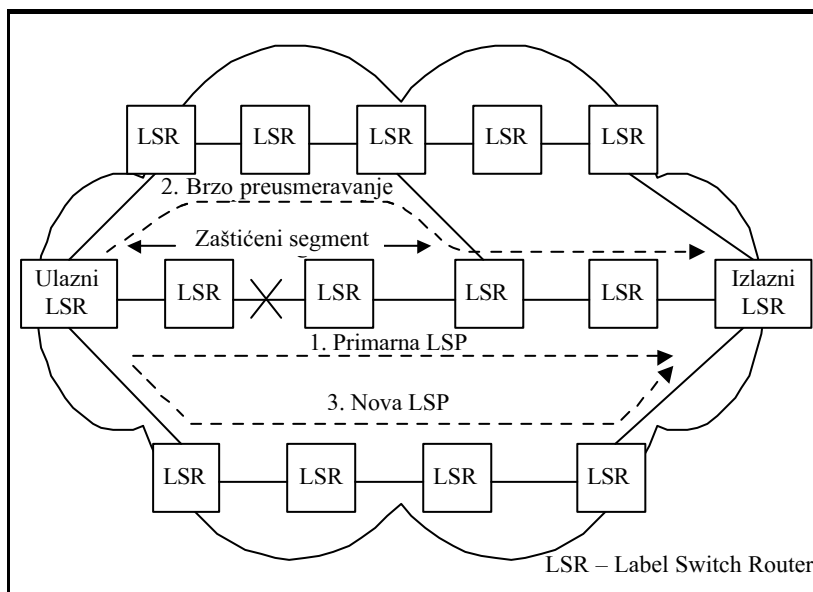
Koncepti projektovanja i realizacije *QoS* IP mreže razmatrani u prethodnim poglavljima se odnose na jedan IP domen (*intra-domain aspects*). Drugim rečima, dosada su razmatrani aspekti realizacije *QoS* unutar telekomunikacionog sistema jedne elektroprivredne organizacije. Pored povezivanja na globalni Internet, za svaki elektroprivredni telekomunikacioni sistem je od posebnog interesa povezivanje sa telekomunikacionim sistemima drugih elektroprivreda.

Ovde će biti ukratko razmotreni zahtevi i uslovi realizacije *QoS* između više međusobno povezanih IP domena (*inter-domain aspects*). Generalno su bitni sledeći aspekti:

1. Pre dogovora o načinu realizacije *QoS* između više domena, moraju da budu definisana sva rešenja unutar pojedinih domena i poznate karakteristike svakog od njih u pogledu performansi, profila saobraćaja i dr.
2. Realizacija interfejsa sa susednim domenom obuhvata preslikavanje dogovorenih karakteristika na konkretna rešenja *QoS* unutar domena, kao što je preslikavanje klase servisa, konfigurisanje kondicionera saobraćaja i dr.

3. Ciljno rešenje je uvođenje standarda za međusobno povezivanje *QoS* domena, ali su, kao prelazna rešenja, prihvatljiva i ona koja se zasnivaju na specifičnim bilateralnim dogovorima između pojedinih operatora.

Slično kao i u slučaju sklapanja ugovora između provajdera i pojedinačnih biznis/rezidencijalnih korisnika, sporazum o nivou servisa - SLA (*Service Level Agreement*) je osnov za definisanje kvaliteta servisa između dva IP domena. SLA obuhvata: definisanje profila za tokove IP saobraćaja, odgovornosti svakog operatora u smislu



Slika 10. Primer zaštite i TE za premijalni saobraćaj u mreži sa MPLS tehnologijom

raspoloživosti servisa i performansi (propusna moć, verovatnoća gubitka paketa, kašnjenje, džiter), metode merenja, posledice u slučaju narušavanja sporazuma (ako nije realizovan dogovoreni nivo servisa ili su generisane veće količine saobraćaja od dogovorenih), cene usluga i način tarifiranja.

SLA treba da bude definisan imajući u vidu ciljni (*end-to-end*) nivo kvaliteta servisa koji treba postići, uzimajući pri tome u obzir karakteristike pojedinačnih domena.

U opštem slučaju SLA se može ugovarati statički ili dinamički. Statički SLA dogovara se periodično, npr. mesečno ili godišnje. Za dinamički SLA koristi se signalizacioni protokol za dogovaranje o servisu na zahtev. Tehnički aspekti ugovora o servisu opisuju se u specifikaciji nivoa servisa - SLS (*Service Level Specification*). Pokušaj formalizovanja i standardizacije specifikacija opisan je u [18], a obuhvata definisanje forme specifikacije i protokola o dogovaranju SLS. Taj rad se, međutim, zasniva na pretpostavci da će IP servisi biti raspoloživi preko javne infrastrukture, koja će se potpuno ili delimično sastojati od DiffServ mrežnih elemenata.

Na slici 11 je ilustrovan primer procesa dinamičkog ugovaranja SLA između dva domena posredstvom brokera propusnog opsega i prenosa informacija sa dogovorenim nivoom kvaliteta servisa. Proces ugovaranja SLA se sastoji iz sledećih faza:

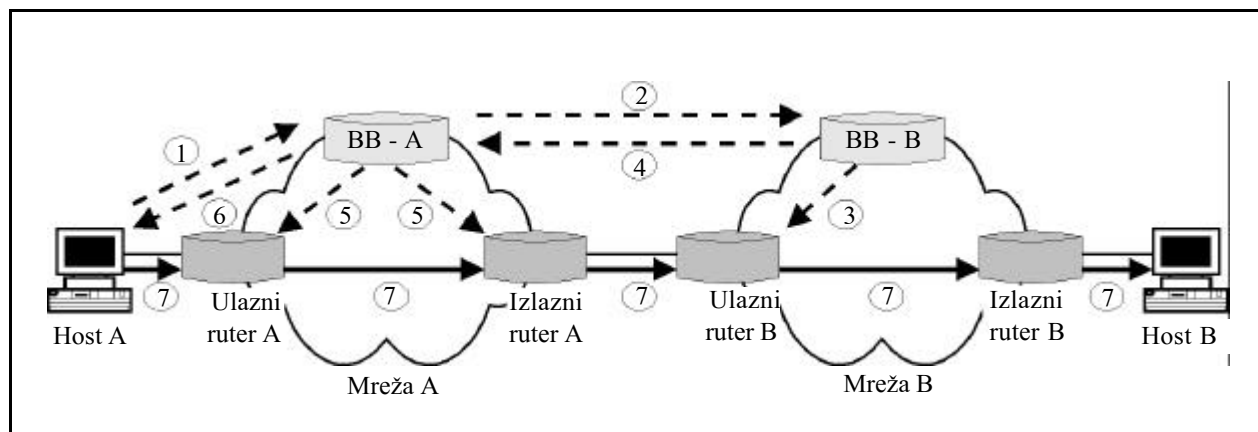
1. Host A, koji zahteva određeni nivo kvaliteta servisa, šalje odgovarajuću signalizacionu poruku (npr. posredstvom protokola za rezervaciju resursa - RSVP) lokalnom brokeru propusnog opsega, BB-A.
2. Broker BB-A donosi odluku o pristupu. Ako je pristup dozvoljen formira i prosleđuje odgovarajuću signalizacionu poruku brokeru domena B (BB-B). U suprotnom, obaveštava host A o odbijanju zahteva i proces se završava (tačka 6).

3. Broker domena B donosi odluku o pristupu. Ako je pristup dozvoljen, BB-B konfigurira parametre ulaznog rutera domena B za klasifikaciju paketa i kondicioniranje saobraćaja (u skladu sa informacijama iz signalizacione poruke).
4. Broker BB-B šalje signalizacionu informaciju o ishodu kontrole pristupa brokeru BB-A.
5. Ako je dobio pozitivan odgovor, BB-A konfigurira parametre svojih ivičnih rutera. U suprotnom, obaveštava host A o odbijanju zahteva (tačka 6).
6. Broker A obaveštava host o ishodu kontrole pristupa.

Ako je ishod kontrole pristupa pozitivan počinje proces prenosa informacija (faza 7 na slici 11), u kome se, u svakom domenu zasebno, primenjuju mehanizmi *QoS* u korisničkoj ravni, sa odgovarajuće konfigurisanim parametrima.

8. ZAKLJUČAK I BUDUĆI RAD

S obzirom na zahteve za skalabilnost, kvalitet servisa u IP mrežama razmatra se u kontekstu arhitekture sa diferenciranim servisima (*DiffServ*), mreža sa *MPLS* tehnologijom, kao i njihovih kombinacija. Klasifikacija servisa tipično se obavlja na bazi dva modela (osim najboljeg pokušaja): premijalnog servisa sa malim kašnjenjem, džiterom i garantovanim vršnim protokom i servisa sa sigurnim prosleđivanjem, u okviru koga se može definisati nekoliko klasa sa različitim nivoima prioriteta. Poželjna je takva politika administracije mreže u kojoj je procenat premijalnog saobraćaja po svakom fizičkom linku relativno mali, čime se postižu dobre performanse kašnjenja i džitera s obzirom na prioritet koji se ovom servisu daje u procesu obrade paketa u čvorovima mreže. Mehanizmi u kontrolnoj ravni određuju politiku pristupa novih tokova u mrežu i način upravljanja mrežnim resursima. Organizovanje saobraćaja i rutiranje kvaliteta servisa su „makro-kon-



Slika 11. Primer uspostavljanja dinamičkog SLA: 1-6 - signalizacija; 7 - prenos informacija

trojni” mehanizmi koji omogućavaju kontrolu ravnomernog korišćenja svih resursa mreže. MPLS tehnologija pruža veoma dobre mogućnosti za organizovanje saobraćaja.

Mada postoje otvorena pitanja koja se posebno odnose na standardizovana rešenja kontrolnih mehanizama i QoS pri povezivanju više nezavisnih IP domena, postoji solidna osnova (uključujući i komercijalno raspoloživu mrežnu opremu) za projektovanje i izgradnju elektroprivrednih multiservisnih IP mreža sa više nivoa kvaliteta servisa, ili za postepenu nadgradnju postojećih mreža funkcijama QoS. Blagovremeno planiranje kapaciteta, obezbeđivanje rezerve u resursima za prioritetni saobraćaj, pravilan izbor mehanizama QoS i adekvatno konfigurisanje pridruženih parametara, kao i redovno održavanje, su najbitnije komponente za pružanje servisa traženog nivoa kvaliteta.

Iako su ovim radom obuhvaćeni brojni aspekti realizacije IP QoS, razmatranja kvaliteta servisa u elektroprivrednim IP mrežama svakako nisu iscrpljena. S obzirom na činjenicu da veliki broj aplikacija koje zahtevaju visok nivo QoS podrazumeva grupnu komunikaciju, budući rad biće usmeren na rešavanje kvaliteta servisa u multicast komunikaciji, uzimajući u obzir aspekte unutar jednog domena i povezivanje više nezavisnih domena.

Takođe treba istaći da ovim radom nisu mogli da budu obuhvaćeni vrlo složeni aspekti sigurnosti podataka (security). Sistem sigurnosti generalno postavlja veoma kompleksne zahteve pri projektovanju korporacijskih mreža sa IP tehnologijom i mora se rešavati na nekoliko nivoa: fizičkom, softverskom i organizacionom. Tehnologija zaštite multiservisne mreže mora da uzme u obzir širok spektar raznorodnih zahteva: od efikasnih i pouzdanih kriptografskih algoritama, preko protokola za transakciono orijentisane aplikacije (e-commerce) do pouzdanog poslovnog telefonskog sistema.

9. LITERATURA

- [1] CIGRÉ WG35.07, POWER SYSTEM COMMUNICATION IN THE HIGH SPEED ENVIRONMENT, December 1996.
- [2] CIGRÉ WG35.07. TB153, THE USE OF IP TECHNOLOGY IN THE POWER UTILITY ENVIRONMENT, April 2000.
- [3] M. Stojanović, KVALITET SERVISA U ELEKTROPRIVREDNIM TELEKOMUNIKACIONIM

MREŽAMA SA TEHNOLOGIJOM INTERNET PROTOKOLA: ARHITEKTURE I MEHANIZMI IMPLEMENTACIJE, Elektroprivreda, br. 3 (2002), str. 41-48.

- [4] S. Blake et al., AN ARCHITECTURE FOR DIFFERENTIATED SERVICES, RFC 2475, IETF, Dec. 1998.
- [5] B. Davie et al., AN EXPEDITED FORWARDING PHB, RFC 3246, IETF, March 2002.
- [6] J. Heinanen et al., ASSURED FORWARDING PHB GROUP, RFC 2597, IETF, June 1999.
- [7] X. Xiao and L. M. Ni, INTERNET QOS: A BIG PICTURE, IEEE NETWORK, vol. 13, no. 2, March/April 1999, pp. 8-18.
- [8] X. Xiao et al., A PRACTICAL APPROACH FOR PROVIDING QOS IN THE INTERNET BACKBONE, IEEE Comm. Magazine, vol. 40, no.12, Dec. 2002, pp. 56-62.
- [9] E. Rosen et al., MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING ARCHITECTURE, RFC 3031, January 2001.
- [10] H. J. Chao, X. Guo, QUALITY OF SERVICE CONTROL IN HIGH-SPEED NETWORKS, John Wiley & Sons, 2002. (on-line version)
- [11] B. Braden et al., RECOMMENDATIONS ON QUEUE MANAGEMENT AND CONGESTION AVOIDANCE IN THE INTERNET, RFC 2309, IETF, April 1998.
- [12] Network Simulator ns2 and Network Animator NAM, <http://www.isi.edu/nsnam>
- [13] J. Malek, Trace Graph - Network Simulator ns Trace Files Analyzer, <http://www.geocities.com/trace-graph>
- [14] GENERALNI PLAN TELEKOMUNIKACIONOG SISTEMA EPCG A.D, Institut Mihajlo Pupin, Beograd, 2000.
- [15] K. Nichols et al., A TWO-BIT DIFFERENTIATED SERVICES ARCHITECTURE FOR THE INTERNET, RFC 2638, IETF, July 1999.
- [16] POLICY-BASED NETWORKING, IEEE Networks, dedicated issue, vol. 16, no. 2, March/April 2002.
- [17] INTERNET TRAFFIC ENGINEERING, IEEE Networks, dedicated issue, vol. 14, no. 2, March/April 2000.
- [18] D. Goderis et al., SERVICE LEVEL SPECIFICATION SEMANTICS, PARAMETERS AND NEGOTIATION REQUIREMENTS, June 2001, <http://www.ist-tequila.org/sls>

Rad je primljen u uredništvo 24. 07. 2003. godine



Mirjana Stojanović je rođena 1962. godine u Beogradu. Diplomirala je 1985. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Odseku za elektroniku, smer telekomunikacije. Magistrirala je 1993. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer telekomunikacije, sa radom iz oblasti implementacije OSI sistema.

Od 1985. godine radi u Institutu Mihajlo Pupin, na poslovima istraživanja, razvoja i projektovanja u oblasti telekomunikacionih mreža. Učestvovala je ili rukovodila realizacijom više tehničkih rešenja među kojima su značajnija: uređaji za prenos podataka i govora i odloženu isporuku podataka u sistemima specijalne namene, VOCO sistem govornih komunikacija za elektroprivrednu telefonsku mrežu i 2 Mb/s jednoparični HDSL modem PP-HTU2, sa sistemom za nadzor i upravljanje. U oblasti planiranja i projektovanja učestvovala je ili rukovodila izradom projekata telekomunikacionih mreža u sistemima specijalne namene, Telekomu Srbija, putne privrede i elektroprivrede.

Problemima koji se odnose na upravljanje saobraćajem i kvalitet servisa bavi se od 1997. godine u kontekstu multiservisnih mreža sa ATM, IP-over-ATM i IP tehnologijom. Autor je više od 30 radova objavljenih na domaćim i inostranim konferencijama i u domaćim časopisima.

Od profesionalnih zaduženja član je Inženjerske komore Srbije, član međunarodne organizacije IEEE i član upravnog odbora evropske COST akcije 279, koja se bavi analizom i projektovanjem multiservisnih mreža.

Nestacionarna stanja zagrevanja/hlađenja izolacije podzemnih kablovskih vodova

Prethodno saopštenje
UDK: 621.315.2; 621.23

Rezime:

U radu je formiran matematički model za analizu nestacionarnih stanja zagrevanja/hlađenja koncentričnih slojeva izolacije kablovskih podzemnih vodova. Rešenje dobijene diferencijalne jednačine bazira na Besselovim funkcijama, i zavisi od vremena i prostorne radijalne koordinate. Na konkretnom primeru izvršeno je upoređenje dobijenog modela sa već postojećim matematičkim modelima pomoću kojih se analiziraju nestacionarna stanja zagrevanja/hlađenja provodnika kablovskih podzemnih vodova. Pored toga, pokazano je kako oblik temperaturnih krivih nestacionarnog zagrevanja/hlađenja zavisi od broja karakterističnih koeficijenata sadržanih u dobijenom rešenju.

Ključne reči: nestacionarno zagrevanje/hlađenje, izolacija, energetski kabl, Besselove funkcije

Abstract:

UN-STATIONARY HEATING/COOLING STATES OF CABLE INSULATION IN UNDERGROUND LINES

Mathematical model for un-stationary state analysis of concentric section insulation heating/cooling, in the case of the underground cable lines, is presented in this paper. The solution of the differential equation is obtained on the basis of Bessel's functions. This model enables the following of transient thermal phenomena as the function of time and radial space coordinate. On a concrete example, the obtained model is compared with other mathematical models suitable for the analysis of transient thermal phenomena at the conductor of underground cable line. Furthermore, the forms of transient thermal phenomena are presented to depend on the number of characteristic coefficients in the obtained solution.

Key words: un-stationary heating/cooling, insulation, power cable, Bessel's functions

1. UVOD

Temperaturni proces zagrevanja/hlađenja energetskih kablova pojavljuje se kao posledica eksploatacije istih na svim naponskim nivoima. Svaku promenu opterećenja prati odgovarajući prelazni proces: smanjenju opterećenja odgovara nestacionarni proces hlađenja, a povećanju opterećenja odgovara

nestacionarni proces zagrevanja energetskog kabla. U domaćoj i stranoj literaturi postoji veliki broj matematičkih modela koji su formirani za potrebe analize nestacionarnih temperaturnih procesa kod cilindričnih tela [3,7], energetskih kablova [2,6,8] i nadzemnih vodova [7,9,10]. Postavljeni matematički modeli za analizu nestacionarnih temperaturnih procesa, kako kod podzemnih kablovskih, tako i kod

As. mr Dardan Klimenta, dipl. ing. el. – Fakultet tehničkih nauka, 38 220 Kosovska Mitrovica, Kneza Miloša 7

klasičnih nadzemnih vodova, najčešće se baziraju na Besselovim funkcijama [2,3,7,8,10] ili eksponencijalnim funkcijama [5,6,7,8,9].

Na kompleksnost analize nestacionarnih temperaturnih procesa i formiranje matematičkih modela utiče složenost geometrije problema podzemnih energetskih kablova, [1]. Pored toga, od velikog značaja za analizu ovih procesa je i priroda prolaza toplote između elemenata konstrukcije samog kabla i sa kabla na okolno zemljište. Poznato je da toplota sa površine kabla na okolno zemljište prelazi kombinovano, putem kondukcije, konvekcije i radijacije. Funkcija temperature pored vremenske, sadrži aksijalnu i radijalnu komponentu, [9].

Zbog svega toga, analiza se često vrši uvođenjem neizbežnih uprošćenja koja za inženjersku praksu daju zadovoljavajuće rezultate ili se jednostavno postupa prema standardu koji definiše ovu problematiku, [4,5]. Jedno od najčešće upotrebljivanih uprošćenja je zanemarenje aksijalne promene temperature, [7,8,9,10]. Takođe se priroda prelaza toplote sa kabla na okolno zemljište svodi na čisto konduktivni prelaz [8].

Glavni cilj ovog rada je postavljanje teoretskih osnova i utvrđivanje pravaca za formiranje realnog matematičkog modela koji bazira na Besselovim funkcijama. Ovde je matematički model realizovan uz maksimalna matematička uprošćenja i sačuvan je minimum fizičkog smisla. Sve uvedene pretpostavke omogućile su pronalaženje jednostavnog algoritma, a zatim i programskog rešenja za analizu nestacionarnih procesa zagrevanja i hlađenja energetskih podzemnih kablova. Ovde postavljeni matematički model, od realne problematike najviše udaljavaju pretpostavke da su fiktivni provodnik i metalni plašt preko izolacije izotermička tela. Pretpostavka da je metalni plašt preko izolacije izotermičko telo isključila je iz analize uticaj toplotne kapacitivnosti zemljišta tj. specifične toplote zemljišta. Toplotna kapacitivnost zemljišta, ukoliko bi se uzela u obzir, znatno bi povećala vrednosti vremenskih konstanti nestacionarnih procesa zagrevanja i hlađenja energetskog kabla.

Energetski kablovi koji su analizirani pomoću matematičkog modela predstavljenog u ovom radu su uljni kablovi sa kanalom za hlađenje u žili [2]. U [2] je analizirana jednožilna konstrukcija ove vrste kablova. U ovom radu je pokazano kako se analiza ove vrste i pristup mogu primeniti na druge vrste kablova osim pomenutih.

U ovom radu se analizira nestacionarno zagrevanje/hlađenje izolacije podzemnih kablovskih vodova. Konstrukcija višezilnog kabla tipa IPO 13 svodi se na fiktivnu konstrukciju jednožilnog kabla, [5]. Generisano rešenje bazira se na Besselovim

funkcijama, uvažavajući vremensku i prostornu radijalnu promenu temperature. Aksijalna promena temperature je zanemarena. Prelaz toplote sa kabla na okolno zemljište je čisto konduktivne prirode, [8]. Vrednost temperature koja se doseže na kraju nestacionarnog procesa zagrevanja/hlađenja kablovske izolacije, određuje se u zavisnosti od vrednosti faktora opterećenja tj. prema postupku postavljenom u analizi nestacionarnih temperaturnih procesa za kablovski provodnik, [8].

2. MATEMATIČKI MODEL

Složena geometrija pojasnog trožilnog kabla tipa IPO 13(A), čiji je poprečni presek prikazan na slici 1-a), svodi se na fiktivnu jednožilnu konstrukciju kabla sa slike 1-b). Prema tome, sve dimenzije koncentričnih elemenata konstrukcije kabla sa slike 1-a) ostaju iste i u slučaju fiktivnog kabla sa slike 1-b), osim broja žila i njihovih poprečnih preseka. Što se tiče površine poprečnog preseka fiktivne žile S_e , može se reći da je $S_e \neq 3S_1$, gde je S_1 - površina poprečnog preseka jedne žile stvarnog kabla. Prethodno važi iz razloga što površina S_e obuhvata i deo površine poprečnog preseka papirne izolacije provodnik-provodnik.

Kako se posmatraju nestacionarni temperaturni procesi u izolaciji između fiktivne žile i metalnog plašta, bitno je zadovoljiti uslov da su fizički parametri posmatrane izolacije isti u oba slučaja, kod stvarnog i fiktivnog kabla. Tako, toplotne otpornosti i toplotne kapacitivnosti u oba slučaja moraju biti iste ili da što bolje odgovaraju realnim vrednostima.

Prečnik fiktivne žile sa slike 1-b) u (m) je, [5]:

$$d_{pe} = 2r_0 d_{iz} e^{\frac{2 T_1}{\epsilon}} \quad (1)$$

gde je:

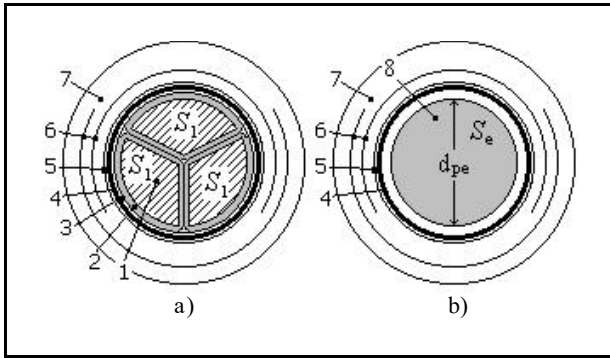
d_{iz} = $2R$ - prečnik kružnice preko izolacije (unutarnji prečnik olovnog plašta) u (m),

T_1 - toplotna otpornost izolacije između provodnika i metalnog plašta kod fiktivnog jednožilnog kabla (po vrednosti to je jedna trećina vrednosti toplotne otpornosti izolacije po jednoj žili stvarnog trožilnog kabla) u (Km/W), [4],

r_{iz} - specifična toplotna otpornost izolacije u (Km/W).

Ako sa d_p u (m) označimo prečnik kružnice preko provodnika stvarnog kabla (slika 1-a)), onda se toplotne kapacitivnosti i toplotne otpornosti za potrebe analize nestacionarnih temperaturnih procesa određuju pod uslovima, [5]:

– ako je $d_p < d_{pe}$ onda ceo prostor između ova dva cilindra treba posmatrati kao da je ispunjen aktuel-



Slika 1. „Pojasni“ kabl tipa IPO 13(A), 6/10 kV/kV:
a) stvarni presek, b) presek jednožilne fiktivne konstrukcije, 1- provodnik; 2- papirna izolacija žile; 3- pojasna izolacija; 4- olovni plašt; 5- unutrašnji zaštitni sloj; 6- dve čelične trake; 7- spoljašnji zaštitni sloj; 8- fiktivni provodnik

nim izolacionim materijalom koji takođe popunjava prostor od d_{pe} do metalnog plašta, ili – ako je $d_p \geq d_{pe}$ onda se smatra da je prostor između cilindra prečnika d_{pe} i metalnog plašta ispunjen aktuelnim izolacionim materijalom (u ovom radu se rešava ovaj slučaj).

Ovakvo uprošćenje ima smisla s obzirom na to da vrednosti toplotnih otpornosti koje se suprotstavljaju protoku toplote po pravcu površina stvarnog provodnika – površina kabela ostaju nepromenjene. Takođe, vrednosti toplotnih kapacitivnosti po koncentričnim slojevima konstrukcije kabela ostaju iste, [5].

Za fiktivni jednožilni kabl kojim se ekvivalentira višežilni kabl, dovoljno je odrediti funkciju temperature $q_{iz}(r,t)$ za izolacioni sloj, između fiktivnog provodnika i metalnog plašta. Pretpostavlja se da temperature provodnika $q_p(t) = q_{iz}(r_0,t)$ i plašta $q_o(t) = q_{iz}(R,t)$ u prelaznom procesu ne zavise od prostorne koordinate r , slično kao u [2]. Znači, fiktivni provodnik i metalni plašt se posmatraju kao izotermička tela.

Jednačina toplotne ravnoteže za elementarni sloj izolacionog cilindra debljine dr , na rastojanju r u (m) od ose jednožilnog kabela je:

$$2 r d r c_{iz} g_{iz} \frac{d q_{iz}}{d t} = d w \quad (2)$$

gde je:

$d q = 2 \pi r d r c_{iz} g_{iz} d q_{iz}$ – količina toplote koja se po jedinici dužine troši na povećanje unutrašnje energije ovog elementarnog sloja, a koja je jednaka promeni specifičnog toplotnog fluksa u ovom sloju $d w$ u (W/m) za vreme $d t$ u (s),

$d V = 2 \pi r d r l$ – elementarna zapremina u (m³),

c_{iz} – specifična toplota izolacije u (J/(kgK)),

g_{iz} – gustina izolacije u (kg/m³), i

q_{iz} – temperatura izolacije u (K).

Pad temperature na elementarnom sloju izolacije dr prema Fourierovom zakonu, [2,8]:

$$d_{iz} = w_{iz} \frac{dr}{2 r} \quad (3)$$

Jednačine (2) i (3) mogu se napisati u oblicima (4) i (5) respektivno:

$$\frac{d_{iz}}{d t} = \frac{1}{2 r c_{iz}} \frac{d w}{d r} \quad (4)$$

$$\frac{d_{iz}}{d r} = \frac{w_{iz}}{2 r} \quad (5)$$

ako se sada izraz (5) izdiferencira po r , i otuda izrazi $d w/d r$, dobija se:

$$\frac{d w}{d r} = \frac{2 r}{iz} \frac{d^2_{iz}}{d r^2} = \frac{1}{r} \frac{d_{iz}}{d r} \quad (6)$$

Ako se relacija (6) unese u (4) konačno se dobija diferencijalna jednačina promene temperature izolacije u zavisnosti od vremena t i prostorne radialne koordinate r , za prelazni proces kao:

$$\frac{d_{iz}}{d t} = \frac{1}{c_{iz}} \frac{d^2_{iz}}{d r^2} = \frac{1}{r} \frac{d_{iz}}{d r} \quad (7)$$

Diferencijalna jednačina (7) naziva se jednačinom toplotne provodnosti, gde je $a_{iz} = 1/(c_{iz} g_{iz} r_{iz})$ za konstantne vrednosti parametara c_{iz} , g_{iz} i r_{iz} , koeficijent toplotne provodnosti koji se izražava u (m²/s).

Prema [3], funkcija temperature izolacionog cilindra $q_{iz}(r,t)$, za temperaturu referentnog zemljišta q_z , treba da zadovoljava parcijalnu diferencijalnu jednačinu:

$$\frac{d_{iz}}{t} = a_{iz} \frac{d^2_{iz}}{r^2} = \frac{1}{r} \frac{d_{iz}}{r} ; \quad t = 0 ; \quad r = r_0 ; \quad r = R ; \quad (8)$$

pri početnim uslovima koji se definišu na osnovu toplotnog proračuna kabela u stacionarnom režimu, i pri graničnim uslovima treće vrste:

– za proces razmene toplote između provodnika i okoline

$$\frac{d_{iz}}{r} = h_1 (q_{iz}(r_0,t) - q_z) \quad (9)$$

– za proces razmene toplote između metalnog plašta i okoline

$$\frac{d_{iz}}{r} = h_2 (q_{iz}(R,t) - q_z) \quad (10)$$

gde su h_j ($j=1,2$) relativni koeficijenti toplotne razmene u (1/m).

Opšte rešenje diferencijalne jednačine (8) može se zapisati u obliku beskonačnog reda, [2]:

– za nestacionarni proces hlađenja kao

$$q_{iz}^{(i)}(r,t) = e^{-a_{iz}n_i^2 t} A_i J_0(n_i r) B_i Y_0(n_i r) \quad (11)$$

– za nestacionarni proces zagrevanja kao

$$q_{iz}^{(i)}(r,t) = (1 - e^{-a_{iz}n_i^2 t}) A_i J_0(n_i r) B_i Y_0(n_i r) \quad (12)$$

gde su n_i , A_i , i B_i – konstantni koeficijenti; J_0 – je Besselova funkcija prve vrste nultog reda; Y_0 – je Besselova funkcija druge vrste nultog reda. Vrednosti koeficijenata n_i , A_i , i B_i određuju se iz početnih i graničnih uslova.

Koeficijent h_j ($j=1,2$) kojim se definiše razmena toplote između posmatranog elementa konstrukcije kabla i okoline u procesu hlađenja, ima istu vrednost i za proces zagrevanja. To se da zaključiti iz izvođenja koje sledi.

$$\text{Ako za } r = r_0 \text{ odredimo } \frac{q_{iz}^{(i)}}{r} \quad i$$

$q_{iz}^{(i)}(r_0,t) - q_z$, za i -ti član beskonačnog reda koji je dat izrazom (11), i zatim oba izraza unesemo u uslov (9), za proces razmene toplote između provodnika i okoline putem hlađenja dobija se

$$\frac{B_i}{A_i} = \frac{\frac{h_1}{n_i} J_0(n_i r_0) J_1(n_i r_0)}{\frac{h_1}{n_i} Y_0(n_i r_0) Y_1(n_i r_0)} \quad (13)$$

gde je $q_{iz}^{(i)}$ ti član beskonačnog reda funkcije rešenja date izrazom (11) ili (12).

Takođe, do izraza (13), može se doći ako se prethodni postupak izvede za proces razmene toplote između provodnika i okoline tokom zagrevanja, uz to da se (11) zameni izrazom (12).

Ako se sada prethodni postupak izvede za $r = R$ tj. za proces razmene toplote između metalnog plašta i okoline tokom zagrevanja/hlađenja dobija se sledeći izraz:

$$\frac{B_i}{A_i} = \frac{R h_2 J_0(n_i R) R n_i J_1(n_i R)}{R h_2 Y_0(n_i R) R n_i Y_1(n_i R)} \quad (14)$$

Postavimo sada granične uslove treće vrste na drugi način i odredimo izraze za relativne koeficijente toplotne razmene h_1 i h_2 . Na osnovu prethodnog, koeficijente h_1 i h_2 dovoljno je odrediti samo za nestacionarni proces hlađenja.

Prvi granični uslov za proces hlađenja fiktivnog provodnika, u trenutku isključenja napajanja, za $r=r_0$, može se napisati kao:

$$\frac{q_{iz}^{(i)}}{t} \quad \frac{w(r_0)}{c_{Al} r_0} \quad (15)$$

gde je:

c_{Al} – specifična toplota fiktivnog provodnika u (J/(kgK)), i

g_{Al} – gustina fiktivnog provodnika u (kg/m³).

Ako se na osnovu izraza (5) izrazi $w(r_0)$, i za trenutak isključenja napajanja $t = 0$ odrede

$$\frac{q_{iz}^{(i)}}{t} \quad i \quad \frac{q_{iz}^{(i)}}{r} \quad , \text{ pa se sve to unese u}$$

izraz (15), dobija se:

$$\frac{B_i}{A_i} = \frac{\frac{n_i r_0 c_{Al}}{2c_{iz}} J_0(n_i r_0) J_1(n_i r_0)}{\frac{n_i r_0 c_{Al}}{2c_{iz}} Y_0(n_i r_0) Y_1(n_i r_0)} \quad (16)$$

Poređenjem izraza (13) i (16) dobija se:

$$h_1 = \frac{n_i^2 r_0 c_{Al}}{2c_{iz}} \quad (17)$$

Drugi granični uslov za proces hlađenja metalnog plašta, u trenutku isključenja napajanja $t = 0$, za $r = R$, može se napisati kao:

$$\frac{q_{iz}^{(i)}}{t} \quad \frac{w(R)}{c_o (R^2 - r_o^2)} \quad (18)$$

gde je:

c_o – specifična toplota metalnog plašta (olova) u (J/(kgK)), i

g_o – gustina metalnog plašta (olova) u (kg/m³).

$w_o = \frac{q_{iz}^{(i)}}{T'_{sz} T'_{ukz}}$ – specifični toplotni fluks koji se odvodi sa plašta u okolnu sredinu, u (W/m),

$T'_{sz} + T'_{ukz}$ – toplotna otpornost koja se suprotstavlja prelazu toplote sa plašta na okolinu,

T'_{sz} – zbir toplotnih otpornosti unutrašnje i spoljašnje zaštite u (Km/W), i

T'_{ukz} – ukupna toplotna otpornost zemljišta od površine kabla do referentne zemlje u (Km/W).

Ako se na osnovu izraza (5) izrazi $w(R)$, i za trenutak isključenja napajanja $t = 0$ odrede

$$\frac{d q_{iz}^{(i)}}{dt} \quad , \quad \frac{d q_{iz}^{(i)}}{dr} \quad i \quad q_{iz}^{(i)}(R,0) - q_z, \text{ pa se sve to}$$

unesu u (18), dobija se izraz (19):

$$\frac{B_i}{A_i} = \frac{\frac{n_i^2 c_o (R^2 - r_o^2)}{2c_{iz}} \frac{J_0(n_i R) n_i R J_1(n_i R)}{2 (T'_{sz} T'_{ukz})}}{\frac{n_i^2 c_o (R^2 - r_o^2)}{2c_{iz}} \frac{Y_0(n_i R) n_i R Y_1(n_i R)}{2 (T'_{sz} T'_{ukz})}}$$

Poređenjem izraza (14) i (19) dobija se:

$$h_2 = \frac{1}{R} \frac{n_i^2 c_o (R^2 - r_o^2)}{2c_{iz}} \frac{J_0(n_i R) n_i R J_1(n_i R)}{2 (T'_{sz} T'_{ukz})} \quad (20)$$

Granični uslovi (15) i (18) su uvedeni na osnovu analogije koja postoji između jednačina koje opisuju toplotne i električne veličine. Fiktivni provodnik i metalni plašt preko izolacije, posmatrani su kao toplotne kapacitivnosti koje se mogu puniti i prazniti toplotnom energijom. Do trenutka isključenja opterećenja $t = 0$, smatra se da se ekvivalentna toplotna kapacitivnost kojom je zamenjen fiktivni provodnik punila toplotnom energijom. U samom trenutku isključenja opterećenja $t = 0$, ima se početak pražnjenja toplotne kapacitivnosti fiktivnog provodnika (iz tog razloga u graničnom uslovu (15) sa desne strane izraza stoji predznak minus).

Što se tiče toplotne kapacitivnosti kojom je zamenjen metalni plašt preko izolacije, ista se takođe punila toplotnom energijom do trenutka $t = 0$. U trenutku $t = 0$ započinje proces pražnjenja toplotne kapacitivnosti metalnog plašta. Specifični toplotni fluks koji je posledica pražnjenja toplotne kapacitivnosti metalnog plašta jednak je razlici između specifičnog toplotnog fluksa koji se dovodi plaštu sa fiktivne izolacije $w(R)$ i specifičnog toplotnog fluksa koji se odvodi sa plašta u okolnu sredinu w_o .

Znači, granični uslovi (15) i (18) dobijeni su iz izraza koji povezuju specifični toplotni fluks i temperaturu preko konstantne vrednosti toplotne kapacitivnosti, u vremenskom domenu za $t = 0$. Prethodno je ekvivalentno izrazima za granične uslove, koji kod električnih veličina u vremenskom domenu za $t = 0$, povezuju struju i napon preko konstantne vrednosti kapacitivnosti kondenzatora koji se prazni (ili puni).

Konačno, ako se zajednički rešavaju izrazi (16) i (19) za proces hlađenja/zagrevanja, za bilo koju vrednost karakterističnog koeficijenta n_i , može se odrediti odgovarajući odnos $(-B_i / A_i)$. To se postiže tako što se numerički menja vrednost za n_i od nule do beskonačnosti (uslovno rečeno), a za aktuelno n_i u svakom koraku istovremeno izračunava odnos $(-B_i / A_i)$ po izrazima (16) i (19). Kada se vrednosti za odnose $(-B_i / A_i)$ izjednače ili približe jedna drugoj ispod određene tačnosti, za neku vrednost n_i dobija se vrednost odnosa $(-B_i / A_i)$ kao rešenje za i -ti indeks.

Takođe, potrebno je odrediti i vrednosti koeficijenta A_i i B_i zbog čega je potrebno postaviti dopunske jednačine. Dopunske jednačine se postavljaju na osnovu početnih uslova, dok se početni uslovi određuju na osnovu temperatura u proizvoljno izabranim tačkama, [2]. To su sledeće tačke:

$$r_j = \frac{(j-1)R + (m-j)r_0}{m-1}; \quad j = 1, m \quad (21)$$

gde je m – broj dopunskih jednačina tj. broj nepoznatih odnosa $(-B_i / A_i)$; $(m-1)$ – broj koncentričnih slojeva na koje je izdvojen izolacioni cilindar za potrebe analize toplotnog proračuna kabla u stacionarnom režimu.

Ukupna toplotna otpornost izolacije je:

$$T_{iz} = \sum_{j=1}^{m-1} T_j \quad (22)$$

Toplotna otpornost j -tog koncentričnog sloja izolacije određuje se po

$$T_j = \frac{iz}{2} n \frac{r_{j-1}}{r_j}; \quad j = 1, m-1 \quad (23)$$

Ako je $q_{iz(1)}$ temperatura na površini fiktivnog provodnika poznata, onda se za temperaturu spoljašnje površine k -tog koncentričnog elementa izolacije može pisati:

$$iz(1) \frac{T_{iz} T'_{sz} T_{ukz} T_j T_z T_j}{T_{iz} T'_{sz} T_{ukz}} = iz(k) \frac{T_j T_j}{T_j T_j} \quad (24)$$

$$k = 0, m-1$$

Prema tome, početni uslovi su:

$$iz(r_j, t=0) = iz(j); \quad j = 1, m \quad (25)$$

3. TEST PRIMER

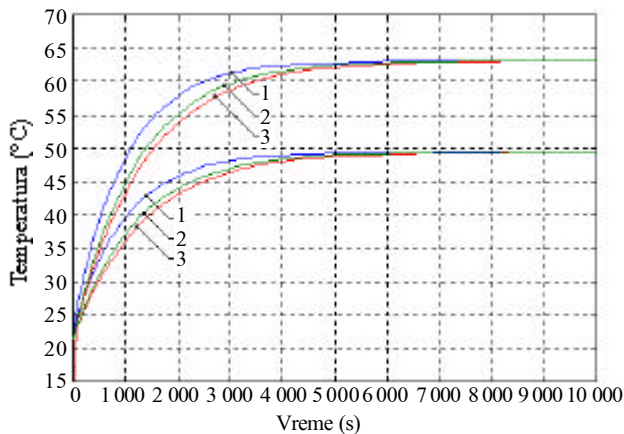
Analizirano je zagrevanje/hlađenje izolacije od impregnisanog papira, koja se nalazi između aluminijumskih sektorskih višežičnih provodnika i olovnog plašta, kabla tipa IPO 13(A) 3x150 (mm²), 6/10 (kV/kV), i to za slučaj polaganja u zemljište. Temperatura referentnog zemljišta je $q_z = 21,402$ (°C). Za proces zagrevanja do trenutka uključenja napajanja, uzima se da je kabl bio neopterećen tj. da je početna temperatura po svim elementima konstrukcije kabla jednaka sa temperaturom ambijenta q_z . Za proces hlađenja do trenutka isključenja napajanja, za $r = r_0$ uzima se da je kabl dovoljno dugo bio opterećen nepromenljivim opterećenjem tj. da je početna temperatura izolacije uz samu površinu provodnika jednaka sa temperaturom provodnika koja odgovara datom faktoru opterećenja, [8]. Za proces hlađenja slojeva izolacije koji se nalaze na rastojanju $r = r_0$ od površine provodnika, treba uzeti u obzir pad temperature koji se javlja sa porastom prostorne radialne koordinate r . Specifična toplotna otpornost neisušenog zemljišta je $r_z = 1$ (Km/W).

Opterećenje je po obliku srednje, i temperaturne krive snimane su za faktor opterećenja m jednak 0,8 i 0,9, pri vršnoj cikličnoj struji $I_{max} = 257$ (A). Faktoru opterećenja $m = 0,8$ odgovaraju sledeći parametri: konačna temperatura nestacionarnog procesa zagrevanja kablovskog provodnika $q_{p\%} = 49,40019$

(°C), vremenska konstanta zagrevanja $T = 1\,209,33$ (s) i zemljište nije isušeno sa $T_{ukz} = 0,512\,804$ (Km/W); dok faktoru opterećenja $m = 0,9$, uz pretpostavku da nije došlo do isušivanja zemljišta (parametri T i T_{ukz} ostaju isti kao za $m = 0,8$), odgovara temperatura $q_{p,y} = 63,135\,99$ (°C), [8].

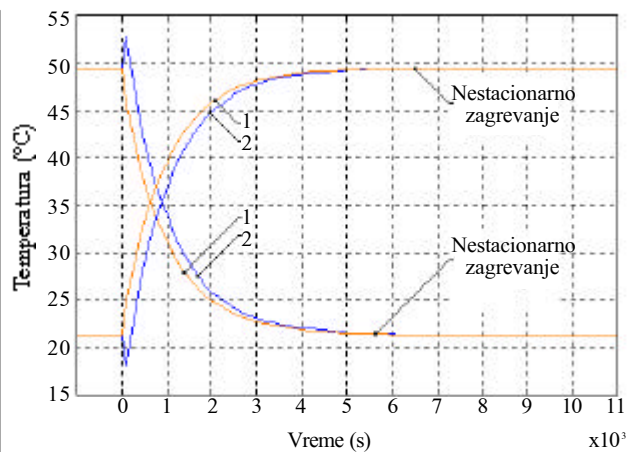
Ostali potrebni parametri su: dubina ukopavanja kabla je $h = 700$ (mm), broj strujno opterećenih provodnika je 3, $r_{iz} = 5,0$ (Km/W), $c_{iz} = 1\,370$ (J/(kgK)), $g_z = 1\,250$ (kg/m³), $c_{Al} = 920$ (J/(kgK)), $g_{Al} = 2\,700$ (kg/m³), $c_{pb} = 127$ (J/(kgK)), $g_{pb} = 11\,340$ (kg/m³), $r_0 = 16,226\,864$ (mm), $R = 20,45$ (mm), spoljašnji prečnik kabla je $d_k = 56,0$ (mm), ostali konstruktivni podaci su kataloški dati od strane proizvođača, $T'_{sz} = 0,135\,82$ (Km/W) i broj karakterističnih koeficijenata n_i koji su upotrebljeni za crtanje krivih $q_{iz}(r,t)$.

Radi poređenja, na slici 2 su prikazane temperaturne krive zagrevanja kablovske izolacije sa temperature od 21,402 °C na 49,400 19 °C (odnosno na 63,135 99 °C) dobijene: 1– za devet karakterističnih koeficijenata n_i i $r = r_0$, po matematičkom modelu postavljenom u ovom radu; 2– po matematičkom modelu iz [8], gde rešenje diferencijalne jednačine sadrži samo eksponencijalne funkcije; 3– po matematičkom modelu iz [8], gde rešenje diferencijalne jednačine sadrži Besselove funkcije. Zapaža se da se tok prelaznog procesa razlikuje u sva tri slučaja, dok je vreme smirivanja procesa približno isto.



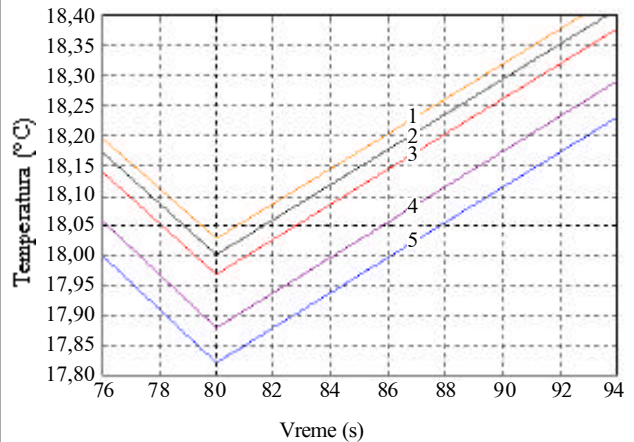
Slika 2. Krive vremenskih promena temperature po matematičkim modelima postavljenim u ovom radu i u [8].

Na slici 3 prikazane su krive za procese zagrevanja i hlađenja kablovske izolacije za neparan i paran broj karakterističnih koeficijenata n_i , za prostornu radijalnu koordinatu $r = r_0$. Primećuje se da za paran broj koeficijenata n_i , generisana kriva ima najpre mali pad/skok, a zatim očekivani tok, za proces zagrevanja/hlađenja respektivno. Testiranjem je pokazano



Slika 3. Vremenske promene temperature, 1 - za devet; i 2- za deset karakterističnih koeficijenata n_i

da se ova pojava ima za bilo koji paran broj koeficijenata n_i , a što je posledica upotrebe aproksimacionih formula za izračunavanje vrednosti Besselovih funkcija u aktuelnim potprogramima, (slika 4). Takođe, sa slike 4 se vidi da je razlika između tokova procesa (zagrevanja) u zavisnosti od broja koeficijenata n_i vrlo mala. Na primer za vreme od 76 (s), kriva 1 je pomešana u odnosu na krivu 5 za svega 0,2 (°C).

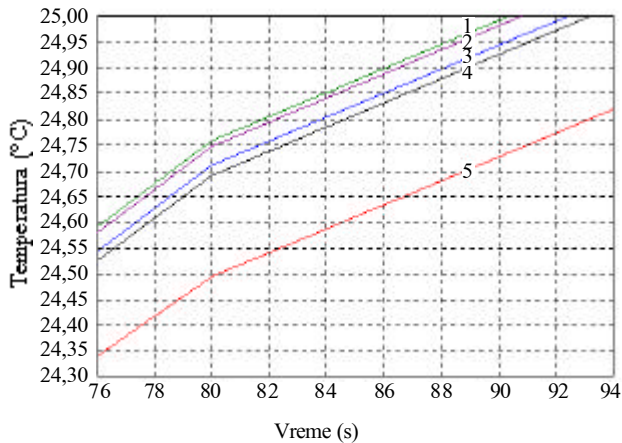


Slika 4. Delovi temperaturnih krivih za paran broj karakterističnih koeficijenata n_i : 1 - četiri; 2 - deset; 3 - dvanaest; 4 - dvadeset; i 5 - četrdeset koeficijenata

U [3] i [8] kaže se sa kojim brojem karakterističnih koeficijenata n_i treba sprovesti analizu dobijanja rešenja baziranog na Besselovim funkcijama. U [3] je rešenje dobijeno sa manje od 40 karakterističnih koeficijenata n_i , gde se kaže da samo prvih nekoliko koeficijenata definiše oblik rešenja sa dovoljnom tačnošću. U [8] se dolazi do sličnih rezultata gde je analiza sprovedena sa 40 karakterističnih koeficijenata n_i , a pokazalo se da je za definisanje rešenja dovoljno svega tri koeficijenta n_i . Stoga se ovde preporučuje broj od tri karakteristična koefici-

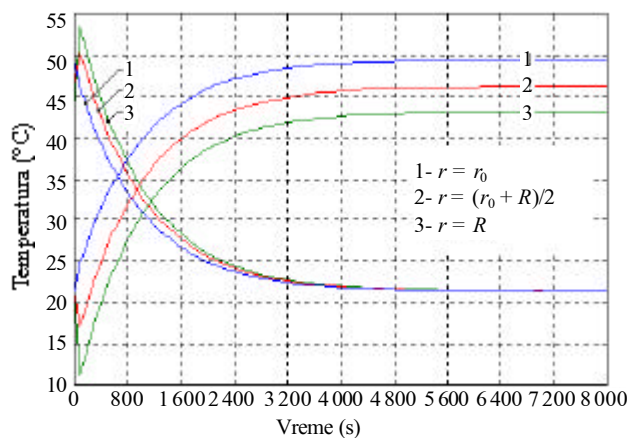
jenta n_i . Analiza u ovom radu izvedena je sa većim brojem karakterističnih koeficijenata n_i , iz razloga da se prikaže uticaj istih na oblik dobijenog rešenja.

Na slici 5 prikazani su delovi temperaturnih krivih za nestacionarne procese zagrevanja i to za neparne brojeve karakterističnih koeficijenata n_i .



Slika 5. Delovi temperaturnih krivih za neparan broj karakterističnih koeficijenata n_i : 1 - tridesetdevet; 2 - devetnaest; 3 - jedanaest; 4 - devet; i 5 - tri koeficijenta

Radi ilustracije, na slici 6 prikazane su vremensko–prostorne temperaturne krive, za procese zagrevanja i hlađenja bez obzira na broj koeficijenata n_i , i to za tri karakteristične vrednosti prostorne radijalne koordinate: 1- $r = r_0$, 2- $r = (r_0 + R)/2$ i 3- $r = R$. Krive sa slike 6 koje prikazuju proces nestacionarnog hlađenja snimljene su pod pretpostavkom da su svi koncentrični elementi izolacije na istoj temperaturi od 49,400 19 (°C) (izolacioni cilindar je izotermičko telo). Takođe, sa slike 6 se vidi da se nepravilnost toka procesa javlja i sa porastom prostorne radijalne koordinate. Pomenuta nepravilnost je najveća za spoljašnju površinu posmatranog izolacionog cilindra tj. za $r = R$.



Slika 6. Vremensko–prostorne promene temperature za devet karakterističnih koeficijenata n_i

4. ZAKLJUČAK

U radu su analizirani nestacionarni procesi zagrevanja i hlađenja izolacije višezilnih energetskih kablova. Upoređenjem dobijenog matematičkog modela sa već postojećim, može se konstatovati da je upotreba ovde postavljenog modela, u granicama inženjerskih tačnosti opravdana. Dobijeni rezultati za vreme trajanja prelaznog procesa se gotovo poklapaju sa repornim, dok sam tok prelaznog procesa odstupa od repornog u granicama od 0,3 °C, što je takođe prihvatljivo.

Međutim, treba naglasiti da se postavljanjem matematičkog modela u ovom radu zanemario uticaj izvesnog broja važnih parametara i činjenica koji bi učinili da ovaj model što realnije prezentuje nestacionarne procese zagrevanja i hlađenja podzemnih energetskih kablova. Ostavljena je mogućnost za dalje poboljšanje matematičkog modela koje bi se sastojalo u obuhvatanju razlike između vremenskih konstanti zagrevanja i hlađenja provodnika podzemnih energetskih kablova i specifične toplote okolnog zemljišta. To bi sve dovelo do različitih rezultata za oblike tokova i trajanja analiziranih nestacionarnih procesa u odnosu na rezultate dobijene u ovom radu.

Značaj ovde razvijenog matematičkog modela ogleda se u punom prikazu matematičkih faktora koji utiču na oblik dobijenog rešenja baziranog na Besselovim funkcijama, a to su: broj karakterističnih koeficijenata i aproksimacione formule za izračunavanje vrednosti Besselovih funkcija u odgovarajućim potprogramima.

5. LITERATURA

- [1] L. Heinhold, POWER CABLES AND THEIR APPLICATION, Part 1, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich, 1990.
- [2] Э. Т. Ларина, СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ И ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ, 2-е издание, переработанное и дополненное, Энергоатомиздат, Москва, 1996.
- [3] П. П. Юшков, „ФУНКЦИИ БЕССЕЛЯ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ К ЗАДАЧАМ ОБ ОХЛАЖДЕНИИ ЦИЛИНДРА”, Энергетический институт АН БССР, Издательство академии наук БССР, Москва, 1962.
- [4] International Electrotechnical Commission 60287.
- [5] International Electrotechnical Commission 60853.
- [6] S. Y. King, N. A. Halfter, UNDERGROUND POWER CABLES, Longman, London and New York, 1982.

- [7] V. T. Morgan, THERMAL BEHAVIOUR OF ELECTRICAL CONDUCTORS, Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England, 1991.
- [8] N. Rajaković, S. Nikolajević, D. Klimenta, UN-STATIONARY STATES AT THE CONDUCTOR HEATINGS OF THE UNDERGROUND CABLE LINES IN THE DISTRIBUTION NETWORKS, MEDPOWER Conference, Athens, November 2002.
- [9] D. Tasić, N. Rajaković, M. Stojanović, NESTACIONARNA STANJA ZAGREVANJA PROVODNIKA NADZEMNIH VODOVA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, Elektroprivreda, br. 4, 1998. godine, str. 44,48.
- [10] D. Tasić, N. Rajaković, RADIJALNA RASPODELA TEMPERATURE KOD AL/FE PROVODNIKA NADZEMNIH VODOVA – TEORIJSKI MODEL, Elektroprivreda, br. 1, 1998. godine, str. 66,72.

Rad je primljen u uredništvo 07. 03. 2003. godine



Dardan Klimenta rođen je 1975. godine u Peći, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 1998. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Prištini i magistrirao 2001. godine na smeru Elektroenergetske mreže i sistemi Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Tokom post-diplomskih studija, radio je kao asistent pripravnika na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini, dok je danas asistent Fakulteta tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici na odseku Elektrotehnike.

Privatno finansiranje energetskih projekata

autora mr Miroslava Markovića

IZVOD IZ RECENZIJE

Prof. dr Sreten Škuletić
Elektrotehnički fakultet Podgorica

Rukopis pod nazivom „PRIVATNO FINANSIRANJE ENERGETSKIH PROJEKATA” autora mr Miroslava Markovića, tematski predstavlja nastavak knjige "Projektno finansiranje u zemljama u razvoju - Analiza rizika u evaluaciji hidroenergetskih projekata", koju je autor objavio 2000. godine.

Može se reći da je tema koju je izabrao mr Marković da obradi putem ovog, prije svega stručnog multidisciplinarnog teksta, i da ga prezentira zainteresovanima za ovu veoma interesantnu, i za dalji brži razvoj našeg područja veoma značajnu problematiku, veoma aktuelna, značajna i provokativna.

Ako se uzme u obzir energetska, a posebno elektroenergetska situacija u Crnoj Gori, i nedostatak društvenih sredstava za brzo i kvalitetno prevazilaženje postojeće nepovoljne situacije, očigledno je da će materija, pažljivo odabrana, dobro prevedena i jasno i razumljivo obrađena ovim rukopisom, kao i

veliki broj brižljivo selektiranih i opisanih dragocjenih iskustava iz dosadašnje prakse širom svijeta, obrađeni teorijski i praktični problemi navedene preporuke za rad u različitim situacijama i uslovima, veoma korisno poslužiti ne samo usko stručnim čitaocima, već i svima koji su na bilo koji način već uključeni u pripremne aktivnosti planiranih objekata. Evidentno je da će ovaj rukopis dati znatan doprinos popunjavanju postojeće praznine u stručnoj literaturi iz ove oblasti.

Brojne informacije, tabele, primjeri, analize i preporuke ukazuju takođe na to da će ovaj rukopis zainteresovati veoma široki auditorijum i da će se koristiti kao veoma važna i nezaobilazna stručna literatura u svim aktivnostima pripreme i izrade dokumentacije vezane za uključivanje privatnog sektora u izradu, ne samo energetskih, već i svih ostalih velikih infrastrukturnih projekata.

Prof. dr Veselin Drašković
Ekonomski fakultet MGU „Lomonosov” Moskva
i Fakultet za pomorstvo Kotor

Tematsku strukturu knjige čini, pored uvodnog dijela, šest logično raspoređenih poglavlja, nekoliko korisnih i informativnih dodataka, kao i spisak brižljivo selektovane i relevantne literature i stranih i naših autora. Metodološku strukturu, koja je po našem mišljenju za ovu knjigu značajna, čini korektno osmišljen i ukomponovan spoj teorijskih i praktičnih pitanja, preporuka, tipologija, objašnjenja i analiza vezanih za mogućnost privatnog finansiranja energetskih projekata, s posebnim naglaskom na zemlje u razvoju. Autor je konceptijski originalno i u logičnom slijedu uobličio obimnu materiju, odnosno veo-

ma koncentrisan, kondenzovan i nadasve stručan tekst, koji je sigurno zahtjevao njegove specifične i kompleksne tematske oblasti.

Kroz cijelu knjigu autor lucidno provlači tačnu tezu o dinamičnom, varijabilnom, neizvjesnom i izazovnom odnosu mogućih finansijera, koji se nalaze u trouglu vlada - privatni sektor - strana ulaganja. U tom kontekstu, on istražuje šanse i mogućnosti privatnog sektora, koji je fleksibilniji u odnosu na konkurente, ali finansijski znatno slabiji i manje otporan na rizike. Koliko god imali različite perspektivne ciljeve, profitni motiv je uvek zajednički imeni-

lac koji inicira i stimuliše konkurenciju navedene trijade potencijalnih finansijera, što autor uočava i tretira u svojim brojnim analizama pomenutog odnosa. Pored toga, mr Miroslav Marković uporno istrajava u traženju raznih mogućnosti participacije privatnog sektora u energetskim projektima, koji često predstavljaju nedodirljivo i „zabranjeno polje” tipa prirodnog monopola, čak i u zemljama u razvoju, koje se u poslednje vrijeme mnogo fleksibilnije i sve više otvaraju u navedenoj opciji. On dolazi do zaključka da ta participacija zavisi od mnogih faktora uticaja, pri čemu je presudan krajnji rezultat bilansnog odnosa između preuzetih rizika i ostvarenog profita od konkretnog energetskog projekta. Iako taj

odnos nije moguće lako, brzo i pouzdano utvrditi, autor stručno obrazlaže metodologiju procjene i objektivne rizike od eventualne greške.

Višestruko je korisno što autor aktivno razmatra limite i prednosti privatnog finansiranja, jer brojne analize i zaključci, koje se u knjizi preuzimaju iz dragocenih svjetskih probnih poligona, mogu poslužiti kao dobre preporuke, koje će sigurno, u manjoj ili većoj mjeri, buduća crnogorska projektno-energetska praksa morati da uvaži. Navedena ideja se može dodatno testirati kako u novim teorijskim istraživanjima, tako i u eventualnoj praktičnoj razradi, pri čemu će knjiga mr Miroslava Markovića poslužiti kao nezaobilazna stručna literatura.

Prikaz knjige

Deregulacije tržišta električne energije

autora mr Branka Stojkovića i dr Vesne Stojković

Ova knjiga je nastala kao odraz potrebe da se detaljnije razmotri oblast deregulacije Elektroprivrednog sektora, što je tema koja poslednjih godina zaokuplja pažnju domaće, ali i strane stručne javnosti.

Materijal je izložen kroz 16 poglavlja i dva dodatka. Obuhvaćeni su i tehnički i pravni aspekti teme o kojoj se govori. Prvih 12 delova se bave tehničkim aspektima deregulacije, dok su poglavlja 13-16 posvećena pravnim aspektima tržišta električne energije. U okviru prvog priloga prezentiran je i tekst nacrtu novog Zakona o energetici, koji je za potrebe Crne Gore izradila konsultantska Barents grupa, pod pokroviteljstvom USAID - Montenegro.

Za izradu knjige korišćeno je obilje materijala, koji su navedeni u Literaturi, a autori su se trudili da u kratkom vremenskom roku obuhvate ovu oblast što kompleksnije. Korišćena su raspoloživa iskustva evropskih država: Španije, Velike Britanije, Italije, Norveške, Belgije i Evropske Unije kao celine. Takođe, autori su koristili iskustva pojedinih saveznih država SAD, pre svih Teksasa, Kalifornije i Nju Džersija. Trudili su se da navedu dovoljno primera koji bi mogli bliže odslikati određene probleme.

Objašnjene su vremenska i funkcionalna dekompozicija tržišta električne energije, kao i najaktuelniji problemi koji prate otvoreno tržište. Sa pravnog aspekta, akcentat je, naravno, stavljen na Direktivu 96/92/EC o unutrašnjem tržištu električne energije u Evropskoj Uniji, kao i na analizu uočenih problema u uspostavljanju i odvijanju rada tržišta. Na kraju je dat prikaz tekućih aktivnosti u jugoistočnoj Evropi, gde je locirana i Crna Gora, čiji je cilj da i ovaj deo Evrope integrišu u jedinstveno tržište električne energije.

Tehničke aspekte deregulacije je obradio i napisao mr Branko Stojković, Rukovodilac Nacionalnog Dispečerskog Centra EPCG, dok je autor dela knjige koji se bave pravnim aspektima ove teme, dr Vesna Stojković, docent na Pravnom fakultetu u Podgorici.

Knjiga omogućava čitaocu da na konzistentan način sagleda problem deregulacije elektroprivrednih monopola, odnosno restrukturiranje elektroprivrednih preduzeća, tako da apsolutno zaslužuje da bude čitana.

Profesor dr Nešo Mijušković