



Elektroprivreda

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

Godina LVV Januar-Mart Broj 1
Year LVV January-March No. 1

Sadržaj	Strana Page	Content
		<i>Vladimir I. Balkovoj</i> i <i>Miladin R. Tanasković</i>
RASPODELA STRUJA NULTOG REDOSLEDA U ENERGETSKIM KABLOVIMA SA ČELIČNOM ARMATUROM	3	ZERO-SEQUENCE CURRENTS DISTRIBUTION IN POWER CABLES WITH STEEL ARMOR
		<i>Ilija Stevanović,</i> <i>Dušan Arnautović i Zoran Ćirić</i>
KLASIFIKACIJA I PRIKAZ STANJA REGULATORA POBUDE SINHRONIH GENERATORA U ELEKTROPRIVREDI SRBIJE	18	CLASSIFICATION AND STATUS REVIEW OF THE AUTOMATIC VOLTAGE REGULATORS OF SYNCHRONOUS GENERATORS IN ELECTRICAL INDUSTRY OF SERBIA
		<i>Aleksandar P. Bojković,</i> <i>Dorde E. Jovanović, Dragan Teslić, Ljubiša P. Nikolić, Sladana Teslić, Radovan Lj. Radosavljević, Aleksandar Janković, Dragomir B. Gucić,</i> <i>Petar Nikolić, Veljko Vidaković i Miomir Lj. Nikodijević</i>
HAVARIJA VELIKOG BLOK-TRANSFORMATORA, U HIDROELEKTRANI „ĐERDAP I”, ISPITIVANJA I UTVRĐIVANJE KVARA	29	FAILURE OF A BIG STEP-UP TRANSFORMER IN HYDROELECTRIC POWER PLANT „ĐERDAP I”, TESTS AND RESULTS OF VISUAL INSPECTION
		<i>Boris Filipović, Marija Đorđević,</i> <i>Aleksandar Kurćubić, Miloš Stojić i Jelena Veselinović</i>
PRIMENA MREŽNIH APLIKACIJA U NDC ELEKTROMREŽE SRBIJE	42	IMPLEMENTATION OF NETWORK APPLICATIONS IN NDC ELEKTROMREŽA SRBIJE
		<i>Duško Bekut i Aleksandar Parmaković</i>
PRORAČUN JEDNOSMERNE KOMPONENTE STRUJE KRATKOG SPOJA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI	51	ANALYSIS OF APERIODICAL COMPONENT OF SHORT CIRCUIT CURRENT IN DISTRIBUTION NETWORK
		<i>Milovan Milošević i Željko R. Đurišić</i>
KONCEPT REGULACIJE DVOSTRANO NAPAJANE INDUKCIONE MAŠINE U VETROAGREGATIMA PRI OSTRVSKOM RADU	63	CONTROL STRATEGY OF A WIND TURBINE DRIVEN DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR FOR STAND-ALONE APPLICATIONS
		<i>Dragoslav Perić</i>
TEHNIČKI ASPEKTI NEOVLAŠĆENOG KORIŠĆENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE	74	TECHNICAL ASPECTS OF UNAUTHORIZED USAGE OF ELECTRICAL ENERGY
		<i>Strahil J. Gušavac,</i> <i>Savo D. Đukić, Jelena M. Lukić i Ljiljana M. Krička</i>
OCENA STANJA TEMELJA I STUBOVA NADZEMNOG VODA	82	ESTIMATION OF CONDITION OF OVERHEAD LINE TOWER AND FOUNDATION
		<i>Branislav A. Bošković</i>
OSTVARENJE ELEKTROENERGETSKOG BILANSA ELEKTROPRIVREDA SRBIJE I CRNE GORE U 2007. GODINI SA OSVRTOM NA 2006. GODINU	96	REALIZATION OF THE POWER BALANCE OF SERBIA AND MONTENEGRO IN 2007 WITH RETROSPEKTIVE VIEW ON 2006
		<i>Jovan Nahman</i>
Prikaz knjige PRENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE Autora: prof. dr. Dobrivoja Stojanovića	112	Review of book TRANSMISSION OF ELECTRICAL ENERGY Author: prof. dr. Dobrivoje Stojanović

IZDAVAČ:**PUBLISHER:****ZAJEDNICA JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE
UNION OF YUGOSLAV ELECTRIC POWER INDUSTRY**

11 000 Beograd, Balkanska 13

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

Telefaks: 686-398

Internet strana: www.eps.co.yu; www.epcg.cg.yu;Elektronska pošta: jugel@sezampro.yu; jugel@beocity.net**VD DIREKTORA I GLAVNOG I ODGOVORNOG UREDNIKA
ACTING DIRECTOR AND CHIEF EDITOR**

Branislav A. Bošković, dipl. ing. el.

IZDAVAČKI SAVET**PUBLISHING COUNCIL**

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

Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd, predsednik;

Prof. dr Jeroslav Živanić, dipl. ing. el., Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički fakultet u Čačku, član;

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

Dr Slobodan Ružić, dipl. ing. el., Agencija za energetske efikasnost, inženjering i konsalting

„Energy Saving Group”, Beograd, član;

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

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

REDAKCIONI ODBOR**EDITORIAL BOARD**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Gojko Vlasisavljević, dipl. ing. el., Beograd, član;

Aleksandar Vlajčić, dipl. ing. el., zamenik direktora PD TENT, Beograd, član;

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

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

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

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

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

Lela Lončar, dipl. filolog, Beograd, član.

TEHNIČKI UREDNIK**TECHNICAL EDITOR**

Jovo Todorović dipl. teh.

LEKTOR I PREVODILAC**LINGUISTIC REVIEW****& TRANSLATION**

Zlata Milinović,

dipl. filolog

CIP – Katalogizacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

620.9

ELEKTROPRIVREDA : časopis Zajednice
jugoslovenske elektroprivrede / v. d. glavnog i
odgovornog urednika Branislav Bošković. –
God. 1, br. 1 (1948)– . – Beograd
(Balkanska 13) : Zajednica jugoslovenske
elektroprivrede, 1948– (Beograd : BS print).
– 28 cm

Tromesečno

ISSN 0013-5755 = Elektroprivreda

COBISS.SR-ID 32023

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Prelom teksta: Agencija „Negativ”, 11070 Novi Beograd, Ismeta Mujezinovića 20 a**Layout and design:** Agencija „Negativ”, 11070 Novi Beograd, Ismeta Mujezinovića 20 a**Štampa:** „BS print”, 11070 Novi Beograd, Bežanijskih ilegalaca 70**Printed by:** „BS print”, 11070 Novi Beograd, Bežanijskih ilegalaca 70**Tiraž:** 1 000 primeraka**Circulation:** 1,000 copies

Vladimir I. Balkovoj] i Miladin R. Tanasković

Raspodela struja nultog redosleda u energetskim kablovima sa čeličnom armaturom

Originalni naučni rad
UDK: 621.3.15.36; 621.3.025

Rezime:

Prisustvo čelika u armiranim energetskim kablovima čini impedanse provodnih delova ovih kablova zavisnim od struja nultog redosleda u njima. Zbog toga iznalaženje raspodele struja nultog redosleda u plaštu i armaturi rešavanjem sistema linearnih jednačina nije moguće. Međutim, ovaj problem se može rešiti izračunavanjem zajedničkog magnetskog fluksa koga stvaraju struje nultog redosleda koje za vreme zemljospoja postoje u kablu. Kada se zna vrednost tog fluksa, tada se mogu izračunati i sve elektromotorne sile koje se indukuju u kablu. Struje u olovnom plaštu i armaturi dobijaju se pomoću iterativnog postupka koji započinje sa dve proizvoljno odabrane vrednosti ove dve struje. Nakon što je izračunata raspodela struja nultog redosleda, jednostavno se može izračunati redukcioni faktor i nulta impedansa kabla, zatim faktor razlaganja struje zemljospoja kao i drugi nelinearni parametri kabla.

Ključne reči: raspodela struje zemljospoja, redukcioni faktor, faktor razlaganja struje zemljospoja, nulta impedansa kabla

Abstract:

ZERO-SEQUENCE CURRENTS DISTRIBUTION IN POWER CABLES WITH STEEL ARMOR

The presence of steel makes the impedances of the lead sheath and the armor strongly dependent on the zero-sequence currents flowing in armor power cables. This makes impossible the estimation of the zero-sequence currents distribution by solving the system of linear equations. However, the problem can be solved by calculating the common magnetic flux which is created by all zero-sequence currents flowing in the cable. Through that flux all induced electromotive forces can be calculated. The currents in the lead sheath and armor are obtained by an iterative procedure which starts with two quite arbitrary values of the two currents. Once the zero-sequence currents distribution is known, it is easy to calculate the reduction factor and the zero-sequence impedance of the cable as well as the ground fault current decomposition factor and other non-linear cable parameters of interest.

Key words: zero-sequence currents distribution, reduction factor, ground fault current decomposition factor, zero-sequence impedance of the cable

Vladimir I. Balkovoj] dipl. ing. el. – JP „EPS”, PD „Elektrovojvodina”,

Projektni biro, 21 000 Novi Sad, Bulevar oslobođenja 100

Dr Miladin R. Tanasković, dipl. ing. el. – JP „EPS”, PD „Elektro distribucija-Beograd”, 11 000 BEOGRAD, Masarikova 1-3

1. UVOD

Energetski kablovi sa izolacijom od impregiranog papira, kod kojih se prodor vlage sprečava primenom olovnog plašta, izvode se sa čeličnom armaturom koja olovni plašt štiti od mehaničkih oštećenja. Čeličnu armaturu takođe imaju i kablovi kod kojih se tokom eksploatacije pojavljuju velike aksijalne sile ili se očekuju druga izuzetna mehanička naprezanja. Čelična armatura izvodi se u obliku omotača od pocinkovanih čeličnih žica, ili čeličnih traka, ili se izvodi kombinacijom obe vrste ovih čelika.

Zaštita pomoću čelične armature primenjuje se kod kablova za podvodno polaganje, zatim kod rudarskih kablova, a do pojave polietilenske izolacije armirani kablovi tipa IPO bili su dominantni u našim srednjenaponskim distributivnim mrežama. Mada je danas još uvek zastupljenost IPO i NPO kablova u elektrodistributivnim mrežama Srbije značajna, ovde se u poslednjoj deceniji u najvećoj meri primenjuju kablovi srednjeg napona sa dielektrikom od umreženog polietilena sa izolovanim spoljnim omotačem (XHE kablovi).

Iako je ugradnja kablova sa sintetičkom izolacijom u elektrodistributivnim mrežama srednjeg napona kod nas počela nešto pre više od jedne decenije, njihovo ponašanje pri jednofaznim zemljospojevima je detaljno proučeno. Tako na primer, određivanje nultih impedansi jednožilnih kablova izloženo je u [1], dok je određivanje redukcionog faktora jednožilnih kablova položenih u trouglastom snopu dato u [2]. Takođe, određivanje impedanse uzemljenja jednožilnih kablova sa izolacionim spoljnim omotačem kada kroz fazne provodnike ne protiče struja kvara detaljno je prikazano u [3].

Nasuprot tome, i pored toga što je vremenski period primene NPO kablova mnogo duži od primene XHE kablova, detaljnije razmatranje njihovih uzemljivačkih svojstava i redukcionog faktora dato je jedino u [4] pre skoro tri decenije, ali sa relativno malo numeričkih podataka. U ovoj referenci je vrlo detaljno prikazan postupak za sračunavanje redukcionog faktora kablova tipa IPO i NPO sa svim potrebnim formulama, ali su izostali numerički rezultati dobijeni na taj način. Od konkretnih numeričkih vrednosti jedino su u tabeli 5.4 na strani 197 dati rezultati sedam merenja *redukcionog faktora* na jednom živom 10 kV napojnom kablovskom vodu. S obzirom da su merenja vršena u TS 10/0,4 kV/kV čiji uzemljivač svakako ima konačnu otpornost, svi su izgledi da su merenjem u stvari dobijene vrednosti faktora razlaganja r_D [6], a ne redukcionog faktora.

Vrednosti redukcionog faktora u funkciji struje zemljospoja za razne preseke ove vrste kablova da-

te su u [4] pomoću dijagrama na slici 5.36 na strani 198 uz navođenje osnovnih podataka o izvornoj referenci [5] iz koje dijagram potiče. Značajno je, međutim, da se u [5] na strani 344 navodi da su krive iz dijagrama sračunate za slučaj kada su zanemarene otpornosti uzemljenja plašteva na krajevima kabla, kao i to da se odvođenje struje sa čeličnog omotača u zemlju u ovom kontekstu uopšte ne pominje. To govori da su krive sračunate u skladu sa izvornom definicijom redukcionog faktora [7] pri čemu se podrazumeva da u faznim provodnicima mora da postoji struja čije magnetsko polje u okruženju kabla redukuje olovni plašt i čelični omotač. Kada nema struje u faznim provodnicima, tada nema ni njenog magnetskog polja pa nema nikakvog smisla govoriti niti o njegovoj redukciji niti o redukcionom faktoru, ali se ne sme zaboraviti da je tada i raspodela struja kroz plašt, armaturu i zemlju bitno različita od slučaja kada u faznim provodnicima postoji struja.

Uvažavajući značajnu rasprostranjenost papirnih kablova u našim gradskim srednjenaponskim mrežama i s obzirom da su kod podvodnog polaganja, kao i u slučaju izuzetnih mehaničkih naprezanja, kablovi sa čeličnom armaturom neizbežni, u tekstu koji sledi učinjen je pokušaj da se primenom analitičkog iterativnog postupka sprovedenog na personalnom računaru dublje pronikne u mehanizam fizičkog procesa u ovim kablovima pri jednofaznim zemljospojevima. Treba reći da je osim toga prisutna i želja autora da se čitaocima učine dostupnim analitički postupci za određivanje nulte impedanse i redukcionog faktora kablova sa čeličnom armaturom, što može olakšati pravovremeno donošenje odluka u vezi sa polaganjem i puštanjem u pogon ovakvih kablova.

2. O KONSEKVENCAMA NELINEARNOSTI PROBLEMA RASPODELE NULTIH STRUJA U ARMIRANIM KABLOVIMA

Pošto čelična armatura ima ulogu mehaničke zaštite provodnih delova kabla i pripadajuće izolacije, ona, sa izuzetkom spoljnog omotača od bitumenizovane jute ili PVC-a, obuhvata sve ostale delove kabla: fazne provodnike, sve provodne plašteve i sve izolacione slojeve. Zbog ove konstruktivne osobine magnetski fluksevi sa kojima su spregnute struje nultog redosleda (u daljem tekstu: nulte struje) svih provodnih delova kabla uvek sadrže i komponentu koja se zatvara kroz čeličnu armaturu.

Budući da je magnetska permeabilnost čelika nelinearna funkcija magnetskog polja, reaktanse svih provodnih delova kabla u režimu nultih struja nelinearne su funkcije struja u njima, zbog čega i čitav problem raspodele struje zemljospoja u kablovi-

ma sa čeličnom armaturom ima nelinearan karakter. U takvim okolnostima ukupna elektrootporna sila duž neke strujne konture ne može se dobiti fazorskim sabiranjem padova napona na sopstvenim i međusobnim impedansama, pa se problem raspodele nultih struja u ovakvim kablovima ne može rešavati pomoću sistema linearnih jednačina. S tim u vezi i upotreba sopstvenih i međusobnih impedansi u ovom kontekstu nema nikakvog praktičnog smisla.

Pored navedene nelinearnosti u čisto algebarskom smislu problem raspodele ima još jednu nelinearnu dimenziju. Naime, zbog prisustva čelične armature struje i naponi osim osnovnog imaju i harmonike višeg reda. Posledice ove pojave su dvojake: prvo, pošto struje i naponi nisu prostoperiodične funkcije vremena, problem raspodele ne može se korektno rešavati upotrebom kompleksnih veličina [10]; drugo, pošto magnetske osobine čelika zavise od brzine promene (učestanosti) magnetskog polja, tada zbog prisustva viših harmonika permeabilnost čelika prestaje da bude realna veličina i postaje kompleksan broj [4,10].

Nelinearnost problema raspodele struja u algebarskom smislu praktično se može prevazići upotrebom iterativnih numeričkih postupaka koji posle dovoljnog broja ponavljanja dovode do dovoljno male greške u rezultatu. Međutim, posledice nelinearnosti problema nastale zbog fizičkih pojava usled prisustva čelika i zbog nelinearnih svojstava ovog feromagnetskog materijala ne mogu se u potpunosti izbeći, tako da treba računati da svaka primena tradicionalnih analitičkih metoda pri rešavanju ovakvih problema neminovno podrazumeva izvesno odstupanje od tačnih rezultata. U tom smislu, poređenja sa rezultatima dobijenim merenjima ili primenom drugih analitičkih metoda uvek su poželjna i dragocena.

3. MAGNETSKI FLUKSEVI U REŽIMU NULTIH STRUJA U ARMIRANOM KABLU

Konstrukcija kablova koji su predmet ovog izlaganja je takva da se prostor koji ispunjavaju fazni provodnici, provodni plašt, izolacija i čelična armatura kabla može izdeliti na podprostore cilindričnog oblika čije se ose poklapaju sa osom kablovskog voda. U tom smislu nema nikakvih prepreka da se i okolno zemljište u koje je položen kabl aproksimira polucilindričnim podprostorom velikog poluprečnika čija se osa približno poklapa sa osom kabla. Prvi od ovih n podprostora ima oblik punog cilindra čija je osnova krug opisan oko sva tri fazna provodnika, odnosno krug čija je površina jednaka preseku provodnika kada se radi o jednožilnom kablov. Ostalih $n-1$ podprostora (osim poslednjeg) imaju oblik šup-

ljeg cilindra čiji je unutrašnji poluprečnik a_{i-1} , a spoljašnji poluprečnik a_i pri čemu je i redni broj podprostora računat od ose kabla. Spoljašnji poluprečnik poslednjeg polucilindričnog podprostora iznosi $a_n = D$, gde je D srednja vrednost dubine povratnog puta nultih struja kroz zemlju za koju se uzima da u metrima približno iznosi $D = 658\sqrt{\rho/f}$ (ρ je specifična otpornost tla u Ωm , a f učestanost u Hz).

U režimu nultih struja u svakom od cilindričnih podprostora postoji magnetski fluks Φ_i koga stvaraju sve struje koje postoje u kablovima a koje su obuhvaćene cilindričnom površi poluprečnika a_i . Kada je magnetska permeabilnost cilindričnog podprostora i konstantna i jednaka $\mu_0 = 4\pi 10^{-4}$ H/km, magnetski fluks u tom podprostoru Φ_i (u Wb) sračunava se prema izrazu

$$\ddot{O}_i = \int_{a_{i-1}}^{a_i} \mu_o H_i(x) c_i(x) \ell dx, \quad (1)$$

a kada je cilindrični podprostor i ispunjen feromagnetskim materijalom, taj fluks se sračunava prema

$$\ddot{O}_i = \int_{a_{i-1}}^{a_i} \mu_o \mu_{ri}(H_i(x)) H_i(x) c_i(x) \ell dx \quad (2)$$

Ovde je:

$H_i(x)$ – magnetsko polje (u A/m) koje u cilindričnom podprostoru čiji je redni broj i na udaljenosti od x metara od ose kabla stvaraju struje obuhvaćene cilindričnom površi poluprečnika a_i ;

$c_i(x)$ – bezdimenzionalna funkcija od x koja je u cilindričnim podprostorima ispunjenim izolacionim materijalom $c_i(x) = 1$; u provodnim cilindričnim podprostorima ona je na rastojanju x metara od ose kabla jednaka odnosu broja elementarnih fiktivnih strujnih niti u provodnom podprostoru u kojima fluks Φ_i indukuje elektromotorne sile, prema ukupnom broju fiktivnih strujnih niti koliko ih ima u celom provodnom podprostoru [9]; uz zanezanje skin efekta $c_i(x)$ se dobija pomoću približne formule

$$c_i(x) = \frac{x^2 - a_{i-1}^2}{a_i^2 - a_{i-1}^2}; \quad (3)$$

$\mu_{ri}(H_i(x))$ – relativna magnetska permeabilnost u cilindričnom podprostoru sa rednim brojem i koji je ispunjen feromagnetskim materijalom, koja se definiše kao

$$\mu_{ri}(H_i(x)) = 1000 \cdot \frac{B(H_i(x))}{\mu_0 H_i(x)}, \quad (4)$$

gde je $B(H_i(x))$ magnetska indukcija (u T) na rastojanju x metara od ose kabla;

l – dužina kabla u km.

Kod armiranih trožilnih i jednožilnih kablova po pravilu se razlikuju šest cilindričnih podprostora:

1. provodni podprostor koga čine fazni provodnici (ili provodnik) od bakra ili aluminijuma (spoljnji poluprečnik a_1 (u m))
2. izolacioni podprostor između provodnika i provodnog plašta (unutrašnji poluprečnik a_1 (u m), spoljnji poluprečnik a_2 (u m))
3. provodni podprostor plašta od olova ili aluminijuma (unutrašnji poluprečnik a_2 (u m), spoljnji poluprečnik a_3 (u m))
4. izolacioni podprostor između plašta i čelične armature (unutrašnji poluprečnik a_3 (u m), spoljnji poluprečnik a_4 (u m))
5. provodni podprostor čelične armature (unutrašnji poluprečnik a_4 (u m), spoljnji poluprečnik a_5 (u m))
6. neprovodni podprostor od čelične armature do rastojanja D (u m) (unutrašnji poluprečnik a_5 (u m), spoljnji poluprečnik $a_6 = D$ (u m)).

Radi lakšeg praćenja daljeg izlaganja arbitrarno se opredeljujemo za *trožilne kablove sa olovnim plaštom* uz opasku da potpuno analogna procedura važi za trožilne kablove sa aluminijumskim plaštom i jednožilne kablove sa olovnim ili aluminijumskim plaštom. U skladu sa ovim, za početak podrazumevaće se da ukupna struja faznih provodnika iznosi I (u A), da je struja u olovnom plaštu I_{pb} (u A) i da je struja u čeličnoj armaturi (ili omotaču) I_{fe} (u A).

Magnetsko polje H_α od sporopromenljive struje I_α dobija se iz opšte diferencijalne jednačine u kompleksnom obliku

$$\operatorname{rot} \underline{\mathbf{H}}_\alpha = \underline{\mathbf{J}}_\alpha \quad (5)$$

odakle posle integraljenja leve i desne strane po kružnoj površi ograničenoj kružnicom C sledi da je

$$\int_C H_\alpha d\ell = I_\alpha \quad (6)$$

Primenjujući (6) na poprečne preseke cilindričnih podprostora broj 1 do broj 6 dobijaju se vrednosti magnetskih polja $H_i(x)$ potrebnih za iznalaženje flukseva pomoću izraza (1) i (2). Na ovom mestu navodimo izraze za magnetska polja u olovnom plaštu (podprostor broj 3) i čeličnoj armaturi (podprostor broj 5) koji zbog provodne sredine i uz zanemarivanje skin efekta imaju specifičnu formu:

$$H_3(x) = \frac{I}{2\pi x} + \frac{I_{pb}}{2\pi x} \cdot \frac{x^2 - a_2^2}{a_3^2 - a_2^2} \quad (7)$$

$$H_5(x) = \frac{I}{2\pi x} + \frac{I_{pb}}{2\pi x} + \frac{I_{fe}}{2\pi x} \cdot \frac{x^2 - a_4^2}{a_5^2 - a_4^2} \quad (8)$$

Za čelični materijal od kojeg je napravljena armatura pri korišćenju izraza (2) za $i = 5$ upotrebljava se kompleksna relativna permeabilnost [4,10]

$$\mu_r(H) = \mu_r^{(1)}(H) - j\mu_r^{(2)}(H) \quad (9)$$

čime se uzimaju u proračun i aktivni gubici nastali u čeliku zbog vihoranih struja i histerezisa. U (9) $\mu_r^{(1)}(H)$ je relativna permeabilnost, a $\mu_r^{(2)}(H)$ je relativni faktor gubitaka.

Primenom izraza (1) do (9) konačno se dolazi do formula za izračunavanje magnetskih flukseva Φ_i , $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ koje u kablju i njegovom okruženju stvaraju struje I , I_{pb} i I_{fe} . Ove formule kao i skraćene oznake za određene integrale koji se pojavljuju u njima date su u Dodatku.

4. RAZLAGANJE UKUPNE STRUJE ZEMLJOSPOJA U KABLOVIMA POLOŽENIM U SLABO PROVODNO TLO – METODOLOGIJA

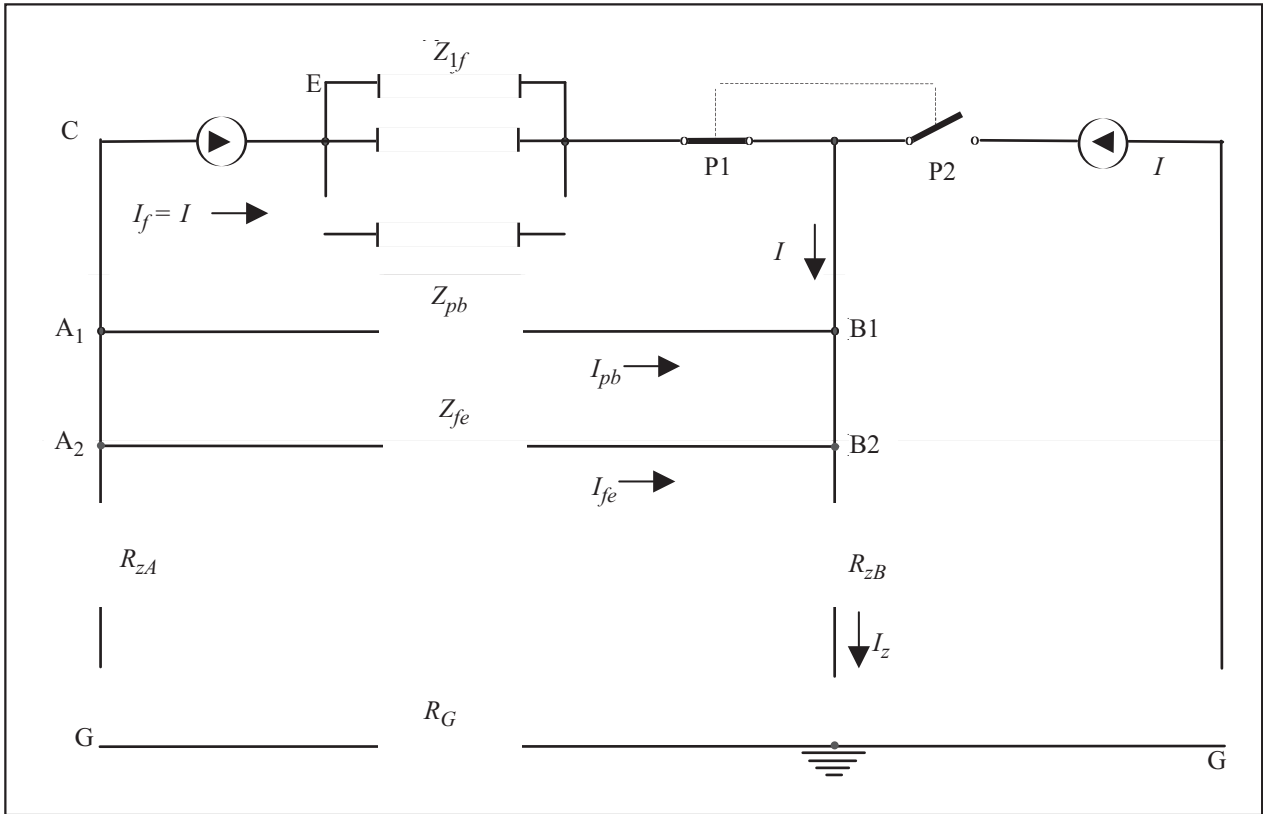
4.1. Uvodne napomene

Na slici 1. prikazana je zamenska šema energetskog kablovskog voda sa čeličnom armaturom na čijem se jednom kraju događa zemljospoj koji se alternativno napaja ili preko kablovskog voda (prekidač P1 uključen, a P2 isključen) ili mimo njega (prekidač P1 isključen, a P2 uključen). U narednom tekstu izložena je procedura kojom se ukupna struja zemljospoja I u tački B1 razlaže na komponentu u provodnom plaštu I_{pb} i komponentu u čeličnoj armaturi I_{fe} .

Metodologija se odnosi na trožilne energetske kablove sa čeličnom armaturom, priključene na trofaznu mrežu, koji imaju jedan provodni plašt od olova zajednički za sve tri žile i na jednožilne energetske kablove sa čeličnom armaturom koji su priključeni na monofaznu mrežu i koji imaju jedan provodni plašt. Pretpostavlja se da su svi navedeni kablovi položeni u slabo provodno tlo, što znači da se zanemaruje odvođenje struje sa čelične armature u zemlju.

4.2. Formule razlaganja i postupak iznalaženja struja I_{pb} i I_{fe}

Na šemi sa slike 1. mogu se uočiti dve zatvorene nulte konture u kojima su ukupne indukovane elektromotorne sile (ems) kompenzovane padovima napona na omskim otpornostima. Prva kontura C1 je kontura olovnog plašta i ona ima trasu A1 B1 B2 G A2 A1. Druga kontura C2 je kontura čelične armature (omotača) i ona ima trasu A2 B2 G A2.



Slika 1. Zamenska šema armiranog energetskog kabla položenog u slabo provodno tlo

Sukcesivnim integraljenjem kompleksne diferencijalne jednačine

$$\text{rot } \underline{\mathbf{E}} = -j\omega \underline{\mathbf{B}} \quad (10)$$

po površini obe konture dobija se da suma svih ems koje u prvoj konturi indukuju struje I , I_{pb} i I_{fe} iznosi $-j2\pi f \Phi_{C1}/l$ i da ista suma u drugoj konturi iznosi $-j2\pi f \Phi_{C2}/l$. Ovde su Φ_{C1} i Φ_{C2} magnetski fluksevi (u Wb) kroz prvu i drugu konturu, a f je učestanost magnetskog polja (u Hz).

Ako je $R_G = 0,0494 \Omega/\text{km}$ podužna otpornost povratnog puta struje kroz zemlju a s obzirom da za usvojene smerove struja važi relacija

$$I_z = I + I_{pb} + I_{fe} \quad (11)$$

tada se za konture C1 i C2 mogu napisati sledeće dve jednačine

$$-j2\pi f \frac{1}{\ell} \sum_{i=3}^6 \ddot{O}_i = R_{pb} I_{pb} + \left(R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell} \right) I_z \quad (12)$$

$$-j2\pi f \frac{1}{\ell} \sum_{i=5}^6 \ddot{O}_i = R_{fe} I_{fe} + \left(R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell} \right) I_z \quad (13)$$

gde su R_{pb} i R_{fe} podužne omske otpornosti olovnog plašta i čelične armature (u Ω/km), R_{zA} i R_{zB} otpornosti uzemljenja plašta i čelične armature na krajevima kabla u Ω , a l dužina kabla (u km).

Kada se zna ukupna struja zemljospoja, tada s obzirom na (11) i izraze (D-6) do (D-11) iz Dodatka, relacije (12) i (13) predstavljaju dve jednačine sa dve nepoznate struje I_{pb} i I_{fe} . Rešenje se može napisati u obliku

$$\begin{bmatrix} I_{pb} \\ I_{fe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ako za vreme zemljospoja u faznim provodnicima postoji struja I (na slici 1. prekidač P1 uključen, a P2 isključen), iz jednačina (12) i (13) dobijaju se jednakosti navedene u Dodatku pod oznakama (D-18) do (D-23).

Kada za vreme zemljospoja struja I ne postoji u faznim provodnicima, tj. kada se zemljospoj ne napaja preko kabla čija se raspodela nulnih struja ispituje (na slici 1. prekidač P1 isključen, a P2 uključen), izrazi za impedanse Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} i Z_{22} ostaju nepromenjeni, dok za V_1 i V_2 umesto (D-22) i (D-23) važi izraz (D-24) pri čemu u izrazima (D-6) do (D-11) treba staviti $I = 0$.

Elementi matrice Z_{ij} u opštem slučaju zavise od struja koje se traže iz dva razloga: zbog promene otpornosti usled zagrevanja i zbog zavisnosti permeabilnosti čelične armature od struje. Pošto se pri kratkotrajnim strujama reda 500 A prvi razlog može zanemariti, u daljem postupku uzet je u obzir samo drugi razlog, a iznalaženje struja I_{pb} i I_{fe} sprovedeno je iterativnom procedurom.

Ona započinje tako što se strujama I_{pb} i I_{fe} najpre dodele dve potpuno proizvoljne vrednosti, pa se sa tim vrednostima prema formulama (D-18) do (D-21) sračunaju impedanse Z_{ij} , a sa datom strujom I pomoću (D-22) i (D-23) ili (D-24) sračunaju elementi V_i .

Zatim se pomoću (14) sračunaju korigovane struje $I_{pb}^{(novo)}$ i $I_{fe}^{(novo)}$ a sa njima i korigovane vrednosti $Z_{ij}^{(novo)}$ i $V_{ij}^{(novo)}$ čime se završava prva iteracija.

Druga iteracija započinje uvođenjem struja $I_{pb}^{(staro)}$ i $I_{fe}^{(staro)}$ preko smene $I_{pb}^{(staro)} = I_{pb}^{(novo)}$ i $I_{fe}^{(staro)} = I_{fe}^{(novo)}$ nakon čega se procedura ponavlja, a kao rezultat iz struja $I_{pb}^{(staro)}$ i $I_{fe}^{(staro)}$ dobijaju se „nove” struje $I_{pb}^{(novo)}$ i $I_{fe}^{(novo)}$ i „nove” vrednosti $Z_{ij}^{(novo)}$ i $V_{ij}^{(novo)}$. Druga iteracija završava se testiranjem razlike struja sa gornjim indeksima „(staro)” i „(novo)”:

$$\left| \frac{I_{pb}^{(staro)} - I_{pb}^{(novo)}}{I_{pb}^{(staro)}} \cdot 100 \right| = \delta_{pb} \% \quad (15)$$

$$\left| \frac{I_{fe}^{(staro)} - I_{fe}^{(novo)}}{I_{fe}^{(staro)}} \cdot 100 \right| = \delta_{fe} \% \quad (16)$$

Procedura se ponavlja sve dok razlike $\delta_{pb} \%$ i $\delta_{fe} \%$ ne postanu manje od unapred zadate dovoljno male vrednosti.

Opisani postupak može se bez teškoća sprovesti na personalnom računaru pomoću programa MATLAB ili sličnih njemu.

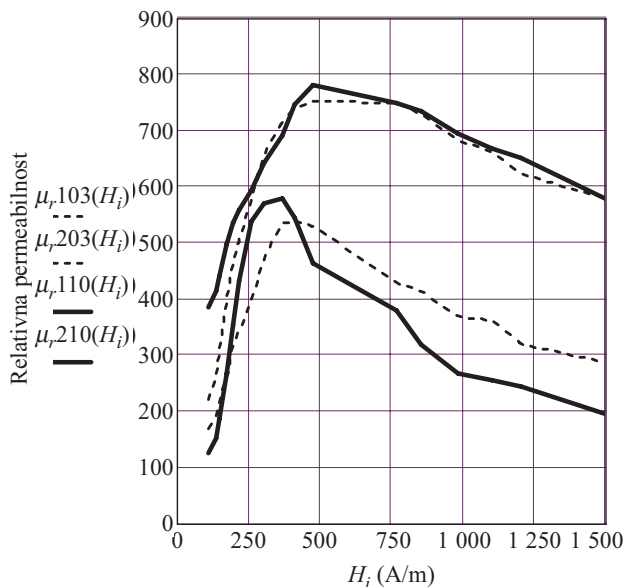
Iskustva pokazuju da već posle pet do deset iteracija greška δ % postaje manja od dela procenta.

4.3. Osvrt na probleme u vezi sa primenom kompleksne permeabilnosti

Kao što će se videti iz narednog teksta predmet numeričkih analiza raspodele nultih struja bili su energetski srednjenaponski kablovi tipa IPO i NPO nazivnog preseka 95 mm², 150 mm² i 240 mm². Prema podacima iz [11] armatura ovih kablova izvedena je sa čeličnom trakom debljine 0,5 mm (presek 95 mm²) i 0,8 mm (preseci 150 mm² i 240 mm²).

Međutim, u vreme izrade ovog teksta autorima su bili na raspolaganju podaci o relativnoj kompleksnoj permeabilnosti hladno valjane čelične trake debljine 0,3 mm i 1,0 mm koji su dobijeni eksperimentalnim putem [12].

Ovi podaci grafički su dati na slici 2. na kojoj su realni delovi permeabilnosti prikazani pomoću donje, a imaginarni pomoću gornje krive. Krive sa slike 2. predstavljale su osnovu za procenu permeabilnosti traka debljine 0,5 mm i 0,8 mm.



Slika 2. Kompleksna relativna permeabilnost čelične trake

– isprekidana linija: traka 0,3 mm,
 – puna linija: traka 1,0 mm,
 – donja kriva: $\mu_r^{(1)}$ i
 – gornja kriva: $\mu_r^{(2)}$.

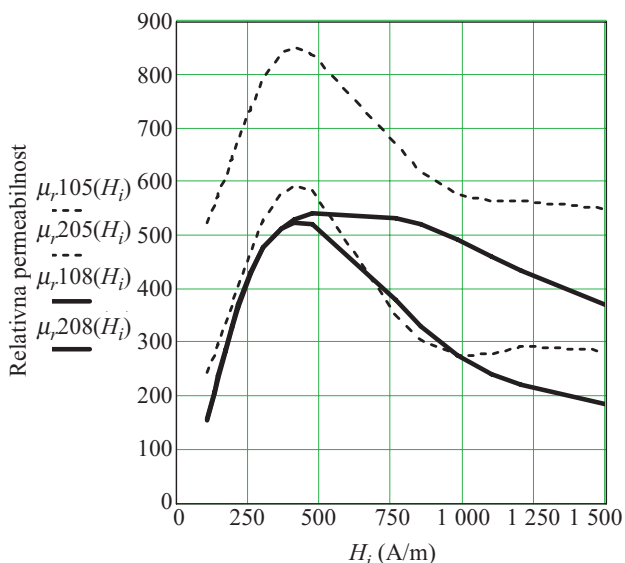
U tu svrhu iskorišćeni su podaci sa dijagrama iz reference [5] o redukcionom faktoru kablova čija je armatura izvedena trakama debljine 0,5 mm i 0,8 mm. Za procenu relativne permeabilnosti za traku 0,5 mm korišćeni su podaci o traci 0,3 mm sa slike 2.

Nezavisno jedan od drugog korigovani su realni i imaginarni deo permeabilnosti sve dok se postupkom opisanim u 4.2 nije dobio redukcionni faktor sa dijagrama na slici 114 na strani 348 u [5]. Na istovetan način procenjena je i permeabilnost za traku 0,8 mm polazeći od grafika za traku 1,0 mm sa slike 2. Nakon velikog broja pokušaja urađenih za razne vrednosti ukupne struje I dobijene su tražene relativne permeabilnosti koje su prikazane na slici 3.

5. KARAKTERISTIČNI SLUČAJEVI RASPODELE NULTIH STRUJA

Procedura za razlaganje struje I koja je izložena u 4.2 omogućuje analize raspodele nultih struja za različite slučajeve zemljospoja sa različitim vrednostima otpornosti R_{zA} i R_{zB} (slika 1.). Svi ovi slučajevi mogu se generalno podeliti u dve grupe: grupu F1

koju čine zemljospojevi koji se napajaju preko kabla čija se raspodela struja analizira i grupu F0 koju čine zemljospojevi koji se napajaju mimo tog kabla.



Slika 3. Kompleksna relativna permeabilnost čelične trake (procena prema [5])

- isprekidana linija: traka 0,5 mm;
- puna linija: traka 0,8 mm;
- donja kriva: $\mu_r^{(1)}$ i
- gornja kriva: $\mu_r^{(2)}$.

Iz obe ove grupe za analizu su izdvojene tri varijante koje su od praktičnog značaja za eksploataciju:

- *Varijanta F1.1* – kabl koji je položen u slabo provodno tlo napaja se iz tačke C ($I_f \neq 0$, P1 zatvoren, P2 otvoren); otpornosti uzemljenja u tačkama A2 i B2 su zanemarive ($R_{zA} = R_{zB} = 0$);
- *Cilj analize*: Iznalaženje struja u olovnom plaštu i čeličnoj armaturi kabla preko koga se napaja zemljospoj kada je poznata ukupna struja zemljospoja; izračunavanje redukcionog faktora i nulte impedanse kabla pomoću prethodno izračunatih struja u olovnom plaštu i čeličnoj armaturi;
- *Varijanta F1.2* – kabl koji je položen u slabo provodno tlo napaja se iz tačke C ($I_f \neq 0$, P1 zatvoren, P2 otvoren); otpornost uzemljenja R_{zA} u tački A2 i otpornost uzemljenja R_{zB} u tački B2 imaju konačne vrednosti;
- *Cilj analize*: Numerička procena pogonskih impedansi olovnog plašta i čelične armature kabla preko koga se napaja zemljospoj pomoću prethodno dobijenih vrednosti struja u olovnom plaštu i čeličnoj armaturi; numerička procena faktora razlaganja struje zemljospoja [7] u postrojenju koje se napaja kablom; izračunavanje graničnog potencijala uzemljivača postrojenja koje se napaja kablom [7];

- *Varijanta F0* – kabl koji je položen u slabo provodno tlo napaja se iz tačke D ($I_f = 0$, P1 otvoren, P2 zatvoren); otpornosti uzemljenja u tačkama A2 i B2 imaju konačnu vrednost ($R_{zA} = R_{zB} = 1 \Omega$ ili $R_{zA} = R_{zB} = 4 \Omega$) i
- *Cilj analize*: Numerička procena faktora razlaganja struje zemljospoja I u postrojenju na koje je priključen kabl kada se struja I ne injektira preko faznih provodnika kabla (slučaj kada kabl ne napaja zemljospoj).

6. NULTA IMPEDANSA KABLA, POGONSKE IMPEDANSE PLAŠTEVA I RAZLAGANJE STRUJE I NA KOMPONENTE U PLAŠTU I ARMATURI

Bez obzira na nelinearna svojstva raspodele nultih struja, nulta impedansa kabla, pogonske impedanse njegovih komponenti kao i redukcionni faktor kabla i faktor razlaganja struje zemljospoja dobijaju se bez teškoća kada se za datu I struju zna koliko su struje I_{pb} i I_{fe} . Ovo potvrđuju i sledeći primeri.

Nulta impedansa kabla određuje se prema varijanti F1.1: $R_{zA} = 0$, $R_{zB} = 0$, P1 zatvoren, P2 otvoren. Sa oznakama sa slike 1. nulta impedansa kabla $Z_0(I)$ u $\Omega/\text{km}/\text{fazi}$ definisana je kao količnik

$$Z_0(I) = 3 \frac{\Delta U_0}{I \ell} \quad (17)$$

gde je ΔU_0 jednako sumi svih elektrootpornih sila na otvorenoj konturi E B1 B2 G A2 A1 C, tj.

$$\Delta U_0 = \frac{R_{1f} \ell}{3} I + R_G \ell I_z + j 2 \pi f \sum_{i=1}^6 \ddot{O}_i \quad (18)$$

odakle je

$$Z_0(I) = R_{1f} + 3 \left(r R_G + j 2 \pi f \frac{1}{I \ell} \sum_{i=1}^6 \ddot{O}_i \right) \quad (19)$$

R_{1f} (Ω/km) je otpornost jednog faznog provodnika, a r je redukcionni faktor kabla definisan kao

$$r = \frac{I_z}{I}, \quad \text{pri } (R_{zA} \wedge R_{zB}) = 0 \quad (20)$$

Pošto se u svim izrazima za magnetske flukseve Φ_i u brojiocu nalazi dužina l , iz (19) se vidi da podužna vrednost nulte impedanse izražena u $\Omega/\text{km}/\text{fazi}$ ne zavisi od dužine kablovskog voda.

Pogonska impedansa [4,8] jednog električnog kola je impedansa koja sadrži i komponente nastale zbog magnetskih i električnih sprega sa drugim električnim kolima u okruženju. Pogonska impedansa Z_{pb} olovnog plašta (u Ω/km) jednaka je količniku napona U_{A1B1} i struje I_{pb} , pa se s obzirom na pozitivne smerove usvojene na slici 1. može pisati

$$Z_{pb} = -\left(R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell}\right) \frac{I_z}{I_{pb}} \quad (21)$$

Za pogonsku impedansu čelične armature (u Ω/km) na analogan način se dobija

$$Z_{fe} = -\left(R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell}\right) \frac{I_z}{I_{fe}} \quad (22)$$

Kada za vreme zemljospoja struja I ne postoji u faznim provodnicima, tj. kada se zemljospoj ne napaja preko kabla čija se raspodela nultih struja ispušta, umesto (21) i (22) koriste se sledeći izrazi:

$$Z_{pb} = -\left[R_{zB} I_z + (R_G \ell + R_{zA}) I_p\right] \frac{1}{I_{pb} \ell} \quad (23)$$

$$Z_{fe} = -\left[R_{zB} I_z + (R_G \ell + R_{zA}) I_p\right] \frac{1}{I_{fe} \ell}, \quad (24)$$

gde su obe impedanse izražene u Ω/km , a $I_p = I_{pb} + I_{fe}$ je ukupna struja kroz olovni plašt i čeličnu armaturu. Pogonska impedansa paralelne veze olovnog plašta i čelične armature (u Ω/km) data je izrazom

$$Z_p = \frac{Z_{pb} Z_{fe}}{Z_{pb} + Z_{fe}} \quad (25)$$

Ako je bar jedna od dve otpornosti R_{zA} i R_{zB} različita od nule, tj. ako je $(R_{zA} \vee R_{zB}) \neq 0$ podužne vrednosti pogonskih impedansi Z_{pb} , Z_{fe} i Z_p izraženih u Ω/km u opštem slučaju zavise ne samo od struje I , već zavise i od dužine kabla ℓ . Međutim, numeričke analize pokazuju da u specijalnim slučajevima kada R_{zB} uzima vrednosti reda $\text{k}\Omega$ i veće, zavisnost podužnih vrednosti pogonskih impedansi od ℓ praktično iščezava.

Redukcioni faktor kabla određuje se pomoću izraza (20) prema varijanti F1.1: $R_{zA} = 0$, $R_{zB} = 0$, P1 zatvoren, P2 otvoren. Redukcioni faktor ne zavisi od dužine kabla.

Faktor razlaganja struje zemljospoja definiše se kao količnik

$$r_D = \frac{I_z}{I}, \quad \text{pri } (R_{zA} \vee R_{zB}) \neq 0 \quad (26)$$

i u opštem slučaju zavisi od struje I i od dužine kabla ℓ .

Faktor razlaganja ukupne struje kroz olovni plašt i čeličnu armaturu definiše se kao količnik

$$r_F = \frac{I_{fe}}{I_{pb} + I_{fe}} = \frac{I_{fe}}{(r_D - 1)I}, \quad (27)$$

odakle sledi

$$I_{fe}/I_{pb} = r_F/(1 - r_F). \quad (28)$$

Numerička ispitivanja sprovedena na kablovima tipa NPO preseka $3 \times 95 \text{ mm}^2$, $3 \times 150 \text{ mm}^2$ i $3 \times 240 \text{ mm}^2$ sa strujama I iz opsega 100 A do 600 A i dužinama kabla ℓ iz opsega od 50 m do 1 500 m pokazala su da faktor razlaganja r_F u navedenim opsezima zavisi isključivo od geometrije preseka kabla i da je gotovo neosetljiv prema intenzitetu struje I , dužinama ℓ i otpornostima R_{zA} i R_{zB} . Računom su dobijene sledeće vrednosti r_F :

$$\begin{aligned} &0,269 \text{ 0} - \text{j } 0,002 \text{ 0} \text{ za presek } 3 \times 95 \text{ mm}^2; \\ &0,350 \text{ 0} - \text{j } 0,003 \text{ 5} \text{ za presek } 3 \times 150 \text{ mm}^2 \text{ i} \\ &0,323 \text{ 5} - \text{j } 0,003 \text{ 5} \text{ za presek } 3 \times 240 \text{ mm}^2. \end{aligned} \quad (29)$$

Kada se za datu struju I i datu dužinu ℓ zna kompleksna vrednost faktora razlaganja r_D , tada se sa navedenim vrednostima r_F može izračunati kompleksna struja u olovnom plaštu i kompleksna struja u čeličnoj armaturi pomoću izraza

$$I_{fe} = r_F (r_D - 1)I \quad (30)$$

$$I_{pb} = (1 - r_F) \cdot (r_D - 1)I \quad (31)$$

NAPOMENA: Za praktičnu primenu (30) i (31) na kabl NPO13 $3 \times 150 \text{ mm}^2$ može se koristiti dijagram na slici 12.

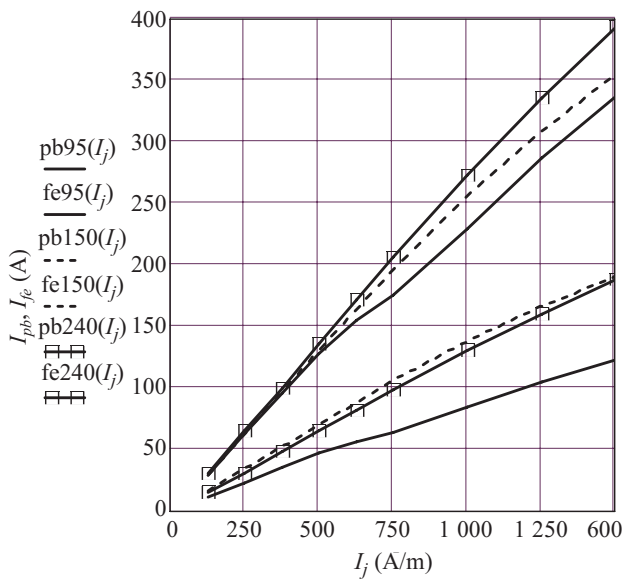
7. REZULTATI ANALIZE

7.1. Prikaz numeričkih rezultata dobijenih metodom razlaganja ukupne nulte struje I

Raspodela nultih struja analizirana je prema ranije objašnjenim procedurama na kablovima tipa NPO nazivnih preseka 95 mm^2 , 150 mm^2 i 240 mm^2 nazivnog napona 6/10 kV/kV. Podaci za ove kablove uzeti su iz priručnika [11]. Raspodelu je bilo moguće ispitivati u strujnom opsegu od 50 A do 600 A zbog toga što su na raspolaganju bili ograničeni podaci za kompleksnu permeabilnost čelične armature dobijeni merenjima sa jačinama magnetskog polja u opsegu od 140 A/m do 2 220 A/m [12].

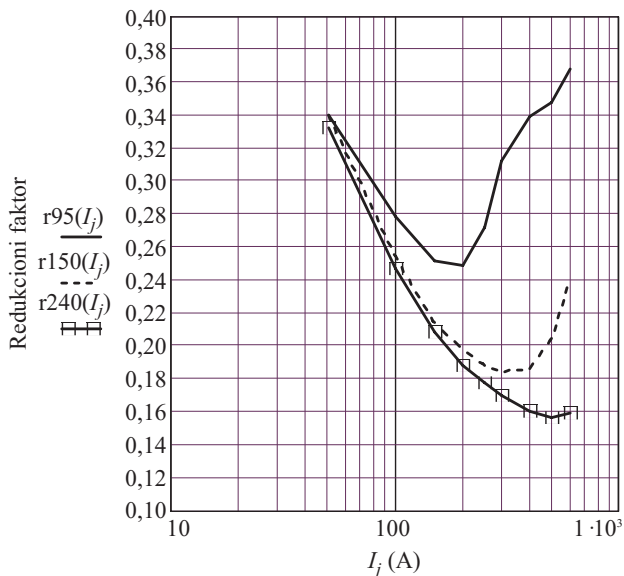
Na slici 4. prikazana je raspodela struja u olovnom plaštu i čeličnoj armaturi za tri standardna preseka koja je za varijantu zemljospoja F1.1 dobijena proračunskim postupkom opisanim u tač. 4. Na osnovu te raspodele sračunati su redukcioni faktori pojedinih kablova i njihove nulte impedanse. Dobijene vrednosti redukcionog faktora prikazane su grafički na slici 5. na kojoj se prepoznaje karakteristična tendencija pomeranja minimuma krive udesno naniže kada se presek faznih provodnika povećava.

Na slici 6. vidi se da nulta otpornost armiranih kablova dostiže maksimum upravo za one vrednosti ukupne struje faznih provodnika za koje redukcioni



Slika 4. Efektivne vrednosti struje olovnog plašta i čelične armature u zavisnosti od ukupne struje I

- gornje tri linije: I_{pb} ;
- donje tri linije: I_{fe} ;
- puna linija: NPO 13 3x95 mm² Cu;
- isprekidana linija: NPO 13 3x150 mm² Al i
- linija sa kvadratićima: NPO 13 3x240 mm².



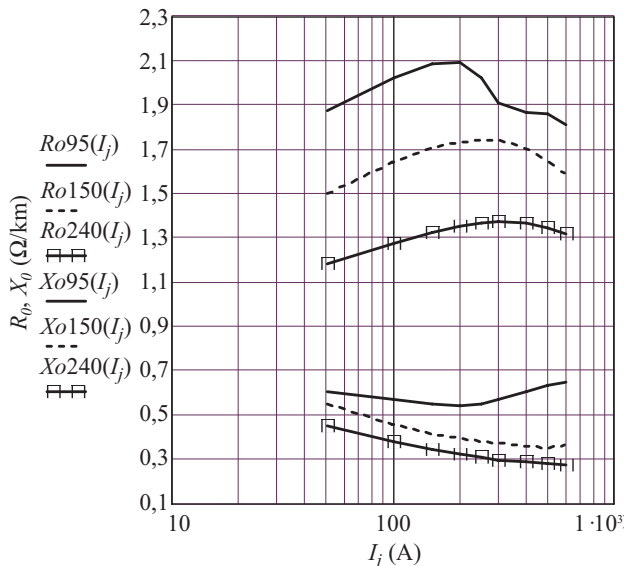
Slika 5. Redukcioni faktor armiranih kablova

- puna linija: NPO 13 3x95 mm² Cu;
- isprekidana linija: NPO 13 3x150 mm² Al i
- linija sa kvadratićima: NPO 13 3x240 mm² Al.

faktor ima minimum, dok nulte reaktanse, za razliku od nultih otpornosti, na tom mestu imaju minimum.

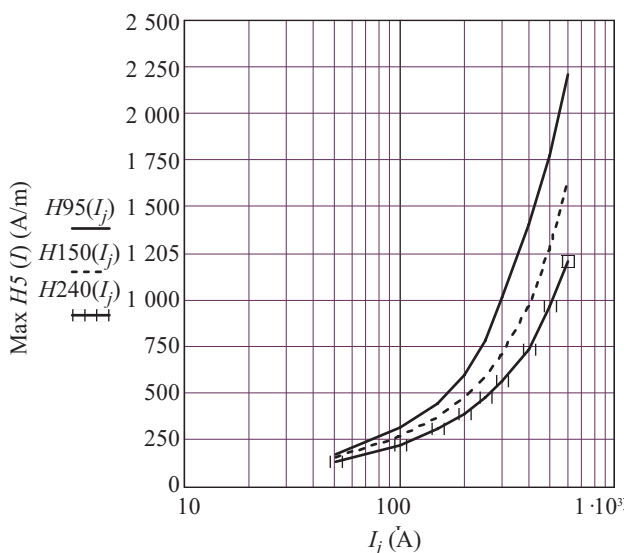
Dijagram na slici 7. prikazuje vrednosti rezultantnog magnetskog polja na unutrašnjoj površini čelične armature. Jednostavna računica pokazuje da bi magnetsko polje koje bi na tom mestu stvorila

struja kroz fazne provodnike bez struje u olovnom omotaču, bilo dva do tri puta veće od rezultantnog. Ova pojava koja je posledica suprotnih smerova struja I i I_{pb} objašnjava niske vrednosti nultih reaktansi kablova, kao i pogonskih reaktansi olovnog plašta i čelične armature na slikama 8. i 9. Pogonske



Slika 6. Nulte impedanse armiranih kablova $Z_0 = R_0 + jX_0$ (Ω/km)

- gornje linije: R_0 ;
- donje linije: X_0 ;
- puna linija: NPO 13 3x95 mm² Cu;
- isprekidana linija: NPO 13 3x150 mm² Al i
- linija sa kvadratićima: NPO 13 3x240 mm² Al.

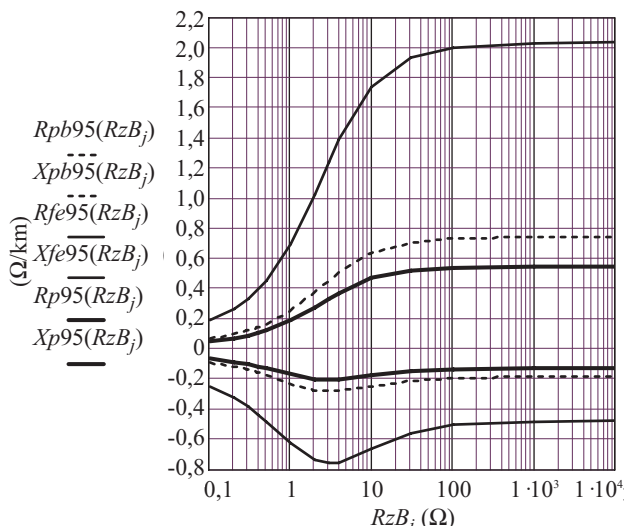


Slika 7. Maksimalne vrednosti magnetskog polja u čeličnoj armaturi (varijanta F1.1)

- puna linija: NPO 13 3x95 mm² Cu;
- isprekidana linija: NPO 13 3x150 mm² Al i
- linija sa kvadratićima: NPO 13 3x240 mm² Al.

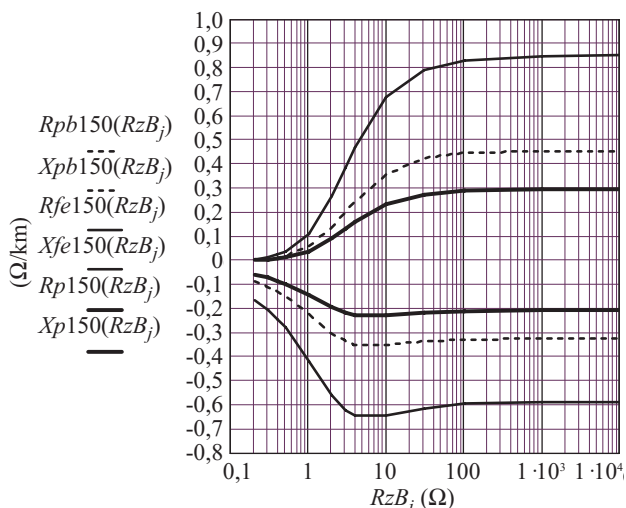
impedanse sračunate su prema varijanti zemljospoja F1.2 uz konstantnu otpornost $R_{zA} = 0,1 \Omega$ i za razne vrednosti otpornosti R_{zB} .

Poređenje grafika na slikama 8. i 9. pored ostalog pokazuje i kako geometrija poprečnog preseka kabla utiče na pogonske impedanse njegovih uzemljenih provodnih delova.



Slika 8. Pogonske impedanse olovnog plašta i čelične armature u zavisnosti od otpornosti uzemljenja na kraju kabla NPO 13 3x95 mm² Cu (varijanta F1.2)

- gornje linije: R; donje linije: X;
- puna tanja linija: čelična armatura;
- isprekidana linija: olovni plašt;
- puna deblja linija: paralelna veza olovnog i plašta i armature.



Slika 9. Pogonske impedanse olovnog plašta i čelične armature u zavisnosti od otpornosti uzemljenja na kraju kabla NPO 13 3x150 mm² Al (varijanta F1.2)

- gornje linije: R; donje linije: X;
- puna tanja linija: čelična armatura;
- isprekidana linija: olovni plašt i
- puna deblja linija: paralelna veza olovnog plašta i armature.

Zanimljivo je da su za $R_{zB} > 100 \Omega$ pogonske impedanse sa slika 7. i 8. praktično linearne funkcije dužine kabla l , dok za manje vrednosti R_{zB} njihova zavisnost od l postaje nelinearna. Ovo svojstvo dozvoljava da se za bilo koju dužinu kabla l može odrediti granični potencijal uzemljivača na njegovom kraju V_{GR} [7], tj. onaj potencijal na otpornosti R_{zB} koji pri datoj struji zemljospoja u B1 ne može biti premašen bez obzira koliko je velika otpornost R_{zB} . Uz smerove kakvi su dati na slici. 1. granični potencijal uzemljivača (u V) je

$$V_{GR} = -Z_p I_p \ell - R_{zA} I_z = Z_p (1 - r_D) I \ell - R_{zA} I_z \quad (32)$$

gde je Z_p (u Ω/km) podužna impedansa paralelne veze olovnog plašta i čelične armature, $I_p = I_{pb} + I_{fe}$, r_D faktor razlaganja struje zemljospoja definisan sa (27) i I_z komponenta struje I definisana sa (11) koja se zatvara kroz zemlju.

Kada je otpornost R_{zA} dovoljno mala, umesto (32) može se koristiti

$$V_{GR} = -Z_p I_p \ell = Z_p (1 - r_D) I \ell \quad (33)$$

Za izračunavanje V_{GR} za kablove nazivnog napona 6/10 kV tipične vrednosti za Z_p (u Ω/km) pri struji od 300 A su:

$$\begin{aligned} &0,545 - j 0,133 \text{ za NPO 13 3x95 mm}^2 \\ &0,296 - j 0,209 \text{ za NPO 13 3x150 mm}^2 \\ &0,250 - j 0,163 \text{ za NPO 13 3x240 mm}^2. \end{aligned} \quad (34)$$

Sa ovim vrednostima dobijeni su za dužinu $l = 1$ km sledeći granični potencijali uzemljivača V_{GR} na kraju kabla, sada izraženi u V/km:

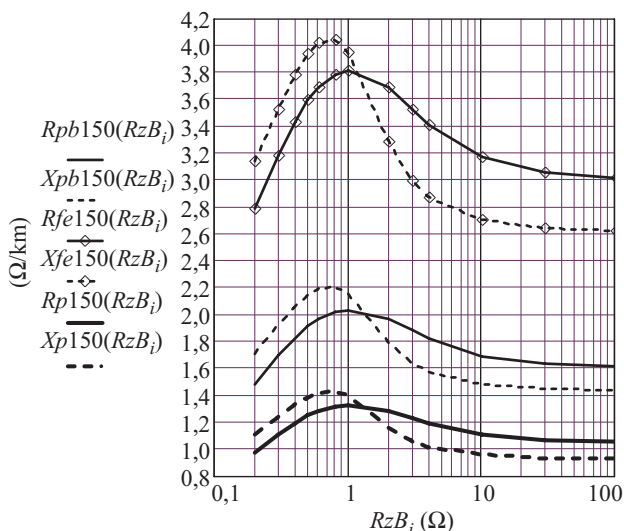
$$\begin{aligned} &168,3 \text{ za NPO 13 3x95 mm}^2 \\ &108,7 \text{ za NPO 13 3x150 mm}^2 \\ &89,5 \text{ za NPO 13 3x240 mm}^2. \end{aligned} \quad (35)$$

Interesantno je zapaziti da ove brojke ukazuju da u uzemljenoj distributivnoj mreži 10 kV izvedenoj navedenim kablovima sa strujom zemljospoja ograničenom na 300 A u kojoj je dozvoljeni napon dodira 150 V i dozvoljeni napon na uzemljivaču $2 \times 150 = 300$ V [13], uzemljivači transformatorskih stanica (TS) 10/0,4 kV/kV mogu imati proizvoljne otpornosti budući da struja od 300 A na njima ne može stvoriti potencijal veći od 170 V ako nijedna TS u mreži nije udaljena od napojne TS više od $300/168,3 = 1,78$ km!

Na slici 10. prikazane su pogonske impedanse armiranog kabla čiji je presek 3×150 mm² Al u zavi-

snosti od različitih otpornosti uzemljenja na kraju kabla R_{zB} uz konstantnu otpornost $R_{zA} = 0,1 \Omega$. Pogonske impedanse sračunate su za slučaj kada se struja I injektira u tački B1 mimo faznih provodnika kabla (varijanta zemljospoja F0). Već na prvi pogled uočava se da je razlika u odnosu na sliku 9. drastična. Ne samo da su apsolutne vrednosti pogonskih otpornosti i reaktansi u drugom slučaju višestruko veće, već su na slici 10. reaktanse dobile suprotan znak – postale su pozitivne!

Kao što je napred pomenuto osnovni uzrok ovih i ovolikih promena nalazi se u činjenici da u drugom slučaju u režimu nultih struja rezultatni magnetski fluks stvaraju dve struje (I_{pb} i I_{je}) koje su gotovo istog faznog stava (argumenti im se razlikuju za manje od jednog stepena!). Ovo je velika razlika u odnosu na slučaj kada ukupni nulti fluks stvaraju tri struje od kojih su dve približno u opoziciji sa prvom, pa su im fluksevi suprotnih znakova. Ovakve vrednosti pogonskih impedansi nagoveštavaju znatne razlike i u faktorima razlaganja ukupne nulte struje I o čemu svedoči i dijagram na slici 11. Na ovom dijagramu faktor razlaganja $r_D = I_z/I$ struje zemljospoja prikazan je u zavisnosti od različitih otpornosti uzemljenja na kraju kabla R_{zB} uz konstantnu otpornost $R_{zA} = 0,1 \Omega$. Snop od tri gornje linije predstavlja faktor razlaganja $r_D = I_z/I$ struje zemljospoja I u tački B1 (slika 1.) kada se struja injektira mimo faznih provodnika kabla (varijanta F0), dok snop od tri donje krive predstavlja isti faktor kada se zemljospoj u B1 napaja preko kabla (varijanta F.1.2).

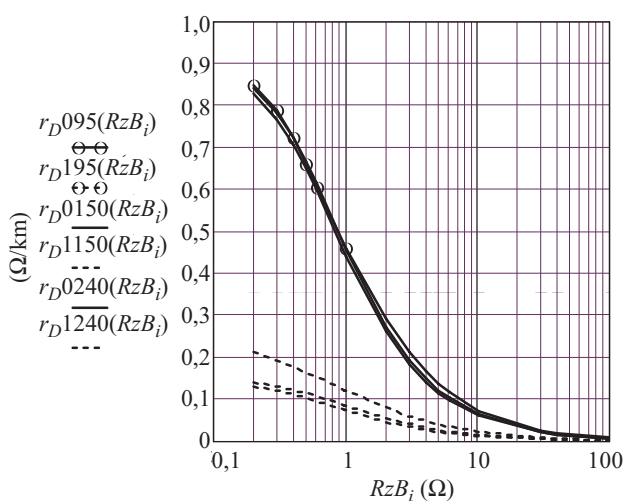


Slika 10. Pogonske impedanse olovnog plašta i čelične armature u zavisnosti od otpornosti uzemljenja na kraju kabla NPO 13 3x150 mm² Al (varijanta F0)

- pune linije: R; isprekidane linije: X;
- rombovi: čelična armatura;
- kružići: olovni plašt i
- čiste linije: paralelna veza olovnog plašta i armature.

Grafik sa slike 11. implicira najmanje dve važne konstatacije:

Prvo, velike razlike između faktora r_D prema varijanti F0 i varijanti F1.2 snažno podupiru tezu da zbog prisustva čelične armature glavnu zaslugu za dobra uzemljivačka svojstva i nizak redukcionni faktor NPO kablova sa provodnim spoljnjim omotačem ima jaka magnetska sprega nultih struja u faznim provodnicima i nultih struja u olovnom plaštu i čeličnoj armaturi, dok odvođenje struje sa čelične armature u zemlju u svemu tome igra marginalnu ulogu. Pri tom se podrazumeva da ova teza treba da bude potvrđena i za provodno tlo odgovarajućom analizom koja izlazi iz okvira ovog razmatranja, ali se na njega nadovezuje.



Slika 11. Faktor razlaganja $r_D = I_z / I$ u zavisnosti od otpornosti uzemljenja na kraju kabla NPO 13 3x95 mm², 3x150 mm² i 3x240 mm²

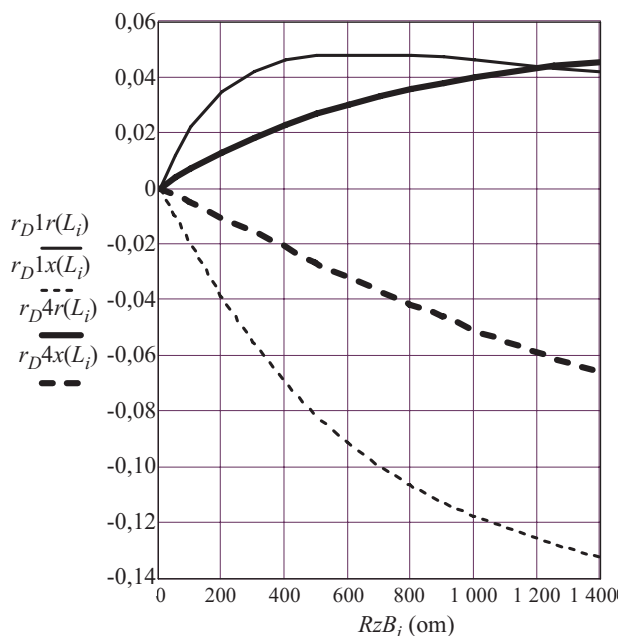
- gornje linije: varijanta F0;
- donje linije: varijanta F1.2;
- linija sa kružićima: NPO 13 3x95 mm² i
- čiste linije: NPO 13 3x150 mm² i 3x240 mm².

Drugo, suprotno prilično rasprostranjenom uverenju da su armirani kablovi sa provodnim spoljnjim omotačem u svakoj prilici dobri uzemljivači [14], ovi rezultati nagoveštavaju da bi u određenim uslovima čak i u provodnom tlu armirani kablovi mogli biti manje efikasni kao uzemljivači nego što se misli. Ovo je moguće u slučaju kada armirani kablovi ne napajaju kvar, već samo odvođe deo struje zemljospoja putem olovnog plašta i čelične armature kao svaki običan lineični uzemljivač.

Ako analize uzemljivačkih svojstava armiranih kablova položenih u provodno tlo potvrde ovu pretpostavku, o tome bi trebalo voditi računa pri dimenzionisanju uzemljivača napojnih TS 110/SN kV/kV prema strujama zemljospoja na strani 110 kV kada se procenjuje doprinos armiranih kablova u odvođenju ukupne struje kvara.

Problem ne postoji kod dimenzionisanja uzemljenja kablovskih TS SN/0,4 kV/kV jer u tim trafostanicama uvek mora postojati bar jedan kabl koji napaja kvar, a rezultatni redukcionni faktor ili rezultatni faktor razlaganja jednak je proizvodu redukcionnih faktora svih kablova koji su vezani na postrojenje TS, te kao takav mora biti manji od redukcionnog faktora napojnog kabla.

Na kraju na slici 12. dati su grafici kompleksnog faktora razlaganja r_D za kabl NPO 13 3x150 mm² izračunati prema varijanti F1.2 za dužine kabla od 50 m do 1 500 m sa otpornošću $R_{zA} = 0,1 \Omega$ na početku kabla i sa dve alternativne otpornosti $R_{zB} = 1 \Omega$ i $R_{zB} = 4 \Omega$ na njegovom kraju. Uz brojnu vrednost faktora r_F iz (36) dijagrami se mogu koristiti za određivanje nultih struja u olovnom plaštu i čeličnoj armaturi ovog tipa kabla kada otpornosti uzemljenja postrojenja koje on napaja alternativno iznose 1Ω ili 4Ω .



Slika 12. Faktor razlaganja r_D struje zemljospoja $I = 300 A$ napojnog kabla NPO 13 3x150 mm² u zavisnosti od dužine kabla

- pune linije: realni deo r_D ;
- isprekidane linije: imaginarni deo r_D ;
- tanja linija: $R_{zB} = 1 \Omega$ i
- deblja linija: $R_{zB} = 4 \Omega$.

7.2. Poređenje sa rezultatima drugih izvora

U tabeli 5.4 na strani 197. reference [4] dati su rezultati merenja redukcionnog faktora na kabl IPO 13 3x95 mm² u 10 kV mreži u Beogradu. U ovom izvoru ne navode se podaci o dužini kablovskog voda, niti se daju podaci o otpornostima uzemljenja na njegovim krajevima. Pri takvim okolno-

stima pretpostavljeno je da je dužina kabla 0,4 km, da otpornost uzemljenja napojne TS iznosi $0,1 \Omega$ i da se otpornost uzemljenja TS 10/0,4 kV/kV za vreme merenja kretala u opsegu od $0,15 \Omega$ do $0,5 \Omega$. Uz ove pretpostavke metodom razlaganja ukupne struje zemljospoja prema varijanti F.1.2 ispostavilo se da se u šest od ukupno sedam navedenih merenja mogu dobiti vrednosti koje se slažu sa rezultatima iz tabele 5.4.

U ovoj istoj referenci u tabeli III.3 na strani 407 navode se podaci fabrike „Siemens” o nultim impedansama trožilnih kablova sa zajedničkim olovnom plaštom. Pored ostalog tu se navodi da je vrednost nulte impedanse kabla sa presekom 150 mm² $1,13 + j 1,12 \Omega/\text{km}$, ali se ne kaže za koju struju to vredi. Naše analize za aluminijumski kabl istog preseka daju približno $1,7 + j 0,4 \Omega/\text{km}$ pri struji od 300 A. Nadalje, u tabeli III.4 na strani 408 dati su opsezi vrednosti nultih impedansi kablova IPO 13 3x95 mm² izmerenih u 10 kV mreži u Beogradu. Prema tim podacima nulta otpornost se kreće u opsegu od $1,59 \Omega/\text{km}$ do $2,43 \Omega/\text{km}$, a nulta reaktansa u opsegu od $0,56 \Omega/\text{km}$ do $1,32 \Omega/\text{km}$. Metodom razlaganja struje zemljospoja za isti kabl pri struji od 300 A dobijeno je $R_0 = 1,9 \Omega/\text{km}$ i $X_0 = 0,55 \Omega/\text{km}$.

U tabeli 47 na strani 323. reference [5] daje se izmerena vrednost nulte impedanse kabla tipa NAK-BA 5,8/10 kV, 3x120 mm² položenog u gradskom području koja vredi za struje iz opsega 100 A do 300 A i koja iznosi $2,11 + j 0,62 \Omega/\text{km}$. Prema našim rezultatima datim na slici 5. ova impedansa treba da se nalazi između impedansi preseka 150 mm² i 95 mm², to znači u okolini vrednosti $1,9 + j 0,4 \Omega/\text{km}$.

8. ZAKLJUČAK

– *Cilindrična simetrija armiranog energetskog kabla omogućava sasvim korektno izračunavanje rezultatnog magnetskog fluksa koji u kabl i okolini stvaraju nulte struje faznih provodnika, olovnog plašta i čelične armature, tako da se izrazito nelinearan problem raspodele nultih struja može rešiti pomoću pogonskih impedansi, naravno, pod uslovom da se zna permeabilnost čelika od koga je izrađena armatura. Pošto se fluksevi izračunavaju pomoću struja, rešavanje tražene raspodele podrazumeva iterativnu numeričku proceduru.*

– *Rezultati dobijeni izloženom metodom razlaganja ukupne struje zemljospoja ukazuju da je sudeći po svemu jaka magnetska sprega, koja zbog prisustva čelične armature postoji između nultih kola faznih provodnika, olovnog plašta i armature, osnovni uzrok niske vrednosti redukcionnog faktora armiranih kablova i da odvođenje struje sa čelične armature u tlo kroz spoljnji omotač od bitumenizo-*

vane jute ima marginalan uticaj na redukcionni faktor i faktor razlaganja struje zemljospoja.

– Numeričke analize sprovedene metodom razlaganja struje zemljospoja ubedljivo su pokazale da se niske vrednosti pogonskih reaktansi olovnog plašta i armature (a time i niske vrednosti količnika I_z/I) dobijaju samo tada kada u faznim provodnicima postoje nulte struje, tj. kod kablova koji napajaju zemljospoj. Kod armiranih kablova koji ne napajaju mesto kvara, količnik I_z/I u slabo provodnom tlu mnogo je manje povoljan nego kada ovi kablovi napajaju mesto zemljospoja, tj. kada u njihovim faznim provodnicima postoje nulte struje

– Analize su takođe pokazale da su u 10 kV mrežama koje su izvedene sa armiranim kablovima granični potencijali uzemljivača na krajevima kablovskih vodova mnogo niži nego što se do sada kod nas pretpostavljalo. I ova osobina posledica je prisustva čelične armature (a ne odvođenja struje u zemlju!) zbog čega impedansa paralelne veze olovnog plašta i armature ima nisku vrednost. Kad se ovo ima u vidu dolazi se do zaključka da bi veliki broj TS 10/0,4 kV/kV u ovim mrežama mogao potpuno bezbedno da radi i bez ikakvog zaštitnog uzemljenja!

– Mada su u opštem slučaju struje kroz olovni plašt i čeličnu armaturu nelinearne funkcije ukupne nulte struje, dužine kabla i otpornosti uzemljenja na krajevima kabla, numerički rezultati pokazuju da je njihov količnik približno jednak realnoj konstanti koja ne zavisi ni od ukupne struje, ni od dužine kabla, niti od otpornosti uzemljenja na krajevima, već je jedino funkcija geometrije poprečnog preseka kabla.

9. DODATAK

9.1. Pregled upotrebljenih oznaka:

a_1 – poluprečnik kruga opisanog oko sva tri fazna provodnika (u m);

a_2 – unutrašnji poluprečnik olovnog plašta (u m);

a_3 – spoljašnji poluprečnik olovnog plašta (u m);

a_4 – unutrašnji poluprečnik čeličnog omotača (u m);

a_5 – spoljašnji poluprečnik čeličnog omotača (u m);

l – dužina kabla (u km);

R_{1f} – otpornost jednog faznog provodnika (u Ω/km);

R_{pb} – otpornost olovnog plašta (u Ω/km);

R_{fe} – otpornost čeličnog omotača (u Ω/km);

R_G – otpornost povratnog puta kroz zemlju (Ω/km);

R_{zA}, R_{zB} – otpornost uzemljenja na krajevima kabla (Ω);

Z_0 – nulta impedansa kabla ($\Omega/\text{km}/\text{fazi}$);

Z_{pb} – pogonska impedansa olovnog plašta (Ω/km);

Z_{fe} – pogonska impedansa čeličnog omotača (Ω/km);

I – ukupna struja zemljospoja (A);

I_{1f} – struja u jednom faznom provodniku (A);

I_{pb} – struja kroz olovni plašt (A);

I_{fe} – struja kroz čelični omotač (A);

I_z – struja kroz zemlju (A) i

r – redukcionni faktor kabla.

9.2. Ostali podaci

$\mu_0 = 4\pi 10^{-4}$ (H/km)

$\mu_r = \mu_r^{(1)} - j\mu_r^{(2)}$ – kompleksna relativna permeabilnost čelične armature;

ρ_G – specifična otpornost povratnog puta kroz zemlju (Ωm);

f – učestanost (Hz) i

$$D = 658 \sqrt{\frac{\rho_G}{f}} \text{ (m)}.$$

9.3. Skraćene oznake integrala

$$INT 23 = \int_{a_2}^{a_3} \left(\frac{x^2 - a_2^2}{a_3^2 - a_2^2} \right)^2 \frac{1}{x} dx \quad (\text{D-1})$$

$$INT 441 = \int_{a_4}^{a_5} \mu_r^{(1)}(H_5(x)) \frac{1}{x} dx \quad (\text{D-2})$$

$$INT 442 = \int_{a_4}^{a_5} \mu_r^{(2)}(H_5(x)) \frac{1}{x} dx \quad (\text{D-3})$$

$$INT 451 = \int_{a_4}^{a_5} \mu_r^{(1)}(H_5(x)) \left(\frac{x^2 - a_4^2}{a_5^2 - a_4^2} \right)^2 \frac{1}{x} dx \quad (\text{D-4})$$

$$INT 452 = \int_{a_4}^{a_5} \mu_r^{(2)}(H_5(x)) \left(\frac{x^2 - a_4^2}{a_5^2 - a_4^2} \right)^2 \frac{1}{x} dx \quad (\text{D-5})$$

9.4. Izrazi za flukseve

$$\Phi_1 = \frac{\mu_0 \ell I}{8\pi} \quad (\text{D-6})$$

$$\Phi_2 = \frac{\mu_0 \ell I}{2\pi} \ln \frac{a_2}{a_1} \quad (\text{D-7})$$

$$\Phi_3 = \frac{\mu_0 \ell I}{2\pi} \ln \frac{a_3}{a_2} + \frac{\mu_0 \ell I_{pb}}{2\pi} \cdot INT 23 \quad (\text{D-8})$$

$$\Phi_4 = \frac{\mu_0 \ell I}{2\pi} \ln \frac{a_4}{a_3} + \frac{\mu_0 \ell I_{pb}}{2\pi} \cdot \ln \frac{a_4}{a_3} \quad (\text{D-9})$$

$$\begin{aligned} \Phi_5 = & \frac{\mu_0 \ell I}{2\pi} \cdot INT 441 - j \frac{\mu_0 \ell I}{2\pi} \cdot INT 442 + \\ & + \frac{\mu_0 \ell I_{pb}}{2\pi} \cdot INT 441 - j \frac{\mu_0 \ell I_{pb}}{2\pi} \cdot INT 442 + \\ & + \frac{\mu_0 \ell I_{fe}}{2\pi} \cdot INT 451 - j \frac{\mu_0 \ell I_{fe}}{2\pi} \cdot INT 452 \quad (\text{D-10}) \end{aligned}$$

$$\Phi_6 = \frac{\mu_0 \ell I}{2\pi} \ln \frac{D}{a_5} + \frac{\mu_0 \ell I_{pb}}{2\pi} \ln \frac{D}{a_5} + \frac{\mu_0 \ell I_{fe}}{2\pi} \ln \frac{D}{a_5} \quad (D-11)$$

9.5. Nulta impedansa trožilnog armiranog kabla

$$Z_0(I) = R_{1f} + 3 \left(r R_G + j 2\pi f \frac{1}{I} \sum_{i=1}^6 \Phi_i \right) \quad (D-12)$$

(Fluksevi Φ_i sračunavaju se prema varijanti zemljospoja F1.1 i ukupnoj struji I .)

9.6. Pogonske impedanse

Varijanta F1.2

$$Z_{pb} = -(R_G \ell + R_{zA} + R_{zB}) \cdot \frac{I_z}{I_{pb} \ell} \quad (D-13)$$

$$Z_{fe} = -(R_G \ell + R_{zA} + R_{zB}) \cdot \frac{I_z}{I_{fe} \ell} \quad (D-14)$$

Varijanta F0

$$Z_{pb} = -[R_{zB} I_z + (R_G \ell + R_{zA}) I_p] \frac{1}{I_{pb} \ell} \quad (D-15)$$

$$Z_{fe} = -[R_{zB} I_z + (R_G \ell + R_{zA}) I_p] \frac{1}{I_{fe} \ell}, \quad (D-16)$$

$$I_z = I + I_{pb} + I_{fe} \quad (D-17)$$

9.7. Impedanse matrice sistema (14)

$$Z_{11} = R_{pb} + R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell} + \mu_0 f \text{INT} 442 + j \mu_0 f \left(\text{INT} 23 + \text{INT} 441 + \ln \frac{D a_4}{a_5 a_3} \right) \quad (D-18)$$

$$Z_{12} = R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell} + \mu_0 f \text{INT} 452 + j \mu_0 f \left(\text{INT} 451 + \ln \frac{D}{a_5} \right) \quad (D-19)$$

$$Z_{21} = R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell} + \mu_0 f \text{INT} 442 + j \mu_0 f \left(\text{INT} 441 + \ln \frac{D}{a_5} \right) \quad (D-20)$$

$$Z_{22} = R_{fe} + R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell} + \mu_0 f \text{INT} 452 + j \mu_0 f \left(\text{INT} 451 + \ln \frac{D}{a_5} \right) \quad (D-21)$$

$$V_1 = \left\{ R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell} + \mu_0 f \text{INT} 442 \right\} (-I) + j \mu_0 f \left(\text{INT} 441 + \ln \frac{D a_4}{a_5 a_2} \right) (-I) \quad (D-22)$$

$$V_2 = \left\{ R_G + \frac{R_{zA} + R_{zB}}{\ell} + \mu_0 f \text{INT} 442 \right\} (-I) + j \mu_0 f \left(\text{INT} 441 + \ln \frac{D}{a_5} \right) (-I) \quad (D-23)$$

$$V_1 = V_2 = \frac{R_{zB}}{\ell} (-I) \quad (D-24)$$

10. LITERATURA

- [1] V. Balkovoj: NULTE IMPEDANSE 20 kV JEDNOŽILNIH KABLOVA – PRORAČUNSKA I IZMEREENE VREDNOSTI, Prvo savetovanje JUKO CIRED o elektrodistributivnim mrežama, Zlatibor 1998.
- [2] M. Tanasković, T. Bojković, D. Perić, V. Šiljkut: ZBORNİK REŠENIH PROBLEMA IZ DISTRIBUCIJE I PRODAJE ELEKTRIČNE ENERGIJE, Međunarodni akademski klub, Beograd, 2006.
- [3] V. Balkovoj, M. Tanasković: PRORAČUN UZEMLJIVAČKIH EFEKATA KABLOVA SA IZOLOVANIM METALNIM PLAŠTEVIMA PRIME-NOM ELEMENTARNE TEORIJE ČETVOROPO-LA, „Elektrodistribucija”, br. 1-2, 1999.
- [4] J. Nahman: UZEMLJENJE NEUTRALNE TAČKE DISTRIBUTIVNIH MREŽA, Naučna knjiga, 1980.
- [5] L. Heinhold: POWER CABLES AND THEIR AP-PPLICATION, Siemens A.G. Berlin, Muenchen, 1970.
- [6] M. Tanasković, T. Bojković, D. Perić: DISTRIBU-CIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE, Akademska mi-sao, Beograd, 2007.
- [7] M. Tanasković, V. Balkovoj: GRANIČNI POTEN-CIJALI I DIMENZIONISANJE UZEMLJIVAČA TS SN/0,4 kV/kV U UZEMLJENIM ELEKTRO-DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, Elektroprivreda, br. 1, 2007.
- [8] V. Balkovoj, V. Davidov, S. Boka: STUDIJA RAS-PODELE STRUJE JEDNOPOLNOG KRATKOG SPOJA DUŽ DALEKOVODA, EPS Projektni biro, Novi Sad, 1991.

- [9] J. Administer: ELECTROMAGNETICS, McGraw – Hill Book Company, 1979.
- [10] B. Popović: ELEKTROMAGNETIKA, Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
- [11] B. Lalević: PRIRUČNIK KABLOVI ELEKTROENERGETSKI, izdanje autora, Beograd, 1997.
- [12] A. Ibrić: SMANJENJE OPASNIH UTICAJA ENERGETSKIH KABLOVA NA TELEKOMUNIKACIONE SISTEME, XVIII Simpozijum o kablovima, Zlatibor, septembar 2004.
- [13] PRAVILNIK O TEHNIČKIM NORMATIVIMA ZA ZAŠTITU NISKONAPONSKIH MREŽA I PRIPADAJUĆIH TRANSFORMATORSKIH STANICA, Sl. list SFRJ br. 13/1978, sa izmenama i dopunama u Sl. listu SRJ br. 37/1995.
- [14] EPS – direkcija za distribuciju električne energije: TEHNIČKA PREPORUKA BR.7, Izvođenje uzemljenja u distributivnim transformatorskim stanicama 35/10 kV/kV, 35/20 kV/kV, 10/0,4 kV/kV, 20/0,4 kV/kV i 35/0,4 kV/kV, III izdanje, Beograd, jun 1996.g, sa Komentarom, III izdanje, Beograd, maj 2001.

Rad je primljen u uredništvo 05. 11. 2007. godine



Vladimir I. Balkovoj je rođen 1934, a umro februara 2008. godine. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1960. godine. Od 1962. godine pa do kraja aktivne službe bio je zaposlen u Projektnom birou Elektrovodine 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.



Miladin R. Tanasković je rođen 1956. godine u Beogradu. Diplomirao je 1981. godine, magistrirao 1993. godine i doktorirao 2003. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od 1988. godine je zaposlen u „Elektrodistribuciji Beograd”, gde je radio na projektovanju visokonaponskih transformatorskih stanica, u Sektoru za tehnički razvoj i istraživanje, kao tehnički direktor i, trenutno, kao Savetnik za odnose sa naučno-istraživačkim ustanovama. Posebne oblasti njegovog stručnog interesovanja su rešavanje problema teorije polja metodom konačnih elemenata, planiranje elektrodistributivnih mreža i nesimetrični kratki spojevi u elektrodistributivnoj mreži.

Ilija Stevanović,
Dušan Arnautović i Zoran Ćirić

Klasifikacija i prikaz stanja regulatora pobude sinhronih generatora u Elektroprivredi Srbije

Pregledni rad
UDK: 62-523; 621.311.18; 621.313.1

Rezime:

U radu se analiziraju vrste regulatora pobude sinhronih generatora primenjenih u Elektroprivredi Srbije. Prvo je izvršena opšta podela regulatora pobude prema konstrukciji i prema vrsti dejstva. Zatim je, prema utvrđenoj podeli, izvršena klasifikacija regulatora pobude svih generatora u Elektroprivredi Srbije. Na osnovu izvršene analize procenjena je potreba za njihovom revitalizacijom.

Ključne reči: regulator pobude, klasifikacija, revitalizacija

Abstract:

CLASSIFICATION AND STATUS REVIEW OF THE AUTOMATIC VOLTAGE REGULATORS OF SYNCHRONOUS GENERATORS IN ELECTRICAL INDUSTRY OF SERBIA

In this paper types of automatic voltage regulators of synchronous generators in Electrical Industry of Serbia are analysed. First, the automatic voltage regulators are classified according to construction and kind of work. After that, the voltage regulators of all generators in power plants of Serbia are classified. At the end, the necessity for their revitalisation is estimated.

Key words: automatic voltage regulator, classification, revitalization

1. UVOD

Proizvodnja reaktivne energije i regulacija napona u elektroenergetskom sistemu (EES) su prioritetni zadaci koji doprinose održavanju potrebnog kvaliteta električne energije. Sinhroni generatori su osnovni i najjeftiniji izvori reaktivne energije u EES-u. Iznos reaktivne energije koji je potrebno da proizvedu generatori se menja u zavisnosti od naponskih prilika u sistemu i karaktera potrošača.

Automatski regulatori napona sinhronih generatora su uređaji zahvaljujući čijim delovanjem se primarno ostvaruje ovaj zadatak.

U njima su implementirani upravljački algoritmi, funkcije ograničenja i zaštitne funkcije.

Razvojem tehnologije i povećanjem zahteva EES-a razvijali su se i automatski regulatori pobude [1]. Prvi industrijski regulatori pobude su bili elektromehaničkog tipa i imali su ulogu da samo održavaju napon na zadanom nivou. Povećanjem snage sinhronih generatora pojavila se potreba za funkcionalno bogatijim regulatorima pobude. Tako su nastali elektromagnetni uređaji koji su prvenstveno imali veću brzinu odziva na poremećaje u sistemu, a obogaćeni su i sa dodatnim povratnim vezama za stabilizaciju prelaznog procesa.

Mr Ilija Stevanović, dipl. ing. el., dr Dušan Arnautović, dipl. ing. el., Zoran Ćirić, dipl. ing. el.,
– Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a

Razvojem analogne elektronike nastali su kompleksni modularni regulatori pobude sa implementiranim osnovnim, dodatnim i nadređenim funkcijama. Osnovna funkcija se sastojala u održavanju napona i statičke stabilnosti. Dodatne funkcije su se manifestovale kroz module ograničenja koji su održavali radni režim generatora u granicama definisanim pogonskim dijagramom, a nadređeni upravljački signali, koji su poticali od grupne regulacije pobude ili sekundarne regulacije napona, dodatno su mogli da utiču na pobudu generatora.

Savremeni trendovi u tehnici doveli su do razvoja tehnološki najsavršenijeg regulatora pobude mikroprocesorskog tipa. Ovi regulatori su pored već standardnih funkcija omogućili dodatnu fleksibilnost uređaja kroz lakše projektovanje, izmenu konfiguracije i parametara, monitoring radnih promjenljivih i uključenje u nadređeni sistem upravljanja.

Ovaj istorijski razvoj regulatora pobude vidljiv je i u elektroenergetskom sistemu Srbije. Pojedini regulatori pobude su još u funkciji iako je već odavno trebalo da budu muzejski eksponati. Ta činjenica vodi ka zaključku da je potrebno ubrzati revitalizaciju pojedinih regulatora pobude i pobudnih sistema u Elektroprivredi Srbije.

U ovom radu detaljnije su obrađeni tipovi regulatora pobude, izvršena je njihova klasifikacija i analiza radi lakšeg određivanja prioriteta pri njihovoj revitalizaciji.

2. VRSTE REGULATORA POBUDE

Opštu podelu regulatora pobude moguće je izvršiti na različite načine zavisno od odabranog kriterijuma za klasifikaciju [2].

Prema načinu rada regulatori pobude se dele na *automatske* i *ručne*.

Kod *automatskih regulatora pobude* regulacija napona generatora je ostvarena u zatvorenoj povratnoj sprezi po naponu generatora.

Ručni regulatori rade u otvorenoj povratnoj sprezi ili u zatvorenoj sprezi po struji pobude generatora. Ručna regulacija se uglavnom koristi kao rezervna regulacija automatskoj regulaciji.

Prema konstrukciji regulatori pobude se dele na: *elektromehaničke*, *elektromagnetne* i *elektronske* (analogne poluprovodničke i digitalne mikroprocesorske).

Elektromehanički regulatori pobude su kombinacija raznih mehaničkih elemenata (opruge, poluge) i električnih elemenata (releji, solenoidi, motori, promenljivi otpornici). Uz pomoć ovih elemenata dobija se upravljački signal koji deluje na promenu otpornosti u pobudnom kolu budilice.

Principijelna šema elektromehaničkog regulatora pobude je prikazana na slici 1 [3]. Automatski regulator pobude elektromehaničkog tipa se sastoji od mernog mehanizma, uređaja za podešavanje i regulišućeg otpornika.

Merni mehanizam ima merni kalem i uređaj za prigušenje. Merni kalem W_L je otvoreni solenoid sa lebdećim jezgrom, a uređaj za prigušenje se sastoji od opruga i kočnice sa specijalnim uljem.

Uređaj za podešavanje se sastoji od kliznih valjkastih kontakata povezanih sa regulišućim otpornikom. Valjkasti kontakti su mehanički vezani sa magnetnim jezgrom mernog kalema.

Regulišući otpornik W_p je vezan u pobudno kolo budilice regulišući njenu pobudnu struju, a time i napon generatora.

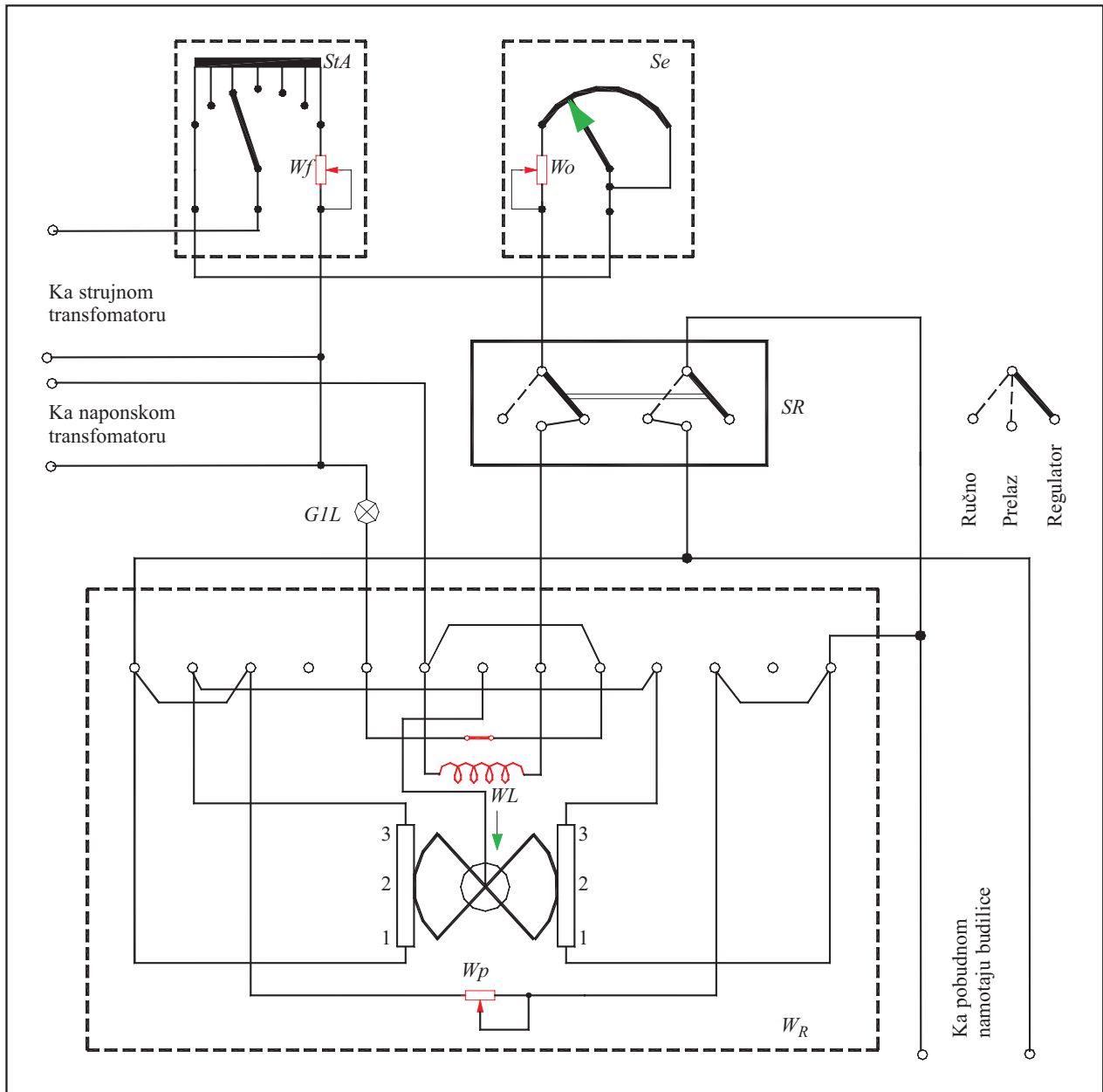
Željeni napon generatora se grubo podešava pomoću otpornika za ručno upravljanje pobudom koji se nalazi u pobudnom kolu budilice, a fino podešavanje se vrši pomoću otpornika u pretvaraču zadate vrednosti Se .

Uticaj struje opterećenja je uzet u obzir preko statičkog izjednačavača StA kroz koji protiče struja srazmerna struji statora generatora. Pad napona usled proticanja struje kroz kalem u izjednačavaču se na odgovarajući način sabira sa mernim naponom generatora obrazujući rezultantni napon koji pobuđuje merni kalem.

Ako napon generatora odstupa od zadate vrednosti, magnetnopobudna sila mernog kalema regulatora W_R pokreće magnetno jezgro koje pomera klizne valjkaste kontakte menjajući vrednost otpora regulišućeg otpornika u regulatoru. Kao rezultat toga, menja se pobudna struja budilice i napon generatora. Ovo pomeranje se vrši velikom brzinom, jer se pomeranju magnetnog jezgra suprotstavljaju samo opruge koje se posle uspostavljanja novog stacionarnog stanja ponovo rasterete usled privlačenja klipa kočnice sa uljem. Kočnica ima ulogu da priguši opisani prelazni proces, a ovo prigušenje se može prema potrebi podešavati.

Elektromagnetni regulatori pobude su takvi regulatori koji za regulaciju koriste magnetne pojačavače i električne elemente kao što su transformatori, releji, otpornici, diode itd (slika 2).

Magnetni pojačavač se sastoji od namotaja sa zasitljivim gvozdenim jezgrom i ispravljača. Postoje glavni (naizmienični) i upravljački (jednosmerni) namotaji. Promenom struje u upravljačkom namotaju menja se zasićenje magnetnog kola, a sa njim i induktivnost, odnosno struja opterećenja glavnog namotaja. Struja glavnog namotaja magnetnog pojačavača se ispravlja u ispravljaču i služi za pobuđivanje glavne budilice. Ispravljači su uglavnom pravljeni od selenskih elemenata. Ceo sistem je rađen kao jed-



Slika 1. Principijelna šema elektromehaničkog regulatora pobude

nofazni ili kao trofazni. U verzijama regulatora u kojima je za regulaciju napona korišćen jedan jedno-fazni magnetni pojačavač, sistem pobude ima samo funkciju korektora napona.

Veći sistemi pobude poseduju dva trofazna magnetna pojačavača sa selenskim ispravljačima koji su povezani tako da jedan od njih pobuđuje generator, a drugi razbuđuje. Svaki od magnetnih pojačavača povezan je na posebni pobudni namotaj budilice. Oni u budilici stvaraju magnetnopoludne sile suprotnog polariteta tako da veoma brzo uspostavljaju ravnotežno stanje između zadatog napona i izmerene vrednosti napona generatora. Da bi se smanjile

dimenzije i vremenske konstante, magnetni pojačavači su često građeni za više učestanosti naizmeničnog napona glavnog namotaja (100 Hz do 400 Hz) koje se dobijaju preko posebno konstruisanih generatora za više frekvencije

Kod ovakvog tipa regulatora pobude glavna budilica je ili naizmenični ili jednosmerni generator i ima najmanje dva pobudna namotaja od kojih jedan služi za povećanje pobude, a drugi za njeno smanjenje. Često se konstruiše i treći pobudni namotaj glavne budilice koji služi da obezbedi osnovnu pobudu mašine od 0 – 80 % nominalnog napona generatora.

pobude generatora koja je ostvarena preko jednog od upravljačkih namotaja u predpojačavaču $u3$.

Napajanje magnetnog predpojačavača, kao i glavnih magnetnih pojačavača se vrši preko pomoćnog sinhronog samopobudnog generatora. Otklanjanje promene izlazne struje glavnih pojačavača $u1$ i $u2$ zbog eventualne promene napona pomoćnog sinhronog generatora ostvareno je preko sklopa $u4$. U ovakvim situacijama ovaj sklop dodatno reguliše struju magnetnih pojačavača $u1$ i $u2$.

Podešavanje statike generatora vrši se pomoću otpornika $r5$, koji se nalazi u naponskoj mernoj grani regulatora napona, a pad napona na njemu je ostvaren zbog proticanja struje srazmerne struji generatora.

Elektronski regulatori pobude se uglavnom mogu svrstati u *analogne* poluprovodničke i *digitalne* mikroprocesorske regulatore.

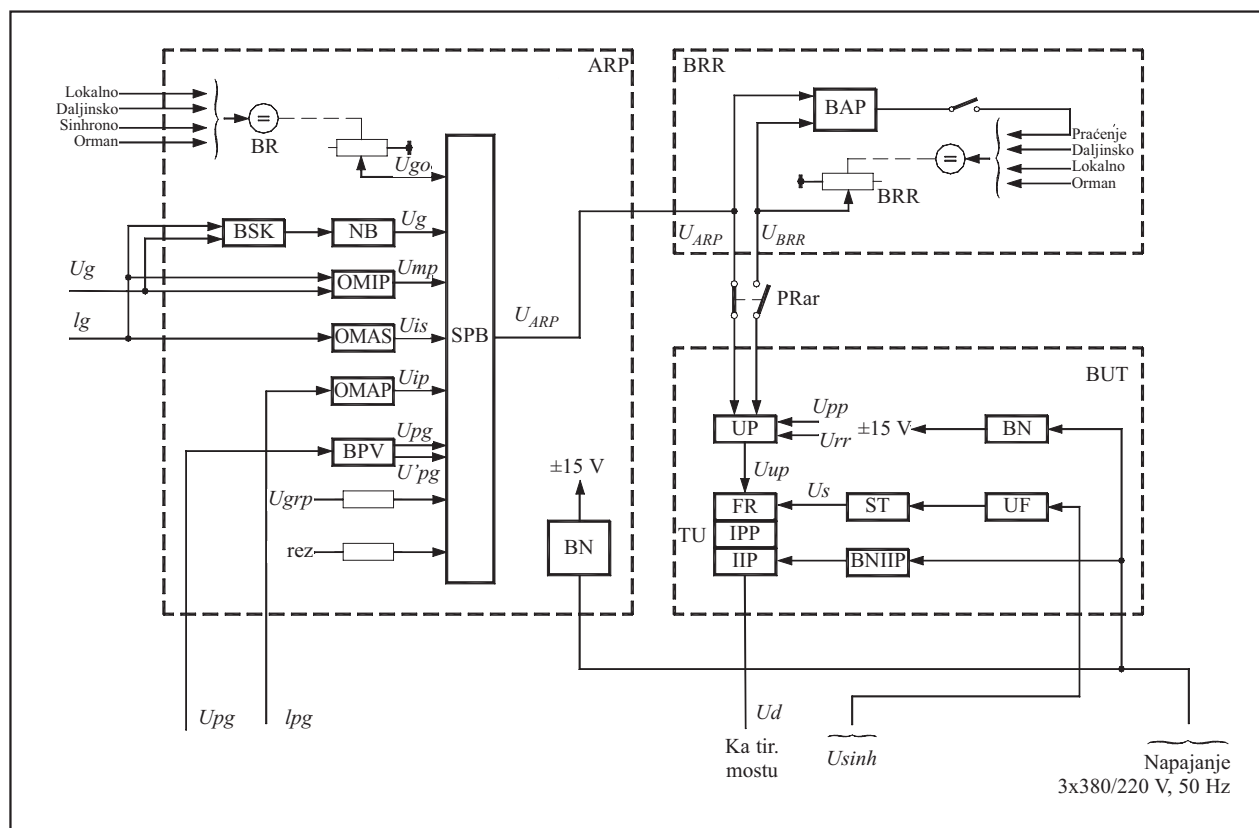
Prva vrsta regulatora realizovana je u poluprovodničkoj analognoj tehnologiji. Ovi regulatori imaju posebne funkcionalne blokove za svaku realizovanu funkciju. Odlikuju se brzim dejstvom, velikom pouzdanošću, lakim održavanjem i niskom cenom. Principijelna šema analognog elektronskog regulatora pobude data je na slici 3 [5].

Automatski regulator pobude (ARP), pored održavanja napona (NB) na krajevima generatora sa uvođenjem kompaundacije po reaktivnom opterećenju (BSK), obezbeđuje ograničenje maksimalne struje statora (OMAS), ograničenje maksimalne pobude (OMAP) i ograničenje minimalne pobude (OMIP), kao i uvođenje signala grupne regulacije pobude.

Upravljački signal deluje na pobudu generatora preko bloka upravljanja tiristorima (BUT) i tiristorskog mosta. Blok povratnih veza (BPV) ima funkciju stabilizacije regulacionog procesa u prelaznim režimima (npr. pobuđivanje, poremećaji u toku rada na mreži, itd.), a takođe doprinosi i povećanju brzine delovanja i linearizuje regulacione karakteristike. Povratne veze zatvorene su po naponu pobude generatora u_{pg} i po njegovom prvom izvodu u bloku povratnih veza.

U slučaju kvara automatskog regulatora pobude, podešavanje pobude, odnosno napona generatora, vrši se ručno pomoću bloka ručne regulacije (BRR), koji takođe deluje na pobudu generatora preko bloka upravljanja tiristorima i tiristorskog mosta.

Za vreme rada automatske regulacije pobude deluje automatsko praćenje automatskog regulatora od strane ručne regulacije, pa se prelaz iz režima au-



Slika 3. Principijelna šema analognog elektronskog regulatora pobude

tomatske u režim ručne regulacije pobude može izvesti u bilo kom trenutku, bez opasnosti od naglog povećanja struje pobude.

Digitalni mikroprocesorski regulatori su se razvili kao posledica opšteg tehnološkog razvoja. Omogućili su realizaciju daleko većeg broja upravljačkih funkcija po znatno nižoj ceni. Takođe, pomoću njih je olakšano uključnje sistema pobude u centralni digitalni sistem upravljanja agregatom, kao i razmena informacija i naredbi [6].

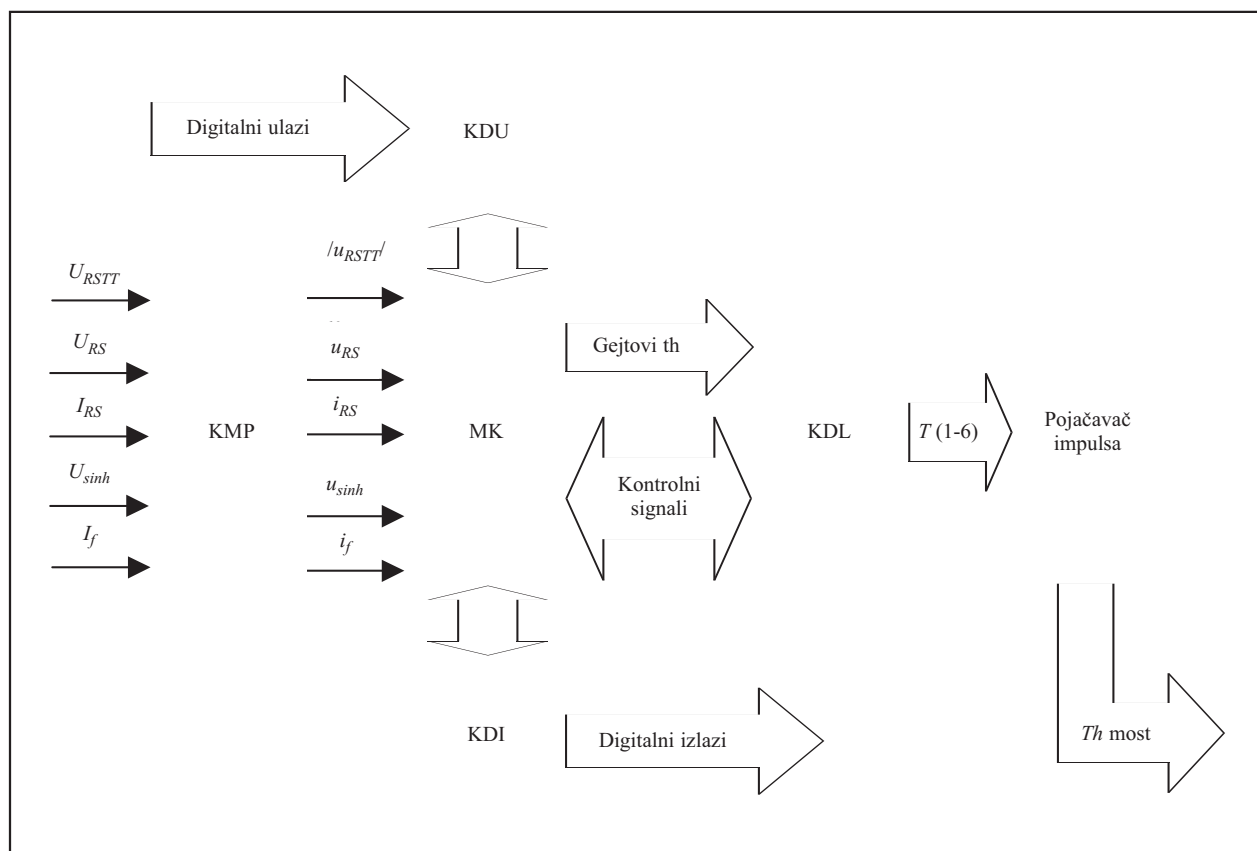
Osnovna namena *digitalnog automatskog regulatora pobude (DARP)* sastoji se u realizaciji automatske regulacije napona generatora. Pomenuta upravljačka funkcija implementirana je korišćenjem više modula, realizovanih u kombinovanoj analognoj i digitalnoj tehnici. Kompaktnost i modularnost rešenja obezbeđene su korišćenjem mikroprocesorskih komponenti koje povećavaju pouzdanost uređaja i omogućavaju jednostavnu izmenu i kontrolu rada upravljačkog algoritma.

Upravljačke funkcije DARP-a realizovane su korišćenjem sledećih modula (slika 4): modula mernih pretvarača (KMP), mikrokontrolerskog modula (MK), modula digitalne logike (KDL), modula digitalnih izlaza (KDI) i modula digitalnih ulaza (KDU).

Funkcija modula mernih pretvarača sastoji se u galvanskoj izolaciji i prilagođenju nivoa mernih signala ulaznim karakteristikama A/D konvertora. Mikrokontrolerski modul služi za realizaciju upravljačkih funkcija pobude generatora. Upravljanje se vrši obradom ulaznih analognih i digitalnih signala i generisanjem izlaznih upravljačkih signala za paljenje tiristora ispravljačkih mostova i za pobudu izvršnih releja.

Na rad regulatora napona, pored analognih merenja, utiču i digitalni kontrolni signali. Digitalne signale mikrokontroler čita korišćenjem perifernih portova i pomoću specijalizovanog PIA čipa. Kontrolni digitalni signali očitavaju se na tastaturi na uređaju i na kontaktima relejne automatike generatora.

Na izlazu modula MK generišu se analogni naponski signal koji se vodi na displej i digitalni komandni signali za paljenje tiristora, za pobudu izlaznih izvršnih releja i za signalizaciju. Komandni signali za paljenje tiristora, T(1)-T(6) vode se na *modul digitalne logike KDL*. Osnovna funkcija modula KDL sastoji se u generisanju signala ispravnosti rada upravljačke jedinice MK, generisanju zbirnih signala zaštita i u generisanju upravljačkih signala za paljenje tiristora.



Slika 4. Blok šema mikroprocesorskog regulatora pobude

Posle obrade, zbirni komandni signali za paljenje tiristorskih mostova vode se na *pojačavač impulsa*, a zatim i na ispravljačke mostove. Signali pobude izlaznih releja vode se na *modul digitalnih izlaza* (KDI), na kojem se pojačavaju i služe za pobuđivanje namotaja izvršnih releja, kao i za pobuđivanje signalnih dioda. *Modul digitalnih ulaza* služi za očitavanje stanja kontakata releja i tastera na uređaju.

Pobudni sistem može da se veže sa nadređenim računarskim sistemom korišćenjem serijske veze.

Prema vrsti dejstva regulatori pobude se dele na *proporcionalne* i *multivarijabilne regulatore*.

Proporcionalni regulatori pobude imaju jedan ulaz i jedan izlaz, a dejstvo im može biti proporcionalno (P), proporcionalno-integralno (PI) ili proporcionalno-integralno-diferencijalno (PID).

Ovi regulatori uzimaju kao merne veličine napon i struju generatora. Ove veličine se posredstvom naponskih i strujnih mernih transformatora dovode u regulator gde se dalje obrađuju i porede sa referentnim naponom. Dobijeni upravljački signal se pojačava u izlaznom pojačavaču regulatora pobude i prosleđuje do energetike. Regulatori mogu biti sa strujnom ili faznom kompaundacijom.

Regulatori pobude se tako projektuju da imaju veliko pojačanje u statičkom stanju kako bi greška sistema bila što manja i relativno manje pojačanje u prelaznim režimima. To se postiže uvodjenjem stabilizacione (diferencijalne) povratne veze po naponu pobude ili adekvatnim izborom parametara regulatora, čime se obezbeđuje da odnos statičkog poja-

čanja sistema i pojačanja pri većim učestanostima bude 10:1.

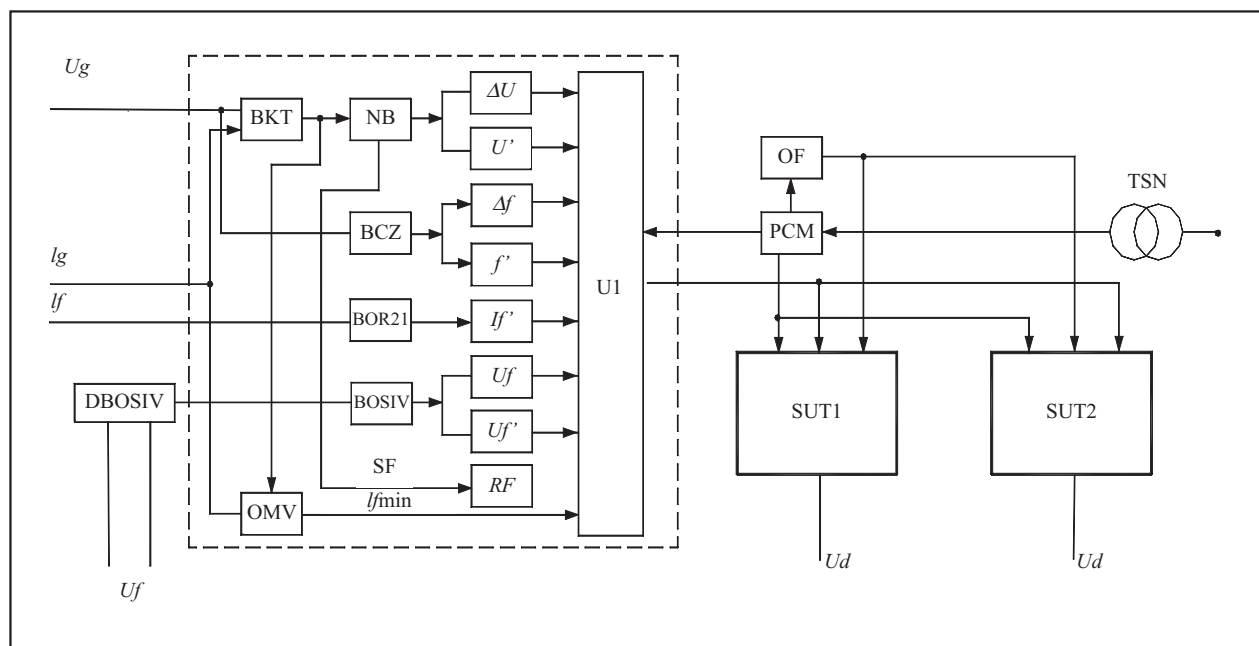
Multivarijabilni regulatori pobude za upravljanje pobudom, pored napona i struje generatora, koriste i dodatne stabilizacione signale da bi poboljšali dinamičke karakteristike elektroenergetskog sistema na koji je generator priključen.

Dodatne promenljive koje se koriste su: snaga generatora, ugaona brzina obrtanja, pobudni napon, pobudna struja i njihovi izvodi. Dakle, to su regulatori sa više ulaza i jednim izlazom. Razlog njihove primene je povećanje dinamičke stabilnosti generatora, prigušenje elektromehaničkih oscilacija i naponskih fluktuacija u sistemu.

Razlikuju se dva tipa multivarijabilnih regulatora pobude. To su: *regulator pobude sa stabilizatorom elektroenergetskog sistema* i *regulator silnog dejstva*.

Prvi tip multivarijabilnih regulatora ima pripojen stabilizator elektroenergetskog sistema na klasični proporcionalni regulator. Dodatne promenljive koje se mogu koristiti u stabilizatoru su: odstupanje brzine obrtanja rotora generatora, odstupanje učestanosti, aktivna snaga generatora i brzina promene napona sabirnica.

Regulatori silnog dejstva, pored proporcionalnog dejstva glavne regulacione promenljive (napon generatora), koriste dodatne promenljive (učestanost, napon pobude i struja pobude) i njihove prve izvode. Principijelna šema regulatora silnog dejstva data je na slici 5 [7].



Slika 5. Principijelna šema regulatora silnog dejstva

Tabela 1.
Klasifikacija regulatora pobude prema konstrukciji

<p>1. ELEKROMEHANIČKI REGULATORI</p> <ul style="list-style-type: none"> – TE „Kolubara A” – G1, G2 – HE „Vrla I” – G1, G2 – HE „Vrla II” – G1 – HE „Vrla III” – G1 – HE „Vrla IV” – G1 – HE „Kokin Brod” – G1, G2
<p>2. ELEKTROMAGNETNI REGULATORI</p> <ul style="list-style-type: none"> – TE „Kolubara A” – G3, G4 – TE „Morava” – G1 – TE „Kostolac A” – G2 – HE „Đerdap I” – G1, G2, G3 – HE „Đerdap II” – G3, G4, G5, G6
<p>3. ELEKTRONSKI REGULATORI</p> <p><i>3.1. Analogni poluprovodnički</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – TE „Nikola Tesla A” – G1, G3, G4, G6 – TE „Nikola Tesla B” – G1, G2 – TE „Kolubara A” – G5 – TE „Kostolac A” – G1 – TE „Kostolac B” – G1, G2 – TE-TO „Novi Sad” – G1, G2 – TE-TO „Zrenjanin” – G1 – TE-TO „Sremska Mitrovica” – G3 – HE „Đerdap I” – G4, G5, G6 – HE „Đerdap II” – G1, G2, G7, G8, G9, G10 – HE „Piroć” – G1, G2 – HE „Vrla I” – G3, G4 – HE „Vrla II” – G2 – HE „Vrla III” – G2 – HE „Vrla IV” – G2 – HE „Zvornik” – G1, G2, G3, G4 – HE „Ovčar Banja” – G1, G2 – HE „Međuvršje” – G1, G2 – HE „Uvac” – G1 – HE „Potpeć” – G1, G2, G3 <p><i>3.2. Digitalni mikroprocesorski</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – HE „Bajina Bašta” – G1, G2, G3, G4 – RHE „Bajina Bašta” – G1, G2 – HE „Bistrica” – G1, G2 – TE „Nikola Tesla A” – G2, G5

Tabela 2.
Klasifikacija regulatora pobude prema vrsti dejstva

<p>1. PROPORCIONALNI REGULATORI</p> <ul style="list-style-type: none"> – TE „Nikola Tesla A” – G2, G3, G4, G5 – TE „Nikola Tesla B” – G1, G2 – TE „Kolubara A” – G1, G2, G3, G4, G5 – TE „Morava” – G1 – TE „Kostolac A” – G1, G2 – TE-TO „Novi Sad” – G1, G2 – TE-TO „Zrenjanin” – G1 – TE-TO „Sremska Mitrovica” – G3 – HE „Đerdap II” – G9, G10 – HE „Piroć” – G1, G2 – HE „Vrla I” – G1, G2, G3, G4 – HE „Vrla II” – G1, G2 – HE „Vrla III” – G1, G2 – HE „Vrla IV” – G1, G2 – HE „Zvornik” – G1, G2, G3, G4 – HE „Ovčar Banja” – G1, G2 – HE „Međuvršje” – G1, G2 – HE „Kokin Brod” – G1, G2 – HE „Uvac” – G1 – HE „Potpeć” – G1, G2, G3 – HE „Bistrica” – G1, G2
<p>2. MULTIVARIJABILNI REGULATORI</p> <p><i>2.1. Regulator sa stabilizatorom EES</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – TE „Nikola Tesla A” – G1, G6 – TE „Kostolac B” – G1, G2 – HE „Đerdap II” – G1, G2, G7, G8 – HE „Bajina Bašta” – G1, G2, G3, G4 – RHE „Bajina Bašta” – G1, G2 <p><i>2.2. Regulator silnog dejstva</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – HE „Đerdap I” – G1, G2, G3, G4, G5, G6 – HE „Đerdap II” – G3, G4, G5, G6

Regulator silnog dejstva vrši regulaciju po odstupanju napona generatora ΔU i njegovom prvom izvodu U' , po odstupanju frekvencije Δf i njenom prvom izvodu f' i po izvodu struje rotora I'_r . Regulator poseduje blok za kompenzaciju pada napona na blok transformatoru i odgovarajuće ograničavače.

U regulatoru su ugrađeni sledeći ograničavači: ograničenje minimalne pobude, ograničenje struje pobude pri forsiranju, ograničenje preopterećenja rotora, kao i kruta i elastična negativna povratna veza za poboljšanje dinamičkih karakteristika, linearizaciju i stabilizaciju sistema. Pri radu sa automatskim regulatorom pobude u funkciji je i automatsko praćenje koje omogućava prelaz na ručno upravljanje tiristorskim pretvaračima, odnosno pobudom.

Promena napona pobude vrši se promenom ugla upravljanja tiristora koji se ostvaruje u poluprovodničkom sistemu impulsno-faznog upravljanja (SUT1, SUT2). Sistem sadrži 6 kanala i obezbeđuje formiranje upravljačkih impulsa i promenu njihove faze u skladu s upravljačkim signalom. Promena faze upravljačkih impulsa ostvaruje se po „*vertikalnom*” principu. Formiranje izlaznog upravljačkog impulsa dešava se u trenutku jednakosti jednosmernog upravljačkog signala i trenutne vrednosti sinhronizacionog napona. Izlazni upravljački impuls se obrazuje u obliku češlja impulsa određene frekvencije.

Napajanje regulatora i tiristorskih upaljača vrši se preko bloka PCM koji napon mrežne frekvencije pretvara u napon veće frekvencije. Sistem je opremljen i sa blokom OF koji ograničava vremensko trajanje forsiranja pobude.

Savremeni regulatori pobude, pored osnovnog regulacionog kruga, poseduju i **ograničavače pobude** koji služe za održavanje generatora u granicama statičke i dinamičke stabilnosti i smanjenje termičkih napreznja generatora. Koriste se sledeći ograničavači:

- ograničenje minimalne struje pobude;
- ograničenje maksimalne struje pobude;
- vremenski zategnuto ograničenje struje pobude;
- ograničenje maksimalne struje statora;
- ograničenje ugla opterećenja i
- ograničenje odnosa U/f .

3. KLASIFIKACIJA REGULATORA POBUDE U ELEKTRANAMA ELEKTROPRIVREDE SRBIJE

Klasifikacija regulatora pobude prema konstrukciji u Elektroprivredi Srbije data je u tabeli 1. Iz date tabele se vidi da se elektromehanički regulatori pobude nalaze u sistemima pobude 9 generatora, od kojih su 2 ugrađena u termoelektranama, a 7 u hidroelektranama. Elektromagnetni regulatori pobude se nalaze na 4 termogeneratora i 7 hidrogeneratora. Najveći broj agregata opremljen je elektronskim regulatorima, ukupno 52. Od toga 42 su analogni, a 10 su mikroprocesorski. U okviru 16 sistema pobude turbogeneratora i 36 sistema pobude hidrogeneratora ugrađeni su elektronski regulatori pobude.

Osim konstrukcionih karakteristika koje uglavnom odražavaju tehnološki stepen razvoja određenog uređaja, veoma je važna podela prema funkcionalnim karakteristikama.

U tabeli 2 je data klasifikacija regulatora pobude prema vrsti dejstva. Najveći broj regulatora pobude u Elektroprivredi Srbije, njih 48 (67 %) je, kao što se može i očekivati, proporcionalnog dejstva.

Preostali 24 (33 %) imaju složeniju strukturu i svrstani su u grupu multivarijabilnih regulatora.

Od toga 10 generatora je opremljeno regulatorima silnog dejstva (HE „Đerdap I i II”), a 14 regulatorima pobude sa stabilizatorom elektroenergetskog sistema (SEES).

Procentualni iznos prethodne analize dat je u tabeli 3. I kod turbogeneratora i kod hidrogeneratora najviše se koriste elektronski regulatori.

Kod turbogeneratora su elektronski regulatori zastupljeni sa 72,7 %, a kod hidrogeneratora sa 72,0 %.

Ukupno gledajući, elektromehanički regulatori pobude zauzimaju 12,5 % svih agregata, elektromagnetni 15,3 %, a elektronski 72,2 %.

Važno je, takođe, primetiti da su mikroprocesorski regulatori pobude, kao najsavremeniji, primenjeni na svega 10 generatora ili 13,8 % svih agregata u Elektroprivredi Srbije.

Tabela 3.

Pregled vrsta regulatora pobude u Elektroprivredi Srbije

Vrste regulatora pobude	Elektromehanički	Elektromagnetni	Elektronski	Ukupno generatora
Broj turbogeneratora	2 (9,1 %)	4 (18,2 %)	16 (72,7 %)	22 (100 %)
Broj hidrogeneratora	7 (14,0 %)	7 (14,0 %)	36 (72,0 %)	50 (100 %)
Ukupan broj generatora sa datim regulatorom pobude	9 (12,5 %)	11 (15,3 %)	52 (72,2 %)	72 (100 %)

4. ZAKLJUČAK

Automatski regulatori napona, kao sastavni delovi sistema pobude, obavljaju primarnu regulaciju napona u elektroenergetskom sistemu. Od njihovih konstrukcionih i funkcionalnih karakteristika zavisi kvalitet električne energije koja se isporučuje potrošačima, kao i stabilnost elektroenergetskog sistema.

Radi sagledavanja stanja u kome se nalaze regulatori pobude u Elektroprivredi Srbije izvršena je njihova podela i klasifikacija, prema konstrukciji, na elektromehaničke, elektromagnetne i elektronske regulatore pobude i, prema vrsti dejstva, na proporcionalne i multivarijabilne.

Najveći broj agregata, oko 72 %, poseduje elektronske regulatore, ali je svega 14 % regulatora napravljeno po najsavremenijoj mikroprocesorskoj tehnologiji. Jedna trećina svih regulatora je multivarijabilnog karaktera, a preostali regulatori su proporcionalnog dejstva, manje ili više opremljeni dodatnim funkcijama.

S obzirom na starost, konstrukciju i funkcionalne mogućnosti, najpotrebnije je zameniti elektromehaničke i elektromagnetne regulatore pobude. Raspoloživost rezervnih delova za ove regulatore je skoro nikakva tako da, u slučaju kvara na njima, sasvim je sigurno da se ne mogu osposobiti za nastavak rada. Takođe, dobar deo analognih elektronskih regulatora pobude treba pripremiti za zamenu i uskoro zameniti zbog starenja elektronskih komponenti i

funkcionalnog osavremenjavanja sistema za regulaciju napona.

5. LITERATURA

- [1] I. Stevanović, Z. Čirić, D. Arnautović: REGULACIJA NAPONA ODNOSNO POBUDNE STRUJE SINHRONIH GENERATORA U ELEKTRANAMA ELEKTROPRIVREDE SRBIJE SA GLEDIŠTA ZAHTEVA SISTEMA, Studija urađena za EPS, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2005. god., 188 strana.
- [2] I. I. Solovev: AVTOMATIČESKIE REGULATORI SINHRONIH GENERATOROV, Energoizdat, Moskva, 1981.
- [3] TEHNIČKA DOKUMENTACIJA SISTEMA POBUDE GENERATORA BR. 1 I 2 U TE „KOLUBARA A”, Siemens.
- [4] TEHNIČKA DOKUMENTACIJA SISTEMA POBUDE GENERATORA BR. 3 I 4 U TE „KOLUBARA A”, Siemens.
- [5] TEHNIČKA DOKUMENTACIJA SISTEMA POBUDE GENERATORA BR. 1, 2, 3 I 4 U HE „ZVORNIK”, Institut „Nikola Tesla”.
- [6] Đ Stojić., Z. Čirić, I. Stevanović: DIGITALNI AUTOMATSKI REGULATOR POBUDE SINHRONOG GENERATORA, 26. savetovanje YUKO CIGRE, Teslić, 2003 i Elektroprivreda, br. 2, Beograd, 2003, str. 3-10.
- [7] TEHNIČKA DOKUMENTACIJA SISTEMA POBUDE GENERATORA BR. 3, 4, 5 I 6 U HE „ĐERDAP II”, Elektrosila.

Rad je primljen u uredništvo 13. 09. 2007. godine



Ilija Stevanović je rođen 1963. godine u Brčkom, BiH. Elektrotehnički fakultet, smer elektroenergetski, završio je 1987. godine u Tuzli. Posle završetka fakulteta, do 1992. godine, radio je na Elektrotehničkom fakultetu u Tuzli kao asistent na predmetima „Električne mašine” i „Elektromagnetika”. Postdiplomske studije, smer „Električne mašine”, završio je 1992. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od 1994. godine zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”, u Centru za automatiku i regulaciju.

Profesionalno zanimanje mu je vezano za istraživanje, razvoj, projektovanje, ispitivanje, izradu i puštanje u rad: sistema pobude sinhronih generatora, električnih zaštita, uređaja za automatizaciju malih hidroelektrana i uređaja za napajanje i regulaciju elektrostatičkih filtera, kao i specijalna ispitivanja električnih mašina.



Dušan Arnautović rođen je 1950. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 1973. godine na Energetskom odseku, magistrirao 1978. godine na smeru Elektroenergetski sistemi i doktorsku tezu odbranio 1988. godine, sve na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od 1975. do 1977. godine je stažirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. 1977. godine zaposlio se u Elektrotehničkom institutu »Nikola Tesla«, Centar za automatiku i regulaciju, gde i danas radi na mestu direktora Centra.

Godine 1995. stiče naučno zvanje viši naučni saradnik. U dosadašnjem radu angažovan je u oblastima: regulaciji elektrana i elektroenergetskih sistema, modelovanju i simulaciji rada elektrana i elektroenergetskih sistema i primeni moderne teorije upravljanja u elektroenergetskim sistemima. Kao au-

tor ili koautor do sada je objavio preko 85 međunarodnih i domaćih naučnih i stručnih radova. Rukovodio je i saradivao na izradi preko 50 studija i istraživačkih projekata.



Zoran Ćirić je rođen 1950. godine u Izvoru kod Pirota. Osnovnu školu i gimnaziju završio je u Pirotu, a Elektrotehnički fakultet u Beogradu. Po završetku studija radio je u IGP „Tigar” Pirot i HE „Đerdap”. Od 1982. godine vrši nadzor, učestvuje u ispitivanjima i puštanju u rad HE „Đerdap II”. Po završetku prve faze izgradnje „Đerdapa II”, radi na radnom mestu šefa elektromašinskog održavanja. Od 1989. godine radi u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”, u Centru za automatiku i regulaciju, gde se bavi: specijalnim merenjima na električnim mašinama, projektovanjem i izradom pobudnih sistema malih, srednjih i velikih generatora, automatizacijom malih hidroelektrana, ispitivanjima i otklanjanjem nedostataka na sistemima pobude u hidro i termoelektranama.

Aleksandar P. Bojković, Đorđe E. Jovanović, Dragan Teslić, Ljubiša P. Nikolić,
Slađana Teslić, Radovan Lj. Radosavljević, Aleksandar Janković, Dragomir B. Gucić,
Petar Nikolić, Veljko Vidaković i Miomir Lj. Nikodijević

Havarija velikog blok-transformatora u hidroelektrani „Đerdap I”, ispitivanja i utvrđivanje kvara

Stručni rad
UDK: 621.314.21

Rezime:

U radu je prikazan kvar velikog blok-transformatora u hidroelektrani „Đerdap I” i ispitivanja koja su usledila u cilju utvrđivanja obima kvara, kao i nalazi pri preliminarnoj i konačnoj defektaži, koji se vrlo dobro slažu sa zaključcima koji su doneti na osnovu obavljenih merenja. Na osnovu napred iznetog doneta je odluka o načinu popravke koja je obavljena na licu mesta, što će, zajedno sa ispitivanjima posle opravke, biti predmet budućih radova.

Ključne reči: energetski transformator, havarija, ispitivanja, utvrđivanje kvara

Abstract:

FAILURE OF A BIG STEP-UP TRANSFORMER IN HYDROELECTRIC POWER PLANT „ĐERDAP I”,
TEST AND RESULTS OF VISUAL INSPECTION

The paper presents the failure of a big step-up transformer in the hydroelectric power plant „Đerdap I” and subsequent tests with the aim of determining the scope of damage, as well as the findings of preliminary and final inspection of the transformer, which are in very good correlation with conclusions drawn from the tests. Based on these facts, decision about the repair on site was made. The repair and tests after the repair will be presented in future papers.

Key words: power transformer, failure, tests, inspection

1. UVOD

Dobro poznatu opasnost od uključanja agregata na mrežu van sinhronizma potvrđuje havarija blok-transformatora u HE „Đerdap I”, do koje je došlo 11. 07. 2006. godine usled kvara sinhronoskopa. Jedan jeftin uređaj je svojim nepravilnim radom pričinio ogromnu štetu, koja je mogla biti i mnogo veća

da elektrana nije raspolagala rezervnim transformatorom, koji je u rekordnom roku montiran, ispitan i pušten u rad. Naime, treba imati u vidu da su u HE „Đerdap I” dva generatora vezana na zajednički blok-transformator, tako da od njegove ispravnosti i raspoloživosti zavisi nesmetan pogon 1/3 naše najveće hidroelektrane. Isto tako, očigledno je da posle havarije blok-transformatora, sve do završetka nje-

Aleksandar P. Bojković, dipl. ing. el., Đorđe E. Jovanović, dipl. ing. el., Dragan Teslić, dipl. ing. el., Ljubiša P. Nikolić, dipl. ing. el., Slađana Teslić, dipl. ing. tehnologije – Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a, prof. dr Radovan Lj. Radosavljević, dipl. ing. el. – Elektrotehnički fakultet, 11 000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73, Aleksandar Janković, dipl. ing. el. – 11 000 Beograd, Dragomir B. Gucić, dipl. ing. el., Petar Nikolić, dipl. ing. el., Veljko Vidaković, dipl. ing. el. – JP „EPS” PD „Đerdap”, 19 320 Kladovo, Trg kralja Petra I broj 1, Miomir Lj. Nikodijević, ing. el. – Minel-Transformatori, 11 000 Beograd

gove opravke, rezerva ne postoji, pri čemu iskustvo sa ranijim havarijama druga dva blok-transformatora u 1975. i 1977. godini (proboji namotaja višeg napona prema masi) pokazuje da transport do proizvođača, opravka i povratak u elektranu traju oko godinu dana, uz značajan udeo transportnih troškova,

U cilju smanjenja troškova i bržeg osposobljavanja rezerve nametnulo se razmatranje mogućnosti opravke transformatora na licu mesta.

2. OSNOVNI PODACI O TRANSFORMATORU

Snaga: 380/190/190 MVA/MVA//MVA;
Napon: 420/15,75/15,75 kV/kV/kV
Struja: 522/6 960/6 960 A/A/A i
Sprega: YN, d5, d5.

Relativni napon kratkog spoja pri mernim spregama:

VN-(NN1+NN2) 12,4 %;

VN-NN1 11,5 %;

VN-NN2 11,4 %;

NN1-NN2 21,4 %;

Godina proizvodnje: 1969;

Količina ulja: 53,5 t;

Težina aktivnog dela 228,1 t;

Ukupna težina: 306,9 t i

Dimenzije transportnog profila:

3 120 x 9 210 x 4 415 mm.

Transformator ima petostubno magnetno kolo. Namotaj višeg napona (VN) se nalazi sa spoljne strane i ima ulaz na sredini visine stuba magnetnog kola. Sastoji se od dve paralelne grane, od kojih je svaka raspoređena po polovini visine stuba. Namotaji nižeg napona su uz stubove magnetnog kola, jedan iznad drugog, tj. svaki zauzima polovinu visine stuba. Namotaj NN1 nalazi se na donjem delu stuba i njegove veze do provodnih izolatora su duže.

3. ISTORIJAT TRANSFORMATORA

Transformator je stavljen pod napon 05. 08. 1970. godine u bloku 1. U toku njegove eksploatacije registrovani su sledeći značajni pogonski događaji:

- Kratkotrajno nesimetrično napajanje transformatora sa strane generatora, pošto jedan pol nije uključio;
- Eksplozija odvodnika prenapona na šinskim vezama koje vode od generatora do priključaka NN2;
- Isključenje rastavljača na strani 420 kV pod opterećenjem usled pogrešne manipulacije 11. 06. 1972. godine;
- U dva maha nije radila po jedna uljna pumpa zbog kvara na automatici;
- Otvaranje transformatora 1982. godine na osnovu rezultata gasnohromatografske kontrole i sanacija na licu mesta uočenih nedostataka;
- U 1987. godini je registrovan povećan gubitak ulja iz transformatora; konstatovano je oštećenje hladnjaka, koje je sanirano 11. 07. 1987. godine blinđiranjem oštećenih cevi i
- Kratak spoj na šinama koje formiraju trougao namotaja nižeg napona NN1 u donjem delu transformatorskog suda, na mestu ulaza ulja u sud iz hladnjaka, dana 05. 10. 1987. godine, otvaranje i sanacija kvara na licu mesta.

U produžetku će biti detaljnije prikazana dva pomenuta događaja.

Institut Nikola Tesla je kod nas uveo gasnohromatografsku kontrolu sadržaja rastvorenih gasova u transformatorskom ulju 1975. godine. Prvo ispitivanje transformatora čiji slučaj razmatramo je dalo zadovoljavajuće rezultate. Međutim, već pri narednom ispitivanju 1976. godine uočen je značajan porast koncentracija etilena (C_2H_4) i metana (CH_4), koji je ukazivao na sumnjivo stanje transformatora, tj. na mogućnost toplotnog kvara (lokalnog pregrevanja). Prema kasnije uvedenoj metodi interpretacije rezultata (IEC 599) rezultati su odgovarali toplotnom kvaru sa temperaturom iznad 700 °C. Otvaranju je prethodilo ispitivanje 28. 06. 1982. godine. Rezultati pomenutih ispitivanja su dati u tabeli 1. U međuvremenu je obavljeno više gasnohromatografskih ispitivanja, pri čemu su koncentracije varirale naviše i naniže. Maksimalne dostignute koncentracije su takođe prikazane u tabeli 1.

Tabela 1.

Rezultati gasnohromatografskih ispitivanja transformatora, koncentracije u ppm

Datum ispitivanja	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
24. 12. 1975. godine	11	22	0	47	8	311	3 060
8. 11. 1976. godine	25	54	0	106	15	428	4 165
28. 06. 1982. godine	44	67	0	246	13	1 560	16 559
Maksimalne koncentracije	64	91	13	304	54	1 594	16 559

Prilikom otvaranja transformatora u hali elektrane dana 30. 09. 1982. godine konstatovano je oštećenje izolacije steznih zavrtneva i steznih lime-nih traka na gornjem jarmu, pri čemu su 4 zavrtnja bila potpuno prekinuta topljenjem ili mehanički zbog slabljenja mehaničke čvrstoće na visokoj temperaturi. Spoljni paket gornjeg jarma je bio delimično nagoreo (gledano sa strane izvoda nižeg napona), Objašnjenje za oscilacije koncentracija gasova kvara su prekidi zatvorenih kontura (praćeni padom koncentracija) i pojave novih (praćene rastom koncentracija). Napred navedeno se dobro slaže sa ocenom o tipu kvara na osnovu gasnohromatografske analize, s tim što ona po prirodi stvari nije mogla odrediti mesto kvara. Ostali nalazi nisu vezani za gasnohromatografsku analizu (nedovoljno pritegnuti zavrtnji na donjim priključcima provodnih izolatora na strani nižeg napona, bez tragova pregrevanja i oštećenje izolacije lule izvoda faze „B”, do kojeg je došlo pri ranijim montažnim radovima). Obavljena je sanacija zaptivanja transformatora, pošto je postojalo znatno curenje ulja. Posle opravke transformator je 16. 11. 1982. godine stavljen u pogon u bloku 2, gde je ostao do 1987. godine. Rezultati gasnohromatografskih analiza posle opravke do 1985. godine bili su pod uticajem prelaza zaostalih gasova od otklonjenog kvara iz čvrste izolacije u ulje, da bi se postepeno normalizovali.

Dana 5. 10. 1987. godine transformator je isključen sa mreže i odvojen od oba generatora delovanjem sopstvenih zaštita (Buholcov rele i ekspanzioni ventil). Oko transformatora je pronađeno izliveno ulje. Rezultati gasnohromatografske analize pre (25. 09. 1987. godine) i posle drugog kvara transformatora su dati u tabeli 2. Rezultati ispitivanja pre havarije nisu ničim ukazivali na ugroženu pogonsku sigurnost transformatora. IEC šifra 102 posle havarije znači luk kroz ulje, s obzirom na odsustvo značajnijeg porasta CO i CO_2 . Provera dielektrične čvrstoće ulja posle havarije dala je visoku, tj. potpuno zadovoljavajuću vrednost (iznad 245 kV/cm), ali je merenje otpornosti izolacije 10. 10. 1987. godine dalo vrednost od svega 800 kΩ za $R_{60''}$ u spoju NN1:M(VN+NN2), čime je približno locirano mesto kvara. U odsustvu bilo kakvih poremećaja naponskih prilika, logičan zaključak je da su havariju izazvale nečistoće koje su dospele iz hlad-

njaka u sud (kvaru je prethodila intervencija na hladnjacima u julu), mada ne treba isključiti ni mogućnost da je kvar bio prouzrokovan usled statičkog elektriciteta (o čemu se detaljna informacija može naći u [1]). Šine su izolovane papirom, ali je količina papira koji je razoren lukom bila isuviše mala da bi se to odrazilo na promenu koncentracija CO i CO_2 . Defektaža i sanacija šinskih veza namotaja NN1 su obavljene u elektrani.

4. OPIS DOGAĐAJA U 2007. GODINI

Dana 11. 07. 2006. godine agregat priključen na namotaj NN1 je bio u pogonu, kada je usledio nalog dispečera za uključanje agregata priključenog na namotaj NN2 transformatora, koji je bio u hladnoj rezervi. Zbog pogrešnog delovanja sinhronoskopa, automatska sinhronizacija je bila pogrešno izvedena, što je dovelo do ispada bloka.

5. ISPITIVANJA TRANSFORMATORA NEPOSREDNO POSLE HAVARIJE

Na transformatoru su 12. 07. 2006. godine izvedena sledeća merenja:

- merenje otpornosti izolacije $R_{60''}$ i polarizacionih indeksa $R_{60''}/R_{15''}$;
- merenje faktora dielektričnih gubitaka $tg\delta$ i kapacitivnosti C , uključujući i merenje ovih veličina na svim provodnim izolatorima;
- merenje struja i gubitaka praznog hoda pri niskom naponu i
- merenje omskih otpornosti bakra namotaja.

Rezultati merenja su dati u tabelama 3 – 11. Uopredo su prikazani i rezultati prethodnog ispitivanja 2005. godine, koje je obavljeno u okviru preventivne kontrole dok je transformator još bio u ispravnom stanju.

Oznake u tabelama imaju sledeća značenja:

- VN – Namotaj višeg napona;
- NN1, NN2 – Namotaji nižeg napona;
- M – Masa;
- $R_{60''}$ – Otpornost izolacije pri 60 s;
- $R_{15''}$ – Otpornost izolacije pri 15 s;
- U – Ispitni napon;
- $tg\delta$ – Faktor dielektričnih gubitaka;
- C – Kapacitivnost;

Tabela 2.

Rezultati gasnohromatografskih ispitivanja transformatora, koncentracije u ppm

Datum ispitivanja	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
25. 09. 1987. godine	8	8	0	23	3	1 372	8 269
10. 10. 1987. godine	1 766	847	1 922	11 335	83	1 326	8 413

Tabela 3.

Rezultati merenja otpornosti izolacije i polarizacionih indeksa digitalnim megaohmmetrom pri 1 kV

Merni spoj	14. 10. 2005. godine, 30 °C		12. 07. 2006. godine, 48 °C	
	$R_{60''}$ (M Ω)	$R_{60''}/R_{15''}$	$R_{60''}$ (M Ω)	$R_{60''}/R_{15''}$
VN:NN1(NN2+M)	24 000	1,85	10 500	1,41
VN:NN2(NN1+M)	23 400	1,84	9 450	1,54
VN:M(NN1+NN2)	2 930	1,13	5 530	1,68
NN1:NN2(VN+M)	57 600	2,37	85,5	0,99
NN1:M(VN+NN2)	6 220	1,39	3 700	1,24
NN2:M(VN+NN1)	10 400	1,56	3 730	1,43

I_0 – Struja praznog hoda pri napajanju niskim naponom;

P_0 – Gubici praznog hoda pri napajanju niskim naponom;

L – Induktivnost usled rasipanja;

R_{Cu} – Otpornost bakra namotaja pri jednosmernoj struji;

m – Odnos transformacije;

X_{sr} – Srednja vrednost rezultata merenja i

σ – Standardna devijacija.

Uobičajeno je da ispitivanja započnu merenjem otpornosti izolacije i polarizacionih indeksa. Rezultati ovog merenja su prikazani u tabeli 3.

Iz tabele 3 se uočava drastično pogoršanje otpornosti izolacije i polarizacionog indeksa dela izolacionog sistema transformatora između dva namotaja nižeg napona, na osnovu čega se može zaključiti da postoji oštećenje ovog dela izolacionog sistema transformatora. Međutim, ispitivanje megaohmmetrom često ne omogućava da se utvrdi prisustvo kvara ni kod transformatora koji su pretrpeli tešku havariju, pošto ulje po prestanku delovanja luka „regene-

riše” izolaciju i dovoljna je izolacija za primenjene ispitne napone kod visokonaponskih transformatora. Otuda je pri oceni stanja transformatora posle vanrednih pogonskih događaja ispitivanje megaohmmetrom samo prvo u nizu neophodnih ispitivanja.

Merenje faktora dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti se na terenu vrši naponima do 10 kV, te predstavlja znatno ozbiljniji test za izolacioni sistem, naročito kod namotaja nižeg napona. Kod namotaja za vrlo visoke napone (npr. 420 kV) efikasnost otkrivanja kvara često nije veća od one koju pruža megaohmmetar. Međutim, u konkretnom slučaju ovo merenje je pružilo korisne dodatne informacije o stanju namotaja 15,75 kV, kao što se vidi iz tabele 4.

Ispitivanje dela izolacionog sistema između dva namotaja nižeg napona dalo je vrlo visoke vrednosti faktora dielektričnih gubitaka (uvećane oko 8,5 puta u odnosu na prethodno ispitivanje), uz značajan porast sa dizanjem ispitnog napona od 5 na 10 kV. Istovremeno je kapacitivnost uvećana za 7,5 do 8 %, što ukazuje na značajnu promenu geometrije. Sve to se

Tabela 4.

Rezultati merenja faktora dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti namotaja

Merni spoj	U (kV)	14. 10. 2005. godine, 30 °C		12. 07. 2006. godine, 48 °C	
		$tg\delta$ (%)	C (pF)	$tg\delta$ (%)	C (pF)
VN:NN1(NN2+M)	5	0,650	4 453	0,420	4 437,5
	10	0,670	4 455	0,470	4 400,0
VN:NN2(NN1+M)	5	0,550	4 435	0,500	4 302,5
	10	0,570	4 437	0,535	4 305,0
VN:M(NN1+NN2)	5	0,360	6 422	0,355	6 436,0
	10	0,380	6 424	0,370	6 435,0
NN1:NN2(VN+M)	5	1,440	1 689	12,370	1 814,0
	10	1,650	1 693	13,920	1 828,0
NN1:M(VN+NN2)	5	0,480	11 650	0,345	11 510,0
	10	0,480	11 660	0,385	11 515,0
NN2:M(VN+NN1)	5	0,490	11 430	1,805	12 910,0
	10	0,520	11 440	3,260	12 925,0

dobro slaže sa zaključkom o oštećenju dela izolacionog sistema između namotaja NN1 i NN2, koji je usledio na osnovu prethodnog merenja.

Obrada rezultata svih 15 merenja kapacitivnosti u spoju NN1:NN2(VN+M) u periodu 1975/2005. godina ne manje ubedljivo svedoči o anomaliji koja se javila u ovom spoju kao posledica havarije. Naime, s izuzetkom prvog, očigledno pogrešnog merenja (1,788 nF), svi ostali rezultati su ubedljivo unutar granica $\pm 2\sigma$ normalne raspodele (1,751 8 – 1,645 8 nF), uz veoma malo rasipanje (standardna devijacija 0,026 5 nF, odnos $\sigma/X_{sr}=0,015 6$), dok rezultat dobijen posle havarije bitno odstupa van navedenih granica. Treba istaći da su pri merenjima u periodu 1975/2005. godina korišćeni različiti etalon-kondenzatori i različiti mostovi, što je bitno uvećalo rasipanje rezultata, odnosno smanjilo njihovu ponovljivost. Merenja u poslednjih 10 godina su, zahvaljujući sve boljoj opremljenosti, znatno kvalitetnija. Rezultati 4 merenja u ovom periodu kreću se u rasponu od 1,692 8 do 1,699 1 nF, uz standardnu devijaciju 0,002 6 nF i odnos $\sigma/X_{sr}=0,001 5$. Nedavno nabavljena najsavremenija oprema za merenje faktora dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti sa poboljšanom eliminacijom uticaja smetnji od okolnih delova postrojenja pod naponom omogućuje još kvalitetnija merenja i još bolju repetibilnost rezultata.

Pored toga, merenje faktora dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti je otkrilo i oštećenje dela izolacionog sistema namotaja NN2 prema masi, na koje ukazuju visoke vrednosti faktora dielektričnih gubitaka i njihov porast sa povećanjem ispitnog napona, kao i razlika u odnosu na dobijene vrednosti za namotaj NN2. Poređenje sa rezultatima iz 2005. godine pokazuje da su tada vrednosti $tg\delta$ kod oba NN namotaja bile slične, a da su u 2006. godine pogoršane samo za NN2.

Dalje, promena kapacitivnosti u spoju NN2:M (VN+NN1) ukazuje na promenu geometrije namotaja NN2, odnosno njegovo pomeranje i deformaciju. U odnosu na 2005. godine uvećanje kapacitivnosti iznosi skoro 13 %.

Slično kao napred, analiza rezultata 14 merenja kapacitivnosti u spoju NN2:M (VN+NN1) pokazuje da se svi rezultati merenja u periodu 1971/2005. godina nalaze unutar granica $\pm 2\sigma$ normalne raspodele (11,286 – 11,941 4), uz veoma malo rasipanje rezultata (standardna devijacija 0,163 9 nF, odnos $\sigma/X_{sr}=0,014 1$), dok rezultat dobijen posle havarije bitno iskače iz navedenih granica. S druge strane, analiza 14 prethodnih merenja u spoju NN1:M (VN+NN2) daje granice 11,417 4 i 12,215 9 nF, u okviru kojih se nalazi i rezultat koji je dobijen 12. 07. 2006. godine.

U tabeli 5 su prikazani rezultati merenja faktora dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti provodnih izolatora na strani nižeg napona, koji su zaklonjeni oklopom od smetnji od okolnih delova postrojenja pod naponom, što njihovo ispitivanje čini znatno pouzdanijim nego ispitivanje provodnih izolatora na strani višeg napona. Zapaža se da su rezultati zadovoljavajući i bez bitnije promene u odnosu na 2005. godinu.

Napomena uz tabelu 5:

Ispitivanje provodnog izolatora y1 nije bilo moguće zbog neispravnosti mernog priključka, koja je konstatovana 2004. godine.

Rezultati ispitivanja provodnih izolatora na strani višeg napona su prikazani u tabeli 6. Radi poređenja, u tabeli su dati i rezultati ispitivanja u 2004. godini, pošto ispitivanje u 2005. godini nije bilo uspešno zbog jakih smetnji. Zapaža se da je kod izolatora N vrednost $tg\delta$ niska, tj. zadovoljavajuća, i praktično nepromenjena u odnosu na 2004. godinu, što važi i za kapacitivnost. Kod ostala tri izolatora

Tabela 5.

Rezultati merenja faktora dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti provodnih izolatora nižeg napona

Izolator (faza, broj)	U (kV)	14. 10. 2005. godine, 30 °C		12. 07. 2006. godine, 48 °C	
		$tg\delta$ (%)	C (pF)	$tg\delta$ (%)	C (pF)
x1 138189	5	0,30	308,5	0,285	309,25
	10	0,30	308,5	0,285	309,23
z1 103861	5	0,38	408,5	0,335	410,10
	10	0,38	408,5	0,335	410,11
x2 101286	5	0,39	421,1	0,355	422,76
	10	0,39	421,1	0,345	422,57
y2 103862	5	0,38	423,1	0,320	425,07
	10	0,38	423,1	0,325	425,07
z2 103860	5	0,36	414,3	0,335	415,78
	10	0,36	414,3	0,330	415,78

Tabela 6.

Rezultati merenja faktora dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti provodnih izolatora višeg napona

Izolator (faza, broj)	U (kV)	14. 10. 2005. godine, 30 °C		12. 07. 2006. godine, 48 °C	
		$tg\delta$ (%)	C (pF)	$tg\delta$ (%)	C (pF)
U 99915	5	0,885	405,92	1,340	407,72
	10	0,900	405,92	1,400	407,61
V 99913	5	0,740	415,94	1,010	417,71
	10	0,750	415,93	1,040	417,67
W 99914	5	0,650	419,27	0,880	418,12
	10	0,665	419,27	0,920	418,00
N 98664	5	0,320	296,90	0,290	298,42
	10	0,315	296,92	0,300	298,38

vrednosti kapaciteta nisu bitnije promenjene, ali su vrednosti $tg\delta$ nešto uvećane, naročito za izolator U . Preporučeno je ponavljanje ispitivanja posle demontaže izolatora i njihovog prenosa u mašinsku halu, odnosno van domašaja smetnji. Rezultati ponovljenog ispitivanja su dati u tabeli 17.

Napred razmatrana ispitivanja su merodavna za procenu stanja glavne izolacije (prema masi i između namotaja). Međutim, za ocenu sposobnosti transformatora za pogon nije manje bitno stanje međuzavojne izolacije i izolacije magnetnog kola, kao i integritet bakarnih provodnika namotaja. Zato se preduzimaju ispitivanja koja će biti prikazana u nastavku.

U tabeli 7 su dati rezultati merenja struja i gubitaka praznog hoda pri jednofaznom niskom naponu u 2005. godini, a u tabeli 8 rezultati istog ispitivanja posle havarije transformatora. Pri napajanju sa strane namotaja višeg napona za faze U i W su 2006. godine dobijeni normalni rezultati, saglasni sa ranijim merenjima. Kod faze V dobijeno je veliko uvećanje struje i gubitaka u odnosu na 2005. godinu.

Kod namotaja nižeg napona, koji je vezan u trougao, vrši se kratko spajanje po dva izvoda pri svakom mernom spoju. Iz tabele 8 se zapaža da su normalni rezultati za oba namotaja nižeg napona dobijeni samo u spoju $z - xy$. U ostala dva spoja velike struje i gubici su dobijeni već pri naponu oko 5 V.

Tabela 7.

Rezultati merenja struja i snaga praznog hoda pri niskom naponu (220 V) dana 14. 10. 2005. godine

Namotaj	I_0 (mA)	P_0 (W)	I_0 (mA)	P_0 (W)	I_0 (mA)	P_0 (W)
VN	$U - N$		$V - N$		$W - N$	
	4,23	0,21	3,15	0,17	3,99	0,21
NN1	$x1 - y1z1$		$y1 - x1z1$		$z1 - x1y1$	
	421,00	40,62	446,10	43,02	528,20	50,43
NN2	$x2 - y2z2$		$y2 - x2z2$		$z2 - x2y2$	
	415,70	41,13	442,70	43,54	529,00	50,97

Tabela 8.

Rezultati merenja struja i snaga praznog hoda pri niskom naponu dana 12. 07. 2006. godine

Namotaj	U (V)	I_0 (mA)	P_0 (W)	U (V)	I_0 (mA)	P_0 (W)	U (V)	I_0 (mA)	P_0 (W)
VN	$U - N$			$V - N$			$W - N$		
	220	5,90	0,41	220	2 401,0	13,0	220	5,71	0,41
NN1	$x1 - y1z1$			$y1 - x1z1$			$z1 - x1y1$		
	5,1	6 320,0	7,41	5,1	6 079,0	7,52	220	509,2	50,93
NN2	$x2 - y2z2$			$y2 - x2z2$			$z2 - x2y2$		
	4,5	8 300,0	-	4,5	8 140,0	-	220	511,0	51,43

Tabela 9.

Rezultati merenja omskih otpornosti (bakra) namotaja nižeg napona R_{Cu} (m Ω)

Namotaj	14. 10. 2005. godine, 26 °C			12. 07. 2006. godine, 26 °C		
	$x - y$	$x - z$	$Z - y$	$x - y$	$x - z$	$z - y$
NN1	1,440	1,440	1,440	1,446	2,492	1,962
NN2	1,338	1,338	1,360	1,366	0,160	1,128

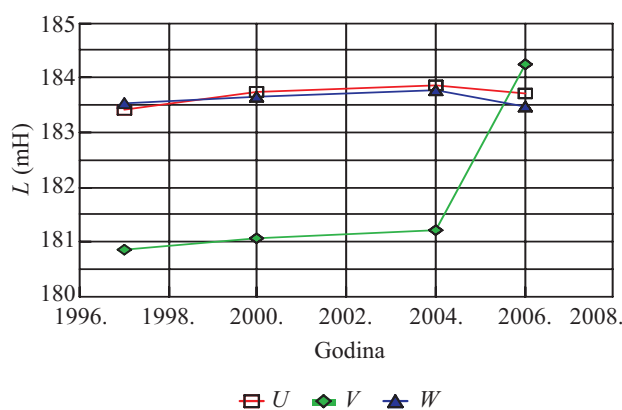
Ovakvi rezultati nesumnjivo ukazuju na međuzavojne kratke spojeve.

Merenje omskih otpornosti (bakra) namotaja obavljeno je 12. 07. 2006. godine samo na namotajima nižeg napona, a rezultati su dati u tabeli 9, uporedo sa rezultatima merenja u 2005. godini. Zapaža se da su pri merenju 2005. godine najveće razlike otpora između tri merna spoja za namotaj NN1 1,81 %, a za namotaj NN2 2,09 %, pri čemu su otpori nešto veći za donji namotaj (NN1) zbog veće dužine njegovih šinskih veza ka provodnim izolatorima. Posle havarije razlike su drastično uvećane. Za namotaj NN1 razlika je 50,3 %, a za namotaj NN2 čak 627,5 %, što potvrđuje neispravnost namotaja nižeg napona. Međutim, tumačenje značenja ovih anomalija nije jednostavno, zato što se u svakom mernom spoju meri otpornost paralelne veze jedne faze i druge dve redno vezane faze.

Najzad, najpouzdaniju sliku o stanju geometrije namotaja daje merenje induktivnosti usled rasipanja, čiji rezultati su dati u tabeli 10. U zadnjoj koloni tabele 10 dati su relativni iznosi promene za pojedine merne spojeve u odnosu na prethodne vrednosti iz 2005. godine. Primećuje se da su nastupile znatne promene kod namotaja faze V , dok su kod krajnjih faza promene neznatne.

Normalno, pri napajanju sa strane višeg napona i oba kratkospojena namotaja nižeg napona, tj. u mernom spoju $VN - (NN1+NN2)$, relativni napon kratkog spoja i induktivnost usled rasipanja su niži nego pri sa-

mo jednom kratkospojenom namotaju NN i otvorenom drugom namotaju NN, tj. u spojevima $VN - NN1$ i $VN - NN2$. Kod dvonamotajnih transformatora deformacije ili pomeranje namotaja uvećavaju induktivnost usled rasipanja, dok međuzavojni kratki spojevi, tj. „skraćena namotaja”, smanjuju induktivnost usled rasipanja. Kod tronamotajnih transformatora je situacija nešto složenija, pošto i kratak spoj na otvorenom namotaju dovodi do smanjenja induktivnosti usled rasipanja u mernom spoju druga dva namotaja.

Slika 1. Rezultati merenja induktivnosti usled rasipanja u spoju $VN - (NN1+NN2)$ u periodu 1997-2006. godina

Slika 1. pokazuje da je u spoju $VN - (NN1+NN2)$ pri svim prethodnim merenjima induk-

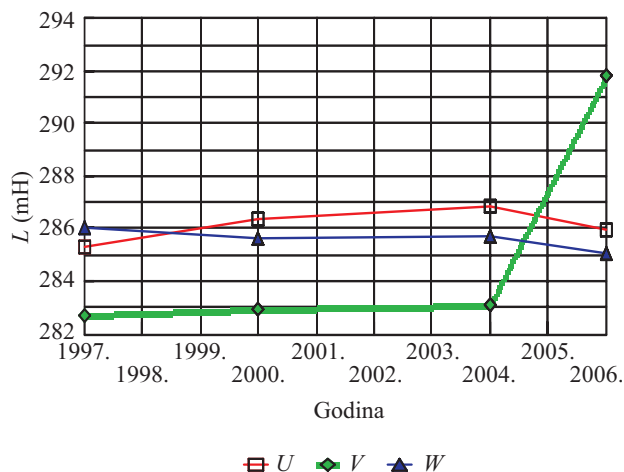
Tabela 10.

Rezultati merenja induktivnosti usled rasipanja metodom Maksvelovog mosta pri struji 1A

Merni spoj	Faza	L (mH)		DL/L (%)
		14. 10. 2005. godine	12. 07. 2006. godine	
$VN - (NN1+NN2)$	$U - N$	183,11	183,70	0,32
	$V - N$	180,51	184,24	2,07
	$W - N$	183,09	183,61	0,28
$VN - NN1$	$U - N$	286,30	261,53	-8,65
	$V - N$	283,13	184,30	-34,91
	$W - N$	287,03	262,07	-8,70
$VN - NN2$	$U - N$	285,24	285,94	0,25
	$V - N$	281,98	291,83	3,49
	$W - N$	284,59	285,03	0,15
$NN1 - NN2$	$x1 - y1$	1,79	1,84	2,79
	$x1 - z1$	1,81	1,86	2,76
	$y1 - z1$	1,81	1,86	2,76

tivnost usled rasipanja srednje faze bila niža nego induktivnosti krajnjih faza, dok je sada ona najveća, što svedoči o pomeranjima ili deformacijama namotaja na srednjem stubu.

I u spoju VN – NN2 uočava se ista pojava, kao što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Rezultati merenja induktivnosti usled rasipanja u spoju VN – NN2

S druge strane, u spoju VN – NN1 se zapaža sniženje induktivnosti usled rasipanja, koje je naročito veliko kod srednje faze, što pokazuje da postoji međuzavojni kratak spoj kod nekog od namotaja.

Rezultati izvedenih električnih merenja na transformatoru su pokazali da je neispravan i da je neophodno da se zameni rezervnim transformatorom. Električna merenja su pokazala:

- da postoji oštećenje čvrste izolacije transformatora;
- da je sigurno oštećena izolacija namotaja NN2 prema masi i namotaju NN1;
- da sigurno postoji poremećaj geometrije namotaja;
- da postoje međuzavojni kratki spojevi i
- da je najsumnjivije stanje namotaja srednje faze.

Naknadno prispeli rezultati laboratorijske gasnohromatografske analize su daleko manje informativni, ali su bar potvrdili da je u transformatoru delovao električni luk (šifra 102 na osnovu karakterističnih odnosa koncentracija) i da je kvarom zahvaćena i celulozna izolacija.

Rezultati prethodne gasnohromatografske kontrole transformatora 2005. godine i sadržaj rastvorenih gasova u ulju i slobodnih gasova koji su se sakupili u Buholcovom releu posle havarije 11. 07. 2006. godine prikazani su u tabeli 11.

Dominantni gasovi kvara u ulju acetilen i vodonik svedoče o električnom luku, a značajne koncentracije CO i CO₂ u gasu iz Buholcovog relea svedoče da je razaranjem obuhvaćena čvrsta izolacija.

U tabeli 12. su prikazani rezultati merenja koncentracije furana u ulju transformatora pre (2002. i 2004. godine) i posle havarije. Ispitivanje je obavljeno metodom tečne hromatografije (HPLC). Furani su karakteristični produkti starenja ili razaranja celulozne izolacije i nikad ne potiču od ulja, za razliku od CO i CO₂, koji u izvesnoj količini mogu biti i produkt degradacije ulja. Najkarakterističniji među njima je 2-furfural (2-FAL). Udvostručenje koncentracije 2-FAL potvrđuje razaranje čvrste izolacije pri havariji.

Tabela 11.

Rezultati gasnohromatografske kontrole sadržaja rastvorenih gasova u ulju – donji nivo, D (izraženih u ppm) i slobodnih gasova koji su se sakupili u Buholcovom releu – BR (u %)

Gas	12. 10. 2005.	11. 07. 2006.	
	godine	D (ppm)	BR (%)
Vodonik, H ₂	97	555	29,900
Metan, CH ₄	14	110	2,800
Acetilen, C ₂ H ₂	0	432	1,800
Etilen, C ₂ H ₄	13	140	0,300
Etan, C ₂ H ₆	3	8	0,005
Ugljenmonoksid, CO	1 174	1 053	12,700
Ugljendioksid, CO ₂	7 886	6 882	0,800
Ukupna zapremina, V (ml/l)	90,9	93,98	
IEC šifra		102	

Tabela 12.

Rezultati merenja koncentracije 2-furfurala (2-FAL) u ulju

Datum	2. 10. 2002.	5. 10. 2004.	13. 07. 2006.
	godine	godine	godine
Koncentracija 2-FAL (ppm)	0,12	0,12	0,25

Na osnovu napred iznetog doneta je odluka o ispuštanju ulja iz transformatora, demontaži provodnih izolatora, prebacivanju transformatora u mašinsku halu i otvaranju radi vizuelnog pregleda.

Napominjemo da od 2007. godine za preventivnu kontrolu i defektažna ispitivanja energetskih transformatora stoji na raspolaganju sofisticirana metoda snimanja frekventnog odziva (SFRA, Sweep Frequency Response Analysis). Sa metodom i prvim rezultatima njene primene upoznaćemo stručnu javnost uskoro.

6. ISPITIVANJA POSLE OTVARANJA TRANSFORMATORA

Vađenje transformatora iz suda omogućilo je razvezivanje trougla kod namotaja NN1 i NN2, a time i odvojena merenja na pojedinim faznim namotajima oba namotaja nižeg napona i bolje sagledavanje njihovog stanja. Rezultati ovih ispitivanja su dati u tabelama 13-16.

U tabeli 13 su dati rezultati merenja omskih otpora (bakra) namotaja. Zapaža se jako snižena vrednost za srednju fazu namotaja NN2, dok su vrednosti ostalih faza oba namotaja ujednačene.

Tabela 13.

Rezultati merenja omskih otpora (bakra) namotaja po fazama

Namotaj	x1	y1	z1	x2	y2	z2
R_{Cu} (mΩ)	2,083 8	2,099 8	2,169 3	1,934 1	0,490 0	1,978 1

U tabeli 14 su dati rezultati merenja omskih otpora (bakra) namotaja VN. Zapaža se da su rezultati po fazama veoma ujednačeni. Najveća razlika iznosi svega 0,21 %.

Tabela 14.

Rezultati merenja omskih otpora (bakra) namotaja VN pri 27,9 °C

Namotaj	U	V	W
R_{Cu} (mΩ)	375,2	374,6	374,4

U tabeli 15 su dati rezultati merenja induktivnosti usled rasipanja po fazama, odnosno stubovima magnetnog kola. Zapaža se veliko sniženje induktivnosti usled rasipanja u spoju $V:y1$, a izvesno uvećanje u spojevima $V:y2$ $V:y1+y2$, dok su sva merenja za namotaje krajnjih stubova dala normalne rezultate. Posebno je interesantna promena induktivnosti usled rasipanja između namotaja nižeg napona na srednjem stubu u zavisnosti od toga koji se namotaj napaja, a koji je kratko spojen.

U tabeli 16 su dati rezultati merenja odnosa transformacije pojedinih parova namotaja na svakom stubu magnetnog kola. Merenje u spojevima $V:y2$ i $y1:y2$ nije obavljeno zbog očiglednog postojanja međuzavojnih spojeva u namotaju $y2$. U svim primenjenim mernim spojevima su dobijene normalne vrednosti odnosa transformacije, odnosno greške u dopuštenim granicama od 0,5 %, s izuzetkom spoja $V:y2$.

Tabela 15.

Rezultati merenja induktivnosti usled rasipanja po stubovima

Mereno između namotaja	L (mH)
U:x1	337,098 2
U:x2	335,605 1
V:y1	184,426 2
V:y2	343,353 6
W:z1	338,615 6
W:z2	335,068 9
U:x1+x2	182,781 4
V:y1+y2	184,201 6
W:z1+z2	183,072 4
x1:x2	2,637 2
y1:y2	2,549 6
z1:z2	2,642 3
x2:x1	2,629 9
y2:y1	0,047 3
z2:z1	2,635 4

Napominjemo da se još pouzdaniji podaci o stanju namotaja mogu dobiti razdvajanjem paralelnih grana namotaja VN i zasebnim merenjima omskih otpora, odnosa transformacije i induktivnosti usled rasipanja svake grane ponaosob. Od ovih merenja se odustalo zbog izolacionih cilindara oko namotaja VN, bez čijeg oštećenja razdvajanje paralelnih grana namotaja VN nije moguće.

Tabela 16.

Rezultati merenja odnosa transformacije

Merni spoj	m_n	M	G (%)
U:x1	15,396	15,414 5	0,12
U:x2	15,396	15,403 0	0,05
V:y1	15,396	17,171 4	11,53
W:z1	15,396	15,398 0	0,01
W:z2	15,396	15,393 6	-0,02
x2:x1	1,000	1,002 7	0,27
z1:z2	1,000	1,002 5	0,25

U tabeli 17 dati su rezultati ispitivanja provodnih izolatora na strani višeg napona u mašinskoj hali, tj. van uticaja smetnji. Imajući u vidu planirana ispitivanja povišenim naponom posle završetka opravke, odlučeno je da se na transformatoru ipak montiraju novi (rezervni) izolatori, uz prethodno ispitivanje njihovog faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta.

Tabela 17.
Rezultati ponovljenog merenja faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta provodnih izolatora na strani višeg napona

Provodni izolator	U (kV)	$tg\delta$ (%)	C (pF)
U , 99915	10	0,94	411,05
V , 99913	10	0,76	417,40
W , 99914	10	0,33	419,06
N , 98664	10	0,52	300,13

7. UTVRĐIVANJE KVARA

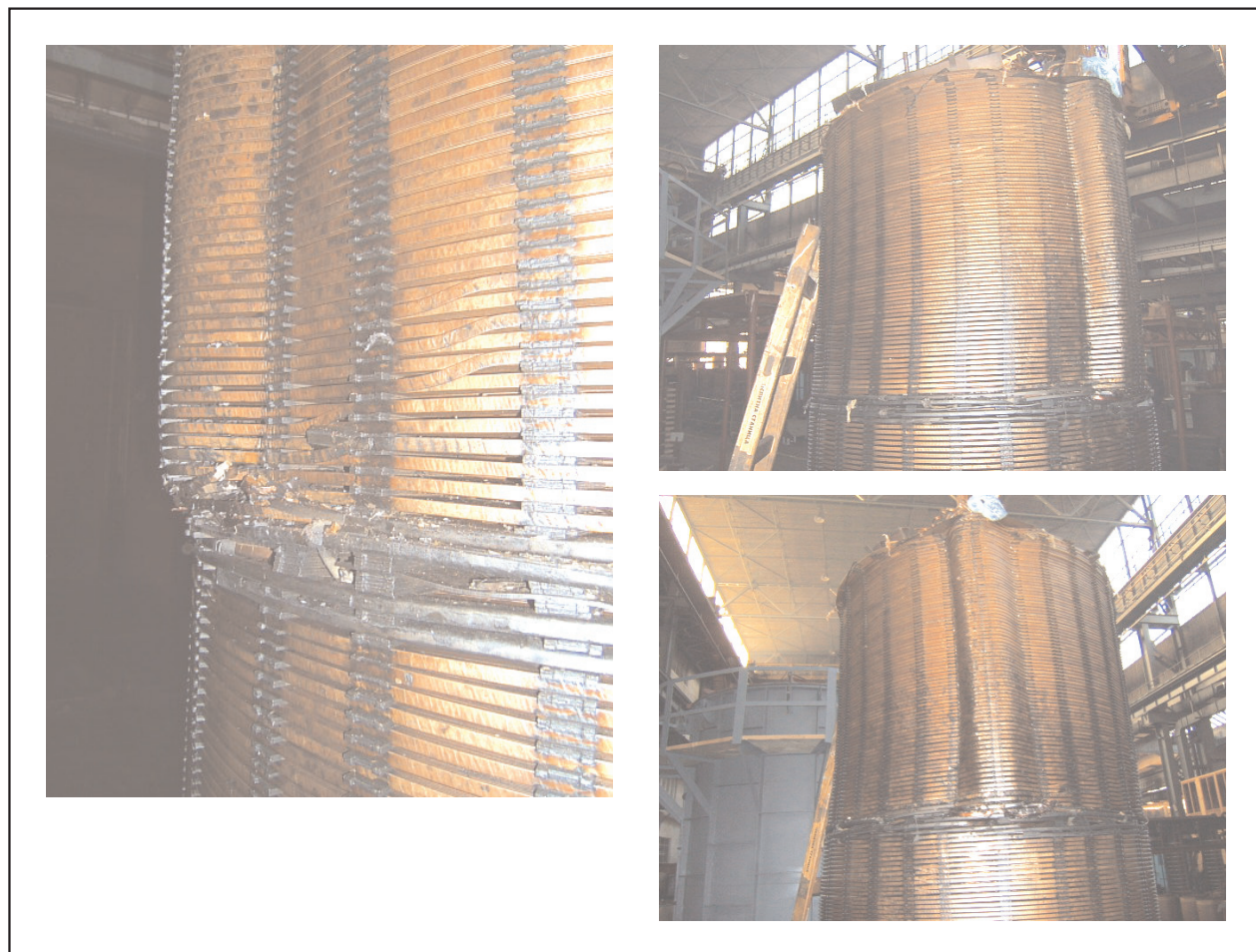
Prvo utvrđivanje kvara je obavljeno posle ispuštanja ulja, demontaže rashladnog sistema, provodnih izolatora i njihovih kupola, kao i prebacivanja transformatora u halu i vadenja iz suda. Primećeno je dosta čađi, kao i nešto gvozdениh i bakarnih opiljaka na donjem izolacionom prstenu namotaja srednjeg stuba. Izolacioni cilindri su onemogućili uvid u

stanje namotaja. Zbog sumnje u stanje namotaja NN2 na srednjem stubu skinuti su izolacioni stezači ovog namotaja prema gornjem jarmu, posle čega je zapaženo da su ulazni kolotovi jako deformisani i da ima dosta nagorelog papira. Uočeno je i pomeranje izolacionih lajsni na srednjem stubu.

Prilikom demontaže gornjeg jarma konstatovani su veliki zazori između limova gornjeg jarma i stubova, što objašnjava prilično velike gubitke i struju praznog hoda prema fabričkom atestu pri U_n (317 kW, 1,07 %).

Posle skidanja gornjeg jarma, pri demontaži namotaja VN nisu uočena oštećenja, ali je demontaža namotaja srednje faze bila otežana zbog deformacije namotaja NN2 (slika 3), na kojem su uočeni i znaci električnog razaranja sa formiranjem međuzavoynih spojeva. Na namotaju NN1 istog stuba prema namotaju NN2 zapaženi su tragovi električnog preskoka i blaga rastrešenost. Na namotajima NN krajnjih faza nisu otkrivena bilo kakva oštećenja.

Oko polovine visine namotaja VN u kanalima između kolotova su primećene sjajne čestice kugla-



Slika 3. Izgled namotaja NN2 srednje faze

stog oblika, koje su ličile na bakarne opiljke, ali je utvrđeno da se pod prstima drobe i da predstavljaju kuglice lepka. Na papirnoj izolaciji prstenova za poboljšanje raspodele potencijala u zoni ulaza u namotaj VN primećene su pravilno raspoređene tamne mrlje, koje prate spiralno motanje papira i takođe predstavljaju tragove lepka, mada su u prvi mah asocirale na tragove parcijalnih pražnjenja.

Završno utvrđivanje kvara namotaja VN u fabrici pokazala je da na njegovim izolacionim barijerama ima dosta čađi.

Vizuelni pregled magnetnog kola posle potpune demontaže namotaja nije otkrio bilo kakva oštećenja, dok su ispitivanjem izolacije magnetnog kola megaometrom pri 500 V dobijene neujednačene vrednosti kao posledica zaprljanosti, a ne zbog postojanja kvara.

Uzeti su uzorci papira za utvrđivanje njegove ostarelosti preko viskozno indeksa polimerizacije. Obavljeno ispitivanje ima širi značaj, pošto se ne tiče samo transformatora koji je pretrpeo havariju, nego i procene radnog veka preostala tri blok-transformatora, imajući u vidu širi aspekt revitalizacije hidroelektrane. Zato će ovi rezultati i njihovo razmatranje biti predmet posebnog rada. Na ovom mestu ćemo pomenuti samo da su rezultati ukazali na veliku ostarelost papirne izolacije.

8. ODLUKA O NAČINU POPRAVKE

Pri donošenju odluke o načinu popravke transformatora uzeti su u obzir:

- zaključci o prirodi i obimu kvara na osnovu sprovedenih ispitivanja i defekataže;
- postojanje kompleta rezervnih namotaja za jednu fazu, koji se čuvaju u cisterni sa uljem;
- problem transporta transformatora u fabriku, s obzirom na njegovu veličinu i težinu, koji je moguće realizovati samo železnicom preko Rumunije, što je veoma skupo (potreban je specijalni vagon) i dugo traje;
- povećani rizik od neraspoloživosti 1/3 proizvodnog kapaciteta elektrane sve vreme dok ne postoji rezervni transformator;

- problem sušenja izolacionog sistema transformatora, koji bi tokom opravke neizbežno duže vremena bio izložen uticaju atmosferske vlage;
- problem adekvatnih dielektričnih ispitivanja, koja bi garantovala kvalitet izvršene opravke;
- pogodnosti koje postoje u elektrani (hala sa kratnom odgovarajuće nosivosti i čistom atmosferom, mogućnost napajanja opreme za sušenje i završno ispitivanje transformatora) i
- nameravana revitalizacija elektrane sa povećanjem snage agregata.

Imajući napred pobrojano u vidu zaključeno je da je **najprihvatljivija strategija sanacije posledica havarije opravka na licu mesta u najneophodnijem obimu, tj. sa zamenom oštećenih namotaja srednje faze, uz zamenu izolacionih cilindara zdravih faza zbog zaprljanosti čađu i preizolovanje šinskih veza, a da se istovremeno planira sukcesivna nabavka novih transformatora veće snage.**

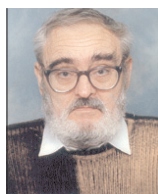
9. ZAKLJUČCI

Električna defektažna merenja su dala vrlo jasnu sliku o prirodi, obimu i mestu kvara, koja je potvrđena tokom defektaže. Sagledavanje stanja transformatora neposredno posle havarije omogućilo je donošenje odluke o daljim aktivnostima na saniranju posledica havarije.

10. LITERATURA

- [1] A. Bojković: OPASNOST OD STATIČKOG ELEKTRICITETA PO VELIKE ENERGETSKE TRANSFORMATORE, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd, Zbornik radova, knjiga 7, 1989.
- [2] A. Janković sa grupom autora: POPRAVKA BLOK-TRANSFORMATORA 380 MVA U ELEKTRANI, 28. Savetovanje JUKO SIGRE, Vrnjačka Banja, 2007.
- [3] A. Janković sa grupom autora: KONCEPCIJA ZAVRŠNIH ISPITIVANJA NA LICU MESTA BLOK-TRANSFORMATORA 380 MVA POSLE POPRAVKE, 28. Savetovanje JUKO SIGRE, Vrnjačka Banja, 2007.

Rad je primljen u uredništvo 30. 08. 2006. godine



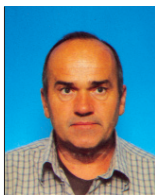
Aleksandar P. Bojković je rođen 1943. godine u Beogradu, gde je završio gimnaziju i diplomirao na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Od 1971. godine radi u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” na poslovima preventivne kontrole elektroenergetske opreme, uključujući i ispitivanja uzoraka ulja. Razvijao je metode kontrole energetskih i mernih transformatora gasnom hromatografijom i metode za utvrđivanje deformacija namotaja energetskih transformatora. Objavio je samostalno ili sa koautorima veći broj radova u zemlji i izvestan broj radova na stručnim skupovima u inostranstvu.



Dorđe E. Jovanović je rođen 1966. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu i srednju elektrotehničku školu „Nikola Tesla”. Godine 1995. diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na smeru Elektroenergetski sistemi. Od 1996. zaposlen u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” na poslovima preventivne kontrole elektroenergetskih objekata. Član CIGRE Studijskog komiteta 12 – Transformatori (A2). Kao koautor učestvovao u izradi više stručnih radova prezentiranih na domaćim stručnim skupovima.



Dragan Teslić je rođen 1968. godine u Beogradu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Energetskom smeru. Nakon diplomiranja radio u preduzeću „Holding Grmeč” AD kao inženjer tehničke pripreme i održavanja. Od 2000. godine zaposlen u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u centru Elektromerenja, Laboratorija za ispitivanje i etaloniranje. Specijalizovan je u oblasti ispitivanja elektroizolacionih sistema energetskih i mernih transformatora, generatora i visoko naponskih motora.



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



Sladana Teslić je rođena u Kikindi 1972. godine. Diplomirala je na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu na odseku Hemijsko inženjerstvo. Nakon diplomiranja radila na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na katedri za Organsku hemijsku tehnologiju i Polimerno inženjerstvo, kao saradnik na istraživanju i nastavi, u oblasti Reaktorskog inženjerstva. Od 2004. godine zaposlena u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u centru Elektromerenja, Laboratorija za ispitivanje i etaloniranje. Specijalizovana je u oblasti ispitivanja izolacionih ulja i čvrste izolacije transformatora.



Radovan Lj. Radosavljević je rođen u Kraljevu 1949. godine. Diplomirao je 1972. godine, magistrirao 1987. i doktorirao 1994. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, gde radi od 1972. godine. Glavni pravci naučnog i istraživačkog rada obuhvataju energetske transformatore, električne mašine i primenu savremenih metoda za ispitivanje transformatora i električnih mašina u stacionarnim i dinamičkim režimima rada. Predsednik je više stručnih tela na nacionalnom nivou. Autor je više od 80 radova objavljenih u eminentnim međunarodnim i domaćim časopisima ili konferencijama i rukovodio je većim brojem projekata studija i elaborata za potrebe domaće elektroprivrede i u inostranstvu.



Aleksandar Janković je rođen 17. 2. 1939. godine u Beogradu. Elektrotehnički fakultet u Beogradu je završio 1993. godine. Više od 30 godina radi u „Minelu”, gde projektuje skoro sve laboratorije visokog napona i, prvenstveno, vodi ispitivanja velikih transformatora. Oko 9 godina radi u „Elektroistoku”, gde, takođe, vodi odeljenje za merenje na energetskim i mernim transformatorima. Ima veliki broj objavljenih radova iz domena svog rada. Više od 20 godina je član međunarodnog Udruženja laboratorija visokog napona.



Dragomir B. Gucić je rođen je u Kladovu 1958. godine gde je stekao osnovno i srednje obrazovanje. Diplomirao je 1984. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Od 1984. godine radi u HE „Đerdap 1” na poslovima elektromašinskog održavanja.



Petar Nikolić je rođen 1970. godine u Kladovu. Diplomirao je na Tehničkom fakultetu u Čačku 1995. godine, na smeru Elektroenergetski sistemi. Od 1997. godine zaposlen je na hidroelektrani HE „ĐERDAP 1” u Kladovu, na poslovima održavanja elektroenergetske opreme.



Veljko Vidaković (1948) je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1971. godine i iste godine se zaposlio u HE Đerdap gde i danas radi. U svom radu najviše se bavio praćenjem stanja, preventivnim održavanjem i revitalizacijom velikih električnih mašina. prvenstveno hidrogenatora i energetske transformatora. Objavio je veći broj stručnih radova u zemlji i inostranstvu.



Miomir Lj. Nikodijević je rođen 1951. godine u Mladenovcu, gde je završio osmogodišnju i srednje tehničku školu, elektrosmer. Višu elektrotehničku školu završio je u Čačku. Preko 33 godine radi u Minelovoj fabrici transformatora u Ripnju, u različitim delovima procesa proizvodnje transformatora. Trenutno rukovodilac Sektora tehničke kontrole.

*Boris Filipović, Marija Đorđević,
Aleksandar Kurćubić, Miloš Stojić i Jelena Veselinović*

Primena mrežnih aplikacija u NDC Elektromreže Srbije

Stručni rad
621.31; 62.519

Rezime:

U ovom radu su opisane sve mrežne funkcije koje se nalaze u sastavu novog SCADA/EMS sistema koji je primenjen u Nacionalnom Dispečarskom Centru Elektromreže Srbije, pokazana je njihova funkcionalnost i njihov značaj za pravilno upravljanje EES-om.

Ključne reči: mrežne aplikacije, estimacija stanja, analiza sigurnosti, kratki spojevi, SCADA

Abstract:

IMPLEMENTATION OF NETWORK APPLICATIONS IN NDC ELEKTROMREŽA SRBIJE

A global overview of network applications, their functionality and importance are given in this paper. They are a part of the new SCADA/EMS system which is implemented in National Dispatching Center of Elektromreža Srbije.

Key words: network applications, state estimation, contingency analysis, short circuit, SCADA

1. UVOD

Sve osnovne funkcije upravljanja u realnom vremenu baziraju se na procesima odlučivanja, a osnov za to su informacije koje se u centar upravljanja prenose direktno iz sistema. Informacije o stanju elektroenergetskog sistema (EES) se dobijaju preko sistema za akviziciju podataka i daljinsko upravljanje (SCADA), pomoću koga se prate vrednosti napona, struja, tokova snaga i statusi prekidača i rastavljača u postrojenjima EES-a. U opštem slučaju skup tih podataka je nepotpun, bilo zato što se za neke elemente EES-a uopšte ne vrše odgovarajuća merenja ili se ne vrši prenos mernih podataka do dispe-

čarskog centra, bilo zato što pojedini merni podaci nisu raspoloživi zbog kvarova na odgovarajućoj opremi. Kada se pri tome doda da merni podaci sadrže greške koje potiču iz različitih razloga, može se dobiti lažna slika o stanju u EES-u. Analizu tih podataka vrši EMS-Energy Management System koji procenjuje u kakvom je stanju elektroenergetski sistem i pokazuje šta bi sve trebalo uraditi da se to stanje poboljša. EMS sadrži aplikacije za analize mreže, aplikacije za upravljanje proizvodnjom, aplikacije za planiranje rada EES i dispečer trening simulator. U Nacionalnom Dispečarskom Centru Elektromreže Srbije instaliran je SCADA/EMS sistem čuvenog svetskog proizvođača AREVA. Krajem 2005.

Boris Filipović, dipl. ing. el. – Simens-DMS, Al Ain, UAE

Mr Marija Đorđević, dipl. ing. el., Aleksandar Kurćubić, dipl. ing. el., Jelena Veselinović, dipl. ing. el.

– JP „Elektromreža Srbije”, 11 000 Beograd, Kneza Miloša 11,

Mr Miloš Stojić, dipl. ing. el. – IMP Automatika, 11 000 Beograd

godine izvršeno je fabričko testiranje sistema i svih njegovih funkcija. U 2006. i 2007. godini je instalirana oprema, izvedena merenja, aplikacije su podešavane i testirane, u saradnji sa proizvođačem neke aplikacije su prilagođene uslovima koji vladaju u našem sistemu.

2. MREŽNE APLIKACIJE

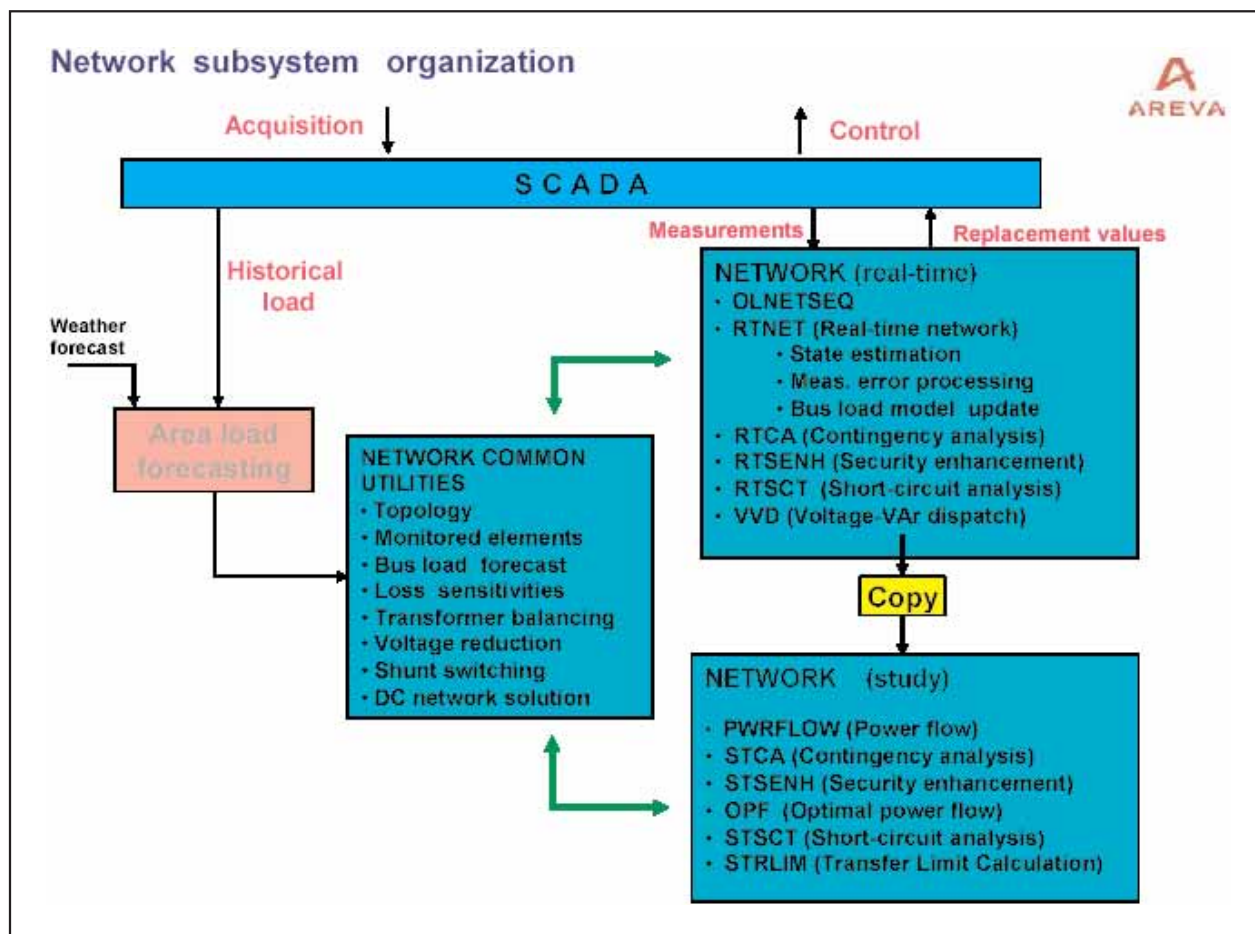
Aplikacije za analize mreže mogu da rade u sledeća dva režima: režim realnog vremena (real time) i studijski režim (study). Aplikacije koje rade u režimu realnog vremena vrše procenu stanja EES, zatim ovu procenu koriste za analizu baznog stanja EES kao i stanja EES koja bi nastala usled nekog poremećaja. Dodatna funkcionalnost se sastoji u tome što se omogućavaju proračuni kontrolnih upravljačkih akcija koje imaju za cilj da poboljšaju sigurnost i/ili ekonomičnost pogona EES. Funkcije koje se izvršavaju i/ili se mogu izvršavati u režimu realnog vremena su: statička estimacija stanja (RTNET - Real time network), analiza statičke sigurnosti (CA-Contingency Analysis), generisanje preventivnih ak-

cija u cilju poboljšanja sigurnosti (SENH-Security Enhancement), proračun kratkih spojeva (SCT-Short Circuit) i naponsko-reaktivno dispečiranje (VVD-Voltage-Var Dispatch). U studijskom režimu, pored gore navedenih funkcija za analize mreže, koriste se i sledeće funkcije aplikacije: proračun toka snaga i napona (PWRFLOW-Power Flow), proračun optimalnih tokova snaga (OPF-Optimal Power Flow) i proračun raspoloživih prenosnih kapaciteta (STRLIM-Study Transfer Limit), kao i aplikacija LALF-Look Ahead Load Flow.

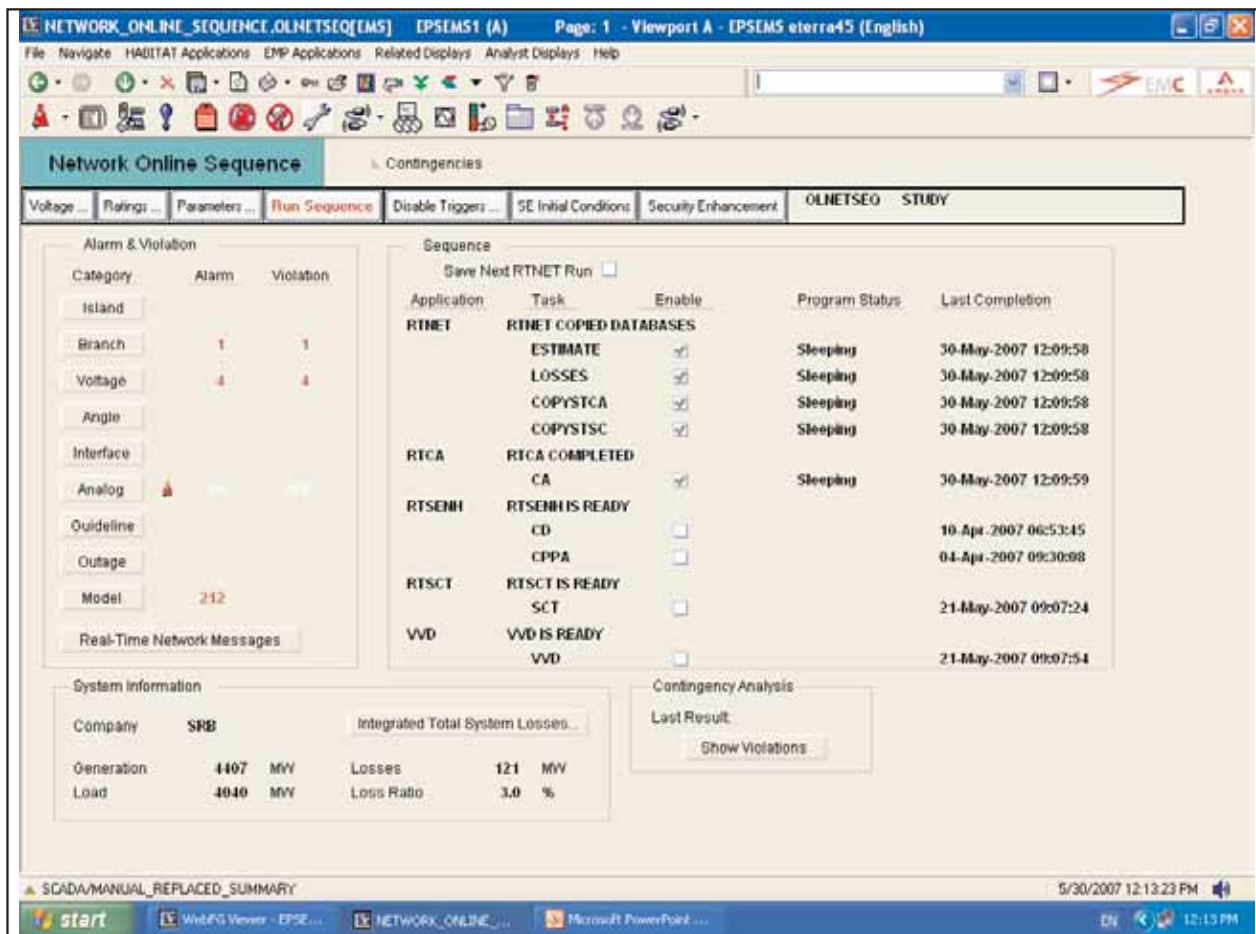
3. REAL TIME APLIKACIJE

Sve aplikacije u režimu realnog vremena se sekvencionalno izvršavaju. Funkcija statičke estimacije stanja EES je da na osnovu daljinski izmerenih podataka u realnom vremenu stvori veran model elektroenergetskog sistema, i odredi kompletno stanje u svim delovima mreže gde je to moguće (stanje je određeno modulima i faznim uglovima napona u čvorovima).

Rezultat estimacije daje tačnije, kompletnije i konzistentnije podatke nego što je to moguće dobiti



Slika 1. Organizacija mrežnih aplikacija



Slika 2. Prikaz displeja sa statusom mrežnih aplikacija koje se izvršavaju u sekvenci

samim SCADA sistemom i oni se koriste kao ulazni podaci za ostale aplikacije. Ovo se postiže uz pomoć povećanog broja analognih merenja u odnosu na minimalan broj neophodan za rešenje opservabilnog dela mreže. Merenjima se dodeljuju različiti težinski faktori klase tačnosti u zavisnosti od nivoa pouzdanosti pojedinih merenja. Tačnija merenja će imati veće težine i više će uticati na proračun i konačan rezultat. Estimacija se vrši na osnovu strukturnih podataka o mreži dobijenih posebnim programom za određivanje topologije mreže na osnovu vrednosti parametara prenosnih vodova i transformatora, kao i daljinski prikupljenih statusa rasklopnih aparata i analognih merenja. Estimacijom je moguće odrediti stanja i u onim objektima koji nisu telemetrisani, pod uslovom da je u njima poznato stanje rasklopnih aparata i ukoliko su susedni objekti pokriveni dovoljnim brojem merenja ili ukoliko se koriste pseudomerenja u datim postrojenjima. Pseudomerenja se automatski dobijaju iz programa za procenu opterećenja čvorova (BLF - Bus Load Forecast) koji na osnovu istorijskih podataka o estimiranim vrednostima opterećenja vrši procenu aktivnih i reaktivnih

injektiranih snaga u svim potrošačkim čvorovima električne mreže. BLF preuzima potrebne estimirane vrednosti opterećenja od estimatora stanja na osnovu kojih vrši ažuriranje istorijskih podataka o opterećenjima potrošačkih čvorova. Veoma važna funkcija estimacije je otkrivanje loših merenja, kao i praćenje karakteristika mernih grešaka. Merenja koja u nekoliko iteracija imaju odstupanja od tačne vrednosti proglašavaju se sumnjivim merenjima, a ako se takvo stanje nastavi, prelaze u kategoriju anomalnih merenja i ne utiču na estimaciju. Ukoliko se merenja poprave, suprotnim postupkom se vraćaju u normalnu upotrebu. Za sva merenja se iz iteracije u iteraciju proračunavaju „bias” i standardna devijacija i na taj način tačnost merenja se može pratiti i može se raditi na popravljanju tačnosti merenja. Po završetku estimacije vrši se provera da li neke estimirane veličine premašuju ograničenja sistema i, ako takve veličine postoje, generišu se alarmi. Ukoliko ne postoji validno rešenje estimacije, druge aplikacije iz režima realnog vremena se ne izvršavaju.

Statička sigurnost elektroenergetskog sistema je pojam koji označava sposobnost sistema da bez ve-

ćih posledica podnese neke nepredviđene, ali verovatne poremećaje iz unapred formirane liste mogućih poremećaja. U listi poremećaja moguće je postaviti jednostruke i višestruke poremećaje, kao i uslovne poremećaje kod kojih se posle nekog poremećaja prati definisana veličina i, ako je ona izvan definisanog opsega, izvršava se i uslovni poremećaj (prosto modelovanje releja). Analiza sigurnosti sje izvršava kroz dva procesa, prvi je brza podela poremećaja na poremećaje koji ne utiču na sigurnost sistema (poremećaji pri kojima se ne premašuju ograničenja sistema) i potencijalno škodljive poremećaje. U prvom procesu koristi se linearni DC model za proračun i prate se odstupanja od ograničenja sistema i na osnovu izračunate sume odstupanja rangiraju se poremećaji. Prilikom rangiranja uvažava se i verovatnoća da se dogodi taj poremećaj. Definisani broj najškodljivih poremećaja ulazi u drugi proces analize sigurnosti koji vrši analizu tih poremećaja punim AC proračunom tokova snaga.

Za svaki poremećaj prikazuju se sva odstupanja od ograničenja i pravi se lista nerešivih proračuna, škodljivih i potencijalno škodljivih poremećaja, kao

i poremećaja koji nisu škodljivi. Analiza sigurnosti elektroenergetskog sistema može da rešava i poremećaje kojima se dele ili povezuju sabirnice, stvaraju ili ukidaju električna ostrva i uvažava generatorske participacione faktore i vreme odziva prilikom poremećaja nekog generisanja ili potrošnje. Jedna od funkcija ove aplikacije je provera stanja u sistemu koje će nastati prilikom nekih manipulacija rasklopne opreme. Ako u sistemu treba da se izvrši neka manipulacija rasklopne opreme, korisnik veoma lako i brzo može da proveri kakvo će stanje posle toga biti i da li će se time narušiti sigurnost sistema.

Generisanje preventivnih upravljačkih akcija (kontrola) je napredna mrežna aplikacija koja se koristi da preporučuje akcije koje treba da se urade da bi se u sistemu otklonila narušenost ograničenja sistema ili da bi se u sistemu smanjili operativni troškovi. Takođe, ova aplikacija može preporučiti akcije koje bi, ako se izvrše, dovele bi sistem u sigurnije stanje. Koristi se linearno programiranje i algoritam je veoma prilagođen realnom stanju jer rešava problem sa najmanjim mogućim brojem kontrola upravljanja. Ovaj program koristi sledeća upravljanja:

SRB	DV101	DV102	DV103	DV104_3	DV203_1	DV1001	DV1002	DV1007
CG	DV1010	DV104_1	DV104_2	DV104_5	DV104_7	DV108	DV108_2	DV109_4
MAK	DV1101	DV1102_1	DV1102_2	DV1105	DV1107_2	DV1107_3	DV1108	DV1110_1
HRV	DV1110_2	DV1112	DV1115	DV1116	DV1117	DV1118	DV1122	DV1126_1
ALB	DV1126_2	DV1125	DV1137	DV113_1	DV1140_3	DV1142	DV1143_1	DV1143_2
BUG	DV1145_1	DV1145_2	DV1147	DV114_1	DV114_2	DV1150	DV1151	DV1152
RUM	DV1156	DV1157	DV1159	DV1161	DV1165	DV1168	DV1172	DV1176
BIH	DV1179	DV117_1	DV1181	DV1183	DV1186	DV1186	DV1187A	DV1187B
HUN	DV1188A	DV1184	DV1186	DV1203_1	DV1203_2	DV1204	DV1208	DV1210
	DV1217	DV1219	DV1221	DV124_3	DV127_1	DV129A	DV130_1	DV130_2
	DV130_3	DV131_2	DV133_2	DV133_3	DV135_2B	DV136A_2	DV136B_2	DV137_1
	DV137_2	DV138	DV141	DV142_1	DV142_2	DV143	DV147_2	DV148_2
	DV148_3	DV151_1	DV151_2	DV151_3	DV152_1	DV152_4	DV153	DV154_2
	DV155_1	DV155	DV155_1	DV155_4	DV152	DV155_2	DV156	DV151
	DV155	DV157	DV155	DV155	DV152	DV155_1	DV155_2	DV155
	DV159_1	DV205_1	DV205_2	DV210	DV211	DV2143	DV2144	DV2172
	DV226	DV2303	DV2304	DV2305	DV235	DV2361	DV2362	DV237
	DV278	DV291	DV2921	DV293_1	DV295	DV2972	DV401	DV4012
	DV404	DV405	DV407	DV4092	DV412	DV420	DV451	DV454
	K1216	K171	K172	K18_3_1D	SM02783	SM4131	DV422	DV423
	DV196	DV202	DV204	SL400101	SL400102	121A1180	121B1180	102_115
	DV1003	DV1004	DV1005	DV1006	DV1006	DV1009	DV1011	DV1012
	DV101A_1	DV101A_2	DV101A_3	DV101A_4	DV101B_1	DV101B_2	DV101B_3	DV101B_4
	DV102A_1	DV102A_2	DV102B_1	DV102B_2	DV103	DV104B	DV104_3	DV104_5
	DV104_A4	DV105_1	DV105_2	DV106A	DV106A_2	DV106A_3	DV106B	DV106B_2
	DV106B_3	DV107_1	DV107_2	DV107_3	DV109_1	DV109_3	DV1102	DV1104
	DV1108	DV1107_1	DV1108	DV110A_1	DV110B_1	DV111	DV1111	DV1113

Slika 3. Prikaz displeja u kome su rangirani poremećaji u sistemu

aktivno i reaktivno generisanje, aktivnu snagu razmene sa susedima, regulator generatorskog napona, otepe na transformatoru, rasterećenje potrošnje. Upravljanja mogu biti definisana pojedinačno ili grupno (po tipu kontrole, po oblasti ili po nekom drugom principu). Takođe, definiše se i prioritet kontrola. Korisnik može da definiše određene scenarije uključenja i isključenja rasklopne opreme za određene slučajeve, i algoritam za te slučajeve prvo izvrši promenu rasklopne opreme po scenariju i onda primenjuje linearno programiranje. Ograničenja su tokovi po dalekovodima i transformatorima, suma tokova snage sa više dalekovoda ili transformatora (koji mogu da se definišu), kao i rotirajuća generatorska rezerva u sistemu.

Proračun kratkih spojeva je aplikacija koja ima za cilj da proračuna struju kao i naponski profil u slučaju kratkog spoja na određenom elementu i da ispita gde su narušena ograničenja rasklopne opreme. Taj proračun se vrši za sve slučajeve kratkih spojeva koji se postave na listu. Na listu kratkih spojeva mogu da se postave trofazni i jednofazni kratki spojevi sa uzemljenjem, na bilo kojoj opremi u siste-

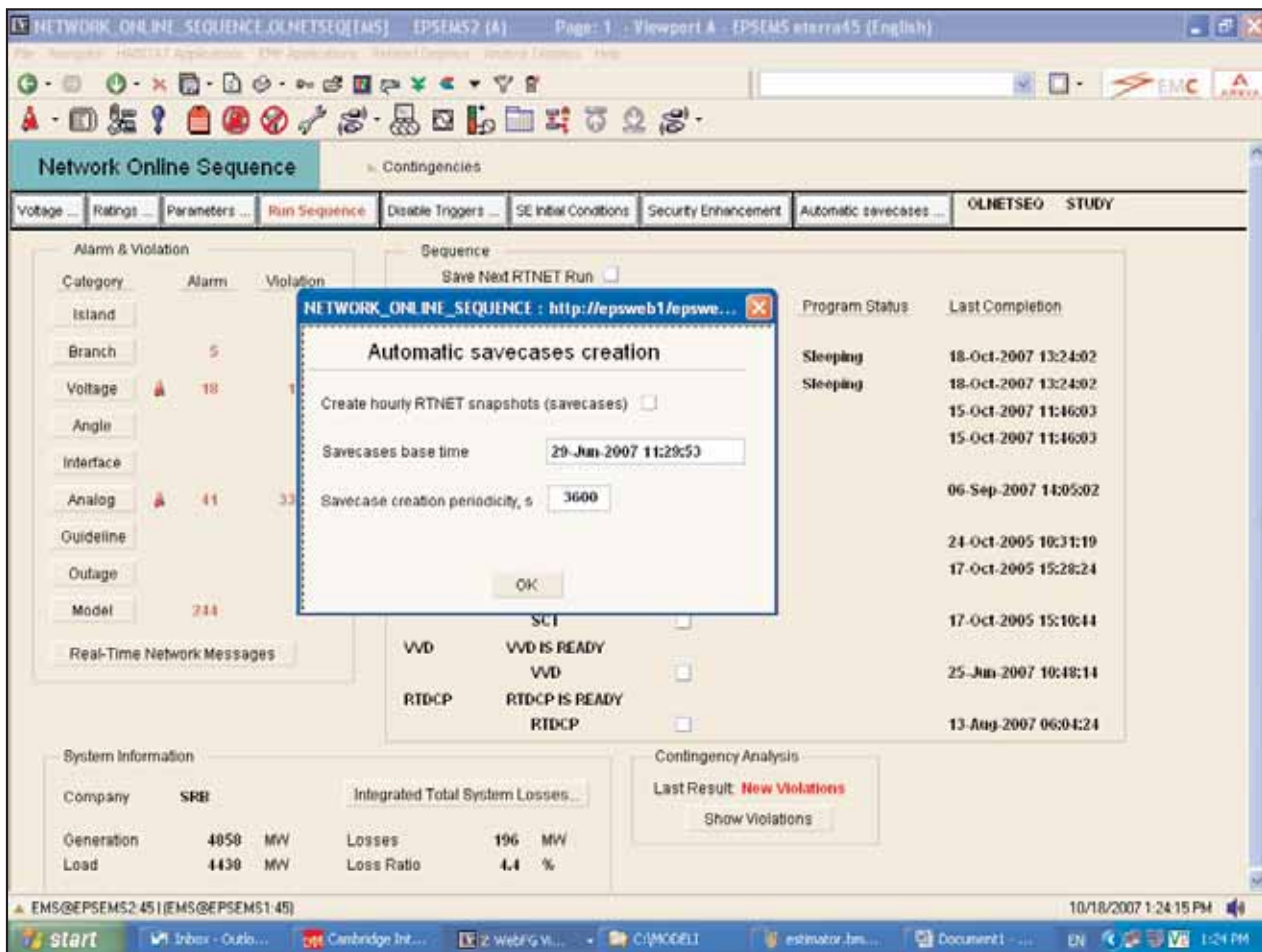
mu. Pregledom rezultata utvrđuje se koji mogući kratki spojevi mogu izazvati probleme u sistemu. U aplikaciji može da se specificira koliko susednih čvorova od elementa na kome se analizira kratak spoj će biti predstavljeno u rezultatima, kao i da li će biti sekvencijalnog ispada dalekovoda u okolini kratkog spoja.

Naponsko-reaktivno dispečiranje je aplikacija koja preporučuje određene akcije kojima bi se kontrolisao napon u sistemu. Ova aplikacija je delimična implementacija OPF aplikacije i njeni ciljevi su da se određenim akcijama dođe do minimizacije gubitaka u sistemu ili do ispravljanja korekcije naponskih prilika u sistemu.

Funkcija Automatic Snapshot je real-time aplikacija koja obezbeđuje automatsko generisanje NETMOM savecase-ova, tj. stanja estimatora. Ovo nije standardan AREVA-in proizvod, već aplikacija formirana na zahtev EMS-a. Korisnički je omogućeno podešavanje početnog (baznog) vremena, od kada počinje snimanje i arhiviranje statičkog stanja estimatora, kao i podešavanje perioda sa kojim će se stanja generisati. Međutim, tačno vreme generisanja

Find Station	RTSCT	REALTIME	SOLUTION DONE
Fault Id	Substation Node Voltage	Type	Symmetrical Fault Current (kA)
BGD5NN1	BGD_5-S3D-110kV	Three Phase	14,335
BGD5NN2	BGD_5-S3D-110kV	Phase to Ground	12,675
BGD5NN3	BGD_5-S3D-110kV	Two Phase to Ground	13,861
KOL110	T_KOLUBA-G1D-110kV	Three Phase	5,596
KOL1101P	T_KOLUBA-G1D-110kV	Phase to Ground	3,541
KOL1102P2	T_KOLUBA-G1D-110kV	Two Phase to Ground	5,009
NSAD33P110	NSAD_3-G1D-110kV	Three Phase	17,269
NIS2NN1	NIS_2-S1D-110kV	Three Phase	8,081
NIS2NN2	NIS_2-S1D-110kV	Phase to Ground	7,305
NIS2NN3	NIS_2-S1D-110kV	Two Phase to Ground	7,907
NSAD31P110	NSAD_3-G1D-110kV	Phase to Ground	15,238
NSAD32P2110	NSAD_3-G1D-110kV	Two Phase to Ground	16,572
PANCEVO1102P2	PANCEVO2-G1D-110kV	Two Phase to Ground	8,776
PANCEVO21103P	PANCEVO2-G1D-110kV	Three Phase	9,024
PANCEVO21101P	PANCEVO2-G1D-110kV	Phase to Ground	8,095
SU3NN1	SUBOTI_3-G1D-110kV	Three Phase	9,221
SU3NN2	SUBOTI_3-G1D-110kV	Phase to Ground	8,570
SU3NN3	SUBOTI_3-G1D-110kV	Two Phase to Ground	8,961

Slika 4. Prikaz displeja sa proračunom kratkih spojeva



Slika 5. Prikaz displeja za aplikaciju automatic snapshot

stanja zavisiće i od sekvence, tj. perioda sa kojim radi esimator. Aplikacija će generisati stanja estimatora i u slučaju kada to stanje nije „validno”, tj. nije dobro sa aspekta statičke estimacije. Ime generisanog stanja sadrži tačan datum i vreme generisanja, kao i podatak o kvalitetu stanja case_rtnet_netmom. DD_MM_YY_hh_mm_ss_stat gde je stat=valid ili stat=not valid u zavisnosti od kvaliteta estimacije). Takođe, postoji mogućnost ručnog postavljanja i ukidanja procesa generisanja stanja od strane korisnika. Arhivirana stanja se mogu po potrebi uzeti iz baze i eksportovati u željene formate (PTI i UCTE) sa željenim naponskim nivoima.

4. STUDY APLIKACIJE

Proračun tokova snaga je studijska aplikacija koja svojom značajnom robusnošću i fleksibilnošću može da reši sve probleme u tokovima snaga. Postoje dva načina predstavljanja neke situacije iz elektroenergetskog sistema u ovoj aplikaciji. Prvi je kopiranje baze NETMOM iz estimatora stanja, iz zad-

nje sekvence ili nekog od ranije snimljenog stanja, kojim se prenosi topologija sistema i estimirane vrednosti potrošnje i generisanja po čvorovima. Drugi način predstavlja podešavanje topologije i ručni unos vrednosti za proizvodnju po generatorima, vrednosti ukupne potrošnje ili potrošnje po čvorovima. Za sve izračunate vrednosti se proverava da li su premašena ograničenja. Jedna od funkcija ove aplikacije je i upoređivanje dva proračuna tokova snaga, koje na lak i fleksibilan način pomaže u analizi elektroenergetskog sistema, prikazujući delove sistema u kojima imamo iste proračunate vrednosti, kao i delove sistema za koje se razlikuju proračuni.

Cilj optimalnog proračuna tokova snaga je da se optimizuje objektivna funkcija uvažavajući set ograničenja i koristeći Njutnovu tehniku, koja je naprednija u odnosu na prethodne tehnike OPF. Može se vršiti minimizacija troškova proizvodnje, minimizacija gubitaka aktivne snage u sistemu i minimizacija odstupanja operativnih veličina od planiranih pri eliminisanju premašenih ograničenja sistema. Ovaj program koristi sledeća upravljanja: aktivno i reak-

tivno generisanje, aktivnu snagu razmene sa susedima, otepe na transformatoru. Korisnik ima mogućnost da definiše relativnu važnost (prioritet) ograničenja. Na primer, situacija u sistemu može biti takva da je potreban tok snage po dalekovodu veći od dozvoljene vrednosti da bi se napon na sabirnicama održao preko minimalne vrednosti. U tom slučaju OPF će pronaći validno rešenje za tokove snaga, zadovoljavajući ograničenja sa većom važnošću.

Aplikacija za proračun raspoloživih prenosnih kapaciteta STRLIM omogućava proračun TTC (total transfer capacity) i ATC (available transfer capacity) pri čemu uzima u obzir sledeća ograničenja: strujna opterećenja dalekovoda, opterećenja interkonektivnih dalekovoda (MW/Mvar), naponska ograničenja i naponski slom. STRLIM prilikom proračuna prenosnih kapaciteta ne uzima direktno u obzir dinamičku statičku stabilnost ali je može uzeti indirektno preko ograničenja razlike uglova između karakterističnih čvorova. STRLIM aplikacija koristi podatke iz aplikacija RTNET, RTCA, LF, RTGEN i povezana je sa aplikacijom TRAKR radi obezbeđivanja plana angažovanja (vozni red) i plana transakcija. STRLIM koristi OPF metodologiju da bi izračunao maksimalni prenosni kapacitet za određenu topologiju mreže a takođe koristi CA aplikaciju da bi odredio najkritičniju topologiju za određeni nivo transakcija.

Aplikacija Look Ahead Load Flow je jedna od studijskih aplikacija, namenjena za proračun DACF (Day Ahead Congestion Forecast) modela. Bazirana je na proračunu tokova snaga. LALF ima mogućnost da obezbedi modele sistema za naredna 24 sata, tj. prognozirane modele za sledeći dan. Proračun tokova snaga se izvršava automatski kako bi se videlo da li modeli konvergiraju za svaka 24 planirana satna stanja sistema. Za svako stanje, aplikacija proverava da li je narušena analiza statičke sigurnosti tj. da li postoje prekoračenja definisanih ograničenja. Ako ne postoje prekoračenja u nekom satu, LALF proračunava tokove snaga i vrši analizu sigurnosti za sledeći sat. Ako je narušeno stanje sistema u nekom satu, tada se LALF zaustavlja. U slučaju prekoračenja, operater ručno priprema stanje sistema i izvršava PWRFLOW, ili ako je potrebno, radi re-dispečing generatora, kako bi prevazišao prekoračenja. Pošto se aplikacija automatski izvršava, ulazi u aplikaciju se obezbeđuju iz drugih aplikacija: satna prognoza potrošnje za sledeća 24 časa (Load Forecast), satni raspored, scheduling razmena sa susednim sistemima, satni plan angažovanja generatorskih jedinica u MW, kao i Pmax i Pmin za svaku generatorsku jedinicu (Generatorske aplikacije), planirani ispadi u sistemu (isključenja dalekovoda) za naredni dan (Outage Scheduling). Izlaz iz aplikacije LALF su plani-

rana 24 modela, sa identifikacijom sata na koji se odnose u svom nazivu fajla.

Iz svih aplikacija, kako onih u režimu realnog vremena tako i onih u studijskom režimu može da se izvrši eksport rezultata u danas dva najčešće korišćena formata, UCTE i PTI format i to obuhvatanjem različitih delova sistema naponskih nivoa:

- 1) kompletnog modelovanog sistema;
- 2) 110 kV, 220 kV i 400 kV naponskog nivoa i
- 3) kao i 400 i 220 kV dela sistema Elektromreže Srbije.

5. PRIMENA MREŽNIH APLIKACIJA

U Nacionalnom dispečarskom centru EMS-a za SCADA/EMS sistem modelovani su kompletni 400 kV, 220 kV i 110 kV delovi našeg sistema, dok su susedni sistemi ekvivalentirani. U toku je proces povezivanja i razmene informacija između našeg i stranih elektroenergetskih sistema, pa će u susednim sistemima biti modelovane prve, a u nekim i druge petlje i prenosiće se informacije o merenjima i statusima u tim postrojenjima, tako da će se dobiti jedan kompletniji model sistema, naročito za aplikaciju analize statičke sigurnosti. Većina 400 kV i 220 kV postrojenja je telemetrisana, dok je situacija sa 110 kV delom sistema loša u pogledu informacija koje se dobijaju sa terena. To uslovljava primenu velikog broja pseudomerenja koja mogu da unesu netačnosti u estimaciju toga dela sistema. Dobrom procenom raspodele opterećenja po čvorovima, rezultati estimacije odgovaraju stvarnom stanju u sistemu. Sve aplikacije u režimu realnog vremena se sekvencionalno izvršavaju svakih 30 sekundi. Osim automatskog periodičnog startovanja sekvence, postoji još i ručni način. Takođe, sekvenca može da se pokrene posle promene statusa bilo kog prekidača u 400 kV i 220 kV delu sistema. Od velike važnosti za rad kompletnog sistema je rad estimatora stanja i konvergencija njegovog proračuna jer rezultati estimacije stanja su ulazni podaci za sve aplikacije i ako oni ne postoje, ostale aplikacije se ne izvršavaju. U toku implementacije vrlo brzo je uspostavljena konvergencija proračuna estimatora stanja i validnost proračuna se održava. Taj uspeh je posledica činjenice da je u Elektromreži Srbije u prethodnim godinama razvijen i implementiran estimator stanja u saradnji sa IMP Automatikom, i sva iskustva i podešavanja sopstvenog estimatora su preneti na novi program. Postoje slučajevi kada se izgubi validnost rešenja, ali to su najčešće posledice topoloških grešaka, kada se dobijaju loši statusi na rasklopnoj opremi i kod grešaka u ručnom unosu statusa. Napravljena je lista poremećaja za analizu sigurnosti i u njoj se nalaze ispadi svih generatora, dalekovoda i tran-

sformatora u našem EES-u. Takođe je napravljena lista kratkih spojeva na svim sabirnicama. Za aplikacije SENH, VVD i OPF napravljene su liste upravljanja. Sve real time aplikacije se sekvencionalno izvršavaju i prate se rezultati tih aplikacija. Studijske aplikacije se koriste za analizu pojedinih stanja u sistemu. Sa deregulacijom i otvorenim pristupom prenosnom sistemu, kao i zbog problema sigurnosti, poželjno je da EMS sistem ima mogućnost da operatoru obezbedi informaciju o prenosnim kapacitetima na interkonektivnim dalekovodima. To omogućava aplikacija STRLIM koja proračunava ATC/TTC. Takođe, UCTE nalaže razmenu DACF modela sa što većom frekvencijom. Sada se razmenjuju modeli za 4 sata na dnevnom nivou i to za (3:30, 10:30, 12:30, 19:30). U Direkciji za plan i analizu za tu svrhu koriste se dva nezavisna alata RASTR [6] i PSA [7], kao i veliki ljudski resursi. Aplikacija LALF, koja automatski modeluje DACF fajlove, će definitivno unaprediti rad u direkciji. S obzirom da je u fazi realizacije i funkcija koja će obezbediti redukciju mreže sa željenim naponskim nivoima i da je moguće stanja eksportovati direktno u UCTE format, stvoreni su svi preduslovi da se počne sa korišćenjem ove vrlo korisne funkcije. Funkcija Automatic Snapshot je višenamenski korisna funkcija savremenog TSO-a. Vrlo često pominjan zahtev u UCTE-u je razmena snepšotova (snapshot) na satnom nivou, mada se u sadašnjim uslovima snepšotovi razmenjuju po potrebi. Takođe, snepšotovi se razmenjuju i za potrebe CBT (Cross Border Trade) mehanizma u cilju proračuna prihoda od tranzita svakog TSO, i to 6 snapshot-ova mesečno.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su opisane sve mrežne funkcije koje se nalaze u sastavu novog SCADA/EMS sistema koji je implementiran u Nacionalnom dispečarskom Centru Elektromreže Srbije, pokazana je njihova funkcionalnost i njihov značaj za pravilno upravljanje EES-om. Posebno bismo istakli da je implementacija izvršena po planu, da sve aplikacije rade i da se koriste i da će vremenom biti nemoguće zamisliti upravljanje našim sistemom bez njih.

7. LITERATURA:

- [1] AREVA, TECHNICAL OFFER VOLUME II Chapter8PSA-Network Subsystem
- [2] D. Vlasisavljević, V. Obradović: PRIKAZ NOVOG SCADA/EMS SISTEMA ZA DISPEČERSKI CENTAR EPS-a 27.Savetovanje JUKO CIGRE, 2005, D2-02
- [3] J. Trhulj, B. Filipović, G. Jakupović, M. Stojić, N. Čukalevski, D. Vlasisavljević: ISKUSTVA SA PUŠTANJA U RAD I PROBNOG RADA INTEGRISANOG SCADA/EMS SISTEMA U NDC EMS, 13 simpozijum JUKO CIGRE, 2006, C2 II-05
- [4] B. Filipović, M. Đorđević, A. Kurćubić, M. Stojić, J. Veselinović: IMPLEMENTACIJA MREŽNIH APLIKACIJA U NDC ELEKTROMREŽE SRBIJE, Konferencija ETRAN 2007, EE 1.4
- [5] J. Veselinović, B. Filipović: IMPLEMENTACIJA ESTIMATORA STANJA U NDC ELEKTROMREŽE SRBIJE, 28. Savetovanje JUKO CIGRE, 2007.

Rad je primljen u uredništvo 23. 10. 2007. godine



Boris Filipović (1974) je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na smeru za elektroenergetske sisteme. Radio je u Elektroprivredi Srbije i Elektromreži Srbije od 1998. godine na razvoju i implementaciji mrežnih aplikacija i učestvovao u projektu implementacije novog SCADA/EMS sistema. Od juna 2007. godine radi za Siemens-DMS na projektu u UAE. Urednik web sajta www.elektroenergetika.info. Elektronska adresa: fboris_uae@yahoo.com



Marija Đorđević, rođena je 1972. godine u Čačku. Diplomirala je 1997. godine, a magistrirala 2003. godine na primeni ekvivalenata u analizi pouzdanosti EES, na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Od 1998. godine radila je u JP EPS u Direkciji za razvoj i investicije na problematici prognoze potrošnje, ekonomskog dispečinga, modelovanju pomoću neuralnih mreža i klastera u EES-u. Od 2003. godine radi u Direkciji za upravljanje EES-om, a kasnije u JP EMS, na problematici proračuna tokova snaga, NTC-a, modela DACF-a. Učestvovala je u implementaciji novog EMS/SCADA sistema u EMS-u. Predstavnik je EMS-a u UCTE grupi „Network Modeling& Forecast Tool” i član je grupe „NACMPF” u SEE regionu. Do sada je objavljivala radove u JUKO CIGRE, Simopis i na konferenciji ETRAN.



Aleksandar Kurćubić, rođen je 1970. godine u Novoj Varoši. Diplomirao je 1998. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Od 1998. godine radio je u JP EPS u Direkciji za upravljanje EES kao operativni dispečer a od 2003 radio je u službi za sistem-ska pitanja prenosa. Od 2005. godine radi u Direkciji za upravljanje prenosnim sistemom u JP EMS u službi za sistem-ska pitanja prenosa, na problematici planiranja isključenja, proračuna tokova snaga, NTC-a, modela DACF-a. Učestvovao je u implementaciji novog EMS/SCADA sistema u EMS-u. Član je grupe „NACMPF” u SEE regionu.



Miloš Stojić je rođen 1961. godine u Beogradu. Diplomirao je 1984. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, smer „Elektromotorni pogoni”. Magistrirao je 1992. godine u „Centru za multidisciplinarne studije Univerziteta u Beogradu” na smeru „Logistika i sistemi”.

Od 1986. do 1988. je radio na Rudarsko geološkom fakultetu u Laboratoriji za elektronsku mikroanalizu. Od 1988. je zaposlen u institutu "Mihajlo Pupin".

Radi na razvoju softverskih paketa u oblasti upravljanja elektroenergetskim sistemima, pre svega u oblasti statičke estimacije stanja EES. Tokom profesionalne karijere se bavio i problemima upravljanja saobraćajem, elektronskim pomagalicama za slepe, bazama podataka. Autor je više radova i patenata objavljenih u zemlji i inostranstvu.

Član je studijskog komiteta 39 (Upravljanje i eksploatacija EES) Jugoslovenskog komiteta Cigre.



Jelena Veselinović je rođena 1977. u Sarajevu. Osnovnu i srednju školu – Petu Beogradsku Gimnaziju (prirodno-matematički smer) završila je u Beogradu. Diplomirala je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, odsek Energetika, smer Elektroenergetski sistemi.

U Elektromreži Srbije stalno je zaposlena od oktobra 2006. godine u Nacionalnom Dispečerskom Centru, Sektor za Informatiku i Telekomunikacije, Centar za Upravljačku informatiku, kao inženjer saradnik na poslovima scada/energy management system.

Proračun jednosmerne komponente struje kratkog spoja u distributivnoj mreži

Stručni rad
UDK: 621.3.064.1; 621.3.014

Rezime:

U radu je predložen jedan savremeni model za proračun jednosmerne komponente struje kratkog spoja metodom ekvivalentne vremenske konstante. Model je razvijen na osnovu odgovarajućeg specijalizovanog modela za proračun naizmjenične komponente struje kratkog spoja u distributivnim mrežama. Taj model polazi od glavne pretpostavke da je distributivna mreža pretežno radijalne strukture. Koristeći se pretpostavkom o radijalnosti mreže, razvijena je izuzetno efikasna „branch oriented” metoda čiji se algoritam u ovom radu primenjuje za proračun jednosmerne komponente.

Ključne reči: jednosmerna komponenta struje kratkog spoja, distributivna mreža, distributivni menadžment sistem

Abstract:

*ANALYSIS OF APERIODICAL COMPONENT OF SHORT CIRCUIT CURRENT
IN DISTRIBUTION NETWORK*

In this paper a contemporary model for the analysis of aperiodical short circuit current in distribution network by the method of equivalent time constant is suggested. The model is developed on the basis of a suitable specialised model for calculation of alternating current component of short circuit in distribution networks. This model is based on the principal assumption that the structure of distribution network is mainly radial. Using this assumption a highly efficient „branch oriented” method is developed for the analysis of aperiodical component of short circuit current.

Key words: aperiodical component of short circuit current, distribution network, distribution management system

1. UVOD

Ovaj rad se nalazi u kontekstu proračuna struja kratkih spojeva distributivne mreže. Rezultati proračuna struja kratkih spojeva imaju široku primenu u eksploataciji i planiranju distributivnih mreža. Izbor opreme u postrojenjima, planiranje pogona, podešavanje zaštite elemenata, provera da li su struje kratkih spojeva (za određeno uklopno stanje mreže) u

okvirima mogućnosti prekidačke opreme i izbor uzemljenja zvezdišta transformatora su samo neka područja gde se ovi proračuni primenjuju [1, 2].

Standardni proračuni struja kratkih spojeva se zasnivaju na primeni Teveninove (Thevenin) teoreme i principa dekompozicije režima sa kratkim spojem na kolo sa režimom pre kratkog spoja i fiktivno trofazno kolo sa naponskim (strujnim) izvorima na mestu kratkog spoja. Režim pre kratkog spoja se

smatra poznatim i proračun struja kratkih spojeva se svodi na određivanje režima fiktivnog kola [3, 4]. Nad ovim kolom se vrši proračun dve praktično nezavisne komponente struje kratkog spoja (spregnute samo početnim uslovima): naizmenične i jednosmerne.

Metode za proračun naizmenične komponente su dobro savladane i korišćene u velikom broju programa za proračune kratkih spojeva i simulatorima elektroenergetskih mreža. Metode se baziraju na linearnom modelu mreže i skupu linearnih jednačina, a proračuni su veoma precizni, tj. „tačni” su onoliko koliko su tačne konstitutivne relacije elemenata.

Nasuprot proračunu naizmenične komponente, egzaktan proračun jednosmerne komponente nije moguće, po prirodi stvari, dovesti do takve efikasnosti. Jedini egzaktan postupak za proračun jednosmerne komponente je rešavanje sistema diferencijalnih jednačina, a ono je u numeričkom smislu znatno neefikasnije u odnosu na rešavanje kompleksnih jednačina (vreme proračuna je neuporedivo duže u odnosu na proračun naizmenične komponente). Kao posledica te neefikasnosti razvijene su metode za približne proračune u kojima se zaobilazi rešavanje diferencijalnih jednačina. Ovaj rad se bavi primenom jedne od tih približnih metoda u proračunima kratkih spojeva u distributivnim mrežama - primenom metode ekvivalentne vremenske konstante. Cilj je postizanje nivoa efikasnosti i brzine u proračunima jednosmerne komponente kakav se ima za proračune naizmenične komponente struje kratkog spoja.

U drugom delu ovog rada je objašnjena jednosmerna komponenta struje kratkog spoja, njena pojava i uticaj koji ona ima na distributivnu mrežu. Treći deo predstavlja pregled postojećih metodologija za proračune jednosmerne komponente. U četvrtom delu je prikazan algoritam i matematički model koji se koristi u proračunima, što je glavni deo ovog rada. Peti deo je posvećen primerima proračuna, a šesti deo predstavlja zaključak. Na kraju, u sedmom delu je referentno navedena literatura korišćena za pisanje ovog rada.

2. JEDNOSMERNNA KOMPONENTA

Jednosmerna komponenta struje kratkog spoja javlja se kao posledica elektromagnetne inercije induktivnosti elemenata elektroenergetske mreže, a koja ne dozvoljava skokovitu promenu struja pri pojavi kratkog spoja od vrednosti koje su bile u režimu koji je prethodio kratkom spoju. S obzirom da ti elementi imaju i otpornost, jednosmerna komponenta kratkog spoja neće biti konstantna već će opadati s vremenskom konstantom:

$$T = \frac{L_k}{R_k} \quad (1)$$

gde je sa L_k označena induktivnost, a sa R_k otpornost na mestu kratkog spoja.

Početna vrednost jednosmerne komponente je jednaka trenutnoj vrednosti simetrične komponente u trenutku kratkog spoja, sa suprotnim znakom. Veličina (početna vrednost) jednosmerne komponente zavisi od vrednosti napona koji se ima u trenutku nastanka kratkog spoja za svaku fazu. Očigledno, vrednosti jednosmerne komponente su različite u sve tri faze. Pošto se taj trenutak nikako ne može predvideti, onda se za proračune uzima najnepovoljniji mogući slučaj i sistem se dizajnira da izdrži takvu situaciju.

Prilikom izbora prekidača u distributivnoj mreži, predviđeno je da vrednost vremenske konstante T bude do 45 ms. Činjenica je da u savremenim distributivnim mrežama može doći do situacija kada je vrednost T veća od pomenutih 45 ms. Činjenica je, takođe, da u savremenim distributivnim mrežama vrednost T ima tendenciju porasta. Sledeći faktori, koji su uglavnom ekonomski motivisani, utiču na porast vremenske konstante jednosmerne struje u distributivnoj mreži [5, 6]:

- Uvođenje lokalne proizvodnje (distributivnih generatora) u mreže. Ovim dolaze do izražaja velike vrednosti subtranzijentnih i tranzijentnih vremenskih konstanti generatora, kao uticaj parametara generatora na vrednost T ;
- Instaliranje transformatora snage sa velikim reaktansama kratkog spoja. Kada zahtevi za energijom prevaziđu postojeće kapacitete VN/SN transformatorskih stanica, tada je uobičajeno rešenje zamena transformatora većim. Da se pri tome ne bi prevazišle dozvoljene struje kratkih spojeva (za koje je oprema projektovana), najjednostavnije je uzeti transformator sa većim naponom kratkog spoja (tj. reaktansom);
- Tendencija korišćenja distributivnih transformatora sa malim gubicima. Da bi se smanjili gubici u namotajima i grejanje, smanjuje se otpornost namotaja;
- Smanjenje otpornosti namotaja u motorima i generatorima radi smanjenja gubitaka;
- Upotreba prenosnih vodova sa većim presekom i više provodnika u snopu da bi se proširili prenosni kapaciteti postojećih vodova i smanjili gubici (manja otpornost);
- Veće korišćenje reaktivnih komponenti za ograničavanje struja kratkih spojeva (prigušnica), koje se često koriste kao rešenje za odlaganje investicija u prekidačku opremu sa većim kapacitetom prekidanja struja kratkog spoja.

Povećana vrednost jednosmerne konstante struje kratkog spoja ima više negativnih efekata [7, 8]:

- Povećava se udarna vrednost struje kratkog spoja, tj. elektrodinamička naprezanja, kojoj su izloženi ne samo prekidači, već i druge komponente kroz koje prolazi struja kratkog spoja;
- Raste dužina trajanja gorenja luka i trajanje poslednje poluperiode pred prekidanje struje (cela kriva pomenjena u jednu stranu). Time raste energija luka prekidača koja dovodi do otežanih uslova rada prekidača;
- Može se pojaviti period u kojem struja kratkog spoja ne prolazi kroz nulu. U slučaju kada generator napaja mesto kratkog spoja, mogu se pojaviti veoma velike aperiodične vremenske konstante (200 – 600 ms za manje jedinice). Usled opadanja naizmenične komponente struje kratkog spoja zbog prirode kratkog spoja na generatoru, privremeno se mogu pojaviti jednosmerne komponente struje kratkog spoja koje prelaze 100 % naizmenične komponente. Ovo uzrokuje period u kojem struja kratkog spoja ne prolazi kroz nulu što negativno utiče na rad prekidača;
- Može doći do zasićenja strujnih transformatora. Kada se nalazi u zasićenju, strujni transformator uzrokuje izobličenje sekundarne struje umanjujući tačnost izmerene struje što se posebno negativno odražava na rad zaštite.

Da bi se pravilno procenili svi prethodno navedeni efekti, neophodno je na odgovarajući način izračunati vrednost jednosmerne komponente. U nastavku se obrađuju metodologije za njen proračun.

3. PREGLED METODOLOGIJE

Kao što je prethodno pomenuto, za proračun jednosmerne komponente postoji samo jedan „tačan” – potpun proračun vremenskog toka struje kratkog spoja. Metoda potpunog proračuna vremenskog toka se zasniva na proračunu prelaznog procesa u celom posmatranom sistemu. On se sastoji od rešavanja sistema diferencijalnih jednačina. Matematički model za proračun prelaznog procesa se sastoji iz sistema jednačina napisanih u vremenskom domenu po metodi konturnih struja:

$$L \frac{dJ}{dt} + RJ = E, \quad (2)$$

gde su L i R matrice konturnih induktivnosti i otpornosti, respektivno, J i E vektor kolone konturnih struja i elektromotornih sila, respektivno.

Raspolažući sa ovim sistemom jednačina, proračun jednosmerne komponente se svodi na nalaženje samo homogenog rešenja ovih diferencijalnih jednačina, dok je partikularno rešenje (prinudni re-

šim) određeno poznatom naizmeničnom komponentom. Za taj proračun postoje specijalni softveri, kao što je npr. EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), kojima se obezbeđuje tačan proračun, ali su nepogodni za rutinske proračune [9]. Zbog toga je razvijen veći broj približnih postupaka koji su bazirani na uprošćenjima koja daju rezultate na stranu sigurnosti u proračunima.

Približni postupci su zasnovani na metodi VDE (*German Association for Electrical, Electronic and Information Technologies*) i metode ekvivalentne vremenske konstante [10].

Metoda VDE zasniva se na proračunu udarne struje u grani kratkog spoja i ekvivalentnog udarnog koeficijenta. Ona je pogodna za primenu u slučajevima kada je cilj proračuna procena vrednosti jednosmerne komponente u grani kratkog spoja, a raspodela po granama nije od interesa. Dalje razmatranje ove metode izlazi iz okvira ovog rada.

Težište metode ekvivalentne vremenske konstante je, takođe, u što tačnijem prikazu vremenskog toka jednosmerne komponente u grani kratkog spoja. Ovim se metodom vremenski tok jednosmerne komponente u svim granama sistema opisuje eksponencijalnom funkcijom sa jedinstvenom – ekvivalentnom vremenskom konstantom. Usvaja se da je raspodela jednosmerne komponente struje kratkog spoja po granama sistema funkcija njihovih reaktansi, jer je u trenutku neposredno posle kratkog spoja vrednost člana $L \frac{dJ}{dt}$ iz relacije (2) velika (domi-

nantna), pa su padovi napona na induktivnostima mnogo veći od onih na aktivnim otpornostima. To je približan proračun, jer će struja iz nekoliko grana biti suma više eksponencijalno opadajućih članova, obično sa različitim eksponentima, dok struja jedne grane sadrži samo jedan član. Već za dve paralelne grane sa različitim vrednostima X/R ne postoji potpuno tačan način kombinovanja za jednu granu (jedan ekvivalent) sa jednom vrednošću X/R . Ali, zbog složenosti tačnog proračuna ovakav pojednostavljen proračun je praktično nezaobilazan.

U standardima, IEC (*International Electrotechnical Commission*) i ANSI (*American National Standards Institute*) se preporučuje upotreba tih pojednostavljenih metoda.

Oba standarda, ANSI i IEC (ANSI C37.010 i IEC 61909) se za proračune ukupne (asimetrične) struje kratkog spoja, tj. njene jednosmerne komponente struje oslanjaju na proračun jedinstvenog (ekvivalentnog) odnos X/R , tj. vremenske konstante [11, 12] pri čemu se taj odnos izračunava iz ekvivalentne impedanse sa mesta kratkog spoja. U oba standarda se zaključuje da odnos X/R određen iz ekvivalentne impedanse ne mora uvek dati konzer-

vativan rezultat (na stranu sigurnosti) za jednosmernu komponentu struje kratkog spoja. Stoga, ANSI i IEC standardi daju procedure koje daju zadovoljavajuće rezultate u dobijanju jedinstvenog odnosa X/R za mesto kratkog spoja, što omogućava konzervativnu procenu jednosmerne komponente i time i toka struje kratkog spoja.

Da bi se odredio odnos X/R , u ANSI standardu se preporučuje nezavisno određivanje ekvivalentnih R i X sa mesta kratkog spoja (kada se izračunava npr. ekvivalentno R tada su sve vrednosti X zanemarene i obrnuto).

IEC standardom su definisane tri metode za određivanje odnosa X/R (ekvivalentne vremenske konstante):

Metoda A – Za grane koje su vezane na mesto kratkog spoja, poredati udele simetričnih struja u ukupnoj struji po veličini po opadajućem redosledu, a onda počevši sa najvećom strujom grane dodavati struje grana dok najmanje 80 % ukupne struje kratkog spoja ne bude obuhvaćeno. Onda iz te grupe grana koje su uključene u 80 % struje pronaći granu čija impedansa ima najveći odnos X/R i koristiti ovaj X/R odnos za sve proračune jednosmerne komponente.

Metoda B – Odrediti X/R odnos iz ekvivalentne kompleksne impedanse. Povećati izračunatu naizmeničnu simetričnu struju za 15 %. Izračunati jednosmernu komponentu na osnovu X/R odnosa i onda je dodati na simetričnu komponentu.

Metoda C – Odrediti naizmeničnu simetričnu struju na osnovu ekvivalentne kompleksne impedanse. Ponovo odrediti ekvivalentnu kompleksnu impedansu, ali tako da se prvo povećaju reaktivne komponente impedansi grana za 40 % u odnosu na njihove vrednosti za nominalnu frekvenciju. Iz te impedanse odrediti odnos X/R za mesto kratkog spoja, pomnožiti ga sa 2,5 i onda tu vrednost koristiti za proračune jednosmerne komponente.

Prema IEC, najtačnija je metoda C, dok A i B više vode računa o sigurnosti.

Svaka od navedenih metoda ima određene prednosti i mane. Najpreciznija je metoda proračuna prelaznog procesa, dok su metode VDE i ekvivalentne vremenske konstante aproksimativne. Samo izračunavanje jednosmerne komponente potpunim proračunom vremenskog toka je vrlo kompleksno, dok je kod druge dve metode jednostavnije. Može se smatrati da metoda ekvivalentne vremenske konstante predstavlja dobar kompromis u smislu kvaliteta rezultata i brzine proračuna – raspodela se lako računa, a rezultati su dovoljno realni. Ova metoda prema proceduri ANSI standarda je obrađena u ovom radu.

4. MATEMATIČKI MODEL I ALGORITAM

Standardni algoritmi za proračun kratkih spojeva (naizmenične komponente) u prenosnim mrežama se zasnivaju na primeni admitantnog modela. Međutim, primenom ovih standardnih algoritama u distributivnoj mreži nailazi se na dva problema. Prvi se odnosi na numeričku nestabilnost matrice admitansi pri rešavanju sistema jednačina. Numerička nestabilnost je izazvana strukturom matrice koja je posledica toga da distributivne mreže karakteriše relativno slaba potencijalna upetljanost i radijalni pogon. Ova nestabilnost se povećava u slučaju kada u mreži postoje relativno dugačke i relativno kratke sekcije što ima za posledicu da se numeričke vrednosti u matrici značajno razlikuju (neki put i za 10^4). Pored toga, odnos R/X kod vodova i kablova u distributivnoj mreži je daleko viši nego u prenosnim mrežama. Drugi problem je velika dimenzija matrice s obzirom na realne dimenzije distributivnih mreža od više desetina ili stotina hiljada čvorova, gde se, bez obzira na primenu tehnike retnih matrica, ne može postići prihvatljiva efikasnost. Na taj način, svi numerički postupci koji su bazirani na matricnom pristupu postaju neefikasni u rešavanju ovog problema u distributivnim mrežama. Zbog toga su razvijeni specijalizovani algoritmi za proračune struje kratkog spoja u distributivnim mrežama [13, 14, 15]. U ovim postupcima se polazi od glavne pretpostavke da je distributivna mreža pretežno radijalna i u njihovoj osnovi se koriste statički „branch-oriented” modeli. Ovi algoritmi su dodatno unapređeni opisom kvarova u zatvorenoj (kanoničnoj formi) i korišćenjem ekvivalentnih admitansi čvorova [16, 17].

Problem proračuna jednosmerne komponente je radom [18] na savremen način zaokružen. U njemu se koristi metoda ekvivalentne vremenske konstante i primenjuju standardni algoritmi za proračune struja kratkog spoja (matrice admitansi i tehnike retnih matrica). Taj postupak za proračun jednosmerne komponente ima sve karakteristike koje ima i proračun naizmenične komponente primenom istih standardnih algoritama. Metoda za proračun jednosmerne komponente koja se predlaže u ovom radu vodi ka daljem unapređenju proračuna jednosmerne komponente. U njoj se maksimalno koriste sve pogodnosti razvijenih i primenjenih specijalizovanih algoritama za proračun naizmenične komponente struje kratkog spoja. Proračun jednosmerne komponente se vrši pomoću istih tih algoritama, a unapređenja [16, 17] se, takođe, koriste.

Konstituisanje matematičkog modela za jednu višenaponsku distributivnu mrežu započinje tako što se njeni elementi predstavljaju odgovarajućim ekvi-

valentnim šemama sa normalizovanim parametara [19]. Mreže u kojima postoje petlje se otvaranjem petlji prevode u radialne, a originalne petlje i mesta njihovog otvaranja se pamte. Formiraju se ekvivalentna kola za direktni, inverzni i nulti redosled. Takođe, da bi se obezbedio efikasan proračun grane i čvorovi se sukcesivno numerišu po slojevima počevši od korena mreže ka njenim krajevima.

U predloženom algoritmu za proračun jednosmerne komponente se koristi metoda ekvivalentne vremenske konstante, uz određene modifikacije. Proračun jednosmerne komponente struje ovom metodom sastoji se iz dva dela: određivanje početne vrednosti ove struje i proračun vremenske konstante.

Početna vrednost jednosmerne komponente je jednaka, po apsolutnoj vrednosti, razlici početne vrednosti naizmenične komponente struje kratkog spoja i struje u elementima u trenutku pre nastanka kratkog spoja. Za vrednost naizmenične komponente struje kratkog spoja uzima se njena amplituda u subtranzijentnom periodu kratkog spoja. To praktično znači da se prvi deo svodi na proračun naizmnične komponente struje kratkog spoja u grani kratkog spoja. Proračun naizmnične komponente struje kratkog spoja je već dobro savladan i nije od interesa u ovom radu. U nastavku ovog rada biće detaljnije opisan samo drugi deo potreban za proračun jednosmerne komponente – proračun vremenske konstante jednosmerne komponente struje kratkog spoja. Ovaj proračun se sastoji iz sledećih koraka:

1. Proračun ekvivalentne odvodnosti i susceptanse „gledane” odočno iz čvora prema višim slojevima, g_d i b_d i proračun ukupne ekvivalentne odvodnosti g_k i ukupne ekvivalentne susceptanse b_k za sve čvorove mreže;
2. Proračun elemenata Teveninove matrice. Za zadato mesto kratkog spoja, a na osnovu prethodno proračunatih ekvivalenata za čvorove, proračunaju se vrednosti za ekvivalentne otpornosti r_k i reaktanse x_k „gledane” odočno sa mesta kratkog spoja. Ukoliko je kolo slabo upetljano, izračunaju se i sopstvene impedanse petlje (r_p i x_p) i za mesto kratkog spoja se odrede međusobna otpornost i reaktansa između mesta kratkog spoja i mesta otvaranja petlje (r_{pk} i x_{pk});
3. Određivanje struja i napona na mestu kratkog spoja. Za zadati tip kratkog spoja i prethodno izračunatu Teveninovu matricu formira se matična jednačina u kanoničnoj formi čijim se rešavanjem dobijaju vrednosti struja i napona pri kratkospojevim reaktansama i otpornostima sukcesivno;
4. Proračun ekvivalentne aktivne otpornosti r_e i reaktanse x_e . Određuju se za zadati tip kratkog spo-

ja, a na osnovu izračunatih struja i napona za mesto kratkog spoja;

5. Na osnovu ekvivalentne aktivne otpornosti r_e i reaktanse x_e izračunava se ekvivalentna vremenska konstanta T_d .

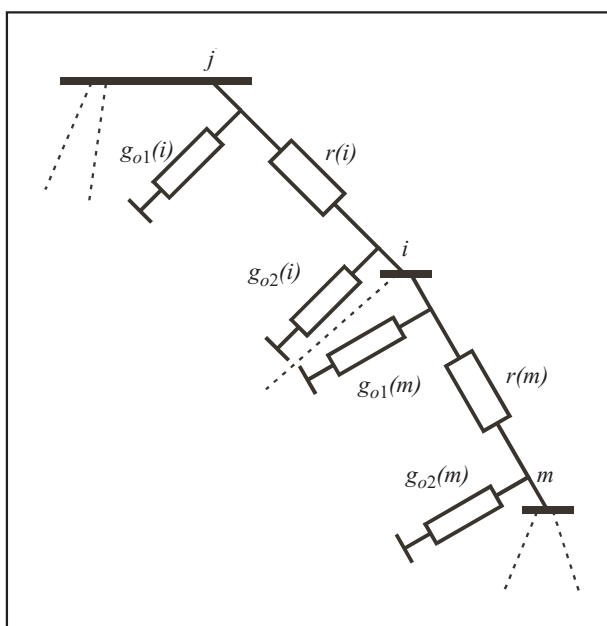
U nastavku se daje više detalja za svaki od navedenih koraka:

1. Prvi korak u ovom proračunu je inicijalni korak koji se sastoji od proračuna ekvivalentnih odvodnosti i susceptansi za svaki čvor mreže. Ekvivalentne odvodnosti i susceptanse čvorova, kao i parametri transliranja, zavise od topologije i parametara mreže. Stoga je njihov proračun izdvojen jer se one mogu proračunati pre početka samog proračuna vezanih za mesto kratkog spoja i ako nema promene topologije ili promene parametara mreže, ostaju nepromenjene.

U ovom slučaju se razmatraju realni i imaginarni delovi kompleksnih vrednosti impedansi i admittansi elemenata sistema. Sve impedanse (z) su odvojene na rezistansu (r) i reaktansu (x), a sve admittanse (y) na konduktansu (g) i susceptansu (b). Za određivanje ekvivalentnih odvodnosti potrebno je u originalnoj šemi sistema kratko prespojiti sve reaktanse i susceptanse, a pri određivanju ekvivalentnih susceptansi potrebno je kratko prespojiti sve aktivne otpornosti i odvodnosti.

Prvo će biti prikazan proračun ekvivalentnih odvodnosti, a na potpuno analogan način se vrši i proračun ekvivalentnih susceptansi.

Neka su na razmatranoj mreži zapažene grane (i) i (m) na čijim se „uzvodnim” krajevima nalaze čvorovi (j) i (i), a na „nizvodnim” krajevima čvorovi

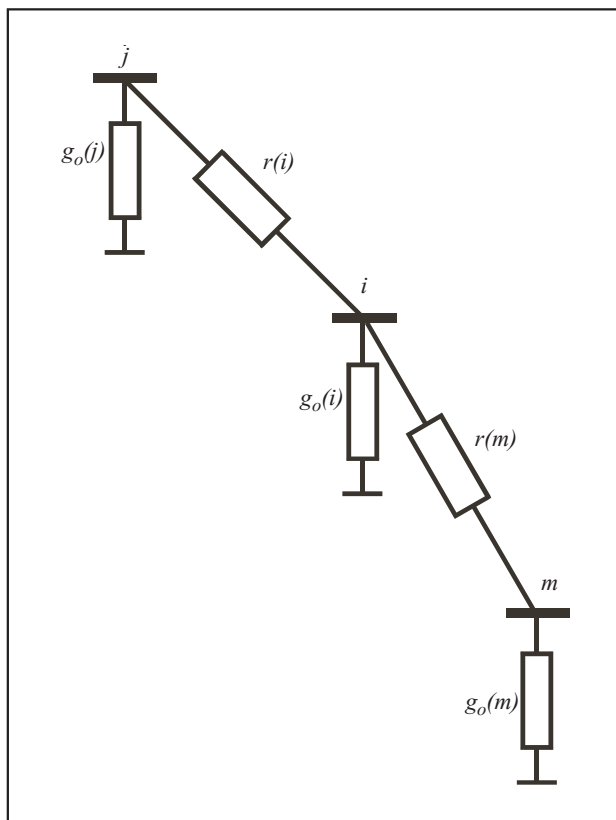


Slika 1. Deo razmatrane mreže sa granama (i) i (m)

vi (i) i (m), respektivno – slika 1. Na ovoj slici sa isprekidanim linijama su simbolično označene ostale sekcije vezane za prikazane čvorove. Svi otočni elementi su predstavljeni kao konduktanse (to su otoke grana g_{o1} i g_{o2} , kod grana u kojima postoje otočne konduktanse), a svi redni elementi kao otpornosti (to su otpornosti grana r).

Zbog jednostavnosti, sva razmatranja su izvedena u domenu simetričnih komponenti i to za direktan režim, dok su uopštavanja za slučaj ostala dva režima simetričnih komponenti, inverzni i nulti, izložena naknadno. Algoritam proračuna vektora g_d i g_u se sastoji iz sledeća tri koraka.

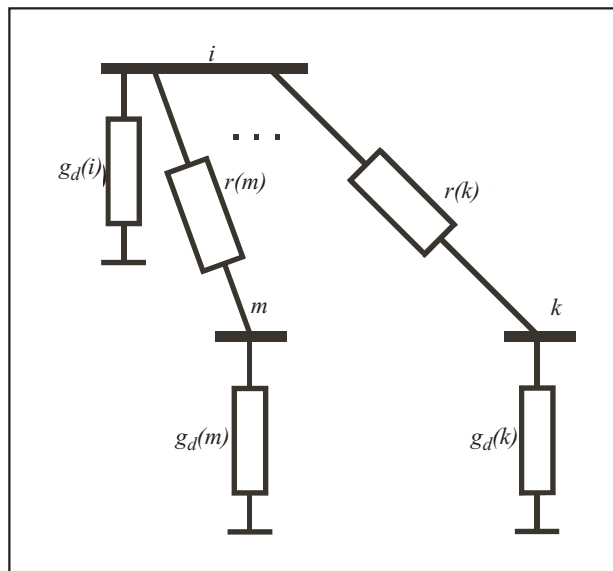
Za svaki od n čvorova se sabiraju sve otočne konduktanse vezane za čvor. Kao rezultat ovog koraka u svakom čvoru postoji samo po jedna otočna konduktansa $g_o(p)$, $p = 1, \dots, n$ (deo mreže sveden na ovaj oblik prikazan je na slici 2).



Slika 2. Mreža sa sažetim otočnim konduktansama

Sledeći korak naziva se ekvivalentiranje unazad („backward equivalencing“). U ovom koraku izračunavaju se vrednosti g_d za svaki od čvorova mreže. Kod čvorova kojima je incidentna samo jedna grana (to su između ostalih i „uzvodni“ čvorovi grana sloja sa najvećim indeksom (q)), inicijalna vrednost g_{di} je i konačna vrednost, dok se za ostale čvorove od-

govarajuća vrednost g_d izračunava sukcesivno polazeći od „uzvodnih“ čvorova grana sloja (q). Neka skup α_i čine indeksi grana iz sloja (q) kod kojih je čvor (i) „uzvodni“ – čvor – slika 3.



Slika 3. Grane sloja (q)

Za proračun $g_d(i)$ potrebno je ekvivalentirati sve grane iz skupa α_i . Pojedinačno za svaku granu iz skupa α_i se proračunava parametar transliranja konduktansi ($Der(k)$):

$$Der(k) = \frac{1}{1 + r(k) \cdot g_d(k)}. \quad (3)$$

Ekvivalentna konduktansa gledana na dole za čvor (i) se dobija kao:

$$g_d(i) = g_{di}(i) + \sum_{s \in \alpha_i} Der_s \cdot g_d(s). \quad (4)$$

Kada se ekvivalentiraju sve grane u sloju (q), ($q-1$) je najveći indeks sloja u preostalom delu mreže, postupak „unazad“ ekvivalentiranja primenjuje se na grane u sloju ($q-1$). Sukcesivnom primenom ovog postupka po granama preostalih slojeva sve do korena mreže dobija se g_d za svaki čvor.

Na kraju sledi korak koji se naziva ekvivalentiranje unapred („forward equivalencing“). U ovom koraku izračunavaju se vrednosti g_k za svaki od čvorova mreže. Postupak započinje proračunom vrednosti $g_k(1)$, za koji važi:

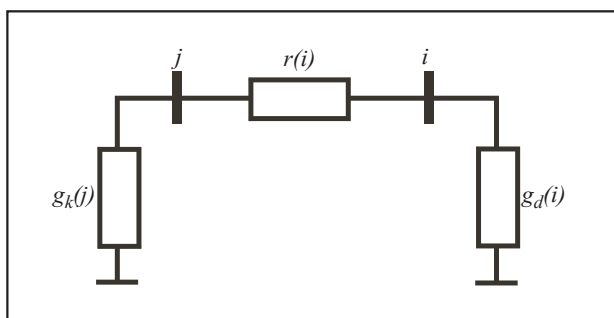
$$g_k(1) = g_d(1). \quad (5)$$

Ostale vrednosti g_k se sukcesivno izračunavaju za „nizvodne“ čvorove grana po slojevima, polazeći od prvog pa zaključno sa slojem (q). Postupak pro-

računa vrednosti g_k je sukcesivan – dakle, podrazumeva se da je pri proračunu vrednosti g_k za „nizvodni“ čvor poznata vrednost g_k za „uzvodni“ čvor te grane:

$$g_k(i) = g_d(i) + \frac{1}{r(i) + \frac{1}{g_k(j) - Der(i) \cdot g_d(i)}} \quad (6)$$

Postupak proračuna vrednosti $g_k(i)$ je prikazan na primeru grane (i) koja se nalazi između čvorova (j) i (i) – slika 4.



Slika 4. Okruženje j -tog čvora mreže

Vrednost $g_k(i)$ se izračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$g_k(i) = g_d(i) + \frac{1}{r(i) + \frac{1}{g_k(j) - Der(i) \cdot g_d(i)}} \quad (7)$$

Prethodno navedena procedura se izvršava i za kola inverznog i nultog redosleda sa odgovarajućim parametrima.

Proračun ekvivalentnih susceptansi počinje sa računanjem ekvivalentne susceptanse prema višim slojevima b_d i ukupne ekvivalentne susceptanse b_k , koje se računaju na isti način kao i ekvivalentna odvodnost prema višim slojevima g_d i ukupna ekvivalentna odvodnost g_k . Jedina razlika je u tome što sada, u svim ekvivalentnim šemama umesto otpornosti stoji reaktansa, a umesto odvodnosti kod transformatora stoji susceptansa, dok je kod vodova nema.

Kao rezultat ove procedure dobijaju se po četiri ekvivalenta g_d , b_d , g_k i b_k za svaki od čvorova mreže i za svaki od redosleda (direktni, inverzni i nulti).

2) U drugom koraku se računaju elementi Teveninove matrice. Za zadato mesto kratkog spoja, proračunaju se vrednosti za ekvivalentne otpornosti r_k i reaktanse x_k „gledane“ odočno sa mesta kratkog spoja. Pošto su ekvivalentne ukupne odvodnosti i susceptanse već izračunate za svaki čvor, ukupna otpornost i reaktansa se dobijaju kao:

$$r_k(i) = \frac{1}{g_k(i)}, \quad x_k(i) = \frac{1}{b_k(i)} \quad (8)$$

Ukoliko je mreža slabo upetljena, potrebno je izračunati i sopstvenu otpornost konture sa mesta otvaranja petlje r_p , i međusobnu otpornost mesta kratkog spoja i mesta otvaranja petlje – r_{pk} . Za određivanje sopstvene i međusobne otpornosti se može iskoristiti neki od specijalizovanih algoritama za takav proračun („branch oriented“) U nastavku je opisan jedan takav – kombinovani algoritam.

Kombinovani algoritam za proračun kratkih spojeva je neiterativan. Postupak proračuna se primenjuje na fiktivnom kolu razmatrane distributivne mreže, pri čemu su početne vrednosti napona svih čvorova brojno jednake nuli.

Inicijalni korak kombinovanog algoritma je proračun ekvivalentnih admitansi (konduktansi i susceptansi u ovom slučaju) i parametara transliranja. To je već opisano u prethodnom delu.

Kao i ostali specijalizovani algoritmi i ovaj se primenjuje kao dvokoračni. U prvom koraku se po svim čvorovima, počevši od „nizvodnih“ čvorova grana iz poslednjeg sloja i sukcesivnom kretanjem po slojevima, primenjuje I Kirkofov (Kirchhoff) zakon za sumiranje struja i admitansi. Za opis ovog koraka se može iskoristiti prethodno opisana slika 3, gde su konduktanse zamenjene sa strujama I :

$$Ie(i) = I(i) + \sum_{s \in \alpha_i} Der(s) \cdot I(s) \quad (9)$$

gde su:

α_i – skup svih grana incidentnih čvoru (i) ;

$I(i)$ – strujno injektiranje u čvor (i) ;

$I(s)$ – ekvivalentna „nizvodna“ struja iz čvora (s) , koja je za svaki čvor iz poslednjeg sloja jednaka strujnom injektiranju u taj čvor;

$Der(s)$ – parametar transliranja za granu/čvor (s) i

$Ie(i)$ – ekvivalentna „nizvodna“ struja iz čvora (i) .

U drugom koraku se, počevši od korena mreže ka slojevima sa većim indeksom, primenjuje II Kirkofov zakon za proračun napona čvorova:

$$V(i) = Der(i) \cdot (V(j) + r(i) \cdot Ie(i)) \quad (10)$$

gde su:

$r(i)$ – otpornost grane (i) i

$V(i)$ i $V(j)$ – napon čvorova (i) i (j) , pri čemu je napon čvora (j) poznat u trenutku proračuna napona čvora (i) jer je čvor (j) u sloju manjeg indeksa nego čvor (i) .

Odgovarajući elementi Teveninove matrice se dobijaju kada se injektiraju jedinične struje na mestu otvaranja petlje. Naponi koji se dobijaju u čvorovima

otvaranja petlji i na mestu kratkog spoja predstavlja odgovarajuće otpornosti.

3) U ovom koraku se vrši proračun struja i napona na mestu kratkog spoja za odgovarajuću šemu i tip kratkog spoja. Za zadato mesto kratkog spoja se formira Teveninova matrica otpornosti (analogno i matrica reaktansi). Za odgovarajući tip kratkog spoja u čvoru (k), vrednosti simetričnih komponenti struja na mestu kratkog spoja su funkcija napona na mestu kratkog spoja pre kratkog spoja V_k izračunatog pri proračunu tokova snaga i Teveninove matrice otpornosti. Matrična jednačina se formira za svaki tip kratkog spoja u zatvorenoj (kanoničnoj) formi čime je obezbeđeno generisanje jednačina u formi algoritma. Sistem se rešava inverzijom matrice otpornosti, gde su rešenja sistema struje i naponi na mestu kratkog spoja.

4) U ovom koraku se na osnovu izračunate struje i napona na mestu kratkog spoja određuje ekvivalentna otpornost r_e , zavisno od tipa kratkog spoja [10].

Za jednopolni kratak spoj u fazi L1:

$$r_e = \frac{-V_k}{I_{L1}} \quad (11)$$

za jednopolni kratak spoj u fazi L2:

$$r_e = \frac{-a^2 \cdot V_k}{I_{L2}} \quad (12)$$

za jednopolni kratak spoj u fazi L3:

$$r_e = \frac{-a \cdot V_k}{I_{L3}} \quad (13)$$

Za dvopolni kratak spoj sa zemljom ekvivalentna otpornost zavisi od veličine modula struje u fazama. Tako da se za dvopolni kratak spoj sa zemljom u fazama L1-L2 ima:

$$\text{ako je } |I_{L1}| > |I_{L2}| : r_e = \frac{-V_k}{I_{L1}} \quad (14)$$

$$\text{ako je } |I_{L1}| < |I_{L2}| : r_e = \frac{-a^2 \cdot V_k}{I_{L2}} \quad (15)$$

za dvopolni kratak spoj sa zemljom u fazama L1-L3:

$$\text{ako je } |I_{L1}| < |I_{L3}| : r_e = \frac{-V_k}{I_{L1}} \quad (16)$$

$$\text{ako je } |I_{L1}| < |I_{L3}| : r_e = \frac{-a \cdot V_k}{I_{L3}} \quad (17)$$

za dvopolni kratak spoj sa zemljom u fazama L2-L3:

$$\text{ako je } |I_{L2}| > |I_{L3}| : r_e = \frac{-a^2 \cdot V_k}{I_{L2}} \quad (18)$$

$$\text{ako je } |I_{L2}| < |I_{L3}| : r_e = \frac{-a \cdot V_k}{I_{L3}} \quad (19)$$

Za dvopolni kratak spoj u fazama L1-L2:

$$r_e = \frac{-0,5 \cdot (V_k - a^2 \cdot V_k)}{I_{L1}} \quad (20)$$

za dvopolni kratak spoj u fazama L1-L3:

$$r_e = \frac{0,5 \cdot (V_k - a \cdot V_k)}{I_{L3}} \quad (21)$$

za dvopolni kratak spoj u fazama L2-L3:

$$r_e = \frac{0,5 \cdot (a^2 \cdot V_k - a \cdot V_k)}{I_{L2}} \quad (22)$$

Za tropolni kratak spoj:

$$r_e = \frac{-V_k}{I_{L1}} \quad (23)$$

gde su:

V_k – napon na mestu kratkog spoja pre kratkog spoja i

I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} – fazne struje na mestu kratkog spoja u fiktivnom kolu,

$$a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$$

Na isti način se računa i ekvivalentna reaktansa x_e zavisno od tipa kratkog spoja, s tim što se za vrednosti struja uzimaju one koje su dobijene u šemi sa kratkospojenim otpornostima.

5) Na kraju, za tako dobijene ekvivalentne vrednosti otpornosti i reaktansi, na jedinstven način izračunava se ekvivalentna vremenska konstanta kao:

$$T_a = \frac{x_e}{\omega \cdot r_e} \quad (24)$$

gde je ω kružna učestanost naizmenične komponente struje kratkog spoja.

4.1. Modifikacija algoritma

Po metodi ekvivalentne vremenske konstante vremenski tok jednosmerne komponente u svim granama sistema opisuje se eksponencijalnom funkcijom sa jedinstvenom – ekvivalentnom vremenskom konstantom. Kao što je već bilo reči, jasno je da je to samo približni proračun, jer se ne može potpuno tačno sistem opisati samo sa jednom vremenskom konstantom. Već za dve paralelne grane sa različitim vrednostima X/R ne postoji potpuno tačan način kombinovanja u jednu granu (jedan ekvivalent) sa jednom vrednošću X/R . Ali, zbog složenosti tačnog proračuna ovakav pojednostavljen proračun je mnogo korisniji u praksi. U cilju približavanja rezultata

dobijenih ovom (približnom) metodom rezultatima koji bi se dobili tačnom metodom u opisanom algoritmu se predlaže modifikacija koja se koristi kod proračuna jednosmerne komponente za potrebe procene naprežanja prekidača. Za procenu naprežanja prekidača izračunavaju se struje kroz prekidač pri čemu je mesto kratkog spoja prvo sa jedne, a zatim i sa druge strane prekidača – s obzirom da se smatra da je impedansa zatvorenog prekidača zanemariva, obe potrebne vrednosti se izračunavaju za jedno mesto kratkog spoja.

U radijalnoj strukturi mreže trolejni kratak spoj deli mrežu na dve fizički nezavisne celine. Polazeći od ove činjenice, moguće je pri proračunu jednosmerne komponente izračunati vremenske konstante za svaku od pomenutih celina [20]. Time se umesto jedinstvene vremenske konstante za samo mesto kratkog spoja imaju dve vrednosti kojim se opisuju tokovi jednosmerne struje sa jedne, odnosno, druge strane mesta kratkog spoja. Za ostale tipove kratkih spojeva se primenjuje isti postupak, pri čemu je očigledno da je tačnost u tom slučaju manja.

5. PRIMERI

Predloženi model za proračun jednosmerne komponente struje kratkog spoja je u potpunosti integrisan u softverski paket za distributivni menadžment sistem (DMS) [3, 4, 19]. Algoritam za proračun (jedinstvene) vremenske konstante za mesto kratkog spoja je primenjen u funkciji „Kvarovi”, dok je algoritam sa opisanom modifikacijom za proračun vremenske konstante u granama od interesa primenjen u funkciji „Provera prekidača”. U ovom delu su prikazani primeri i rezultati proračuna koji se dobijaju primenom tih funkcija na primerima realnih distributivnih mreža. Cilj je da se prikažu efekti koje na vrednosti jednosmerne struje kratkog spoja imaju distributivni generatori, da se ilustruje brzina i stabilnost ovih algoritama, kao i unapređenje koje se dobija primenom opisane modifikacije u algoritmu.

U tabeli 1 je prikazano potrebno vreme za proračun jednosmerne komponente struje kratkog spoja

Tabela 1.
Vreme proračuna struje i T_a za sve čvorove

Distributivna mreža	Broj TS SN/NN	Broj čvorova	Proračun (sekunda)
Buenos Aires (Argentina)	15 170	57 350	41,3
Tunis (Tunis)	6 590	21 320	10,5
Skoplje (Makedonija)	2 370	8 060	3,3
Novi Sad	1 150	3 710	1,8

na mestu kratkog spoja u realnim distributivnim mrežama za sve čvorove ekvivalentnog kola. Ovaj proračun se vrši u funkciji „Kvarovi” izborom moda za proračun u celoj mreži.

U tabeli je prikazan i podatak o veličini distributivnih mreža na kojima su vršeni proračuni preko broja transformatorskih stanica srednji na niski napon (TS SN/NN). Može se primetiti da je vreme potrebno za proračun struje na mestu kratkog spoja kao jednosmerne komponente za jedno mesto kratkog spoja veoma malo i da iznosi manje od 1 milisekunde za bilo koju veličinu distributivne mreže (npr. vreme proračuna za mrežu Buenos Airesa je 41,3 s odnosno 41 300 ms što, kada se podeli sa 57 350 čvorova, daje rezultat od 0,72 ms).

U tabeli 2 su za iste distributivne mreže dati podaci o broju prekidača u mreži i vremenu potrebnom da se izvrši proračun maksimalne vrednosti vremenske konstante jednosmerne komponente kratkog spoja za sve prekidače u mreži. Ovaj proračun se vrši u funkciji „Provera prekidača”, izborom kriterijuma za proveru „jednosmerna vremenska konstanta” i moda za proračun u celoj mreži. Pri ovome se vrši provera za sva četiri standardna tipa kratkog spoja i za kratke spojeve sa obe strane prekidača. I u ovom slučaju se, takođe, može zapaziti malo vreme potrebno za proračune u celoj mreži.

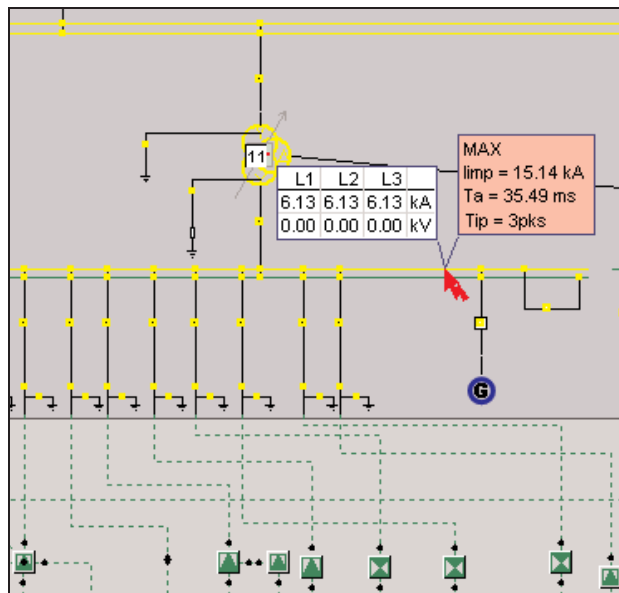
Tabela 2.
Proračun naprežanja prekidača (uključen proračun i T_a)

Distributivna mreža	Broj TS SN/NN	Broj čvorova	Proračun (sekunda)
Buenos Aires (Argentina)	15 170	2 360	25,0
Tunis (Tunis)	6 590	590	4,5
Skoplje (Makedonija)	2 370	1 430	6,1
Novi Sad	1 150	410	2,2

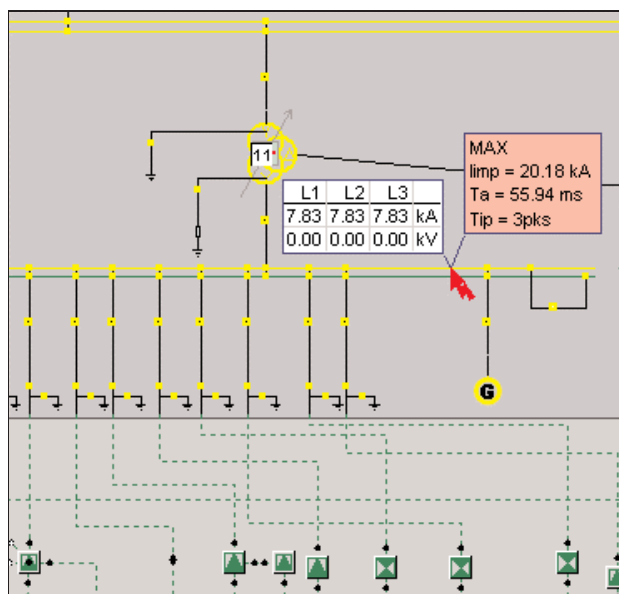
Na slikama 5 i 6 je ilustrovan uticaj koji priključenje distributivnih generatora ima na vrednost vremenske konstante i jednosmerne komponente struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja. Vidi se da dolazi do značajnog povećanja vremenske konstante, sa oko 35 ms na vrednost od skoro 56 ms.

Poslednjim primerom (slika 7) ilustruje se značaj prethodno opisane modifikacije u algoritmu. Na slici 6 se vidi da je ekvivalentna vremenska konstanta jednosmerne komponente struje kratkog spoja, priključenjem generatora za kratak spoj na sabirnici na kojoj je priključen generator, imala vrednost od oko 56 ms. Pošto je kratak spoj na toj sabirnici kritičan za naprežanja generatora, bez opisane modifika-

cije ova ekvivalentna vremenska konstanta za kritično mesto kratkog spoja bi se smatrala i maksimalnom vrednošću za prekidač. Međutim, jednosmerna komponenta struje koja prolazi kroz prekidač pri trolepolnom kratkom spoju na sabirnici ima vremensku konstantu od 130 ms.

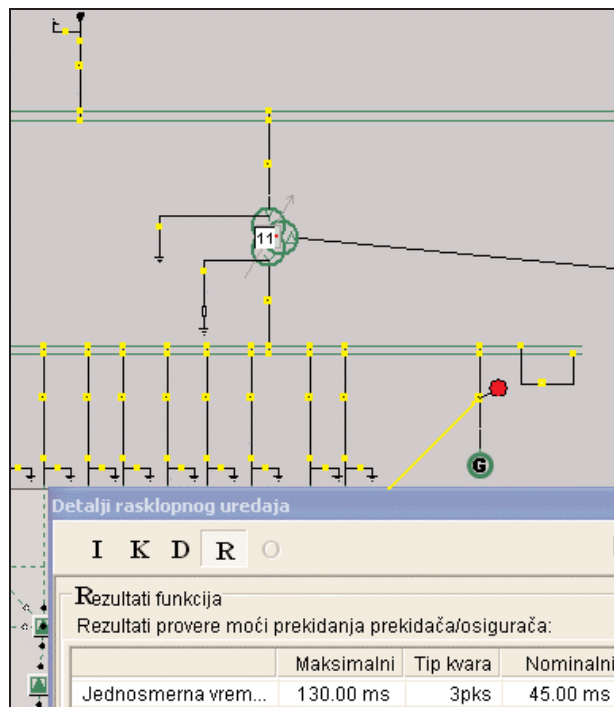


Slika 5. Proračun struje i T_a bez distributivnog generatora



Slika 6. Proračun struje i T_a sa distributivnim generatorom

Ova „prava” maksimalna vrednost za jednosmernu vremensku konstantu se i dobija primenom opisane modifikacije algoritma u funkciji „Provera prekidača”, što je prikazano na slici 7.



Slika 7. Vrednost T_a na generatorskom prekidaču

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio da se prikaže jedan efikasan postupak za proračun jednosmerne komponente struje kratkog spoja. Zadati cilj je u potpunosti postignut s obzirom na to da je prikazani algoritam kompletno orijentisan ka savremenim računarima i odgovarajućim specijalizovanim programskim paketima. Generalno, proračun vremenske konstante jednosmerne komponente na ovaj način predstavlja prirodnu nadgradnju na proračun naizmenične komponente struje kratkog spoja u distributivnim mrežama. Nedostaci (nestabilnost i neefikasnost) koji bi potencijalno nastali primenom standardnih – matrično orijentisanih algoritama za proračun kratkih spojeva u slaboupetljanim distributivnim mrežama su otklonjeni kroz predloženi model i algoritam. Njegova efikasnost se praktično ne razlikuje u radialnim i slaboupetljanim distributivnim mrežama. Posebno je značajno što se on na isti način primenjuje za proračune i u mrežama u kojima ima distributivnih generatora (i to sve više!), jer su u takvim mrežama proračuni jednosmerne komponente struje kratkog spoja od naročitog značaja.

7. LITERATURA

- [1] H. Požar: VISOKONAPONSKA RASKLOPNA POSTROJENJA, Tehnička knjiga, Zagreb, 1984.
- [2] J. Nahman, V. Mijailović: VISOKONAPONSKA POSTROJENJA, Beopres, Beograd, 2000.

- [3] V. Strezoski, D. Popović, D. Bekut, N. Katić, G. Švenda, Z. Gorečan, J. Dujčić: OSNOVNE ENERGETSKE FUNKCIJE ZA ANALIZU, UPRAVLJANJE I PLANIRANJE POGONA SREDNJENAPONSKIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA – Deo I: Tokovi snaga, režimi s kvarovima, zaštita i estimacija stanja, Drugo naučno-stručno savjetovanje Energetika Srpske 1998, Banja Vrućica, 1998., str. 353-360.
- [4] V. Strezoski, D. Popović, D. Bekut, N. Katić, G. Švenda, Z. Gorečan, J. Dujčić: OSNOVNE ENERGETSKE FUNKCIJE ZA ANALIZU, UPRAVLJANJE I PLANIRANJE POGONA SREDNJENAPONSKIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA – DEO II: REKONFIGURACIJA, VOĐENJE POGONA, RESTAURACIJA, REGULACIJA NAPONA I KONFIGURACIJA, Drugo naučno-stručno savjetovanje Energetika Srpske 1998, Banja Vrućica, 1998., str. 361-367.
- [5] R. P. P. Smeets, A. G. A. Lathouwers: ECONOMY MOTIVATED INCREASE OF DC TIME CONSTANTS IN POWER SYSTEMS AND CONSEQUENCES FOR FAULT CURRENT INTERRUPTION, Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE , Volume 1, Issue , 2001 pp. 462 – 467.
- [6] W. M. C. Heuvel, A. L. J. Janssen, G. C. DAMSTRA: INTERRUPTION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN MV NETWORKS WITH EXTREMELY LONG TIME CONSTANTS, Generation, Transmission and Distribution, Volume 136, Issue 2, Mar 1989 pp. 115 – 119.
- [7] T. Satou, M. Nishio, K. Kawakita, S. Baba. K. Kamei, Y. Hirano, A. Kobayashi, T. Nakamoto, K. Hirasawa, Y. Yamane: INFLUENCE OF THE TIME CONSTANT OF DC COMPONENT ON INTERRUPTING DUTY OF GCB, Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE Volume 1, Issue , 28 Jan-1 Feb 2001., pp. 300 – 305
- [8] R. P. P. Smeets, D. F. Peelo, J. H. Sawada, L. V. Sluis: EVALUATION OF STRESSES IN DISTRIBUTION NETWORKS AND THEIR IMPACT ON TESTING AND CERTIFICATION OF MEDIUM VOLTAGE SWITCHGEAR, Cigre, 2002, paper 13-106
- [9] S. Stojković: ZBIRKA ZADATAKA IZ RELEJNE ZAŠTITE, Tehnički Fakultet, Čačak, 2002.
- [10] J. Nahman, D. Bekut: FORMIRANJE EKVIVALENTA ZA DELOVE ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA KOD PRORAČUNA JEDNOSMERNE KOMPONENTE STRUJE KRATKOG SPOJA, Elektroprivreda, br. 5-6, 1992, str. 207-217.
- [11] G. Knight, H. Sieling: COMPARISON OF ANSI AND IEC 909 SHORT-CIRCUIT CURRENT CALCULATION PROCEDURES INDUSTRY APPLICATIONS, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 29, Issue 3, May/June 1993, pp. 625 – 630.
- [12] K. Dartawan, C. St Pierre: SIMPLIFYING IEEE/ANSI AND IEC FAULT POINT X/R RATIO FOR BREAKER EVALUATION, Industrial and Commercial Power Systems, 2003 IEEE Technical Conference Volume , Issue , 4-8 May 2003., pp. 129 – 137
- [13] X. Zhang, F. Soudi, D. Shirmohammadi, C. Cheng: A DISTRIBUTION SHORT CIRCUIT ANALYSIS APPROACH USING HYBRID COMPENSATION METHOD, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 10, Issue 4, Nov 1995, pp. 2053-2059.
- [14] A. Tan, W. H. Liu, D. Shirmohammadi: TRANSFORMER AND LOAD MODELING IN SHORT CIRCUIT ANALYSIS FOR DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Transactions. on Power Systems, Vol. 12, No. 3, Aug. 1997, pp. 1315-1322.
- [15] D. Rajačić, R. Taleski: Two novel methods for radial and weakly-meshed network analysis, Electric Power System Research, 48, (1998), pp. 79-87.
- [16] D. D. Bekut: PRORAČUN REŽIMA SA KRATKIM SPOJEM U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI U OKVIRU DISTRIBUTIVNOG MENADŽMENT SISTEMA, Elektrodistribucija, broj 1, 2000. str. 29-37.
- [17] V. Strezoski, D. Bekut: A CANONICAL MODEL FOR THE STUDY OF FAULTS IN POWER SYSTEMS, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 6, Issue 4, Nov 1991, pp. 1493 – 1499.
- [18] V. Strezoski, D. Bekut, A. Rakoš: PRIMENA TEHNIKE RETKIH MATRICA ZA PRORAČUN RASPODELE JEDNOSMERNE KOMPONENTE STRUJE TROPOLNOG KRATKOG SPOJA METODOM EKVIVALENTNE VREMENSKE KONSTANTE, Elektroprivreda, br. 5-6, 1990., str. 161-166.
- [19] D. Popović, D. Bekut, V. Treskanica: SPECIJALIZOVANI DMS ALGORITMI, DMS Group, Novi Sad, 2004.
- [20] D. Bekut, A. Parmaković: PROVERA KARAKTERISTIKA PREKIDAČA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI, Elektrodistribucija, br. 2, 2003, str. 31-39.

Rad je primljen u uredništvo 26. 11. 2007. godine



Duško Bekut je Fakultet tehničkih nauka završio u Novom Sadu, dok je magistrirao, a zatim i doktorirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od 1986. godine je zaposlen na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, gde je sada profesor. Oblasti rada i angažovanja su vezane za relejnu zaštitu, analizu elektroenergetskih sistema, distributivni menadžment sistem, itd.



Aleksandar Parmaković je rođen 1976. godine u Sremskoj Mitrovici. Fakultet tehničkih nauka je završio 2001. godine u Novom Sadu. Od 2002. godine je zaposlen u DMS Grupi u Novom Sadu. Oblasti rada i angažovanja su vezane za kratke spojeve, relejnu zaštitu, distributivni menadžment sistem, itd.

Koncept regulacije dvostrano napajane indukcione mašine u vetroagregatima pri ostrvskom radu

Stručni rad
UDK: 621.313.332

Rezime:

U radu je razvijen matematički i logički model upravljanja u vetrogeneratorskom izolovanom sistemu sa dvostrano napajanom indukcionom mašinom. Osnovna strategija upravljanja je održavanje napona i frekvencije u propisanim granicama pri realnim uslovima promene snage vetra, kao i realnim uslovima opterećenja, uključujući i asimetričan rad. Predloženi model upravljanja omogućava prilagođenje brzine obrtanja vetroturbine uslovima vetra i na taj način omogućava maksimalnu efikasnost rada vetroturbine u celokupnom opsegu radnih brzina vetra.

Ključne reči: vetroagregat, izolovani sistem, dvostrano napajana indukciona mašina, regulacija

Abstract:

CONTROL STRATEGY OF A WIND TURBINE DRIVEN DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR FOR STAND-ALONE APPLICATIONS

Abstract: Mathematical and logical control models of wind turbine driven doubly fed induction machine for stand-alone applications were developed and they are presented in this paper. Basic control strategy is to maintain voltage and frequency in prescribed limits in realistic conditions when wind speed and consumer's demand for power vary, and also under asymmetric working conditions. Suggested control model enables adjustment of wind turbines shaft speed according to wind speed, thus ensuring achievement of maximal efficiency in the whole range of wind turbine working speeds.

Key words: wind turbine, stand-alone application, doubly fed induction generator, regulation

1. UVOD

Vetar predstavlja neiscrpan ekološki izvor energije čiji globalni potencijal višestruko prevazilazi svetske potrebe za električnom energijom [1]. Međutim, pouzdana i ekonomski prihvatljiva konverzija mehaničke energije vetra u električnu energiju je praćena nizom poteškoća koje su posledica stohastičnosti vetra i njegove male gustine snage [2,3].

Da bi se obezbedio efikasan i pouzdan rad vetrogeneratora kod savremenih vetroagregata veće snage, koji su priključeni na elektroenergetski sistem (EES), dvostrano napajani indukcioni generator (DFIG – *Double Fed Induction Generator*) postao je najzastupljeniji koncept [4,5]. Stator je direktno priključen na mrežu, a rotor je preko kliznih prstenova, pretvaračke grupe i eventualno transformatora takođe priključen na mrežu. Ova tehnika potiče od pod-

sinhronih kaskada (Šerbiusov pogon) koje se primenjuju u elektromotornim pogonima velike snage, ali je kod tih pogona od interesa samo motorni režim rada.

Primena vetrogeneratora u izolovanim sistemima postaje sve veća [6]. Uporedne analize troškova proizvodnje električne energije iz različitih distribuiranih izvora pokazuju da su vetrogeneratori ekonomski i ekološki prihvatljivo rešenje na lokacijama koje obezbeđuju faktor iskorišćenja kapaciteta iznad 18 % [7]. Uslovi primene DFIG u vetroagregatima male snage koji napajaju izolovani potrošač su analizirani u literaturi [8, 9]. Koncept upravljanja generatorom pri izolovanom radu se u potpunosti razlikuje u odnosu na situaciju kada on radi na mreži. Pri radu u izolovanom sistemu osnovni zahtevi su održavanje napona i frekvencije u propisanim granicama pri realnim uslovima promene snage vetra, kao i realnim uslovima opterećenja uključujući i asimetrične režime rada. U radu [10] analizirani su uslovi upravljanja DFIG pri simetričnim uslovima opterećenja. Kod realnih izolovanih potrošača česta su asimetrična opterećenja pa je potrebno analizirati mogućnosti upravljanja i regulacije DFIG u realnim uslovima sa mogućnošću postojanja asimetričnog opterećenja.

U ovom radu je razvijen jedan jednostavan i praktičan algoritam za upravljanje vetroagregatom sa DFIG koji napaja realan izolovani simetričan ili asimetričan potrošač. Predloženi algoritam omogućava optimalno upravljanje brzinom obrtanja turbine i time omogućava maksimalnu efikasnost vetrogeneratorskog sistema pri svim uslovima vetra.

2. MATEMATIČKI MODEL DVOSTRANO NAPAŽANOG INDUKCIONOG GENERATORA

Matematički model DFIG obuhvata jednačine naponskog balansa za statorski i rotorski namot, jednačine fluksnih obuhvata statorskog i rotorskog namota i jednačinu ravnoteže momenata na vratilu mašine. Polazne pretpostavke pri izvođenju modela su: postojanje sinusoidalno raspodeljenog trofaznog namotaja na statoru i na rotoru. Magnetno kolo se smatra linearnim i zanemaruju se gubici u njemu usled histerezisa i vihornih struja. Takođe se zanemaruju i ivični efekti, a mašina se smatra idealno rotaciono simetričnom.

Jednačine naponske ravnoteže statorskog i rotorskog namota u stacionarnom sistemu u vektorskom obliku su date sledećim jednačinama:

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} \quad (1)$$

$$\vec{V}_{rs} = R_r \vec{I}_{rs} + \frac{d\vec{\Psi}_{rs}}{dt} - \vec{\Omega}_m \times \vec{\Psi}_{rs} \quad (2)$$

Jednačine fluksnih obuhvata namotaja statora i rotora u matricnom obliku posmatrane u stacionarnom sistemu se mogu definisati sledećom matricnom jednačinom:

$$\begin{bmatrix} \emptyset_{as} \\ \emptyset_{bs} \\ \emptyset_{cs} \\ \emptyset_{ars} \\ \emptyset_{brs} \\ \emptyset_{crs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m \\ L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_r & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_r & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ars} \\ i_{brs} \\ i_{crs} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Oznake u jednačini (3) imaju sledeće značenje:

$i_{a,b,c s}$ – trenutne vrednosti faznih struja statorskog namota;

$i_{a,b,c r}$ – trenutne vrednosti faznih struja rotorskog namota;

$\Psi_{a,b,c s}$ – fluksni obuhvati odgovarajućih statorskih faznih namotaja;

$\Psi_{a,b,c r}$ – fluksni obuhvati odgovarajućih rotorskih faznih namotaja;

R_s – aktivna otpornost faznog namotaja statora;

R_r – aktivna otpornost faznog namotaja rotora;

L_s – sopstvena induktivnost po fazi statorskog namotaja;

L_m – induktivnost magnećenja po fazi i

L_r – sopstvena induktivnost po fazi rotorskog namotaja.

Elektromagnetni moment T_e koji deluje na rotor može se definisati vektorskim proizvodom vektora struje i fluksa rotora kao:

$$T_e = p \cdot \vec{i}_r \times \vec{\Psi}_r \quad (4)$$

Mehanička jednačina ravnoteže momenata rotora:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_{turb} \quad (5)$$

gde je J ekvivalentni moment inercije zamajnih masa sveden na vratilo generatora, T_{turb} je mehanički moment vetroturbine sveden na vratilo generatora.

3. PRINCIPI UPRAVLJANJA DVOSTRANO NAPAŽANOG INDUKCIONOG GENERATORA U IZOLOVANOM SISTEMU

Pri radu DFIG u izolovanom sistemu osnovni zahtevi su održavanje napona i frekvencije u propisanim granicama pri realnim uslovima promene snage vetra, kao i realnim uslovima opterećenja (uklju-

čujući i asimetričan rad). Realni uslovi rada uzrokuju stalne promene momenta vetroturbine koje su posledica varijacije brzine vetra ali i efekata vezanih za samu turbinu [11], pa u takvim uslovima održavanje frekvencije predstavlja značajan problem u izolovanim sistemima [12]. Osnovna ideja je da se upravljanjem strujama rotora obezbedi da brzina obrtanja magnetskog polja u svim radnim uslovima bude konstantna, odnosno takva da obezbedi zadatu (nominalnu) frekvenciju indukovanih elektromotornih sila (ems) u statorskom namotu. To znači da je potrebno obezbediti da se fazor struje rotorskog namota, a time i fazor indukcije u međugvožđu mašine, obrće konstantnom brzinom u odnosu na statorski namot. Pod pretpostavkom da je obezbeđena konstantna brzina obrtanja fazora magnetopobudne sile (mps), amplitude indukovanih elektromotornih sila u statorskim namotajima će zavistiti samo od odgovarajućih fluksnih obuhvata. Promenom intenziteta rotorskih struja moguće je upravljati fluksnim obuhvatima statorskih faznih namotaja, odnosno faznim naponima statora. Pošto nivo fluksnog obuhvata zavisi i od statorskih struja, u uslovima asimetričnih opterećenja struje u rotorskim faznim namotajima treba podesiti na vrednosti koje će obezbediti da fluksni obuhvati statorskih faznih namotaja bu-

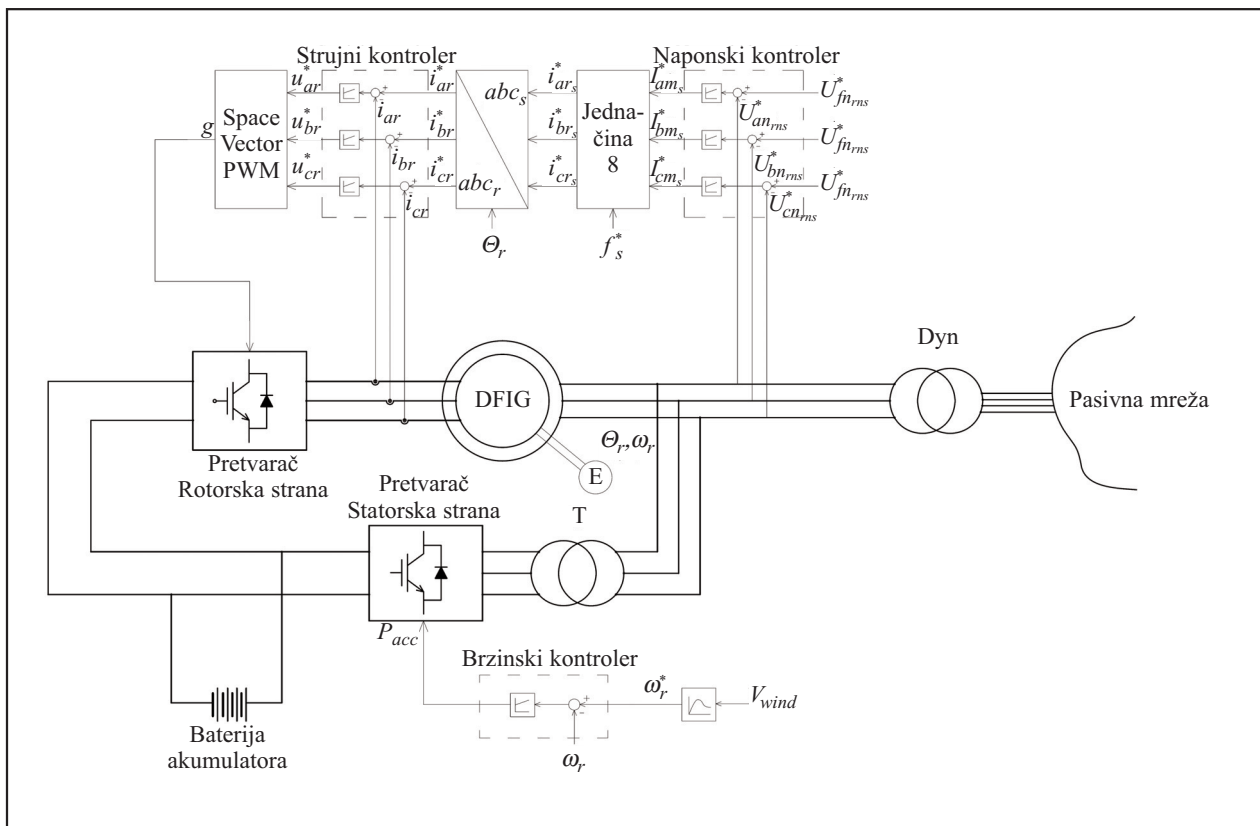
du takvi da naponi na njima budu nominalni. Dakle, kompletan sistem upravljanja je vezan za rotorske struje. Ovakav način upravljanja DFIG je blizak konceptu rada sinhronne mašine, s tom razlikom što je u ovom slučaju pobudni namotaj trofazan, pa rotorske struje mogu stvoriti obrtno polje i obezbediti da se ono prostorno obrće konstantnom brzinom bez obzira na mehaničku brzinu obrtanja rotora. Različiti nivo pobudnih struja u pojedinim faznim namotajima rotora obezbeđuje kompenzaciju asimetrične reakcije indukta (statora), pa se na ovaj način obezbeđuje da mašina može raditi sa konstantnim efektivnim vrednostima naponima na statorskim priključcima i u uslovima asimetričnih opterećenja. Dakle, u opštem slučaju struje rotora su asimetrične, pa je obrtno magnetno polje koje one stvaraju eliptično, ali je ukupni efekat struja rotora i statora takav da fluksni obuhvat svakog namotaja obezbeđuje nominalni napon na statorskim faznim namotajima.

Principijelna šema DFIG koja napaja izolovani potrošač je prikazana na slici 1.

Veličine na slici 1 imaju sledeće značenje:

U_{fnrms}^* – željena efektivna vrednost faznog napona statora;

$U_{a,b,c nrms}$ – merene efektivne vrednosti faznih napona statora;



Slika 1. Principijelna šema DFIG koja napaja izolovani potrošač

$I_{a,b,c rms}^*$ – željene amplitude faznih struja rotora u stacionarnom abc sistemu;
 f_s^* – željena frekvencija statorskih napona;
 $i_{a,b,c rs}^*$ – željene trenutne vrednosti faznih struja rotora u stacionarnom abc sistemu;
 θ_r – mereni ugao (pozicija) rotora (ugao između magnetskih osa faze a rotorskog i statorskog namota);
 $i_{a,b,c r}^*$ – željene trenutne vrednosti faznih struja rotora;
 $i_{a,b,c r}$ – merene trenutne vrednosti faznih struja rotora;
 $u_{a,b,c r}^*$ – željene trenutne vrednosti faznih napona rotora;
 g – okidački impulsi za upravljanje DC-AC rotorskim pretvaračem;
 v_{wind} – srednja desetominutna brzina vetra;
 ω_r^* – željena brzina obrtanja turbine (rotora);
 ω_r – merena brzina obrtanja turbine (rotora) i
 P_{acc} – zahtevana snaga punjenja baterije akumulatora.

3.1 Regulacija napona i frekvencije

Suština upravljanja faznim naponima statora je ostvarivanje odgovarajućeg fluksnog obuhvata faznih namotaja statora. Na nivo fluksnog obuhvata može se uticati upravljanjem strujama rotora. S obzirom da je upravljanje usmereno na veličine koje karakterišu statorski namot, zgodno je formalno matematički problem upravljanja posmatrati u jedinstvenom stacionarnom koordinatnom sistemu vezanom za stator. Jednačine naponskog balansa za statorski namot posmatrane u kompleksnom domenu su definisane sledećim sistemom jednačina:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{as} &= R_s \underline{I}_{as} + j\omega_s \underline{\Psi}_{as} \\
 \underline{U}_{bs} &= R_s \underline{I}_{bs} + j\omega_s \underline{\Psi}_{bs} \\
 \underline{U}_{cs} &= R_s \underline{I}_{cs} + j\omega_s \underline{\Psi}_{cs}
 \end{aligned} \quad (6)$$

Na osnovu jednačina fluksnih obuhvata dobija se:

$$\begin{aligned}
 \underline{\Psi}_{as} &= L_s \underline{I}_{as} - \frac{L_m}{2} \underline{I}_{bs} - \frac{L_m}{2} \underline{I}_{cs} + \frac{3}{2} L_m \underline{I}_{ars} \\
 \underline{\Psi}_{bs} &= L_s \underline{I}_{bs} - \frac{L_m}{2} \underline{I}_{as} - \frac{L_m}{2} \underline{I}_{cs} + \frac{3}{2} L_m \underline{I}_{brs} \\
 \underline{\Psi}_{cs} &= L_s \underline{I}_{cs} - \frac{L_m}{2} \underline{I}_{as} - \frac{L_m}{2} \underline{I}_{bs} + \frac{3}{2} L_m \underline{I}_{crs}
 \end{aligned} \quad (7)$$

Na osnovu sistema jednačina (6) i (7) može se zaključiti da se efektivnim vrednostima napona na statorskim priključcima može upravljati direktno preko faznih struja rotora. Na osnovu merenih efek-

tivnih vrednosti napona na priključcima statora U_{firms} moguće je zadati efektivne vrednosti faznih struja rotora u stacionarnom sistemu ($I_{a,b,c rs}$), koje će, za dati radni režim, u skladu sa jednačinama (7), obezbediti potreban nivo fluksnih obuhvata tako da efektivne vrednosti napona statora budu jednake željenoj vrednosti. Ova povratna veza ostvaruje se preko PI regulatora čiji se parametri mogu optimizovati u pogledu brzine odziva i robusnosti. Da bi učestanost napona statora bila jednaka željenoj vrednosti f_s^* , učestanost struja rotora u stacionarnom sistemu treba da bude takođe jednaka frekvenciji f_s^* . Trenutne vrednosti faznih struja rotora u stacionarnom sistemu su:

$$\begin{aligned}
 i_{ars} &= I_{amrs} \sin 2\pi f_s^* t \\
 i_{brs} &= I_{bmrs} \sin(2\pi f_s^* t - 120^\circ) \\
 i_{crs} &= I_{cmrs} \sin(2\pi f_s^* t + 120^\circ)
 \end{aligned} \quad (8)$$

Praćenjem trenutne pozicije rotora, koja je definisana merenim uglom θ_r , vrši se preslikavanje željenih struja rotora iz stacionarnog sistema u stvarni obrtni rotorski abc_r sistem, shodno sledećoj matičnoj jednačini:

$$\begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r - 240^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 240^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ars} \\ i_{brs} \\ i_{crs} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Regulacija struja rotora se vrši preko PI regulatora tako što se zadaju odgovarajući naponi rotora koji se generišu SVPWM (*Space Vector Pulse Wide Modulation*) tehnikom.

U predloženoj šemi na slici 1 veza potrošača na vetrogeneratorski sistem ostvarena je preko transformatora sprege Dyn. Na ovaj način postignuto je da potrošači raspolažu i faznim i linijskim naponima, a izbegnuta je mogućnost pojave nultih struja na strani DFIG koje se ne mogu kompenzovati.

3.2 Regulacija brzine obrtanja turbine

Kod eksploatacije energije vetra, s obzirom da se nema mogućnost njene akumulacije u primarnom obliku, osnovna strategija je obezbediti u svakom trenutku maksimalan mogući stepen iskorišćenja. Mehanička snaga (P_{meh}) koju razvija vetroturbina, pri određenoj brzini vetra (v) je data relacijom:

$$P_{meh} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 \quad (10)$$

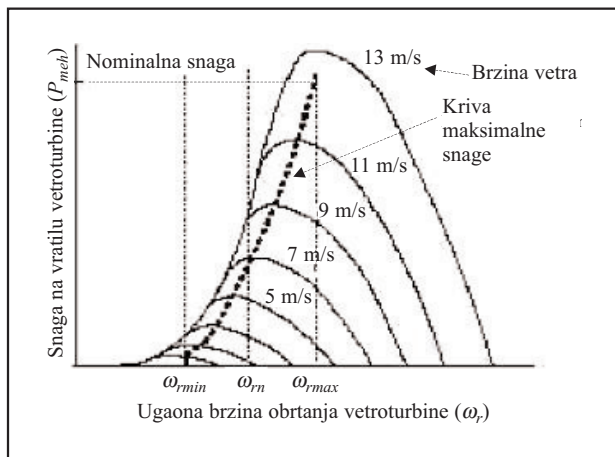
gde je:

ρ – gustina vazduha;

R – poluprečnik rotora vetroturbinе i

C_p – faktor iskorišćenja snage vetroturbinе koji je funkcija odnosa periferne brzine vrha lopatice vetroturbinе (ωR) i brzine vetra.

Tipična mehanička karakteristika vetroturbinе za različite brzine vetra je prikazana na slici 2. Sa karakteristike se vidi da se maksimalan stepen iskorišćavanja vetroturbinе C_p za različite brzine vetra postiže pri različitim ugaonim brzinama turbinе.



Slika 2. Mehanička karakteristika vetroturbinе za različite brzine vetra

Na osnovu mehaničke karakteristike vetroturbinе se zaključuje da je za optimalno iskorišćenje snage vetra potrebno prilagoditi brzinu obrtanja turbinе brzini vetra (pratiti krivu maksimalne snage), odnosno vršiti elektromehaničku konverziju sa promenljivom brzinom obrtanja generatora. S obzirom da brzina vetra varira u širokom dijapazonu, zadovoljenje kriterijuma maksimalnog stepena iskorišćenja zahteva relativno velike varijacije ugaone brzine turbinе, odnosno generatora. Obezbeđivanje maksimalne efikasnosti turbinе podrazumeva da je u svakom trenutku potrošač spreman da prihvati generisanu električnu energiju. Kada je vetrogenerator priključen na elektroenergetski sistem (EES), ovaj problem obično ne postoji jer je mreža dovoljno jaka i vetrogenerator može uvek injektirati maksimalnu moguću snagu. Kod izolovanog potrošača snaga koju može predati vetrogenerator zavisi od trenutnih potreba za električnom energijom. Najčešće se zahtevana snaga potrošnje i maksimalna raspoloživa snaga generatora razlikuju i taj debalans je neophodno kompenzovati baterijom akumulatora. Ideja koja je predstavljena u ovom radu (slika 1) je da baterija akumulatora bude električno pozicionirana u rotorskom kolu generatora. Iz baterije bi se, prema opisanoj logici, vršilo napajanje rotorskog namota, dok bi sa druge strane akumulator preko tranzistorskog bidirekcionog pretvarača vršio kompenzaciju debalan-

sa između trenutne snage generisanja i potrošnje. U slučaju da je snaga vetrogeneratora veća od trenutne snage potrošnje, višak snage preuzima baterija, odnosno vrši se njeno punjenje. Kada je snaga vetrogeneratora nedovoljna da podmiri zahteve potrošača, baterija akumulatora se prazni i dopunjava snagu generatora i podmiruje se zahtevana snaga potrošnje.

Pri svim radnim brzinama vetra elektromehanička konverzija se može vršiti pri nekoj željenoj brzini obrtanja rotora koja obezbeđuje maksimalni stepen iskorišćenja vetroturbinе u skladu sa njenom mehaničkom karakteristikom, slika 2. Ukoliko se brzina vetra poveća, pri istoj snazi potrošnje, deluje se na regulator punjenja baterije tako da se snaga punjenja baterije privremeno smanji, kako bi debalans između mehaničke snage turbinе i električne snage generatora doveo do povećanja brzine obrtanja turbinе. Kada se postigne željena brzina obrtanja turbinе, snaga punjenja baterije se preko odgovarajućeg PI regulatora podešava na vrednost koja obezbeđuje balans između električne snage generatora i snage na vratilu turbinе. Ako je snaga vetroagregata nedovoljna da pokrije zahtevanu potrošnju, debalans se nadoknađuje iz baterije akumulatora. I u ovom slučaju se elektromehanička konverzija može ostvariti pri željenoj brzini obrtanja turbinе koja se postiže i održava upravljanjem snagom pražnjenja baterije akumulatora. Negativna povratna sprega po brzini obrtanja turbinе ostvaruje se preko odgovarajućeg PI regulatora.

Predloženi koncept upravljanja se odnosi na opseg brzina vetra od brzine uključenja v_{catin} do nominalne brzine v_n pri kojoj se postiže nominalna snaga generatora. U ovom opsegu brzina vetra potrebno je varirati ugaonu brzinu obrtanja turbinе u opsegu od ω_{min} do ω_{max} . Pri brzinama vetra većim od v_n kontrolu snage preuzima sama turbina koja može biti dizajnirana tako da zbog *stall* efekta smanji svoju snagu ispod nominalne [13]. Ovim jednostavnim pasivnim načinom kontrole se može sprečiti preopterećenje generatora u uslovima jakog vetra. Pri veoma jakim vetrovima (iznad 25 m/s), elektromehanička konverzija se, u cilju očuvanja vetroturbinе od mehaničkih oštećenja, u potpunosti zaustavlja tako što se turbina mehanički ukoči.

Kapacitet baterije akumulatora se određuje na osnovu zahteva za potrošnjom i raspoloživog potencijala vetra u najkritičnijoj nedelji u godini. Ukoliko postoji višak električne energije koju bi mogao generisati vetrogenerator a baterija akumulatora je puna, ili ne može prihvatiti zahtevanu snagu punjenja P_{acc} , onda su moguća dva načina za upravljanje u ovakvim režimima. Prvi je upotreba klasičnog rešenja sa tiristorski kontrolisanim otpornikom za disipaciju, a drugo rešenje, koje se sugerise u ovom ra-

du je da se poveća brzina obrtanja turbine tako da se smanji njena efikasnost C_p . Zbog nemogućnosti baterije akumulatora da u ovakvom scenariju prihvati višak električne energije doći će do povećanja brzine obrtanja vetroturbine, pa će, shodno mehaničkoj karakteristici prikazanoj na slici 2, radna tačka sponatano preći u oblast sa sniženim faktorom snage C_p . Snaga vetroturbine će se prilagoditi snazi potrošnje pri brzini obrtanja turbine pri kojoj postoji balans između mehaničke snage vetroturbine i električne snage opterećenja. U graničnom slučaju, ako je baterija akumulatora puna a potrošnja jednaka nuli, turbina će ubrzati do brzine koja, za aktuelnu brzinu vetra, odgovara preseku mehaničke karakteristike vetroturbine i apscisne ose, tj. faktoru snage u radnoj tački u kojoj je $C_p \approx 0$. U ovom, realno mogućem, scenariju može se vetroturbina mehanički za kočiti sve dok se ne javi potreba za potrošnjom električne energije. Kod mikrovetroturbina (do nekoliko kW) može se dozvoliti rad vetroturbine i u „praznom hodu”.

U logičkom smislu pretvarač koji kontroliše punjenja baterije akumulatora treba da predstavlja „ventil” koji treba da omogući dvosmerni protok energije u zavisnosti od raspoloživosti vetra, zahtevane snage potrošnje i stanja baterije akumulatora. Pored toga, potrebno je da se vrši i kontrola brzine otvaranja „ventila” u cilju amortizacije strujnih udara pri zahtevanoj promeni (smanjenju) brzine obrtanja turbine. Ovakvu logiku je praktično moguće realizovati sa standardnim *back-to-back* pretvaračima sa *PWM* logikom [14].

Rešenje koje je predloženo u ovom radu je primenljivo pre svega za vetroagregate male snage (nekoliko kW) koji napajaju usamljene objekte, ali i za vetroagregate srednje snage (nekoliko stotina kW) koji rade u ostrvskom režimu i napajaju izolovane mreže. U drugom slučaju obično se rade hibridni vetar-dizel sistemi jer je rezerviranje snage klasičnim baterijama akumulatora tehnički i ekonomski neopravdano.

4. TESTIRANJE MODELA

Na osnovu razvijenog matematičkog modela DFIG i predložene logike upravljanja napravljen je simulacioni model u programskom paketu MATLAB-Simulink. Pomoću ovog modela izvršene su računarske simulacije rada DFIG koji napaja pasivnu mrežu za različite karakteristične radne režime. Parametri test modela DFIG su dati u tabeli 1.

Testiranje predloženog vetrogeneratorskog sistema je sprovedeno kroz sledeće simulacione testove:

- Rad pri promenljivoj simetričnoj i asimetričnoj potrošnji i konstantnoj brzini vetra.
- Rad pri promenljivoj brzini vetra i konstantnoj potrošnji.

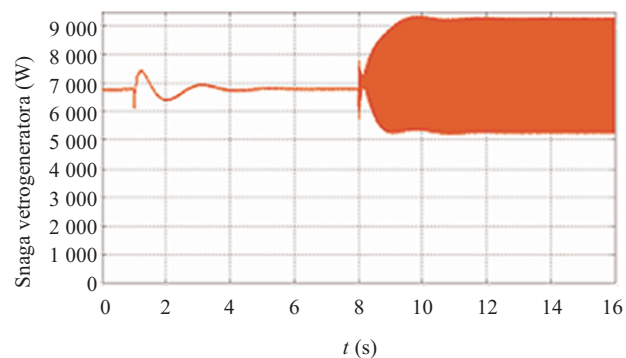
Tabela 1.

Parametri test modela DFIG

Nominalna snaga	10 kW
Nominalni napon statora	3x380 V/220 V
Otpornost statorskog namotaja	1,115 Ω
Induktivnost rasipanja statorskog namotaja	5,98 mH
Otpornost rotorskog namotaja svedena na stator	1,083 Ω
Induktivnost rasipanja rotora svedena na stator	5,98 mH
Induktivnost magnećenja posmatrana sa statorske strane	203,7 mH
Broj parova polova	2
Ekvivalentni moment inercije sveden na vratilo generatora	4,5 kgm ²

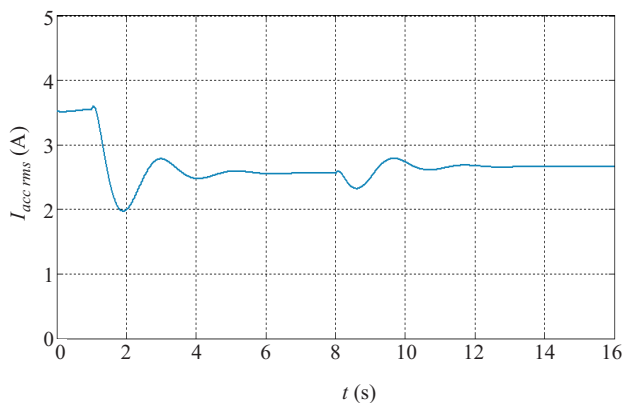
4.1. Simulacija rada dvostrano napajanog indukcionog generatora pri simetričnoj i asimetričnoj promeni opterećenja i konstantnoj brzini vetra

U ovom simulacionom testu pretpostavljeno je da je brzina vetra konstantna ali da se menja opterećenje izolovanog potrošača. Pretpostavljeno je da vetroagregat napaja simetrični omski potrošač sa otporom po fazi od $R_1=32 \Omega$, što pri nominalnom naponu odgovara trofaznoj snazi potrošnje od $P_1 \approx 4,5$ kW. U trenutku $t_1=1$ s simulirano je trenutno uključjenje trofaznog potrošača, tako da je opterećenje ostalo simetrično ali je otpor po fazi u novim uslovima opterećenja $R_2 = 28 \Omega$, što odgovara snazi potrošnje od $P_2 \approx 5,2$ kW. U trenutku $t_2 = 8$ s simulirano je asimetrično opterećenje sa ekvivalentnim otporima po fazi: $R_{3A} = 23 \Omega$, $R_{3B} = 27 \Omega$, $R_{3C} = 30 \Omega$. Na slici 3 prikazana je promena snage na priključcima statora DFIG.



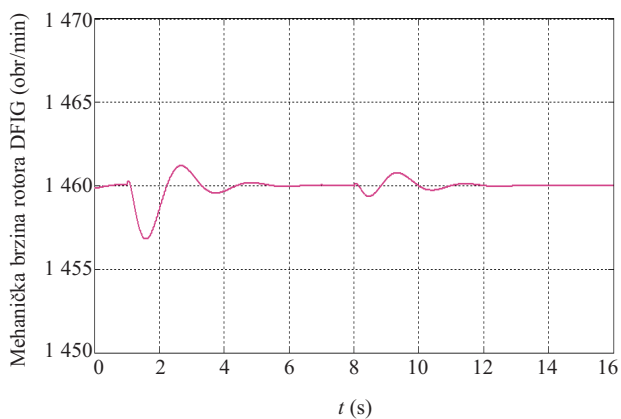
Slika 3. Snaga na trofaznim priključcima DFIG za različite snage opterećenja

U pretpostavljenoj simulaciji, snaga vetroturbine, za zadatu brzinu vetra i zadatu brzinu obrtanja turbine, je za sve pretpostavljene uslove opterećenja veća od snage koju zahteva izolovani potrošač. Da bi se brzina obrtanja vetroturbine održala konstantnom, višak snage je preko odgovarajućeg pretvarača (slika 1) iskorišćen za punjenje baterije akumulatora. Na slici 4 prikazan je dijagram promene efektivne vrednosti struje punjenja baterije akumulatora, posmatrane na naponskom nivou statora DFIG.



Slika 4. Struja punjenja akumulatora u analiziranom simulacionom testu

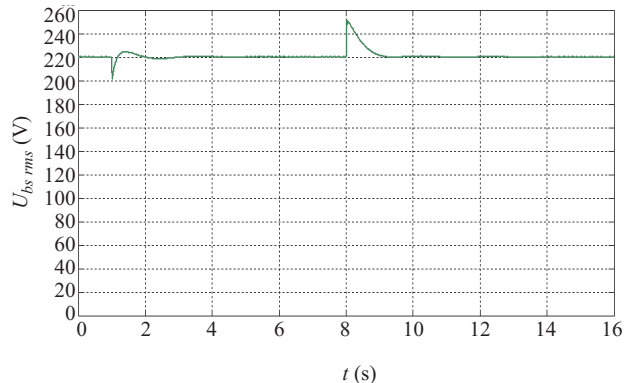
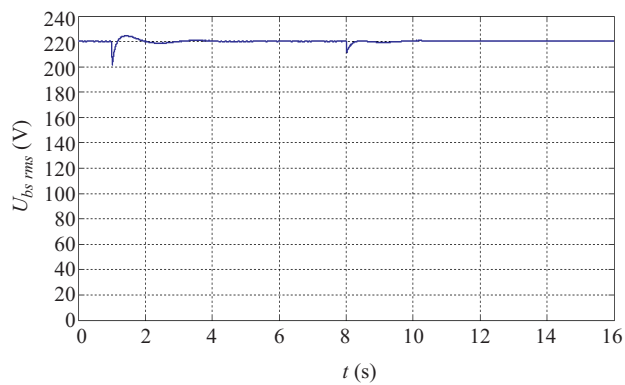
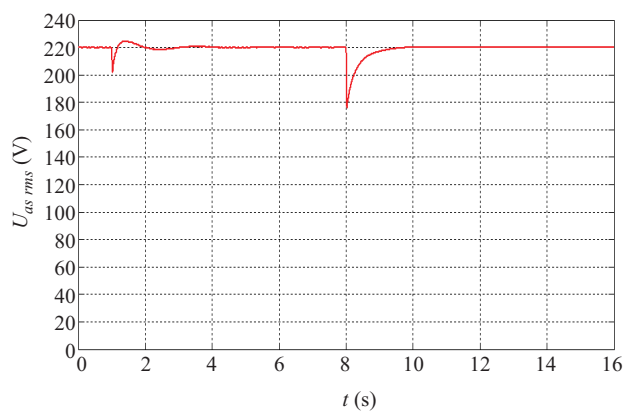
Upravljanje snagom punjenja baterije akumulatora se vrši tako da se održi zahtevana (optimalna) brzina obrtanja generatora, odnosno turbine. Za zadatu brzinu vetra pretpostavljeno je da se maksimalna efikasnost turbine postiže pri brzini obrtanja rotora generatora od 1 460 obr./min (povoljna brzina obrtanja vetroturbine, u zavisnosti od njene snage i broja lopatica, je obično nekoliko desetina obrtaja u minuti, pa je potrebno koristiti reduktor kako bi se prilagodile povoljne brzine obrtanja generatora i vetroturbine). Na slici 5. prikazan je vremenski dijagram promene brzine obrtanja turbine u analiziranom simulacionom testu.



Slika 5. Promena brzine obrtanja rotora generatora u analiziranom simulacionom testu

Na osnovu slike 5 može se zaključiti da regulator punjenja baterije akumulatora održava brzinu obrtanja generatora na zahtevani nivo u svim pretpostavljenim režimima opterećenja. Promene brzine obrtanja turbine u tranzijentnim periodima, koji su uzrokovani simuliranim promenama potrošnje, su relativno male i zavise od inercionih masa sistema, veličine promene snage potrošnje i karakteristika *PI* regulatora u upravljačkom kolu baterije akumulatora.

Pored očuvanja maksimalne efikasnosti rada vetroturbine, osnovni zahtev je očuvanje frekvencije i efektivne vrednosti napona na priključcima DFIG. Na slici 6 prikazan je vremenski dijagram promene efektivne vrednosti faznih napona na priključcima potrošača u analiziranom simulacionom testu. Na osnovu prikazanih vremenskih dijagrama

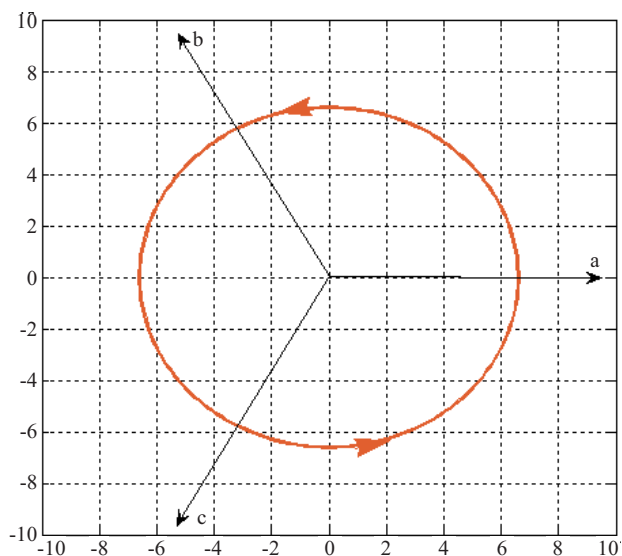


Slika 6. Efektivne vrednosti napona na priključcima izolovanog potrošača u analiziranom simulacionom testu

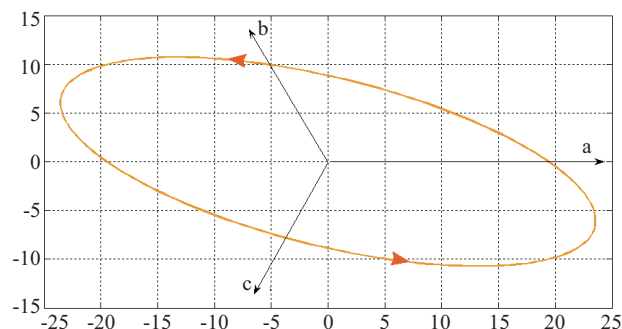
može se zaključiti da je pri svim analiziranim simetričnim i asimetričnim režimima opterećenja održana zahtevana vrednost napona na statorskim priključcima potrošača. U tranzijentnim periodima, pri naglim promenama opterećenja, javljaju se određeni propadi ili povišenja napona. Dubina propada, odnosno skoka napona, zavisi od veličine i vrste poremećaja i brzine odziva *PI* regulatora u odgovarajućem upravljačkom kolu. Ukoliko vetroagregat napaja izolovani potrošač sa osetljivim uređajima (npr. računarska oprema), tranzijentni poremećaji kvaliteta napona mogu biti nedozvoljeno veliki, pa je u takvim slučajevima potrebno ugraditi posebnu opremu za popravku kvaliteta napona.

Održavanje napona na željenoj vrednosti se suštinski vrši upravljanjem pomoću struja rotora koje obezbeđuju zahtevani nivo fluksnog obuhvata faznih namotaja statora. U uslovima simetričnog opterećenja efektivne vrednosti struje u rotorskim faznim namotajima su iste, pa je i magnituda obrtnog fazora magnetnopoludne sile rotorskog namota konstantna. To znači da je u režimima simetričnog opterećenja hodograf fazora magnetnopoludne sile rotorskog namota krug.

Na slici 7 prikazan je hodograf magnetnopoludne sile po navojku rotorskog namota za slučaj kada je opterećenje trofazno simetrično. Ako je opterećenje nesimetrično onda se hodograf fazora mps rotora degeneriše u elipsu. Na slici 8 prikazan je hodograf mps po navojku rotorskog namota za testirani slučaj asimetričnog opterećenja. Pri asimetričnom opterećenju neophodno je da struje rotora sadrže inverznu komponentu kako bi rezultantno polje obezbedilo zahtevani nivo fluksnih obuhvata faznih namotaja statora.



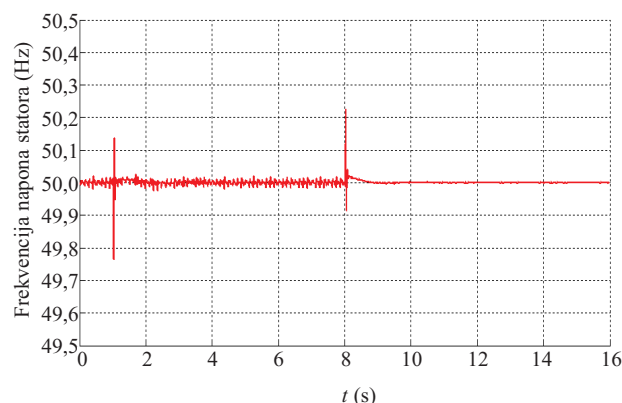
Slika 7. Hodograf fazora mps rotora pri stacionarnom simetričnom trofaznom režimu rada



Slika 8. Hodograf fazora mps rotora pri analiziranom stacionarnom asimetričnom režimu rada

Brzina obrtanja fazora mps u odnosu na rotor odgovara razlici ugaone brzine koja odgovara zadatoj frekvenciji i brzine obrtanja rotora. Ako je brzina obrtanja rotora (po paru polova) jednaka zadatoj ugaonoj učestanosti napona statora, onda su struje u rotorskom namotu jednosmerne i mašina radi kao sinhroni generator. Dakle, za svaku ugaonu brzinu rotora može se podesiti frekvencija rotorskih struja tako da frekvencija napona na statoru bude jednaka željenoj.

Na slici 9 prikazana je vremenska promena osnovne frekvencije napona statora u toku simulacije.

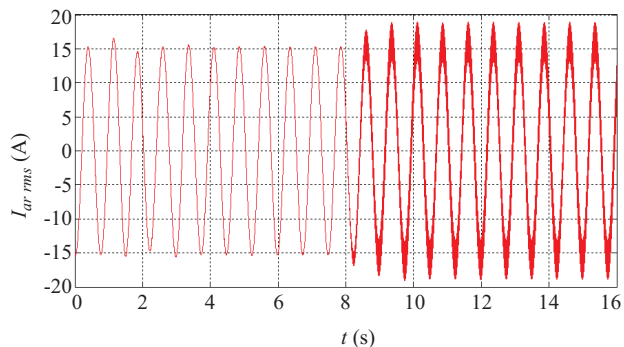


Slika 9. Vremenska promena frekvencije osnovnog harmonika napona statora u analiziranom simulacionom testu

Frekvencija je merena procesiranjem napona faze A kombinovanom *zero crossing* i *Furierovom* (Fourier) metodom [15]. U stacionarnim radnim režimima, i u slučaju simetrične i asimetrične potrošnje, maksimalno odstupanje frekvencije od zadate vrednosti (50 Hz) je ispod 20 mHz. U analiziranim tranzijentnim režimima odstupanje frekvencije je takođe u prihvatljivim granicama

Na slici 10 prikazana je vremenska promena struje u fazi a rotorskog namota. U analiziranom stacionarnom trofaznom režimu učestanost struja u rotorskim faznim namotima odgovara razlici između

nominalne i stvarne mehaničke ugaone brzine rotora. U asimetričnim režimima struje rotora treba da kompenzuju pored direktnog i inverzno obrtno polje koje se javlja kao reakcija asimetričnih struja statora. Iz tog razloga u struji rotora se u asimetričnim režimima javlja i komponenta čija je učestanost jednaka zbiru nominalne i stvarne brzine obrtanja rotora.

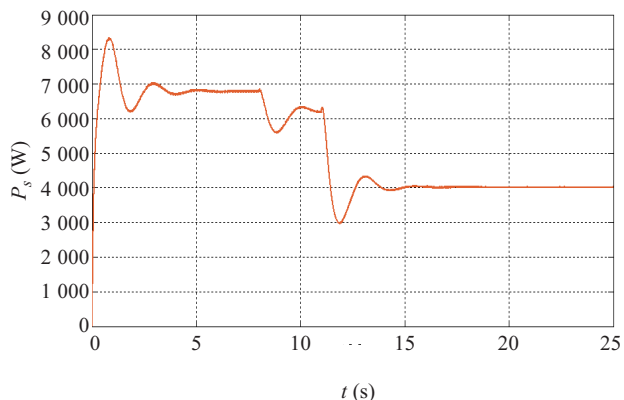


Slika 10. Struja u fazi a rotorskog namota u analiziranom simulacionom testu

4.2. Simulacija rada dvostrano napajanog indukcionog generatora pri promenljivoj brzini vetra

Predloženi model DFIG omogućava upravljanje brzinom obrtanja vetroturbinе tako da je u realnim uslovima promene brzine vetra moguće prilagođavati brzinu obrtanja turbine i održavati maksimalnu efikasnost rada vetroturbinе. U ovom simulacionom testu pretpostavljeno je da je snaga potrošnje konstantna i simetrična. Brzina vetra se u trenutku $t = 8$ s trenutno smanjila sa $v_1 = 9$ m/s na $v_2 = 7$ m/s.

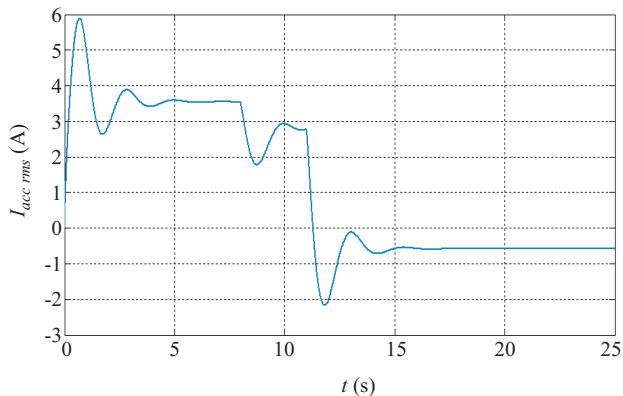
Na osnovu izmerene brzine vetra zadaje se željena brzina obrtanja turbine i preko regulatora punjenja baterije akumulatora menja se opterećenje DFIG i uspostavlja nova željena brzina obrtanja tur-



Slika 11. Promena električne snage na priključcima DFIG

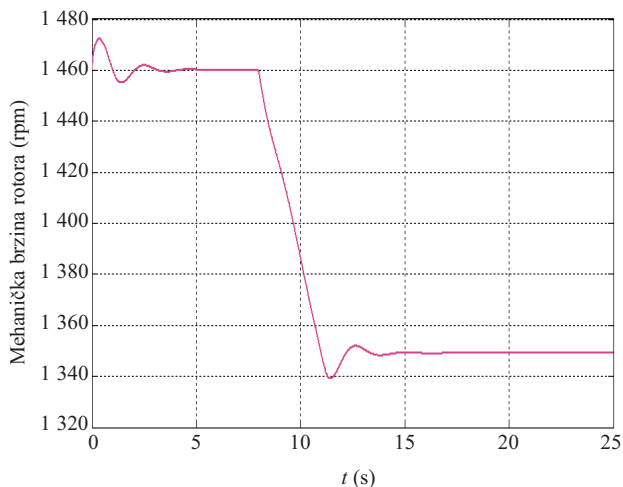
bine. Da se ne bi javili veliki mehanički udari na vratilu vetroturbinе i strujna preopterećenja baterije i pretvarača, potrebno je kontrolisati snagu punjenja baterije tako da promena brzine obrtanja turbine sa stare na novu referentnu vrednost ne bude nagla.

Na slici 11 prikazana je promena snage na priključcima DFIG, a na slici 12 promena struje punjenja akumulatora pri simuliranoj promeni brzine vetra. U trenutku $t = 0^+$ s generator turbine nije bio opterećen a vetroturbina se obrtala optimalnom brzinom za aktuelnu brzinu vetra.



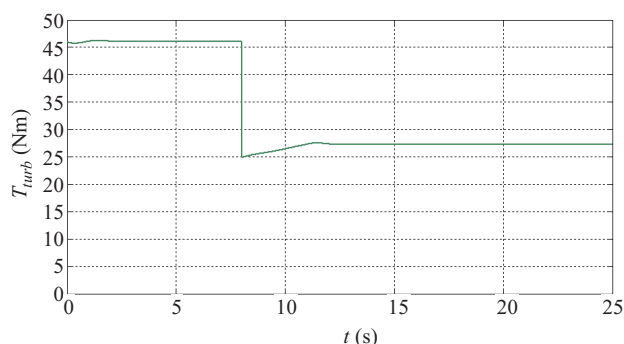
Slika 12. Promena struje punjenja baterije akumulatora

Pri pretpostavljenoj brzini vetra v_1 snaga DFIG je bila veća od zahtevane snage potrošača. Višak snage generisanja je preko pretvarača usmeren na punjenje baterije akumulatora. Nakon smanjenja brzine vetra snaga DFIG postaje nedovoljna da podmiri potrebe potrošača, pa se potrošnja delom dopunjava iz baterije akumulatora, slika 12. Da bi se očuvala optimalna efikasnost rada vetroturbinе, brzina obrtanja je smanjena u skladu sa karakteristikom turbine i zadatim promenama brzine vetra, slika 13.



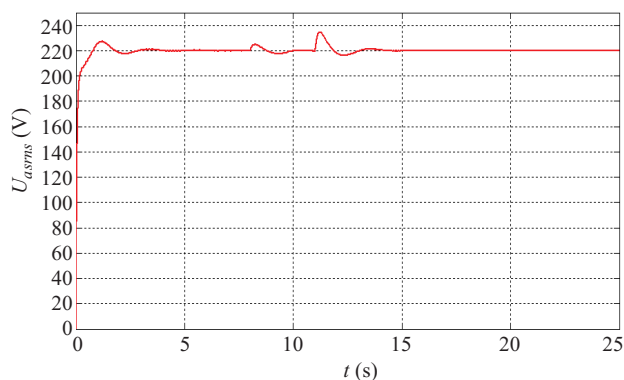
Slika 13. Promena brzine obrtanja rotora DFIG

Na slici 14 prikazana je promena obrtnog momenta vetroturbine pri analiziranoj promeni brzine vetra i brzine obrtanja turbine.

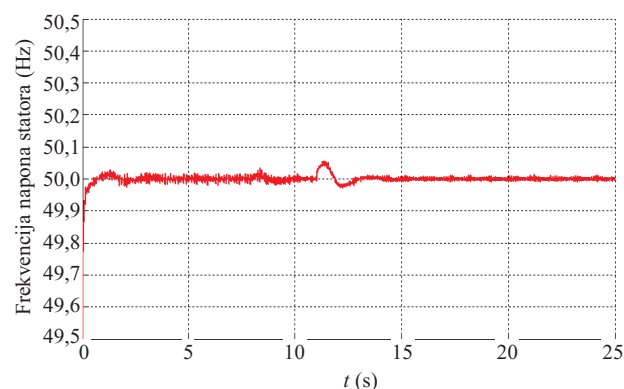


Slika 14. Promena momenta turbine

Na slici 15 prikazana je promena efektivne vrednosti napona faze A statora, a na slici 16 odgovarajuća promena frekvencije.



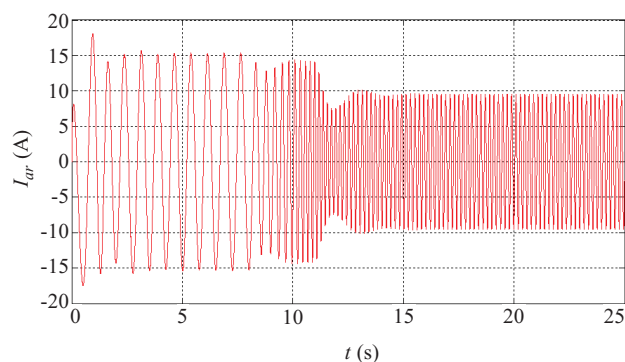
Slika 15. Promena efektivne vrednosti faznog napona statora



Slika 16. Promena frekvencije napona na statorskim priključcima

Na osnovu prikazanih grafika može se zaključiti da je regulacija frekvencije i napona funkcionalna i u uslovima naglih promena momenta vetroturbine.

Na slici 17 prikazana je vremenska promena struje u faznom namotaju rotora u toku sprovedenog simulacionog testa.



Slika 17. Vremenska promena struje u faznom namotaju rotora u toku sprovedenog testa

Pri većim brzinama vetra struja u rotorskom namotu je veća jer je reakcija indukta i pad napona na impedansi statorskog namota veći. Sa smanjenjem brzine vetra smanjuje se izlazna snaga DFIG, pa je reakcija indukta i pad napona manji, te je za održavanje napona potrebna manja struja rotora. Promena frekvencije struje rotora uslovljena je promenom brzine obrtanja rotora i zahtevom za očuvanje frekvencije napona statora.

5. ZAKLJUČAK

U radu su analizirani uslovi rada vetroagegata sa DFIG koji napaja izolovani potrošač. Osnovne pretpostavke na kojima se bazira razvijeni matematički i logički model su održavanje frekvencija i efektivne vrednosti napona na priključcima potrošača u realnim uslovima promene brzine vetra i promene snage potrošnje uključujući i asimetričan rad. Upravljanje frekvencijom i efektivnim vrednostima faznih napona statora je ostvareno kontrolom fazora mps struja rotorskog namota. Predloženi model upravljanja omogućava prilagođenje brzine obrtanja vetroturbine uslovima vetra i na taj način omogućava maksimalnu efikasnost rada vetroturbine u celokupnom opsegu radnih brzina vetra. Upravljanje brzinom obrtanja vetroturbine je ostvareno kroz kontrolu snage punjenja (pražnjenja) baterije akumulatora. U predloženoj šemi pretpostavljeno je da se baterija akumulatora nalazi u jednosmernom rotorskom međukolu **back to back** pretvarača. Na ovaj način baterija akumulatora istovremeno služi i kao izvor pobude za DFIG i kao akumulator za kompenzaciju debalansa između proizvodnje i zahtevane potrošnje električne energije. Ovakvo rešenje zahteva usklađivanje napona baterije akumulatora sa nominalnim naponom rotorskog namota, pri čemu su efikasnija rešenja sa većim naponom baterije akumulatora zbog smanjenih gubitaka u priključnim vezama. Simulacioni testovi koji su sprovedeni u ovom radu pokazuju dobru praktičnu primenljivost predloženog rešenja.

6. LITERATURA

- [1] European Wind Energy Association, Wind Force 12, www.ewea.org
- [2] D. Mikičić, Ž. Đurišić, B. Radičević: VETROGENERATORI – PERSPEKTIVNI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE Elektroprivreda, broj 4, 2002.
- [3] Ž. Đurišić, N. Rajaković, PERSPEKTIVNE TEHNOLOGIJE DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE, Energija, br. 2, jun 2005. ISSN: 0354-8651, pp. 151 – 159.
- [4] R. Datta, V. T. Ranganathan, VARIABLE-SPEED WIND POWER GENERATION USING DOUBLY FED WOUND ROTOR INDUCTION MACHINE – A Comparison With Alternative Schemes, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 17, No 3, september 2002.
- [5] Ž. Đurišić, N. Krajišnik, D. Božović, DVOSTRANO NAPAJANA ASINHRONA MAŠINA PRIMENJENA U VETROGENERATORIMA, Alternativni izvori energije i budućnost njihove primjene u zemlji – Treći naučni skup, Budva, 9-10. oktobar 2003. Zbornik radova – CANU, sveska 65, 2004.
- [6] Daniel Weisser, Raquel S. Garcia, INSTANTANEOUS WIND ENERGY PENETRATION IN ISOLATED ELECTRICITY GRIDS: CONCEPTS AND REVIEW, Renewable Energy 30 (2005) 1299-1308.
- [7] Andreas Poullikkas, IMPLEMENTATION OF DISTRIBUTED GENERATION TECHNOLOGIES IN ISOLATED POWER SYSTEMS, Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 30-56.
- [8] M. S. Vicatos, J. A. Tegopoulos, STEADY STATE ANALYSIS OF A DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR UNDER SYNCHRONOUS OPERATION, IEEE Trans. Energy Conversion 4 (3) (1989) 495-501.
- [9] Y. Kawabata, T. Oka, E. Ejiogu, T. Kawabat, VARIABLE SPEED CONSTANT FREQUENCY STAND-ALONE POWER GENERATOR USING WOUND-ROTOR INDUCTION MACHINE, Proceedings of the Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2004, IEEE, 2004, pp. 1778-1784.
- [10] D. G. Forchetti, J. A. Solsona, G. O. Garcia, M. I. Valla, A CONTROL STRATEGY FOR STAND-ALONE WOUND ROTOR INDUCTION MACHINE, Electric Power Systems Research 77 (2007) 163-169.
- [11] T. Thiringer and J. A. Dahlberg, PERIODIC POWER PULSATIONS FROM A THREE-BLADED WIND TURBINE, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 16, pp. 128-133, June 2001.
- [12] C. Carrillo, A. E. Feijóo, J. Cidrs, POWER FLUCTUATIONS IN AN ISOLATED WIND PLANT, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, March 2004.
- [13] M. Đurić, A. Čukarić, Ž. Đurišić, ELEKTRANE, ETF Beograd – ETF Kosovska Mitrovica, 2004.
- [14] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight, A REVIEW OF POWER CONVERTER TOPOLOGIES FOR WIND GENERATORS, Renewable Energy, Accepted for future publication, 2007.
- [15] Ž. Đurišić, RAZVOJ ALGORITAMA ZA DIGITALNE FREKVENCIJSKE RELEJE U USLOVIMA VELIKIH IZOBLIČENJA ULAZNIH SIGNALA, magistarski rad, ETF Beograd, 2006.

Rad je primljen u uredništvo 13. 09. 2007. godine



Milovan Milošević je rođen 1982. god. u Beogradu. Diplomirao je na Energetskom odsjeku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu (2006).

U toku 2007. godine radio je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu kao saradnik u nastavi pri Katedri za elektromotorne pogone i pretvarače. Trenutno je zaposlen u firmi Exor-ESI kao inženjer u sektoru za projektovanje i puštanje u rad regulisanih elektromotornih pogona.



Željko R. Đurišić je rođen 1972. godine u Beranama. Diplomirao je i magistrirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu (1999. i 2006). Radi na Katedri za elektroenergetske sisteme Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu kao asistent na predmetima: Elementi EES-a, Razvodna postrojenja, Elektrane, Digitalne relejne zaštite EES-a, Kvalitet električne energije, Obnovljivi izvori energije i Mehanika. Do sada je publikovao oko 70 stručnih i naučnih radova i učestvovao u realizaciji više domaćih i međunarodnih projekata i studija. Koautor je dve knjige.

Dragoslav Perić

Tehnički aspekti neovlašćenog korišćenja električne energije

Stručni rad

UDK: 621.311.1; 537.214; 621.317.786

Rezime:

U radu su sistematizovani i opisani mnogobrojni postupci i tehnike neovlašćenog korišćenja ili krađe električne energije. Opisane su postojeće i predložene neke nove metode za pokretanje postupka kontrole i potvrđivanja neovlašćenog korišćenja električne energije. Predložena je klasifikacija i označavanje slučajeva kao i preventivne tehničke mere za sprečavanje neovlašćenog korišćenja električne energije.

Ključne reči: krađa električne energije, neovlašćeno korišćenje električne energije, distributivne mreže, niskonaponska mreža, brojila električne energije

Abstract:

TECHNICAL ASPECTS OF UNAUTHORIZED USAGE OF ELECTRICAL ENERGY

The paper describes and systemizes the numerous ways and technical approaches applied for unauthorized usage or theft of electrical energy. The available and some new methods for supervision, inspection and technical means for detecting and indicating the unauthorized usage of electrical energy are presented. An appropriate classification of various cases of malusages and some technical preventive measures are proposed.

Key words: theft of electrical energy, unauthorized usage of electrical energy, distribution networks, low voltage networks, electricity meter

1. UVOD

Neovlašćeno korišćenje ili krađa električne energije (EE) u porastu je u većini regiona u svetu i posebno je karakteristična za države sa društvenim krizama [1, 2]. Postoje različiti aspekti neovlašćenog korišćenja EE, kao što su pravni [3], etički [4] i organizacioni [5]. U ovom radu se razmatraju tehnički aspekti neovlašćenog korišćenja EE, koji su u literaturi slabo obrađeni, a dosta prisutni u usmenim stručnim saopštenjima.

U prvom delu rada sistematizuju se i opisuju postupci i tehnike neovlašćenog korišćenja EE, prven-

stveno načini priključenja na niskonaponsku (NN) distributivnu mrežu. Drugi deo rada bavi se metodama otkrivanja neovlašćenog korišćenja EE, dok se u trećem i četvrtom delu predlaže klasifikacija i označavanje slučajeva neovlašćenog korišćenja EE i predlažu preventivne tehničke mere za njihovo sprečavanje.

2. POSTUPCI I TEHNIKE NEOVLAŠĆENOG KORIŠĆENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Postupci i tehnike neovlašćenog korišćenja EE mogu se prema načinu priključenja i merenja svrstati u četiri osnovne kategorije:

Prof. dr Dragoslav Perić, dipl. ing. el. – Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, 11 000 Beograd, Vojvode Stepe 283

- Neovlašćeno priključenje na NN mrežu ili NN instalacije bez merenja (A);
- Neovlašćeno priključenje na NN mrežu sa delimičnim merenjem (B);
- Sprečavanje ispravne primene tarifnog stava (C) i
- Sprečavanje ispravnog rada brojila (D).

U zgradama su navedene slovne oznake postupaka i tehnika koje se koriste u narednom tekstu. U radu se razmatraju samo priključenja na NN mrežu i odgovarajuća merenja.

2.1. Neovlašćeno priključenje na NN mrežu ili instalacije bez merenja (A)

Pod neovlašćenim priključenjem bez merenja podrazumevaju se priključenja koja nisu izvedena u blizini brojila električne energije. Ovde se razlikuju dve osnovne kategorije:

- Energija se ne meri i ne naplaćuje na drugom mestu (A1) i
- Energija se meri i naplaćuje na drugom mestu (A2).

U prvom slučaju radi se o direktnom priključenju na, po pravilu, nadzemnu NN mrežu. Obično se radi sa improvizovanim sredstvima, kao što su metalne kuke na koje je vezan provodnik za priključenje, koje se drvenim motkama nabacuju na provodnike NN mreže. Kada se ostvari spoj sa provodnikom dodaje se teg, na primer cigla, kojim se zateže provodnik i ostvaruje relativno dobar električni kontakt. Energija koju potroše ovako priključena trošila ne utiče na povećanje nijednog računa za utrošenu električnu energiju i pripisuje se tehničkim gubicima, čime se prikriva prava priroda ovih gubitaka.

U drugom slučaju priključak se ostvaruje iza brojila nekog drugog potrošača, priključenjem na provodnike njegove instalacije. Obično se priključuje na javne ili zajedničke instalacije stepenišnog ili uličnog osvetljenja, instalacije opšte potrošnje stambenih zgrada i slično. Tipični primeri su priključivanja TA peći na stepenišno osvetljenje ili priključenje frižidera za uličnu prodaju na mrežu uličnog osvetljenja. Pored priključenja na javne i zajedničke instalacije, postoje i slučajevi priključivanja na instalacije drugih potrošača, kao što je napajanje jedne faze instalacije stana iza susednog brojila u zajedničkom merno-razvodnom ormanu. Energija koju potroše ovako priključena trošila utiče na povećanje računa za električnu energiju ali je takvo povećanje teško otkriti.

Otkrivanje neovlašćenog priključenja u ovoj kategoriji moguće je vizuelnom kontrolom. Pokretanje ovakve kontrole, međutim, otežano je jer ne postoji jasno zainteresovana strana koja bi postupak otkrivanja pokrenula.

2.2. Neovlašćeno priključenje na NN mrežu sa delimičnim merenjem (B)

Neovlašćeno priključenje sa delimičnim merenjem (B) je najčešći oblik neovlašćenog priključenja, gde se delovanjem na brojilo i uređaje oko brojila obezbeđuje da se ne meri ukupna, već samo deo potrošene električne energije.

Prema trajanju i zahvatu mogu se razlikovati tri sledeće kategorije:

- Trajno uključenje dela trošila bez merenja (B1);
- Povremeno uključenje dela trošila bez merenja (B2) i
- Povremeno uključenje svih trošila bez merenja (B3).

1.2.1. Trajno uključenje dela trošila bez merenja (B1)

Trajno uključenje dela trošila bez merenja (B1) sprovodi se priključenjem pre brojila po pravilu trošila velike snage, kao što su TA peći, kotlovi za centralno grejanja itd. Mesto priključenja se maskira tako da se teško otkriva vizuelnim pregledom. Naročito se teško otkrivaju priključenja koja se izvode u fazi izgradnje objekta, odnosno kada se zvanično priključuje na mrežu nepotpuno završeni objekat.

2.2.2. Povremeno uključenje dela trošila bez merenja (B2)

Kod *povremenog uključjenja dela trošila bez merenja (B2)* pre brojila se pravi odvod na koji se povremeno, preko prekidača ili sklopke uključuju potrošači. Sklopkom se upravlja preko sakrivenog, prekidača. Sklopka je po pravilu uključena, a isključuje se ukoliko se pojave kontrolori neovlašćene potrošnje. Više korišćene opreme u ovom slučaju zahteva pažljivije maskiranje mesta priključenja.

2.2.3. Povremeno uključenje svih trošila bez merenja (B3)

Povremeno uključjenje svih trošila bez merenja (B2) ostvaruje se povremenim premošćavanjem brojila. U paralelne grane šeme, onu sa brojilom i onu bez brojila, postavljaju se sklopke koje se naizmenično uključuju ili isključuju. Alternativni način je da se koristi samo jedna bistabilna sklopka. Sklopkama se upravlja preko sakrivenog prekidača i tako se podešava deo potrošene energije koji će biti izmeren. Ukoliko se pojave kontrolori neovlašćene potrošnje tajni prekidač služi da se sva potrošnja neprimetno preusmeri preko brojila. Više korišćene

opreme u ovom slučaju zahteva još pažljivije maskiranje mesta priključenja.

2.2.4. Elementi opreme i tehnike koje se koriste kod neovlašćenog priključenja sa delimičnim merenjem

Kod neovlašćenog priključenja sa delimičnim merenjem uvek postoji dodatna grana u šemi preko koje se tok energije preusmerava van brojila. U ovoj grani koriste se određeni elementi instalacione opreme i tehnike njihovog povezivanja i korišćenja, od kojih su najčešći sledeći:

- Priključak na napojni vod pre brojila;
- Osigurač ili automatski instalacioni prekidač;
- Sklopka ili ručni prekidač;
- Sakriveni prekidač za isključenje sklopke i
- Napajanje komandnog kola sklopke iza brojila.

Priključak na napojni vod pre brojila ostvaruje se sa i bez prekidanja voda. Kada se vod ne prekida sa njega se pažljivo skida izolacija, upređanjem provodnika ostvaruje i izoluje priključak. Najčešće se vod dodatne grane izvodi sa druge strane zida, čime se ostvaruju dobri uslovi za maskiranje priključka – nikakve intervencije nisu vidljive sa strane zida na kojoj se nalazi napojni vod. Na sličan način često se ostvaruje i priključak iz kablovske priključne kutije (KPK). Kada se vod prekida potrebne su i odgovarajuće redne stezaljke čime se ostvaruje bolji kontakt i otežava maskiranje priključka. Priključci na napojni vod uglavnom se izvode veoma stručno, osim u nekim slučajevima priključenja bez prekida napojnog voda.

Osigurač ili automatski instalacioni prekidač skoro obavezno postoje, s obzirom da se neovlašćeno priključuju trošila veće snage.

Sklopka ili ručni prekidač služe za uključivanje i isključivanje neovlašćenog dela potrošnje. Primena sklopke daje mnogo veće mogućnosti, kao što je korišćenje sakrivenog prekidača za isključenje sklopke pomoću koga se neprimetno može isključiti neovlašćeni deo potrošnje EE u situaciji kada naiđu kontrolori neovlašćene potrošnje.

Jedan od postupaka koji primenjuju pomenuti kontrolori je da prvo isključe glavni prekidač (ograničavač snage), a potom traže trošilo koje je još pod naponom, što je moguće samo ako je ono neovlašćeno priključeno. Ukoliko se, međutim, *komandno kolo sklopke napoji iza brojila*, prilikom isključenja glavnog prekidača automatski će se isključiti i sva neovlašćena potrošnja, što pomenuti postupak kontrole čini potpuno neefikasnim.

Opisana tehnička rešenja koja se primenjuju pri neovlašćenom korišćenju električne energije ukazuju na visok nivo stručnosti osoba koja ova rešenja

realizuju, među kojima se verovatno nalaze i radnici distributivnih preduzeća. Druga karakteristika je da se koristi dosta opreme relativno velikih dimenzija (osigurači, sklopke) koje nije jednostavno sakriti i maskirati, pa se mogu lako otkriti vizuelnim pregledom.

2.3. Sprečavanje ispravne primene tarifnog stava (C)

Sprečavanje ispravne primene tarifnog stava (C) postiže se delovanjem na sledeće uređaje u mereno-razvodnom ormanu (MRO):

- Ograničavač snage (C1);
- Strujni transformator (C2);
- Brojilo (C3);
- Mehanički uklopni sat (C4);
- Elektronski uklopni sat (C5);
- Prijemnik mrežno-tonske komande (prijemnik MTK) (C6) i
- Prijemnik radio-tonske komande (prijemnik RTK) (C7).

Ograničavač snage (C1) je automatski instalacioni prekidač (jedan ili tri za jednofazni, odnosno trofazni priključak) koji služi za ograničavanje vršne snage potrošača. Na osnovu naznačene struje ograničavača određuje se tarifni stav (cena) za obračun potrošene električne energije. Sprečavanje ispravne primene tarifnog stava sastoji se u ugradnji ograničavača sa lažnim natpisom na koji je upisana manja naznačena struja od stvarne, što se ne može otkriti vizuelnim pregledom.

Strujni transformator (C2) odobrenog prenosnog odnosa može se zameniti transformatorom većeg prenosnog odnosa uz zadržavanje starih natpisnih pločica sa podacima, slično kao kod ograničavača snage.

Delovanje na ostale navedene uređaje zasniva se na sprečavanju ispravne primene tarifnog stava na takav način da se potrošnja registruje sa nižim, za potrošača jeftinijim tarifnim stavom. Promene u šemama veza treba izvršiti unutar plombiranih uređaja ili delova MRO. Plombe se konstruišu tako da se delovanje na njih može otkriti vizuelnim pregledom oštećenja na plombama. Međutim, organizovanje sveobuhvatnog periodičnog pregledanja plombi nije jednostavan zadatak, s obzirom na veliki broj potrošača i brojila. Drugi način za otkrivanje sprečavanja ispravne primene tarifnog stava je analiza izveštaja o potrošnji u dužem vremenskom periodu sa ciljem da se otkriju potrošači sa naglim padom potrošnje u skupljoj tarifi i kod njih izvrši kontrola neovlašćenog korišćenja električne energije [6].

Kod *prijemnika RTK* sprečavanje ispravne primene tarifnog stava može se postići i ometanjem ra-

dio signala prilikom izdavanja komande za promenu, što se obično lako onemogućava odgovarajućom strukturom komande (na primer, komanda se može izdavati više puta).

Sistem atestiranja razmatranih uređaja u MRO značajno utiče na sprečavanje ispravne primene tarifnog stava.

2.4. Sprečavanje ispravnog rada brojila (D)

Za sprečavanje ispravnog rada brojila uglavnom se primenjuje

- Promena šeme mernih namotaja brojila (D1);
- Mehaničko blokiranje obrtnih delova brojila (D2) i
- Delovanje na brojilo jakim magnetnim poljem (D3).

Opisi koji slede odnose se najviše na indukcionska električna brojila, dok iskustva specifična za elektronska brojila još nisu sakupljena.

2.4.1. Promena šeme mernih namotaja brojila (D1)

Promena šeme mernih namotaja brojila (D1) ostvaruje se delovanjem na strujne (D11) i naponske merne namotaje brojila (D12). U oba slučaja potrebno je pristupiti plombiranom delu brojila, što se postiže raskidanjem plombe i njenim provizornim vraćanjem u normalno stanje. Drugi način je oštećenje poklopca u donjem delu brojila i kasnije maskiranje oštećenja, na primer nalepnicom sa natpisom (ime i prezime, broj stana i slično), sa izgovorom kako se tako pomaže čitačima da identifikuju brojilo.

Delovanje na strujne merne namotaje (D11) sastoji se u promeni priključnih krajeva jednog ili više strujnih namotaja i time promeni smer proticanja struje kroz njih. Kada se promene priključci svih strujnih namotaja (jedan kod jednofaznog ili sva tri kod trofaznih brojila), obrtni disk indukcionih brojila se obrće u suprotnom smeru i registruje se negativna potrošnja. Kada se kod trofaznih brojila, pod pretpostavkom da su opterećenja svih faza jednaka, promeni smer kroz strujni namotaj jedne faze, registrovana potrošnja se umanjuje za trećinu, a kada se promeni smer kroz dva strujna namotaja, registruje se kao negativna jedna trećina potrošnje. Očigledno je da se najteže otkriva situacija kada se registruje potrošnja umanjena za trećinu.

Delovanje na naponske merne namotaje (D12) sprovodi se sprečavanjem napajanja jednog ili više naponskih namotaja (D121) ili njihovim pregorevanjem (D122). Naponski merni namotaj brojila priključuje se sa jedne strane kraj strujnog namotaja preko karakteristične kontaktne pločice. Ovaj priključak se može staviti van funkcije pomeranjem kontaktne pločice (D1211), postavljanjem izolacio-

nog umetka preko pločice (D1212) ili lakiranjem pločice izolacionim lakom (D1213). Pregorevanje naponskog namotaja (D122) najlakše se postiže njegovim priključivanjem na mali napon jednosmerne struje, čime se, zbog izostanka induktivnog otpora, ostvaruju velike struje i lokalizovano zagrevanje koje trajno oštećuje namotaj. Opisane intervencije se kod trofaznih brojila mogu izvesti na jednom ili više namotaja čime se isključuje registrovanje odgovarajućeg dela potrošnje.

2.4.2. Mehaničko blokiranje obrtnih delova brojila (D2)

Mehaničko blokiranje obrtnih delova brojila (D2) indukcionih brojila odnosi se na blokiranje aluminijumskog diska ili brojčanika. Obično se kroz oklop brojila buši mala rupa i kroz nju ubacuje pomoćni predmet (žica, igla, plastična nit i sl.) kojim se blokira obrtanje diska ili brojčanika. Teži se da rupica i pomoćni predmet budu što manje uočljivi, da se pomoćni predmet može vaditi (na primer i automatski sa otvaranjem vrata MRO) i ponovo stavljati.

2.4.3. Delovanje na brojilo jakim magnetnim poljem (D3)

Delovanje na brojilo jakim magnetnim poljem (D3) umanjuje tačnost brojila, a postiže se jakim stalnim magnetom (D31) ili na drugi način stvorenim dovoljno jakim magnetnim poljem (D32).

3. METODE OTKRIVANJA NEOVLAŠĆENOG KORIŠĆENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Za otkrivanje neovlašćenog korišćenja električne energije koriste se sledeći postupci:

- Analiza računa i drugih podataka o potrošnji električne energije (R);
- Prijava (P);
- Vizuelni pregled (V) i
- Merenje (M).

Prva tri navedena postupka mogu da posluže za pokretanje postupka za kontrolu, dok se poslednja dva koriste za potvrđivanje (dokaz) neovlašćenog korišćenja EE.

Analiza računa i drugih podataka o potrošnji električne energije (R) ima za cilj da smanji listu potrošača koji se kasnije kontrolišu na drugi način. Analiza podataka iz računa za električnu energiju (R1) se odnosi na podatke o mesečnoj potrošnji i njihovo poređenje sa ranijom potrošnjom istog potrošača i sa aktuelnom potrošnjom drugih potrošača iste kategorije iz susedstva [6]. Rezultat analize je li-

sta (sumnjivih) potrošača koje treba kontrolisati. Međutim, na listi se mogu naći i potrošači koji su iz nekih drugih razloga promenili strukturu potrošnje (na primer, prelazak na grejanje na gas), pa treba težiti da računarski programi koji prave liste koriste što veći broj podataka. Na listi se, međutim, neće naći potrošači koji su pre tehničkog prijema realizovali neku od tehnika neovlašćenog priključenja, tako da se podaci o stvarnoj potrošnji nikada nisu nalazili na računima – stoga se navedeni pristup ne može koristiti kao jedini za pravljenje liste potrošača koje treba kontrolisati.

Analiza podataka o kontrolnom merenju energije (R2) zasniva se na postavljanju dodatnog brojila koje meri energiju koju konzumira NN mreža. Ovde se kao NN mreža podrazumeva: priključak jednog ili više potrošača EE (R21), jedan ili više NN izvoda iz TS SN/NN (R22) ili svi NN izvodi koji se napajaju iz jednog transformatora u TS SN/NN (R23). Energije izmerene brojiлом u nekom vremenskom intervalu, povezane su sledećom relacijom:

$$W_{NN} = \sum_n W_i + W_J + W_X \quad (1)$$

gde je:

W_{NN} – energija izmerena kontrolnim brojiлом;

W_i – energija i -tog potrošača;

n – ukupan broj potrošača NN mreže;

W_J – energija Džulovih gubitaka NN mreže i

W_X – neovlašćeno potrošena energija.

Očitavanje pokazivanja brojila treba da bude istovremeno, odnosno u dovoljnom kratkom intervalu, što nije jednostavno ostvariti, osim kada se radi o daljinskom očitavanju brojila, ili kada je broj potrošača mali. Energija Džulovih gubitaka NN mreže W_J može se izračunati razvojem i primenom odgovarajućih DMS funkcija [7]. Primenom (1) može se utvrditi da li na nekom delu NN postoji neovlašćena potrošnja.

Prijava moguće neovlašćene potrošnje (P) može da potekne od: građana – obično susednih potrošača (P1), radnika koji očitavaju stanje brojila (P2), radnika distribucije koji rade druge poslove (P3), isključujući radnike koji rade na otkrivanju neovlašćene potrošnje EE. Najveći broj prijavi potiče od susednih potrošača (P1), dok su ostale vrste prijavi slabo zastupljene, iako bi ovakva vrsta aktivnosti mogla da se organizuje uz male troškove. Na primer, radnici koji očitavaju stanje brojila bi mogli da samoinicijativno (P21) prijavljuju sumnjive potrošače ili da sistematski (P22), pri svakom očitavanju brojila, proveravaju jedan po jedan parametar značajan za neovlašćeno korišćenje EE (stanje plombi, vreme

na uklopnom satu i status tarifnog stava na brojiłu, stanje poklopaca brojila, itd.).

Vizuelni pregled (V) sprovode namenski formirane stručne ekipe – kontrolori neovlašćene potrošnje. Cilj pregleda je da se uoče tehnička oštećenja i nepravilnosti na kućnom priključku, MRO i instalaciji potrošača, učinjena radi neovlašćenog korišćenja električne energije. Neka od pomenutih oštećenja i nepravilnosti mogu se neposredno uočiti (V1), čime se neposredno dokazuje da postoji neovlašćeno korišćenje EE. Prilikom pregleda primenjuje se i isključivanje i uključivanje trošila (V2). Jedan pristup je da se isključi glavni prekidač, a potom traže trošila koja su još uvek uključena (V21). Ovaj pristup nije efikasan ako potrošač uspe da isključi trošila pre dolaska kontrolora, bilo ručno, bilo korišćenjem skrivenog prekidača za isključenje sklopke, napajanjem sklopke iza brojila i sl. Drugi pristup je da se isključe sva trošila, a potom jedno po jedno trošilo uključuje i isključuje (V22) – neovlašćeno priključeno trošilo je ono koje ne pokreće brojilo. Kada se isključivanjem i uključivanjem trošila (V21, V22) pronađe neovlašćeno priključeno trošilo, obično se potom pronađe i način na koji je priključenje izvedeno, što se smatra konačnim dokazom neovlašćenog korišćenja EE.

Merenje (M) je tehnika koja se primenjuje kada vizuelni pregled ne dovede do otkrivanja neovlašćenog korišćenja EE. Merenje se sprovodi raznim prenosnim mernim uređajima. Merenjem se može utvrditi ispravnost brojila (M1) i ograničavača snage (C1). Ne postoji sistematski pristup kojim bi se merenjem u svim slučajevima utvrdilo (dokazalo) neovlašćeno korišćenje EE, što je slučaj i sa vizuelnim pregledom.

4. KLASIFIKACIJA I OZNAČAVANJE SLUČAJEVA NEOVLAŠĆENOG KORIŠĆENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

U cilju lakše analize, utvrđivanja preventivnih mera i razvoja tehnika otkrivanja, slučajeve neovlašćenog korišćenja EE treba klasifikovati i označiti na odgovarajući način.

Pregled postupaka za kontrolu i potvrđivanje neovlašćenog korišćenja EE sa odgovarajućim oznakama, dat je u tabeli 1. Za pokretanje postupka za kontrolu primenjuju se postupci tipa R, P i V, a za potvrđivanje neovlašćenog korišćenja EE postupci tipa V i M. Pregled postupaka i tehnika neovlašćenog korišćenja EE sa odgovarajućim oznakama dat je u tabeli 2. Spisak postupaka u tabelama 1 i 2 nije konačan i može se dopunjavati.

Tabela 1.

Postupci za pokretanje kontrole i potvrđivanje neovlašćenog korišćenja EE

R Analiza računa i drugih podataka o potrošnji električne energije R1 Analiza podataka iz računa za električnu energiju R2 Analiza podataka o kontrolnom merenju energije R21 Jedan ili više potrošača EE R22 Jedan ili više NN izvoda iz TS SN/NN R23 Svi NN izvodi koji se napajaju iz jednog transformatora u TS SN/NN
P Prijava P1 Prijava od strane građana P2 Prijava od strane radnika koji očitavaju stanje brojila P21 Samoinicijativno P22 Sistematski P3 Prijava od strane radnika distribucije koji rade druge poslove
V Vizuelni pregled V1 Nepravilnosti koje se mogu neposredno uočiti V2 Isključivanje i uključivanje trošila V21 Isključivanje glavnog prekidača i traženje trošila koje se i dalje napaja V22 Isključenje svih trošila i traženje trošila koje ne aktivira brojilo
M Merenje M1 Utvrđivanje ispravnosti brojila

Tabela 2.

Postupci i tehnike neovlašćenog korišćenja EE

A Neovlašćeno priključenje na NN mrežu ili NN instalacije bez merenja A1 Energija se ne meri i ne naplaćuje na drugom mestu A2 Energija se meri i naplaćuje na drugom mestu
B Neovlašćeno priključenje na NN mrežu sa delimičnim merenjem B1 Trajno uključenje dela trošila bez merenja B2 Povremeno uključenje dela trošila bez merenja B3 Povremeno uključenje svih trošila bez merenja
C Sprečavanje ispravne primene tarifnog stava C1 Ograničavač snage C2 Strujni transformator C3 Brojilo C4 Mehanički uklopni sat C5 Elektronski uklopni sat C6 Prijemnik mrežno-tonske komande (MTK) C7 Prijemnik radio-tonske komande (RTK)
D Sprečavanje ispravnog rada brojila D1 Promena šeme mernih namotaja brojila D11 Delovanje na strujne merne namotaje brojila D12 Delovanje na naponske merne namotaje brojila D121 Sprečavanje napajanja jednog ili više naponskih namotaja D1211 Pomeranje kontaktne pločice D1212 Postavljanje izolacionog umetka preko kontaktne pločice D1213 Lakiranje kontaktne pločice izolacionim lakom D122 Pregorevanje jednog ili više naponskih namotaja D2 Mehaničko blokiranje obrtnih delova brojila D3 Delovanje na brojilo jakim magnetnim poljem D31 Delovanje stalnim magnetom D32 Delovanjem na drugi način stvorenim magnetnim poljem

Cifre koje opisuju elemente opreme i tehnike neovlašćenog priključenja

Prva cifra	0 Priključak na napojni vod <i>bez prekidanja</i> napojnog voda
	1 Priključak na napojni vod <i>sa prekidanjem</i> napojnog voda
Druga cifra	0 <i>Bez osigurača</i> ili automatskog instalacionog prekidača
	1 <i>Osigurač</i> ili automatski instalacioni prekidač
Treća cifra	0 <i>Ručni prekidač</i>
	1 <i>Slopka</i> sa sakrivenim prekidačem za isključenje sklopke
Četvrta cifra	0 Napajanje komandnog kola sklopke <i>ispred</i> brojila
	1 Napajanje komandnog kola sklopke <i>iza</i> brojila

Elementi opreme i tehnike koje se koriste kod neovlašćenog priključenja sa delimičnim merenjem (B) opisuju se sa četiri cifre (0 ili 1), čije je značenje prikazano u tabeli 3.

Svaki slučaj neovlašćenog korišćenja EE hronološki ima ranije opisana tri dela:

- pokretanje postupka za kontrolu neovlašćenog korišćenja EE,
- potvrđivanje neovlašćenog korišćenja EE i
- opis postupaka i tehnika neovlašćenog korišćenja EE.

Svaki slučaj neovlašćenog korišćenja EE opisuje se oznakom od četiri dela razdvojenih crticama, u obliku:

S99-S99-S99-1111,

gde **S** označava jedno od mogućih slova, **99** jednu ili više cifara od 1 do 9, a **1111** četiri cifre od 0 do 1. Na primer, oznaka

P1-V22-B1-1110

označava slučaj neovlašćenog korišćenja EE gde je kontrola pokrenuta na osnovu prijave građana (P1), neovlašćeno korišćenje je potvrđeno vizuelnim pregledom pri čemu je korišćena tehnika isključenja svih trošila i traženje trošila koje ne aktivira brojilo (V22); izvršeno je neovlašćeno priključenje trajnim uključenjem dela trošila bez merenja (B1) pri čemu je prekinut napojni vod pre brojila, ugrađen osigurač ili automatski instalacioni prekidač i sklopka čije se komandno kolo napaja ispred brojila.

Ukoliko se neki slučaj ne može opisati jednom šifrom, treba mu dodeliti potreban broj šifara.

5. PREVENTIVNE MERE ZA SPREČAVANJE NEOVLAŠĆENOG KORIŠĆENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Slučajevi neovlašćenog korišćenja EE zasnovani su na činjenici da je MRO i NN instalacija potrošača lako dostupna potrošačima, a teško dostupna radnicima distribucije – kontrolorima neovlašćenog

korišćenja EE. Imajući u vidu u radu opisane postupke i tehnike, mogu se predložiti sledeće *tehničke mere* za sprečavanje neovlašćenog korišćenja EE:

- Selektivno izmeštanje u javni prostor MRO stambenih objekata individualne gradnje;
- Detaljan tehnički pregled objekata pri priključenju na distributivnu mrežu i
- Analiza podataka o neovlašćenom korišćenju električne energije.

U vešespratnim objektima MRO se montira u nenastanjeni i lako pristupačnu prostoriju, kao što su ulazni hol i stepenišni prostor. U stambenim objektima individualne gradnje MRO se montira blizu ulaznih vrata sa nadstrešnicom, u pasažu, na otvorenoj terasi i sl. Kod nas odavno postoji ideja da se MRO izmesti izvan objekta i montira kao slobodnostojeći MRO na granici vlasništva ili na javnoj površini. Prednost ovakvog rešenja bi bilo značajno smanjenje mogućnosti neovlašćenog korišćenja EE, ali i sledeći nedostaci koji se navode u [8]:

- urbanistički – potreba za lokacijom i postoljem (temeljom);
- ekonomski – povećana cena, posebno ako se priključni objekat nalazi sa suprotne strane ulice ili puta;
- primena ograničavača snage bi bila neprihvatljiva za potrošače, pa bi mogli da koriste samo brojila sa merenjem angažovane snage i
- realno nije moguće izdvajanje instalacija za termičke potrošače i radi upravljanja opterećenjem (MTK i RTK).

Međutim, svi navedeni nedostaci nisu opšte važeći, tako da bi *selektivno izmeštanje u javni prostor MRO stambenih objekata individualne gradnje* bilo prihvatljivo kao preventivna mera. Na primer, u slučajevima skupih objekata, koji imaju masivne i ukrasne ograde svi navedeni nedostaci bi bili od manjeg značaja. Izmeštanje MRO bi bilo prihvatljivo i kod izgradnje novih naselja, kod potrošača koji su

prethodno neovlašćeno koristili električnu energiju itd.

Tehnički pregled objekata pri priključenju na distributivnu mrežu omogućava detaljnu proveru da li su pripremljeni neki postupci i tehnike neovlašćenog priključenja na distributivnu mrežu (A, B, C, D). Kasnije kontrole neovlašćenog korišćenja EE obično se obavljaju pri lošijim uslovima (ograničen pristup, ograničeno vreme). Dodatno, dobar prijemni tehnički pregled omogućava pokretanje postupka za kontrolu neovlašćenog korišćenja EE na osnovu analize podataka iz računa za električnu energiju (R1).

Analiza podataka o neovlašćenom korišćenju električne energije bazirana na klasifikaciji predloženoj u ovom radu mogla bi da ukaže na najčešće primenjene postupke i tehnike i podstakne razvoj odgovarajućih mera za sprečavanje neovlašćenog korišćenja EE.

6. ZAKLJUČAK

Mnogobrojni postupci i tehnike neovlašćenog korišćenja ili krađe električne energije opisani u radu ukazuju na stručan pristup počinilaca i potrebu za tretiranje tehničkih aspekata njihovih aktivnosti. Predložena je klasifikacija i označavanje slučajeva neovlašćenog korišćenja električne energije kao i njihovo prikupljanje i statistička obrada, kao jedna od preventivnih mera za sprečavanje neovlašćenog korišćenja električne energije. Kao preventivne tehničke mere predloženi su i selektivno izmeštanje u javni prostor MRO stambenih objekata individualne gradnje i detaljni tehnički pregled objekata pri priključenju na distributivnu mrežu.

7. LITERATURA

- [1] T. B. Smith, ELECTRICITY THEFT: A COMPARATIVE ANALYSIS, Energy Policy, Vol. 32, Issue 18, December 2004, pp 2067-2076.
- [2] K. Kovačević-Markov, ANALIZA GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI ERS ZA PERIOD 1998-2000. GODINE, Treće naučno-stručno savetovanje „Stanje, perspektive i pravci razvoja energetike Republike Srpske”, Banja Vrućica, Teslić, 04-05. 10. 2001.
- [3] D. Simonović, KRAĐA ELEKTRIČNE ENERGIJE I DRUGI DELIKTI OD ZNAČAJA ZA ELEKTROPRIVREDU”, MST Gajić, Beograd 1999.
- [4] D. Perić, I. Vlajić-Naumovska, M. Milanković, QUESTIONNAIRES ABOUT ETHICAL ASPECT OF UNAUTHORISED USAGE OF ELECTRICAL ENERGY, Second regional conference on electricity distribution, Serbia, Zlatibor, 2006.
- [5] S. Spahic, S. Cero, COMMERCIAL DISTRIBUTION LOSSES IN JP EPBIH AND THEIR MANAGING IN LATE TEN YEARS, Second regional conference on electricity distribution, Serbia, Zlatibor, 2006.
- [6] J. Spirić, A. Janjić, KORIŠĆENJE FUZZY LOGIKE ZA OTKRIVANJE KRAĐA KOD KUPACA ELEKTRIČNE ENERGIJE JEDNOTARIFNIM BROJILIMA, Elektroprivreda broj 4, 2006, pp-92-97.
- [7] D. Popović, D. Bekut, V. Treskanica, SPECIJALIZOVANI DMS ALGORITMI, DMS Group, Novi Sad, 2004.
- [8] M. Tanasković, T. Bojković, D. Perić, DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE, Akademska misao, Beograd, 2006.

Rad je primljen u uredništvo 18. 09. 2007. godine



Dragoslav M. Perić je rođen 1958. godine u Rači. Diplomirao je 1983. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, gde je i magistrirao 1989. godine na smeru Elektroenergetski sistemi i odbranio doktorsku tezu 1997. godine. Radi kao profesor na Visokoj školi elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u Beogradu i na Višoj poslovnoj školi strukovnih studija u Valjevu. Objavio je više naučnih i stručnih radova i knjiga. Bavi se elektrodistributivnim sistemima i primenom softverskih alata u projektovanju.

Strahil J. Gušavac,
Savo D. Đukić, Jelena M. Lukić i Ljiljana M. Krička

Ocena stanja temelja i stubova nadzemnog voda

Stručni rad
UDK: 624.153.542.2; 621.315

Rezime:

Rangiranje nadzemnih vodova u svrhu određivanja redosleda obnavljanja po RCM (reliability centered maintenance) metodi odlučivanja zasniva se na dve veličine, i to: oceni njegovog stanja i oceni značaja u prenosu električne energije. Uspešnost funkcionisanja nadzemnog voda zavisi od stanja svake od njegovih sastavnih komponenti, pa tako i od stanja nosećih elemenata voda : temelja i stubova. Pošto ne postoji način za egzaktno definisanje stanja ovih elemenata, problem se može okarakterisati kao loše strukturiran. U radu se predlaže lingvistički način izražavanje stanja ovih elemenata i korišćenje teorije fazi matematike za ocenu stanja. Za opis stanja temelja i stanja stuba uvedene su četiri fazi ocene, i to : zadovoljavajuće stanje, potrebno obnavljanje, potrebno pojačavanje i potrebna zamena. Razmatraju se stanja u kojima se ovi elementi mogu nalaziti, pa se na bazi toga sprovodi rangiranje njihovog stanja brojevima u opsegu od 0 do 100, i potom određuje pripadnost tog stanja prethodno uvedenim ocenama stanja. Cilj ocene stanja nosećih elemenata nadzemnog voda je utvrđivanje da li će oni biti u mogućnosti da po revitalizaciji obavljaju svoju funkciju i u narednom periodu eksploatacije nadzemnog voda. Ovakvim pristupom, zadržavanjem postojećih temelja i stubova, mogu se postići značajne uštede u investicijama. Sumirajući dobijenu ocenu stanja nosećih elemenata, sa ocenom stanja drugih komponenti, dobija se ukupna ocena stanja nadzemnog voda. Dobijena ocena omogućuje rangiranje nadzemnih vodova i na bazi toga određivanje prioriteta pri njihovom obnavljanju.

Ključne reči: ocena stanja, nadzemni vod, stub, temelj, fazi matematika, RCM.

Abstract:

ESTIMATION OF CONDITION OF OVERHEAD LINE TOWER AND FOUNDATION

Ranging of overhead lines for the purpose of determining the sequence of revitalization as per RCM (reliability centered maintenance) decision making method is based on two parameters, namely: estimation of their condition and assessment of their importance in electrical energy transmission. Good functioning of the overhead line depends on the condition of each of its components, as well as on the condition of overhead line supporting elements - foundation and tower. As there is no way to exactly define the condition of those elements, the problem may be characterized as ill-structured. The paper proposes linguistic method of defining the condition of these elements and a mathematical fuzzy theory for condition estimation. To describe the foundation and tower condition four fuzzy grades have been introduced, namely: satisfactory condition, revitalization required, reinforcing required and replacement required.

Mr Strahil J. Gušavac, dipl. ing. el., Savo D. Đukić, dipl. ing. el., Jelena M. Lukić, dipl. ing. el., Ljiljana M. Krička, dipl. ing. el.
– Fakultet tehničkih nauka, 21 000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6

Conditions in which these elements may be found are considered and thereupon the sequence of their conditions is set up in the range from 0 to 100 and, then, it is defined where conditions belong in the scale of previously established condition estimates. The aim of estimating the condition of the overhead line supporting elements is to determine whether they will, upon revitalization, be able to perform their function throughout the further period of the overhead line exploitation. By such approach, by replacing a conductor and conserving the existing foundation and towers, significant investment savings can be made. Adding the derived estimation of condition of supporting elements to the other components condition, a total estimation of the overhead line condition is obtained. The obtained estimation enables ranging of overhead lines, which will serve as a basis for determining priority in their revitalization.

Key words: condition estimation, overhead line, tower, foundation, fuzzy mathematics, RCM

1. UVOD

Približavanjem kraja životnog veka nadzemnog voda povećavaju se troškovi njegove eksploatacije, kao posledica: duže trajanje korektivnog održavanja, povećanja broja ugrađenih rezervnih delova i češćih pojava kvarova. Zato je ovim vodovima potrebna češća inspekcija. Ovo takođe za posledicu ima povećavanje neraspoloživosti i opadanje raspoloživosti napajanja postrojenja koja su njime povezana. Tako ovi vodovi postaju ograničavajući elementi za funkcionisanje elektroenergetskog sistema, jer izazivaju negativne posledice po pouzdanost njegovog rada.

Jedna od bitnih funkcija službe održavanja je dijagnostika stanja ostarelih vodova i određivanje načina eliminisanja problema povezanih sa njihovim starenjem. Ovo se izvodi na bazi sagledavanja istorijata njihovog rada i inspekcije stanja delova nadzemnog voda primenjujući eventualna dodatna ispitivanja njegovih elemenata na terenu ili u laboratoriji. Na bazi rezultata ispitivanja bira se strategija

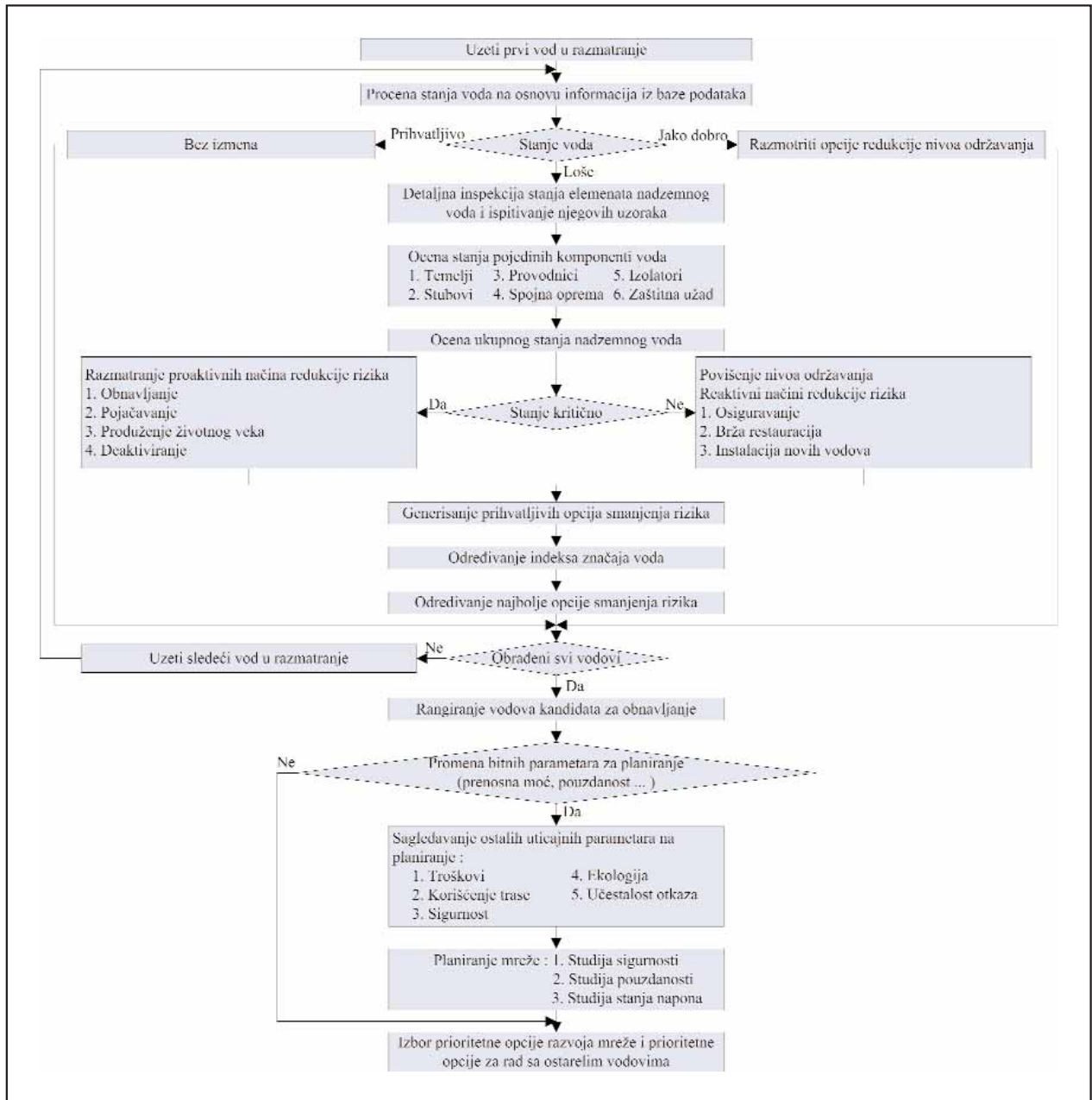
njegove obnove da bi se eliminisali nepovoljni efekti otkaza. U tabeli 1 [1] dat je pregled akcija koje se mogu preduzimati u cilju rešavanja problema povezanih sa starenjem nadzemnih vodova. Načini redukcije rizika rada ostarelih vodova dele se u grupu proaktivnih (njima se smanjuje verovatnoća kvara) i reaktivnih akcija (ne utiču na verovatnoću pojave kvara). Kada je rizik od kvara previsok usled predvidivih događaja, njegovo smanjenje se vrši proaktivnim akcijama. Kada je rizik previsok usled nepredvidivih događaja, od interesa su reaktivne akcije. Ako su potencijalne posledice kvara visoke, mogu biti potrebne i proaktivne i reaktivne akcije radi smanjenja rizika od ispada voda, zbog njegovog lošeg stanja.

Prerana akcija održavanja na nadzemnom vodu koji ima zadovoljavajuće karakteristike, rezultuje nepotrebnim povećanjem uloženi novčanih sredstava, dok kašnjenje sa izvođenjem adekvatnih akcija rezultuje lošom pouzdanošću i povećanjem troškova usled povećanog broja otkaza.

Tabela 1.

Akcije koje se provode na nadzemnim vodovima u zavisnosti od njihovog stanja

Menadžerske odluke	Izdaci	Verovatnoća kvara	Uticaj na posledice kvara komponente
<i>Rizik od kvara je previsok – smanjenje rizika proaktivnim načinima</i>			
Održavanje	Povećanje godišnjih troškova	Opada	Ne
Obnavljanje	Povećanje investicija	Opada	Ne
Produženje životnog veka	Povećanje investicija	Opada	Ne
Pojačavanje	Povećanje investicija	Opada	Ne
Deaktiviranje	Smanjenje godišnjih troškova	Nula	Lokalne posledice
<i>Rizik od kvara je previsok – smanjenje rizika reaktivnim načinima</i>			
Brza restauracija	Povećavanje investicija	Ne	Opadaju posledice po sistem
Osiguranje	Povećavanje godišnjih troškova	Ne	Opada
Izgradnja novih vodova	Povećavanje investicija	Ne	Opada
<i>Prihvatljiv rizik</i>			
Bez dodatnih akcija	Bez izmene	Ne	Ne
<i>Rizik od kvara je prenizak – povećanje rizika</i>			
Redukcija održavanja	Smanjenje godišnjih troškova	Raste	Ne
Povećanje prenosne moći bez pojačavanja nosećih elemenata	Povećanje investicija	Raste	Raste



Slika 1. Blok dijagram algoritma za menadžment nadzemnim vodovima

Ako se ne predviđa izvođenje proaktivnih akcija održavanja, tada je potrebno razmotriti koje od akcija treba odabrati da bi se rad nadzemnog voda u periodu pre preduzimanja proaktivnih opcija redukcije rizika doveo u podnošljive granice. Ovo znači intenziviranje održavanja, koje se svodi na neophodna obnavljanja delova voda, za koje je inspekcijom utvrđeno da su u lošem stanju.

Na slici 1 dat je predlog algoritma za menadžment nadzemnim vodovima. Na osnovu dostupnih informacija iz baze podataka [2] vrši se ocena stanja nadzemnog voda brojem u opsegu od 0 do 100. Što

je rang stanja komponente bliži vrednosti 0 to znači da je ona u boljem stanju. Ako je vrednost ocene manja od granično usvojene (ovde se predviđa vrednost 60), vrši se njegoa detaljna inspekcija. Ako se utvrdi da je stanje nadzemnog voda ili neke njegove komponente kritično, razmatra se da li poboljšavanje njihovih parametara treba vršiti proaktivnim ili reaktivnim akcijama redukcije rizika. Kod RCM metoda [3, 4] odlučivanja, pored ocene stanja, određuje se i ocena indeksa značaja nadzemnog voda [5]. Ocena indeksa značaja vrši se preko njegovog uticaja na količinu neisporučene energije koja je po-

sledica mesta i uloge nadzemnog voda u sistemu kao i njegovog trenutnog stanja. Na bazi dobijenih vrednosti vrši se rangiranje vodova u pogledu prioriteta obnavljanja. U zavisnosti od ocene stanja i značaja voda vrši se izbor načina održavanja i vremenskog perioda u kome ga treba izvršiti, a u skladu sa potrebnim finansijskim ulaganjima [6].

Ako se predviđa promena bitnih parametara voda za aspekt planiranja (stopa otkaza, prenosna mogućnost itd.), potrebno je prilagoditi proces planiranja mreže stavovima asset menadžera u pogledu ocene stanja nadzemnih vodova. Zato se vrši prilagođavanje procesa planiranja trenutku i načinu obnavljanja nadzemnog voda [7, 8].

2. STANJE NOSEĆIH ELEMENATA NADZEMNOG VODA

Da bi se omogućio očekivani eksploatacioni vek temelja i stubova od oko 80 godina [5] (što je realno ostvariv cilj), kako bi se omogućila zamena provodnika radi revitalizacije nadzemnog voda, treba izvršiti detaljnu analizu njihovog stanja i odabrati akcije koje na svakom od njih treba izvršiti da bi se taj predviđeni životni vek ostvario. U narednom tekstu se sagledavaju uzročnici lošeg stanja temelja i stubova.

2.1. Stanje temelja

Temelj je jedan od najvažnijih elemenata nadzemnog voda. Preko njega se opterećenje provodnika, zaštitne užadi, stubova i ostalih elemenata prenosi na tlo. Temelji mogu biti armirano-betonski (obično za vodove visokih napona) ili izvedeni običnim ukopavanjem stuba u zemlju (mahom za vodove srednjih i nižih napona). U ovom radu će se razmatrati stanja armirano-betonskih temelja. Naravno, u potpunosti analogno razmatranje se može izvesti i za temelje izvedene direktnim ukopavanjem stubova u zemlju. Narušena stanja armirano-betonskih temelja mogu se podeliti u tri osnovne grupe, to su:

A. nedostaci nastali za vreme ili neposredno nakon izgradnje koji nastaju:

- usled prebrzog sušenja betona;
- plastičnih prslina, i
- termičkih prslina.

B. nedostaci nastali hemijskim i atmosferskim uticajima:

- razaranje kiselinom – dovodi do povećanja poroznosti cementa;
- reakcije sa alkalnim agregatima – prouzrokuju bušenje i pukotine na površini betona;

- karbonizacija – dovodi do gubitka alkaliteta cementne košuljice i do ozbiljnih posledica po čelik u betonu;

- razaranje hloridima – dovodi do pucanja cementne košuljice što olakšava koroziju armature u betonu;

- kristalizacija soli – prouzrokuje bliske pukotine i dovodi do listanja paralelnog površini betona i

- nagrizanje sulfatima – dovodi do povećanja zapremine materijala i razbijanja cementne košuljice na površini.

C. fizička oštećenja temelja:

- loši cementni agregati – dovode do pojave lokalnih pukotina, a to dovodi do naprsnuća površine i raspadanje betona do značajne dubine i

- proces zamrzavanje/otapanje – uzrokuje nastajanja pukotina paralelnih površini.

Radi izvođenja inspeksijske ocene stanja temelja predlaže se njihovo razvrstavanje u četiri grupe, i to:

a) Zadovoljavajuće stanje, kada karakteristike temelja odgovaraju željenim, odnosno na njemu nema čak ni manjih oštećenja.

b) Potrebno obnavljanje temelja, kada su mogući razlozi za to:

- korozija čeličnog dela stuba koji se nalazi u temelju u manjem obimu – kada treba izvršiti zaštitu korodiranih čeličnih delova;

- značajnija korozija koja za posledicu ima lošu čvrstoću temelja, pa treba izvršiti zamenu ili ojačavanje jednog njegovog dela;

- mehaničko oštećenje osnove temelja;

- potrebna dodatna zaštita cementne košuljice u cilju prevencije hemijskih ili fizičkih razaranja;

- pasivne pukotine (kod kojih tokom vremena ne dolazi do značajnih promena u dužini i širini) i

- aktivne pukotine (kod kojih dolazi do povećavanja dužine i širine tokom vremena).

c) Potrebno pojačavanje temelja, kada je njegova čvrstoća manja od projektovane. Načini da se ovi problemi reše su:

c.1. Poboljšanjem građevinske čvrstoće.

c.2. Geotehničkim poboljšanjima:

c.2.1. *Poboljšavanjem okolnog zemljišta:*

a) Povećavanje otpornosti na podizanje, povećavanjem količine zemljišta;

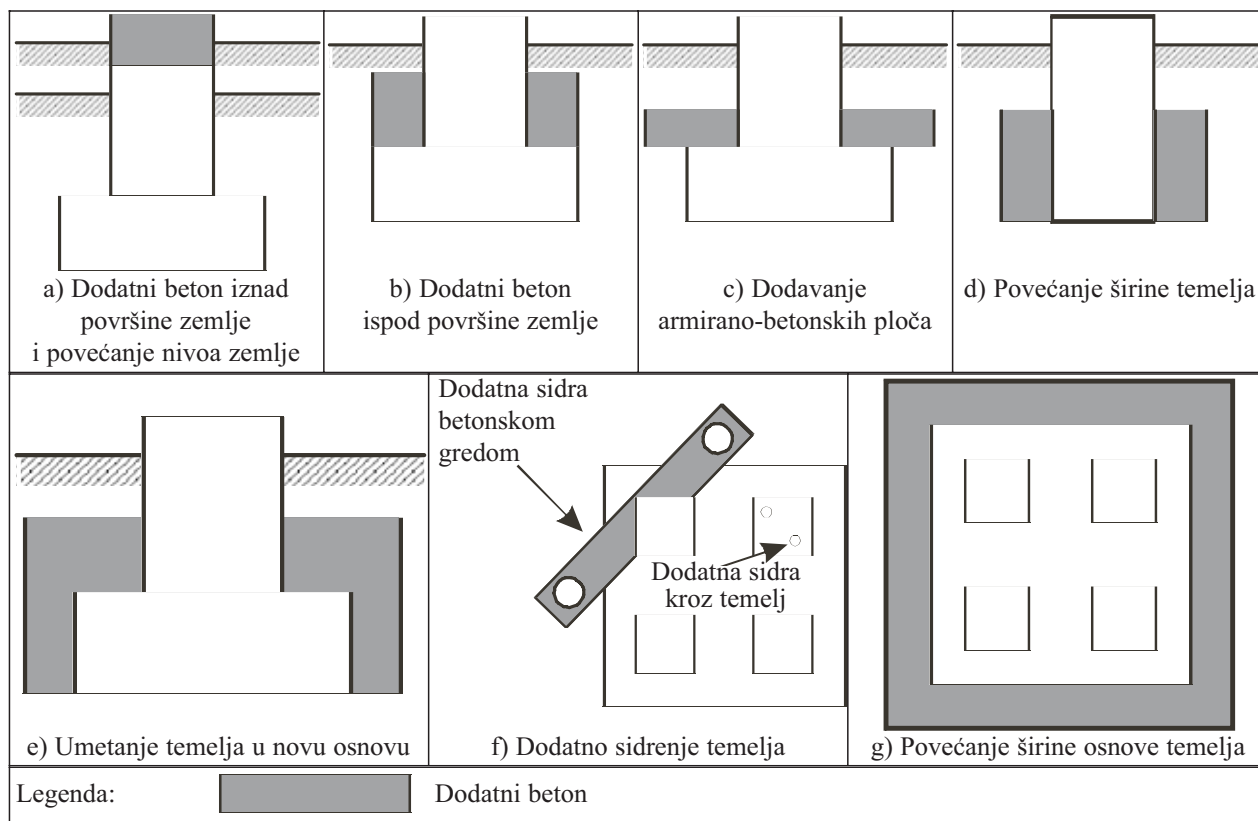
b) Povećavanje otpornosti na podizanje:

- ponovnim zbijanjem materijala oko temelja i

- zamenom zemlje oko temelja zemljom drugačije zrnaste strukture;

c) Povećanje kompresivnosti, otpornosti na podizanje i bočne sile naprezanja:

- snižavanjem nivoa podzemne vode (npr. promenom drenaže), i



Slika 2. Načini pojačavanja/dogradnje kompaktnih plitkih temelja

– injektiranjem cementnog ili hemijskog zalivanja u cilju povećanje gustine tla, te tako redukovanje propustljivosti ili nasipanje podzemnih šupljina.

c.2.2. Poboljšanje temelja.

Metode koje se koriste zavise od vrste temelja, tj. da li se oni mogu klasifikovati kao plitki ili duboki, da li su kompaktni ili imaju zasebne oslonce za svaku nogu stuba. Poboljšanja koja se koriste za plitke kompaktne (iz jednog dela) temelje dati su na slici 2, i mogu se podeliti na (dati su redosledom prema visini troškova za izvođenje saniranja) [9]:

- povećanje težine temelja dodavanjem betona iznad postojeće površine zemlje i povećanje nivoa oblaganja zemljom (slika 2.a);
- dodavanje betona ispod površine zemlje (slika 2.b);
- dodavanje armirano – betonske ploče (slika 2.c),
- povećanje širine temelja (slika 2.d);
- umetanje postojećeg temelja u novu osnovu (slika 2.e);
- dodatno sidrenje ankera koja se mogu integrisati direktno ili indirektno u temelj (slika 2.f) i
- povećanje širine osnove temelja (slika 2.g).

d) Potrebna zamena temelja, i to:

- u svrhu zamene provodnika ili nekih drugih komponenti nadzemnog voda usled izvođenja povećavanja prenosne moći (revitalizacija provodnika);

– zbog znatnijih oštećenja temelja;

– zbog loše nosivosti temelja i

– potrebnog izmeštanja stuba (npr. usled nemogućnosti rešavanja problema visokog nivoa podzemnih voda na mestu postavljanja).

U pogledu utvrđivanja stanja temelja stuba, proces inspekcije se deli u nekoliko nivoa. Prema [9], predlaže izvođenje inspekcije u četiri nivoa.

Prvi nivo inspekcije je uglavnom vizuelne prirode i njome se gradi osnova za kasnije kompleksnije inspekcije. Inspekcija se izvodi na svim temeljima nadzemnog voda. Ovo je naravno deo kompletne inspekcije nadzemnog voda. Na ovom nivou inspekcije se određuje vrsta temelja, ako ona nije tačno poznata, stanje korišćenja okolnog zemljišta i vegetacije, profil zemljišta oko temelja i zemljanog pokrivača, prisutna zagađenja, površinski nedostaci u betonu, oštećene ivice, pukotine između noge stuba i temelja, korozija čeličnih delova temelja. Ovom inspekcijom treba da se identifikuju temelji za koje je potrebna detaljnija inspekcija.

Drugi nivo inspekcije ima za cilj da odredi opseg oštećenja temelja. Na ovom nivou inspekcije treba odrediti na kojim temeljima treba izvršiti obnavljanje ili pojačavanje.

Namena **trećeg nivoa inspekcije** je da obezbedi podatke o geotehničkoj čvrstoći temelja i stepen

pogoršanja stanja pojedinih njegovih elemenata, da bi se napravio plan njihovog obnavljanja.

Konačno, na **četvrtom nivou inspekcije** vrši se testiranje postojećih temelja punim projektovanim iznosom opterećenja, da bi se odredila njihova nosivost, kao dodatak inspekcijama na trećem nivou.

2.2. Stanje stuba

Stubovi koji se koriste za nadzemne vodove iz vode se od različitih materijala, a kod nas se najčešće koriste armirano-betonski i čelično-rešetkasti.

2.2.1. Armirano-betonski stubovi

Uzroci oštećenja armirano-betonskih stubova mogu biti različiti. Pošto su od istog materijala, procesi njihovog propadanja su slični kao kod temelja. Ipak ovde će se ukazati na neke specifičnosti njihovog oštećivanja. U literaturi [10] sagledavani su uzroci i oštećenja na jednom nadzemnom vodu sa armirano-betonskim stubovima na kome je vršena revitalizacija. Pristup je sličan kao kod temelja.

Utvrđivanje vidova i lokaliteta oštećenja stuba vrši se njihovim detaljnim pregledom. Prva faza inspekcije kao i kod temelja je vizuelna, da bi se potom na višim nivoima inspekcije na manjem broju stubova koji imaju približno ista oštećenja i slične uslove eksploatacije izvršilo detaljnije sagledavanje i klasifikacija stepena njihovog oštećenja. Ovim inspekcijama se formira kompletna slika o oštećenjima svakog stuba, a time i sagledavaju mogući vidovi sanacije.

Nedostaci i oštećenja kod armirano-betonskih stubova mogu se svrstati u slične grupe kao kod temelja, s tim da postoje određene specifičnosti koje su posledica drugačije uloge stuba.

Neke greške i nedostaci koji nastaju na stubovima u toku gradnje se ogledaju u:

- maloj debljini sloja betona do armature (armatura vidljiva), nastala kao posledica lepljenja armature za oplatu pri izgradnji što u eksploataciji dovodi do korozije armature;
- segregaciji betona kao posledici izlivanja cementa iz oplata (u okolini nastavljanja susednih elemenata oplata) i
- šupljikavosti stubova, kao posledici nedovoljnog nabijanja betona ili grešaka u ugradnji tečnog betona (loš vodocementni faktor).

Značajan eksploatacioni i izloženost stubova atmosferskim i hemijskim uticajima ostavlja vidljive tragove na njima. Oštećenja koja su posledica delovanja ovih uticaja ogledaju se u:

- koroziji vidljive armature i bubrenju betona na takvim mestima i

- prisutnosti mahovine i algi na stablu stuba i konzolama.

Oštećenja na stubovima uslovljena dejstvom visokih nivoa mehaničkih opterećenja ogledaju se u sledećem:

- pojavi horizontalnih prslina različitih veličina i smerova rasprostiranja, najviše zastupljenih u donjoj trećini stabla stuba kao posledica naprezanja horizontalnim silama;
- oštećenjima uzrokovanim odlublivanjem betona sve do armature, što je posledica gubitka napona prijanjanja betona i armature;
- oštećenjima kod kojih betonska masa zaštitnog sloja još stoji uz prividan utisak da je na tom mestu stub zdrav;
- koroziji armature koja pod dejstvom atmosferalija i pri dodatnim opterećenjima stabla stuba pospešuje uvećanje prslina ili pak odvaljivanje betona;
- oštećenjima koja su posledica grešaka pri nasilnoj demontaži faznih provodnika ili zaštitne užadi i
- torzionom lomu stubova ispod konzole.

Specifičnost loma stuba ispod gornje konzole je da slomljeni deo stuba i dalje ostaje u uspravnom položaju. Pri pregledu stubova treba biti izuzetno pažljiv te kod ovakvih oštećenja treba utvrditi i rotaciju preseka duž prsline. Konstatovana rotacija preseka i vidna pukotina po obimu nedvosmisleno potvrđuju lom stuba. Princip sanacije se sastoji u tome da se u zoni pukotine nadomesti presek od čeličnih profila koji je u stanju da prihvati opterećenja na stubu koja su iznad preseka pukotine.

Pri analizi svih oštećenja do kojih je došlo na armirano-betonskih stubovima vrlo važno je utvrditi zahvaćenost armature korozijom i sagledavanje smanjenja preseka armature kao posledice korozije, odnosno sagledavanje potreba za pojačavanjem armature na mestima gde je ugrožena nosivost stuba. Ako postoje pukotine na stubovima potrebno je utvrditi njihovu veličinu i ugroženost stuba od prodiranja atmosferalija u njih. U zavisnosti od veličine i vrste pukotina (aktivne ili pasivne) značajno se može razlikovati pristup sanaciji stanja stuba.

2.2.2. Čelično-rešetkasti stubovi

Osnova za ocenu stanja čelično-rešetkastih stubova je stanje čelične konstrukcije. Čelična konstrukcija je zaštićena antikorozivnom zaštitom koja se izvodi: postupkom toplog cinkovanja ili nanošenjem zaštitnih sredstava. Da li će postojeća čelična konstrukcija zadovoljiti u pogledu svoje namene u narednom periodu eksploatacije nadzemnog voda zavisi od stanja zaštitne prevlake odnosno od zahvaćenosti čelika korozijom. Osnovu za rangiranje čelika u pogledu zahvaćenosti korozijom daje standard

JUS ISO 4268 [11]. Ovim standardom usvojena je jednobrazna konvencija označavanja intenziteta nedostataka prema podeli od Ri0 do Ri5. Ri0 označava zaštitu bez nedostataka, a Ri5 da su nedostaci toliko ozbiljni da rangiranje praktično nema smisla. U trećem delu ovog standarda (JUS ISO 4268/3) prikazuje se vizuelni izgled (etaloni) stepena zardalosti čeličnih površina, prethodno zaštićenih prevlakom u gradaciji od Ri1 do Ri5. Ovi stepeni predstavljaju određeni procenat zahvaćenosti čelične površine korozijom, uočenom ispod prevlake i onom koja je izbila kroz prevlaku. Na slici 3 dat je prikaz stepena korozije, njihova oznaka, kao i procenat korodiranoosti površine. Naravno, samo stanje antikorozivne zaštite čeličnih konstrukcija utvrđuje se vizuelnim pregledom.

Ako su čelične konstrukcije već zahvaćene korozijom, da bi se sačuvale od daljnjeg propadanja neophodno je da se na njima izvrši sanacija antikorozivne zaštite. Pravilan izbor trenutka i postupka njene sanacije moguće je izvršiti nakon utvrđivanja, stepena oštećenja od korozije i stepena agresivnosti sredine u kojoj se element nalazi. Pre propisivanja tehnologije sanacije antikorozivne zaštite, potrebno je sagledati oštećenost svih elemenata date konstrukcije.

Na osnovu iskustava i istraživanja [12, 13], sa obnavljanjem zaštite treba otpočeti kada se na ukupno zaštićenoj konstrukciji konstatuje 5 % korozije čelika, ili kada se postojeća debljina cinkove prevlake približava vrednosti 20 mm, što se u normalnim atmosferskim uslovima može očekivati nakon 20 godina eksploatacije stubova. To znači da je obnovu stuba od korozije potrebno izvesti kada se stanje može opisati ocenom između Ri3 i Ri4. Stanje Ri5 znači da obnovu stanja stuba treba izvršiti odmah, pod uslovom da oštećenje nije takvo (kada se otkloni korozija) da je potrebno izvršiti zamenu dela ili čitavog stuba zbog smanjenog preseka konstrukcije i njime ugrožene stabilnosti što se proverava ispitivanjima. Standard JUS ISO 12944 [14] detaljno opisuje postupke pripreme i čišćenja površina u zavisnosti od vrste i stanja prethodne zaštite.






Na osnovu izmerenih vrednosti, a prema tablicama standardnih mera može se zaključiti da li je došlo do kritičnog gubitka debljine osnovnog preseka profila napadnutog korozijom. U slučaju da jeste, može se pretpostaviti da je došlo do narušavanja stabilnosti konstrukcije, i tada je neophodna njena statička provera. U slučaju da korodirani profili ne zadovoljavaju statiku konstrukcije, vrši se zamena ili ojačanje istih, a potom sledi njihova zaštita. Ako izmereni poprečni preseki profila zadovoljavaju zahteve statičkog proračuna pristupa se sanaciji antikorozivne zaštite. Procena kada je potrebno izvršiti sanaciju stanja antikorozivne zaštite ako ne postoji pojava korozije, vrši se na bazi utvrđene debljine premaza antikorozivne zaštite, s tim što treba imati na umu da brzina smanjivanja premaza antikorozivnom zaštitom zavisi od kategorije atmosferske korozivnosti. Prema [14] izvršena je klasifikacija sredina u šest kategorija atmosferske korozivnosti:

- a) C1 – vrlo niska (čista atmosfera u zatvorenom prostoru);
- b) C2 – niska (atmosfera sa niskim nivoom zagađenja – seoska oblast);
- c) C3 – srednja (gradska i industrijska atmosfera sa umerenom koncentracijom SO₂ i primorske oblasti sa niskim salinitetom);
- d) C4 – visoka (industrijska atmosfera sa visokom koncentracijom hemijskih agenasa SO₂ i primorske oblasti sa umerenim salinitetom);
- e) C5-I – vrlo visoka (industrijska oblast sa visokom vlažnošću i agresivnom sredinom) i
- f) C5-M – vrlo visoka (područja na obali i na vodi sa visokim salinitetom).

Sagledavanje uslova u pogledu zagađivanja je važno u cilju procene kada se može očekivati da neku površinu treba dodatno zaštititi.

2.3. Ocena stanja ostalih nosećih elemenata stubnog mesta

Na nekim vrstama stubova sreću se dodatni elementi koji značajno utiču na njegovu stabilnost. Primer za to su sidreni čelično-rešetkasti stubovi kod

Ri1	Ri2	Ri3	Ri4	Ri5
				
0,05 %	0,5 %	1 %	8 %	40 – 50 %

Slika 3. Ilustracija klasa zardalosti površina i procenat zardalosti površine za datu klasu [11]

kojih sama čelično-rešetkasta konstrukcija nije stabilna bez sidra koja se izvode čeličnim užadima. To znači da se kod ovakvih stubova pored stanja temelja i stuba, ocenjuje i stanje sidra, odnosno temelja za sidrenje. Znači, i ovi elementi učestvuju u izvođenju ukupne ocene stanja stubnog mesta. Oni se ovde neće detaljnije razmatrati, a za njih se može provesti analogno razmatranje kao i za temelje odnosno stubove.

3. IZVOĐENJE OCENE STANJA STUBNOG MESTA¹⁾

U svom radu inženjer se sreće sa dve vrste problema: dobro i loše strukturiranim. Dok je u prvom slučaju jednostavno napraviti matematički model u drugom slučaju problem je vrlo složen, i matematički model, je teško ili neefikasno napraviti. Teorija fazi brojeva je jedan od najmoćnijih alata za loše strukturane probleme. Ovim alatom može da se uvažava subjektivnost, empirijski stečeno znanje i intuicija koji su prisutni u procesu čovekovog razmišljanja. Na ovaj način omogućuje se integracija čovekovog iskustva i subjektivnosti i pojačava čovekova mogućnost da rešava probleme.

Imajući u vidu da je teško pouzdano odrediti uslove pod kojima je nadzemni vod tokom perioda eksploatacije radio, teško je pouzdano i precizno odrediti i njegovo stanje. Zato se izvodi detaljna inspekcija stanja njegovih komponenti.

Formiranje fazi sistema za zaključivanje izvodi se u pet koraka [15], i to: fazifikacija ulaznih podataka, primena fazi operatora, primena metode implikacije, agregacija svih izlaza i defazifikacija rezultata.

Fazifikacija ulaznih podataka predstavlja prvi korak pri izgradnji fazi sistema za zaključivanje i podrazumeva određivanje vrste i broja ulaznih veličina, njihovo pretvaranje u jezičke promenljive, kao i određivanje oblika funkcije pripadnosti za svaku od njih. Pri tome su ulazne veličine „klasični” brojevi definisani nad određenim deskriptivnim intervalom, dok su izlazi uvek određeni stepeni pripadnosti funkciji definisanom nad drugim intervalom.

Ulazne promenljive za određivanje stanja stubnog mesta su stanje temelja i stanje stuba iskazani opisno (kod sidrenih stubova treba na analogan način iskazati stanje dodatnih elemenata za učvršćivanje).

Na bazi izloženog u drugom delu ovog rada može se reći da se temelj i stub mogu nalaziti u sledeća četiri stanja, i to:

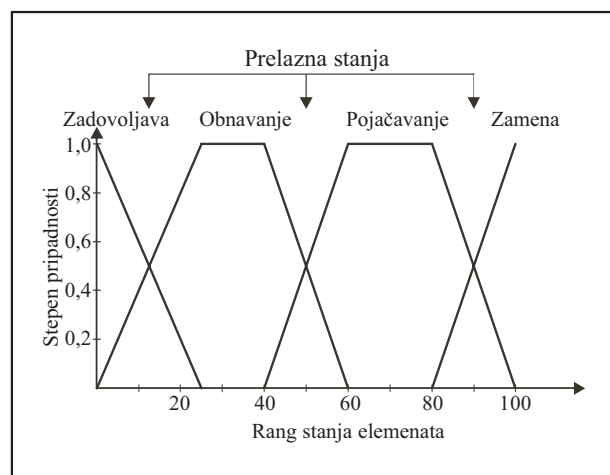
1. zadovoljavajuće stanje;

1) Pod stubnim mestom se podrazumeva sklop temelja i stuba

2. potrebno obnavljanje;
3. potrebno pojačavanje i
4. potrebna zamena.

Na bazi ovakve pretpostavke i razmatranja izvedenih u drugom delu rada usvojen je izgled funkcije pripadnosti za opis stanja temelja (stuba) kao na slici 4. Za rang stanja u kome se nalazi element usvojen je interval od 0 do 100. Rang stanja jednak 0 označava najbolje moguće stanje (nisu potrebne nikakvi radovi na elementu), a broj 100 najlošije moguće stanje (potrebna zamena elementa).

Veza lingvističkog načina opisa stanja, ranga stanja i funkcija pripadnosti data je u tabelama 2 (temelji) i 3 (armirano-betonski stubovi). Analogno rangiranje stanja može se izvesti i za čelično-rešetkaste stubove.



Slika 4. Izgled funkcije pripadnosti za ulaznu veličinu stanje temelja (stuba)

Nakon izvršene fazifikacije ulaza, potrebno je izvršiti agregaciju stanja ulaza u cilju dobijanja izlaza odnosno zaključka u zavisnosti od pretpostavki, tačnije definisanje stepena pripadnosti zaključka određenom fazi skupu na osnovu stepena pripadnosti pretpostavke.

Definisana pravila za stanje temelja i stuba data su tabelom 4. Pravila definisana tabelom 4 dobijena su pod pretpostavkom da su i temelj i stub istog stepena značaja. U slučaju drugačije pretpostavke dobiće se i drugačije stanje na izlazu. Svako definisano pravilo, na osnovu prethodnih koraka daje određeni fazi izlaz. Agregacija ulaza ima za cilj njihovu sintezu u zbirni fazi skup. Na slici 5 dat je oblik funkcija pripadnosti stanju izlaza. Kao što se može zaključiti sa ove slike i iz table 4 određena su stanja stubnog mesta funkcijama pripadnosti od F0 do F8, tj. od najboljeg (F0) do najlošijeg stanja (F8), pri čemu se pod najboljim stanjem podrazumeva slučaj

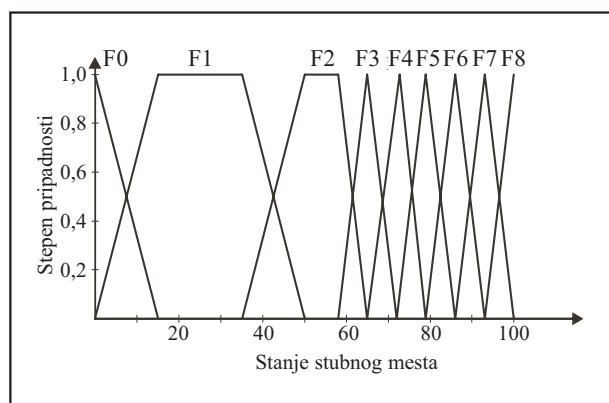
Rangiranje stanja armirano-betonskih temelja nadzemnog voda

Redni broj	Opis stanja temelja	Rang	Semantički opis
1.	Bez ikakvih znakova pogoršanja.	0	ZADOVOLJAVA
2.	Bez pukotina i većih pogoršanja, ali je potrebna površinska zaštita dela koji se nalazi van zemlje.	7,5	Prelazno stanje između obnavljanja i stanja koje zadovoljava.
3.	Temelj obrastao grmljem ili drvećem bez pomenosti po bilo kojoj od osa (horizontalno, vertikalno ili rotaciono) i sa pretpostavkom da u narednom periodu od pet godina to neće značajno uticati na položaj temelja stuba	10	
4.	Oslabljena svojstva zaštitne prevlake betona koja bi trebalo da bude zadovoljavajuća u narednom periodu od pet godina	15	
5.	Strukturno beznačajna korozija elemenata temelja, potrebno je zaštitno presvlačenje.	20	
6.	Strukturno ojačana korozija elemenata temelja, bez potrebe za ojačavanjem delova.	25	
7.	Pasivne pukotine – beznačajne promjene u dužini i širini.	32,5	OBNAVLJANJE
8.	Potrebna zaštita cementne površine za prevenciju hemijskih ili fizičkih razaranja.	35	
9.	Mehaničko oštećenje elemenata temelja.	40	
10.	Stukturno značajna korozija elemenata temelja, sa potrebnim ojačavanjem delova.	30	Prelazno stanje između obnavljanja i pojačavanja temelja.
11.	Aktivne pukotine – povećava im se dužina i širina.	45	
12.	Temelj obrastao grmljem ili drvećem bez pomenosti po bilo kojoj od osa (horizontalno, vertikalno ili rotaciono) i sa pretpostavkom da u narednom periodu (pet godina) to može značajno uticati na položaj temelja.	50	
13.	Potrebno poboljšavanje okolnog zemljišta.	55	
14.	Povećavanje težine temelja (beton iznad postojeće površine zemlje) i oblaganje zemljom kao na slici 2.a.	57,5	
15.	Dodavanje betona (ispod nivoa tla) kao na slici 2.b.	60	POJAČAVANJE
16.	Korišćenje dodatne armirano-betonske ploče kao na slici 2.c.	65	
17.	Povećavanje širine temelja kao na slici 2.d.	70	
18.	Umetanje starog temelja u novo podnožje kao na slici 2.e.	75	
19.	Dodatna sidra koja se integrišu u temelj npr. armirano-betonskim gredama kao na slici 2.f.	80	
20.	Povećanje širine osnove temelja kao na slici 2.g.	85	Prelaz između stanja pojačavanja i zamene.
21.	Potrebna zamena temelja u svrhu revitalizacije ostalih delova nadzemnog voda (npr. provodnika).	90	ZAMENA
22.	Stanje temelja je takvo da je potrebna njegova zamena	100	

kada se stanje temelja i stanje stuba može definisati kao zadovoljavajuće, a pod najlošijim stanjem se podrazumeva ono stanje kada je potrebna zamena temelja i stuba. Dobijena vrednost na izlazu je broj između 0 i 100.

Poslednji korak pri formiranju sistema za fazi zaključivanje je defazifikacija. Svrha defazifikacije je da se fazi zaključak pretvori u jedan broj. Broj tj. numerička ocena koja se dobije mora da bude realan predstavnik fazi zaključka koji je dobijen primenom fazi pravila.

Pri defazifikaciji se može koristiti više metoda od kojih su najčešći: metod centra mase, metod srednje vrednosti maksimuma, najveći maksimum, najmanji maksimum i bisektor. Najčešće korišćeni metod je metod centra mase koji se zasniva na proračunu težišta površine definisane oblikom rezultujućeg fazi broja. Na slici 6 dat je primer određivanja vrednosti po metodama centra mase (vrednost 65,1) i centra maksimuma (vrednost 78,8) za slučaj kada su rang



Slika 5. Definisane funkcije pripadnosti izlaznoj veličini

stanja temelja (potrebno poboljšavanje okolnog zemljišta) i stuba jednaki 55.

Na slici 7 data je vrednost izlaza (stanja stubnog mesta) u zavisnosti od vrednosti ulaznih promenljivih (stanja temelja i stanja stuba), za celokupan opseg ranga stanja temelja i stuba.

Tabela 3.

Rangiranje stanja armirano-betonskog stuba nadzemnog voda²⁾

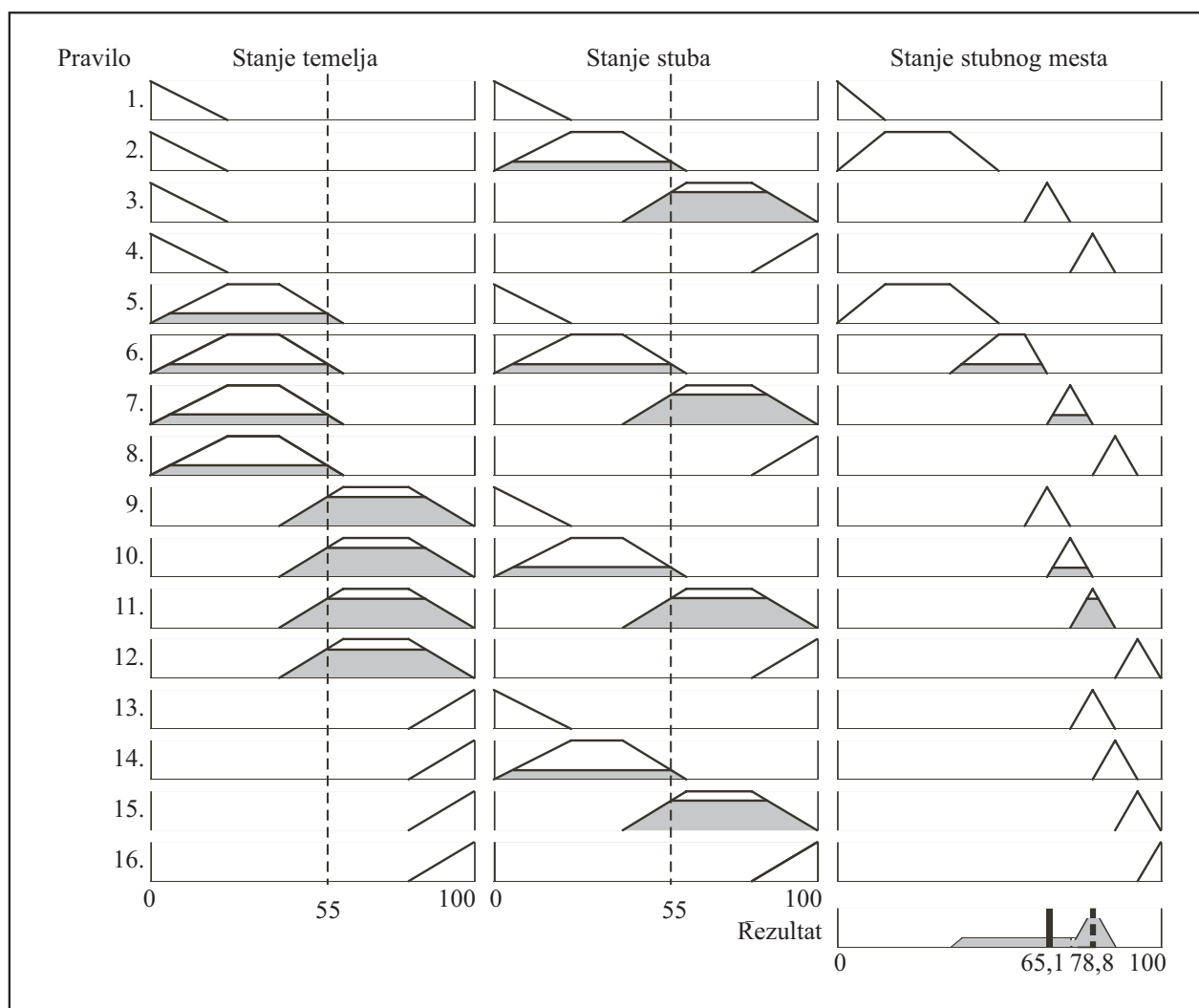
Redni broj	Stanje stuba i konzola	Rang	Semantički opis
1.	Bez oštećenja, nedostataka i mikroprslina i potrebe za zaštitom površine.	0	ZADOVOLJAVA
2.	Na stubu nedostaju ili su labave opomenske tablice ili tablice sa oznakama faza.	5	Prelazno stanje između obnavljanja i stanja koje zadovoljava.
3.	Bez oštećenja, nedostataka i mikroprslina i sa potrebom za zaštitom površine.	10	
4.	Potreba čišćenja naslaga sa površine (mahovina alge i slično) bez potrebe za zaštitom površine.	15	
5.	Potreba čišćenja naslaga sa površine (mahovina alge i slično) sa potrebom za zaštitom površine.	20	
6.	Sanacija površinskih oštećenja koja ne utiču značajno na konstrukcionu nosivost (kalcinacija, segregacija, ljuspanje betona, šupljikavost i sl.) koje treba sanirati da ne bi doveli do većih oštećenja.	25	OBNAVLJANJE
7.	Postojanje mreže prslina karakteristične za nagli gubitak vlage u procesu vezivanja i očvršćavanja betona i potrebna sanacija prslina.	30	
8.	Oštećenja uslovljena segregacijom, erozijom i uticajem atmosferalija sa prslinama do 0,5 mm.	32,5	
9.	Stubovi sa znatno oštećenim površinama i prslinama od 0,5 do 2 mm sa korodiranom armaturom bez značajnijeg smanjenja preseka armature.	35	
10.	Stubovi sa znatno oštećenim površinama i prslinama otvora 2 mm i više bez značajnijeg smanjenja preseka armature.	40	
11.	Stubovi sa znatno oštećenim površinama i prslinama od 0,5 do 2 mm sa korodiranom armaturom sa značajnijim smanjenjem preseka armature.	45	Prelazno stanje između obnavljanja i pojačavanja stuba.
12.	Stubovi sa znatno oštećenim površinama i prslinama otvora 2 mm i više sa značajnijim smanjenjem preseka armature.	50	
13.	Otkidanje/ljuspanje komada betona (ponekad je neke delove potrebno otkloniti „površinskim čekićanjem”) ili njihovo odvajanje od armature kao posledica širenja produkata korozije tako da je armatura vidljiva, kada smanjenje preseka armature nije kritično. Pri sanaciji nije potrebna oplata.	52,5	
14.	Otkidanje/ljuspanje komada betona (ponekad je neke delove potrebno otkloniti „površinskim čekićanjem”) ili njihovo odvajanje od armature kao posledica širenja produkata korozije tako da je armatura vidljiva, kada smanjenje preseka armature nije kritično. Pri sanaciji je potrebna oplata.	55	
15.	Otkidanje/ljuspanje komada betona (ponekad je neke delove potrebno otkloniti „površinskim čekićanjem”) ili njihovo odvajanje od armature kao posledica širenja produkata korozije tako da je armatura vidljiva, kada je smanjenje preseka armature kritično. Pri sanaciji nije potrebna oplata.	57,5	
16.	Otkidanje/ljuspanje komada betona (ponekad je neke delove potrebno otkloniti „površinskim čekićanjem”) ili njihovo odvajanje od armature kao posledica širenja produkata korozije tako da je armatura vidljiva, kada je smanjenje preseka armature kritično. Pri sanaciji je potrebna oplata.	60	POJAČAVANJE
17.	Pojava horizontalnih prslina različitih otvora i dužina rasprostiranja najviše zastupljenih u donjoj trećini stabla stuba, znatno su rjeđe na ostalom delu stuba.	62,5	
18.	Potrebna sanacija jedne od konzola stuba njenom nadogradnjom ili zamenom.	65	
19.	Potrebna sanacija više od jedne konzole stuba njenom nadogradnjom ili zamenom.	70	
20.	Sanacija konzola i vrha stubova (oštećenih vrhova ili njihova prerada za ugradnju zaštitnog užeta).	75	
21.	Uvrnut gornji dio stuba sa zdravim delovima izvan te zone.	80	
22.	Polomljen vrh stuba (između srednje i gornje konzole, usled torzionog loma stuba), koji se otklanja nadomještanjem nedostajućeg dela stuba metalnom (ili nekakvom drugom) konstrukcijom.	85	Prelaz između stanja pojačavanja i zamene.
23.	Potrebna zamena stuba usled neadekvatne čvrstoće betona.	95	
24.	Oštećenje stuba koje dovodi u pitanje njegovu konstrukcionu stabilnost.	95	
25.	Potrebna kompletna zamena stuba.	100	ZAMENA

2) Klasifikacija oštećenja koja se odnosi na otvor prslina izvršena je tako da definiše pukotine otvora do 0,5 mm, pukotine otvora između 0,5 i 2 mm kao i pukotine otvora preko 2 mm. Klasifikacija je izvršena u skladu sa činjenicom da se pristup sanaciji istih znatno razlikuje.

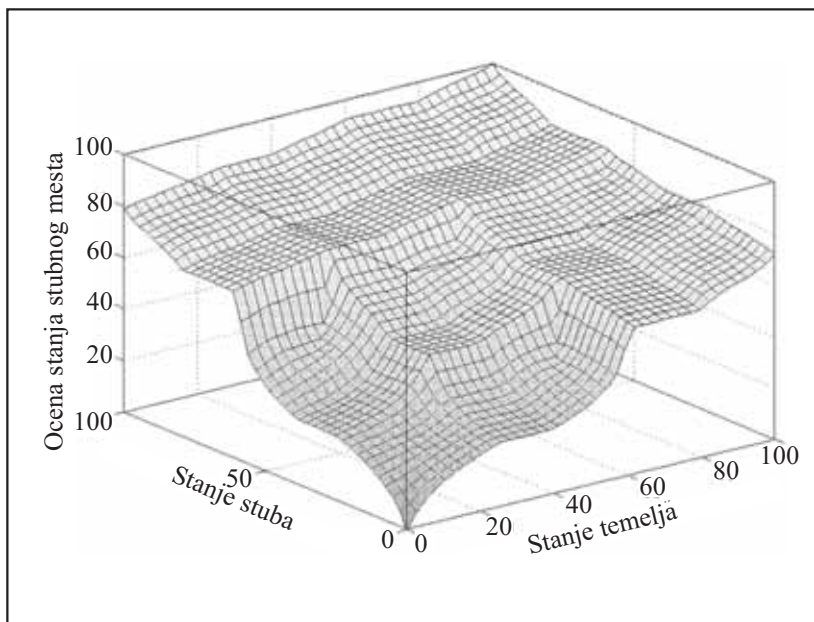
Tabela 4.

Definisana pravila za ocenu stanja stubnog mesta nadzemnog voda

Redni broj	Stanje temelja	Stanje stuba	Funkcija stanja stubnog mesta	Ocena stanja stubnog mesta	Stanje stubnog mesta
1.	Zadovoljava	Zadovoljava	F0	0	Zadovoljava
2.	Zadovoljava	Obnavljanje	F1		
3.	Obnavljanje	Zadovoljava	F1		
4.	Obnavljanje	Obnavljanje	F2		
5.	Zadovoljava	Pojačavanje	F3		
6.	Pojačavanje	Zadovoljava	F3		
7.	Obnavljanje	Pojačavanje	F4		
8.	Pojačavanje	Obnavljanje	F4		
9.	Pojačavanje	Pojačavanje	F5		
10.	Zadovoljava	Zamena	F5		
11.	Zamena	Zadovoljava	F5		
12.	Obnavljanje	Zamena	F6		
13.	Zamena	Obnavljanje	F6		
14.	Pojačavanje	Zamena	F7		
15.	Zamena	Pojačavanje	F7		
16.	Zamena	Zamena	F8	100	Zamena



Slika 6. Izvođenje fazi zaključka na bazi definisanih pravila



Slika 7. Vrednost indeksa stanja stubnog mesta određena preko metode centra mase, u zavisnosti od ranga stanja temelja i ranga stanja stuba

4. IZVOĐENJE UKUPNE OCENE STANJA SVIH STUBNIH MESTA

Nakon inspekcije stanja stubova i temelja i određivanja pojedinačne ocene stanja potrebno je izvesti zajedničku ocenu za sva stubna mesta koja se nalaze na trasi nadzemnog voda. Ako je ukupan broj stubnih mesta na trasi jednak n , tada je ukupna ocena njihovog stanja (S) jednaka:

$$S = \frac{\sum_{j=1}^n k_j \cdot S_j}{\sum_{j=1}^n k_j} \quad (1)$$

gde su:

k_j – težinski faktor značaja j -tog stubnog mesta i

S_j – ocena stanja j -tog stubnog mesta.

Težinskim faktorom k_j uzima se u obzir činjenica da su stubna mesta na trasi različitog značaja. Npr. u pogledu funkcije koju vrše u sklopu nadzemnog voda razlikuju se linijski i zatezni stubovi. Funkcija linijskih stubova je da nose fazne provodnike i zaštitnu užad. Zatezni stubovi služe ne samo za nošenje nego i zatezanje faznih provodnika i zaštitne užadi, koji se sa obe strane odvojeno pričvršćuju na stub. Oni se u praksi postavljaju najmanje na svaka 3 kilometra i najviše na svakih 8 kilometara ili na 30 raspona. Kraća zatezna polja su povoljnija u slučaju havarija jer se tada eventualna oštećenja ne prenose na sused-

na zatezna polja. S druge strane, duža polja zatezanja su zbog nižih cena linijskih stubova od zateznih, povoljnija iz ekonomskih razloga. Terenske prilike takođe imaju znatnog uticaja na dužinu zateznog polja. U ovom radu predlaže se izbor težinskog faktora k_j u skladu sa cenama nosećih i zateznih stubova. On se može birati i u skladu sa drugačijim subjektivnim mišljenjem onoga ko vrši razmatranje.

Dobijena zbirna ocena stanja nosećih elemenata je broj od 0 do 100. Što je vrednost ocene stanja bliža 0 to je stanja bolje i obrnuto što je ova vrednost bliža 100, to je stanje lošije.

Kao pomoćne veličine u opisanju stanja nosećih elemenata pored ocene definisane izrazom (1) mogu se koristiti i drugi parametri koji su rezultat statističke obrade

rezultata ocena stanja stubnih mesta. Naime za dve trase nadzemnog voda može se dobiti ista vrednost ocene stanja, ali u pogledu uticaja na pouzdanost njihovog rada nije svejedno da li je veći ili manji broj stubova u stanju za koje je potrebna zamena. Upravo u tom cilju koriste se dodatni statistički parametri za ocenjivanje stanja nosećih elemenata stuba.

Ako su vrednosti dobijenog niza ocena stubnih mesta uređenog po neopadajućem redosledu ravnomerno i ekvidistantno raspoređene levo i desno od srednje vrednosti niza ocena, takva raspodela može se nazvati simetričnom. Ako je nagomilavanje vrednosti oko srednje vrednosti neravnomerno sa leve i desne strane, reč je o asimetričnoj raspodeli. U cilju izvođenja dodatnih ocena stanja nosećih elemenata nadzemnog voda mogu se koristiti jednostavni pokazatelji na bazi kojih se može zaključiti o nesimetričnosti kao što su mod i medijana. Takođe se mogu koristiti i složeniji pokazatelji stepena asimetričnosti kao što su centralni normirani momenti i Pearsonov koeficijent asimetrije [16]. Pored ovih kao dodatni pokazatelji mogu služiti i mere zaobljenosti krive, koja pokazuje raspodelu ocena stanja pojedinačnih stubnih mesta.

Što je asimetrija izraženija udesno prema većim vrednostima ocene stanja, znači da postoji veći broj stubova sa lošijim stanjem nego kada je asimetrija izražena ulevo, za istu vrednost ocene stanja dobijenu prema (1).

Za konačno ocenjivanje stanja kompletnog nadzemnog voda potrebno je dobijenu ocenu stanja stubnih mesta kombinovati sa ocenom stanja ostalih elemenata nadzemnog voda (stanje provodnika, zaštitne užadi, izolatora i spojne opreme).

5. ZAKLJUČAK

U radu je dat pregled mogućih stanja temelja i stuba u pogledu kritičnosti sa aspekta korišćenja u preostalom periodu eksploatacije voda. Opis njihovog stanja zasniva se na rezultatima detaljne inspekcije odnosno utvrđivanja stanja i korišćenja izvedene ocene na bazi fazi skupova. Na ovaj način izvršeno je svodenje procesa zaključivanja na matematičko određivanje ocene njihovog stanja na bazi inspekcija kojima se dobija kao izlaz opisno iskazano stanje temelja odnosno stuba. Dobijena ocena daje podlogu na osnovu koje se odlučuje o načinu gazdovanja datim elementima. Ocena takođe omogućuje međusobno upoređivanje stanja pojedinih nadzemnih vodova, što je od velikog značaja pri donošenju odluka u procesu revitalizacije nadzemnih vodova.

6. LITERATURA

- [1] F. Kiessling, P. Nefyger, J. F. Nolasco, U. Kaintzyk: OVERHEAD POWER LINES – PLANNING, Design, Construction, Springer, Berlin, 2003.
- [2] S. Gušavac, M. Nimrihter, S. Novaković, Ž. Savanović: OVERHEAD LINES MAINTENANCE INFORMATION SYSTEM, COLLOQUIUM ON OVERHEAD LINES REVITALIZATION, Beograd, May 06-10, 2003, paper R3-01.
- [3] S. J. Gušavac, M. D. Nimrihter, Lj. R. Gerić, ESTIMATION OF OVERHEAD LINE CONDITION, Elect. Power, Syst. Res. (2007), doi:10.1016/j.epsr.2007.05.001.
- [4] Wenyuan Li, RISK ASSESSMENT OF POWER SYSTEMS, MODELS, METHODS, AND APPLICATIONS, A John Wiley&Sons, New York, 2005.
- [5] Cigré WG 37.27, AGEING OF THE SYSTEM-IMPACT ON THE PLANNING, Electra No. 193, Paris, December 2000.
- [6] M. Nimrihter, S. Gušavac, S. Novaković, M. Dutina: TECHNO-ECONOMICAL ANALYSIS OF OVERHEAD LINES – REVITALIZATION CANDIDATES, Colloquium on Overhead Lines Revitalization, Beograd, May 06-10, 2003, paper R7-01.
- [7] M. Nimrihter, S. Gušavac, M. Dutina, S. Novaković: PLANIRANJE REVITALIZACIJE NADZEMNIH VODOVA, Elektroprivreda, broj 1, strane 31-39, 2004, Beograd.
- [8] S. Gušavac, M. Nimrihter, Ž. Savanović, S. Novaković: ZNAČAJ REVITALIZACIJE NADZEMNIH VODOVA SA ASPEKTA KRATKOROČNOG PLANIRANJA POJAČANJA PRENOSNE MREŽE, JUKO CIGRE, rad B2-02, Zlatibor, maj 2005.
- [9] Cigré SC 22 WG07, REFURBISHMENT AND UPGRADING OF FOUNDATIONS, Paris, Cigré Brochure No. 141, 1999.
- [10] B. Glogovac, M. Uljarević: PERFORMED REHABILITATION AND REFERENCE TO REHABILITATED TL 110 kV BILEČA-BERKOVIĆI AFTER 5 YEARS OF EXPLOITATION, Colloquium on Overhead Lines Revitalization, Beograd, May 06-10, 2003, paper R7-03.
- [11] JUS ISO 4628/1-6, OZNAČAVANJE INTENZITETA, KOLIČINE I VELIČINE NAJČEŠĆIH TIPOVA NEDOSTATAKA, DELOVI 1 DO 6, Beograd, Savezni zavod za standardizaciju, Beograd, 1998.
- [12] Z. Vučković, D. Jašović, S. Stupar: REFURBISHMENT OF CORROSION PROTECTION ON TRANSMISSION LINE TOWER STEEL LATTICE STRUCTURE, Colloquium on Overhead Lines Revitalization, Beograd, May 06-10, 2003, paper R5-01.
- [13] L. Szabó: EXPERIENCE OF ON SITE PAINT COATING ON HOT DIP GALVANIZED LATTICE STEEL STRUCTURE, Colloquium on Overhead Lines Revitalization, Beograd, May 06-10, 2003, paper R5-03.
- [14] JUS ISO 12944
- [15] P. Subašić: FAZI LOGIKA I NEURONSKE MREŽE, Tehnička knjiga, Beograd, 1997.
- [16] M. Kostić: METODI STATISTIČKE ANALIZE, Naučna knjiga, Beograd, 1990.

Rad je primljen u uredništvo 30. 11. 2007. godine



Strahil J. Gušavac je zaposlen na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, kao asistent na elektrotehničkom odseku. Diplomirao je na istom fakultetu, a magistrirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Drži vežbe iz predmeta: „Planiranje, eksploatacija i upravljanje u EES”, „Distributivni sistemi” i „Električne instalacije i industrijska elektroenergetika”. Učestvovao je na više studija radenih za potrebe privrede. Objavljuje članke iz pouzdanosti, upravljanja potrošnjom električne energije i menadžmenta materijalnim dobrima u elektroprivredi.



Savo D. Đukić je 1998 završio osnovnu školu „Nikola Tesla” u Novom Sadu kao đak generacije. Prirodno-matematički smer gimnaziju „Isidora Sekulić” je završio 2002 godine. Za postignute rezultate u osnovnoj školi dobio je specijalne diplome za fiziku i hemiju a u srednjoj školi specijalnu diplomu za fiziku. Za postignute rezultate u učenju i vladanju u toku osnovne i srednje škole dobitnik je diplome Vuk Karadžić. Na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu na smeru elektroenergetika 2007 godine odbranio je master rad pod nazivom „Proračun struja kratkih spojeva primenom savremenih programskih alata i standardnih inženjerskih izraza”. Trenutno je student doktorskih studija.



Jelena M. Lukić je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2007 godine na smeru elektroenergetika odbranila master rad pod nazivom „Dijagnostika stanja elemenata nadzemnog voda”.



Ljiljana Krička je rođena 1982. godine u Kninu. Završila je Višu elektrotehničku školu u Beogradu (smer: energetika) 2003. godine. Diplomirala je 2007. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, smer elektroenergetika.

Ostvarenje elektroenergetskog bilansa elektroprivreda Srbije i Crne Gore u 2007. godini sa osvrtom na 2006. godinu

Stručni rad
UDK: 621.3.05

Rezime:

Rad prezentuje realizaciju elektroenergetskog bilansa za 2007. godinu elektroprivreda Srbije i Crne Gore kroz prikaz sledećeg: proizvodnje i potrošnje električne energije, nabavke i isporuke električne energije drugim elektroenergetskim sistemima, stanja akumulacija hidroelektrana, otkrivke uglja, proizvodnje uglja, deponija uglja za termoelektrane, i upoređuje ove veličine sa ostvarenjem u 2006. godini.

Ključne riječi: elektroenergetski bilans elektroprivrede Srbije i elektroenergetski bilans elektroprivrede Crne Gore

Abstract:

REALIZATION OF THE POWER BALANCE OF SERBIA AND MONTENEGRO
IN 2007 WITH RETROSPEKTIVE VIEW ON 2006

The paper deals with the realization of the electric power balance for 2007 in Serbia and Montenegro, by presenting the following: electric power production and consumption, power exchange, electric power supply from and delivery to other electric power systems, hydro plant reservoirs, coal overburden layers removal, coal production, coal deposits for thermal power plants, with a review of the realization in 2006.

Key words: electric power balance of Serbia and Montenegro

1. UVOD

Elektroprivrednu delatnost u Srbiji obavljaju:
Javno preduzeće za proizvodnju električne energije, distribuciju električne energije i upravljanje distributivnim sistemom i trgovinu električnom energijom, koje posluje pod firmom Javno Preduzeće „Elektroprivreda Srbije” sa potpunom odgovornošću i sedištem u Beogradu, čiji je skraćeni naziv JP „EPS” sa p.o. (u daljem tekstu: EPS) i Javno preduzeće „Elektromreža Srbije” sa potpunom odgovornošću i sedištem u Beogradu, čiji je skraćeni na-

ziv JP „EMS” sa p.o. (u daljem tekstu: EMS). Javna preduzeća su osnovana zakonom o elektroprivredi („Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 94/2004) sa izmenama i dopunama.

Elektroprivrednu delatnost u Crnoj Gori obavlja:
Javno elektroprivredno preduzeće za proizvodnju, prenos, nabavku i distribuciju električne energije, koje posluje pod firmom „Elektroprivreda Crne Gore” sa sedištem u Nikšiću (u daljem tekstu: EPCG) osnovano Zakonom o energetici („Službeni list SRCG” br. 16/90) sa izmenama i dopunama. Od-

lukom Upravnog odbora ovog preduzeća, 18. marta 1998. godine ovo preduzeće je transformisano u Elektroprivredu Crne Gore A.D.

Saradnja između ove dve elektroprivrede regulisana je Ugovorom o dugoročnoj poslovnotehničkoj saradnji, koji je zaključen marta 1991. godine, sa izmenama i dopunama iz 2006. godine.

2. ELEKTROPRIVREDA SRBIJE

2.1. Proizvodnja električne energije

U 2007. godini, energetskim bilansima elektroprivrede Srbije predviđena je:

- proizvodnja iz sopstvenih izvora 38 079 GWh (HE 10 534 GWh, TE 27 545 GWh) i
- nabavka električne energije 2 612 GWh (i od EPCG).

Ukupna proizvodnja električne energije u 2007. godini u Republici Srbiji je iznosila **38 978,4 GWh** (25,7 % iz HE a 74,3 % iz TE), dok su nabavke električne energije od drugih EES-a (uključujući i od EPCG) iznosile **2 270,1 GWh**.

Plan proizvodnje iz sopstvenih izvora je veći za 2,4 %. HE su svoj plan ostvarile sa 95,0 % a TE su ostvarile sa 105,2 % plana.

Nabavka električne energije (uključujući i od EPCG) je manja za 13,1 % od plana.

Ukupno raspoloživa električna energija je bila za 1,4 % veća od plana za 2007. godinu.

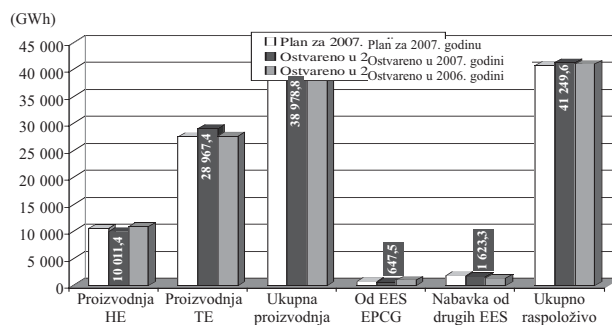
Kada se prave poređenja raspoložive električne energije u 2007. godini u odnosu na 2006. godinu, onda su odnosi sledeći:

- sopstvena proizvodnja je veća za 1,1 %, pri čemu je proizvodnja HE manja za 8,7 % a TE veća za 4,9 %;
- nabavka električne energije (uključujući i od EPCG) je manja za 4,2 % i
- raspoloživa električna energija je veća za 0,8 %.

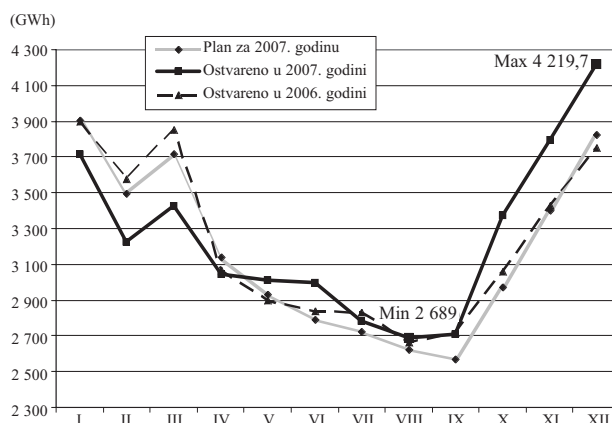
Svi gore navedeni podaci dati su u tabeli 1. i na slici 1.

Karakteristične proizvodnje na pragu elektrana:

- najveća mesečna proizvodnja je bila **4 219,7 GWh** i to u **decembru** 2007. godine, tog meseca HE su proizvele **1 151,6 GWh**, a TE **3 068,1 GWh** (najveća mesečna proizvodnja u 2006. godini je bila 3 896,0 GWh);
- najveća mesečna proizvodnja HE je bila u **decembru** 2007. godine i iznosila je **1 151,6 GWh** (naj-



Slika 1. Ostvarenje bilansa proizvodnje (na pragu elektrana) i nabavki električne energije EES-a Srbije



Slika 2. Proizvodnja EES-a Srbije

Tabela 1.

Ostvarenje bilansa proizvodnje (na pragu elektrana) i nabavki električne energije EES-a Srbije

Raspoloživo	2007. godina		Ostvareno 2007/ Planirano 2007. (2/1)	2006. godina Ostvareno	Ostvareno 2007/ Ostvareno 2006. (2/4)
	Planirano	Ostvareno			
	(GWh)	(GWh)	(%)	(GWh)	(%)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Proizvodnja HE	10 534	10 011,2	95,0	10 959,8	91,3
Proizvodnja TE	27 545	28 967,3	105,2	27 601,8	104,9
Ukupna proizvodnja	38 079	38 978,4	102,4	38 561,6	101,1
Nabavka od EES EPCG	762	647,5	85,0	994,2	65,1
Nabavka od drugih EES	1 850	1 622,6	87,7	1 375,9	118,0
Ukupno raspoloživo	40 691	41 248,7	101,4	40 931,8	100,8

veća mesečna proizvodnja HE u 2006. godini je bila 1 340,2 GWh);

- najveća mesečna proizvodnja TE je bila u **decembru** 2007. godine i iznosila je **3 068,1** GWh (najveća mesečna proizvodnja TE u 2006. godini je bila 3 015,9 GWh);
- najveća dnevna proizvodnja je bila **24. decembra** 2007. godine i iznosila je **145,4** GWh; tog dana HE su proizvele 36,8 GWh, a TE 108,6 GWh (najveća dnevna proizvodnja u 2006. godini je bila 141,0 GWh);
- najveća dnevna proizvodnja HE je bila **30. novembra** 2007. godine i iznosila je **49,0** GWh (najveća dnevna proizvodnja HE u 2006. godini je bila 50,4 GWh);
- najveća dnevna proizvodnja TE je bila **31. decembra** 2007. godine i iznosila je **112,4** GWh (najveća dnevna proizvodnja TE u 2006. godini 103,7 GWh);
- prosečna dnevna proizvodnja na godišnjem nivou u 2007. godini je iznosila **106,8** GWh (planirana 104,3 GWh), (dok je u 2006. godini ostvarena prosečna dnevna proizvodnja iznosila 105,7 GWh).

2.2. Potrošnja električne energije

Ukupne potrebe potrošača električne energije (sa pumpanjem i sopstvenom potrošnjom elektrana) su iznosile **39 225,0** GWh, dok su isporuke drugim EES (uključujući i EPCG) iznosile **2 023,6** GWh.

Plan potrošnje domaćih potrošača električne energije je ostvaren sa **99,0** %. Isporuca električne energije drugim EES (uključujući i EPCG) je ostvarena sa **188,3** %, plana (u odnosu na 2006. godinu to je 88,3 %). Ukupan plasman je iznosio **101,4** % plana. U tabeli 2. i na slici 3. imamo prikazano: neto

konzum, gubici električne energije, pumpanje kao i nabavka električne energije za potrebe sigurnog snabdevanja potrošača. Neto konzum je ispunio plan sa **98,0** % i veći je nego u 2006. godini 1,3 %. Gubici električne energije u prenosu su manji od planiranih za **1,5** % ali su u odnosu na 2006. godinu veći **0,2** %. Na slici 4. prikazana je prosečna mesečna potrošnja električne energije bruto konzuma (bez pumpanja), dok su na slici 5. prikazani uporedno mesečna proizvodnja i bruto konzum iz čega se vidi da je EES EPS-a imao skoro svojom proizvodnjom pokrivenost potreba potrošača osim u februaru kada je potrošnja bila veća od sopstvene proizvodnje cca 4 %, za razliku od proizvodnje u junu, kada je ista bila veća od potrošnje cca 17,5 %.

Karakteristične potrošnje električne energije:

- najveća mesečna potrošnja je bila u **decembru** 2007. godine i iznosila je **4 260,5** GWh, bez pumpanja (najveća u 2006. godini je bila 4 070,9 GWh);
- najveća dnevna potrošnja je bila **24. decembra** 2007. godine i iznosila je **151,4** GWh, pri minimalnoj dnevnoj temperaturi tog dana u Beogradu od minus **4,2** stepena Celzijusa (najveća dnevna potrošnja 26. januara u 2006. godini je bila 150,6 GWh, pri temperaturi od minus 11,8 stepena Celzijusa);
- najveća srednja satna snaga je bila **31. decembra** **7 305** MW u 18 h (najveća u 2006. godini je bila 6 940 MW) i
- prosečna dnevna potrošnja na godišnjem nivou u 2007. godini, bez energije za pumpanje je iznosila **103,5** GWh (planirana 107,1 GWh), (prosečna dnevna potrošnja na godišnjem nivou u 2006. godini 101,7 GWh).

Tabela 2.

Ostvarenje bilansa potrošnje i isporuka električne energije EES EPS-a

Plasman	2007. godina		Ostvareno 2007./ Planirano 2007. (2/1)	2006. godina Ostvareno	Ostvareno 2007./ Ostvareno 2006. (4/2)
	Planirano	Ostvareno			
	(GWh)		(%)	(GWh)	(%)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Neto konzum	37 034	36 307,3	98,0	35 830,8	101,3
Gubici u prenosu	1 500	1 477,5	98,5	1 474,3	100,2
Pumpanje PAP Lisine	82	65,5	79,9	100,2	65,4
Pumpanje RHE Bajina Bašta	435	798,0	183,4	751,5	106,2
Potrebe elektrana	565	576,6	101,9	662,3	87,1
Ukupna potrošnja	39 616	39 225,0	99,0	38 639,9	101,5
Isporuca za EPCG	1 075	1 235,1	114,9	1 241,9	99,5
Isporuca drugim EES	0	788,5		1 050,0	75,1
Ukupan plasman	40 691	41 248,6	101,4	40 931,8	100,8

U tabeli 3. prikazano je kako su se kretale mesečna ostvarenja proizvodnje EPS-a u odnosu na plan za 2007. godine kao i u odnosu na ostvareno u 2006. godini.

Tabela 3.

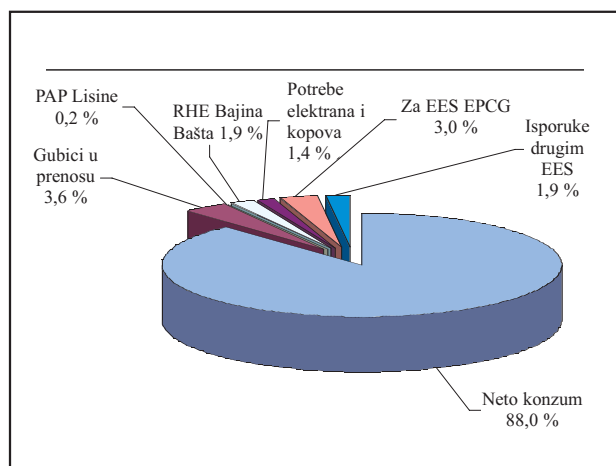
Proizvodnja EPS-a: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Plan za 2007. godinu	(GWh)	3 901,0	3 497,0	3 719,0	3 140,0	2 928,0	2 789,0	2 722,0	2 625,0	2 568,0	2 968,0	3 398,0	3 824,0	38 079,0
Ostvareno u 2007. godini	(GWh)	3 715,7	3 224,8	3 425,3	3 042,2	3 011,8	2 995,4	2 781,4	2 689,0	2 706,1	3 372,2	3 795,4	4 219,7	38 979,0
O. 2007/P. 2007.	(%)	95,2	92,2	92,1	96,9	102,9	107,4	102,2	102,4	105,4	113,6	111,7	110,3	102,4
Ostvareno u 2006. godini	(GWh)	3 896,0	3 572,7	3 851,9	3 065,1	2 896,1	2 838,8	2 831,5	2 659,3	2 714,4	3 057,7	3 425,1	3 753,0	38 561,6
O. 2007/O. 2006. godini	(%)	95,4	90,3	88,9	99,3	104,0	105,5	98,2	101,1	99,7	110,3	110,8	112,4	101,1

Tabela 4.

Bruto konzum bez pumpanja: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Plan za 2007. godinu	(GWh)	4 224,0	3 737,0	3 840,0	2 982,0	2 755,0	2 662,0	2 620,0	2 551,0	2 631,0	3 162,0	3 793,0	4 143,0	39 099,0
Ostvareno u 2007. godini	(GWh)	3 751,9	3 362,2	3 444,7	2 825,6	2 640,3	2 548,4	2 623,7	2 620,2	2 661,5	3 282,2	3 763,9	4 260,5	37 785,1
O. 2007/P. 2007.	(%)	88,8	90,0	89,7	94,8	95,8	95,7	100,2	102,7	101,2	103,8	99,2	102,8	96,6
Ostvareno u 2006. godini	(GWh)	4 070,9	3 599,3	3 675,0	2 841,4	2 633,6	2 545,5	2 489,8	2 488,6	2 511,3	2 907,0	3 441,8	3 921,9	37 125,9
O. 2007/O. 2006.	(%)	92,2	93,4	93,7	99,4	100,3	100,1	105,4	105,3	106,0	112,9	109,4	108,6	101,8

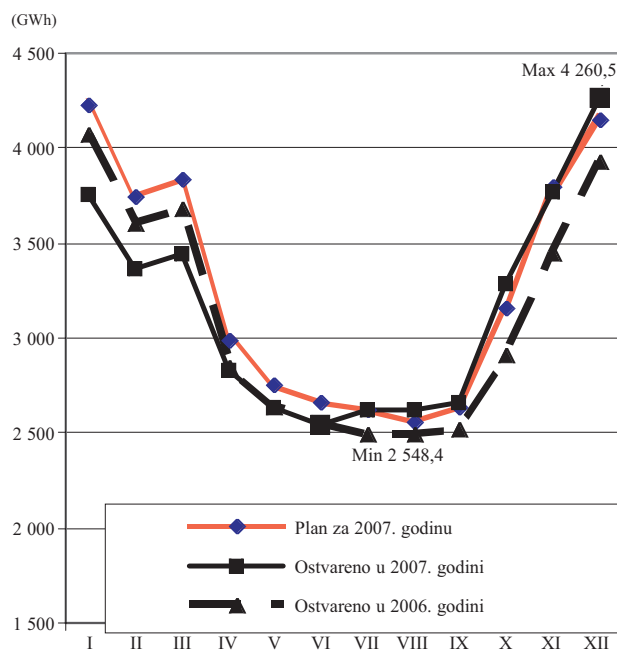


Slika 3. Ukupan plasman

2.3. Isporučka električne energije EPS-a EPCG

Isporučka električne energije i EPS-a, i EPCG u 2007. godini je u skladu sa dugoročnim ugovorom.

EPS je tokom 2007. godine EPCG isporučio električne energije 1 235,1 GWh ili 114,9 % od pla-



Slika 4. Bruto konzum bez pumpanja

Tabela 5.

Proizvodnja i Bruto konzum bez pumpanja: ostvarenje tokom 2007. godinu

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Proizvodnja u 2007. godini	(GWh)	3 715,7	3 224,8	3 425,3	3 042,2	3 011,8	2 995,4	2 781,4	2 689,0	2 706,1	3 372,2	3 795,4	4 219,7	38 979,0
Bruto konzum u 2007. godini	(GWh)	3 751,9	3 362,2	3 444,7	2 825,6	2 640,3	2 548,4	2 623,7	2 620,2	2 661,5	3 282,2	3 763,9	4 260,5	37 785,1

Tabela 6.

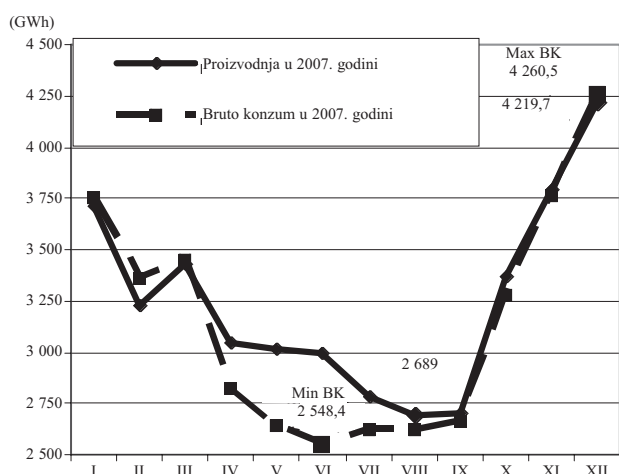
Planirane maksimalne snage konzuma u 2007. godini u trećoj sredi meseca i ostvarene u trećoj sredi meseca 2007. i 2006. godine

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Plan za 2007. godinu	(GW)	6,752	6,461	6,294	5,792	4,760	4,616	4,344	4,470	4,900	5,970	6,472	6,806
Ostvareno u 2007. godini	(GW)	5,806	6,091	5,446	5,235	4,600	4,595	4,555	4,127	4,918	5,745	6,578	6,534
O. 2007./P. 2007.	(%)	86,0	94,3	86,5	90,4	96,6	99,5	104,9	92,3	100,4	96,2	101,6	96,0
Ostvareno u 2006.	(GW)	6,004	5,694	5,989	5,196	4,379	4,405	4,265	4,374	4,784	5,431	5,762	6,264
O. 2007./O. 2006.	(%)	96,7	107,0	90,9	100,8	105,0	104,3	106,8	94,4	102,8	105,8	114,2	104,3

Tabela 7.

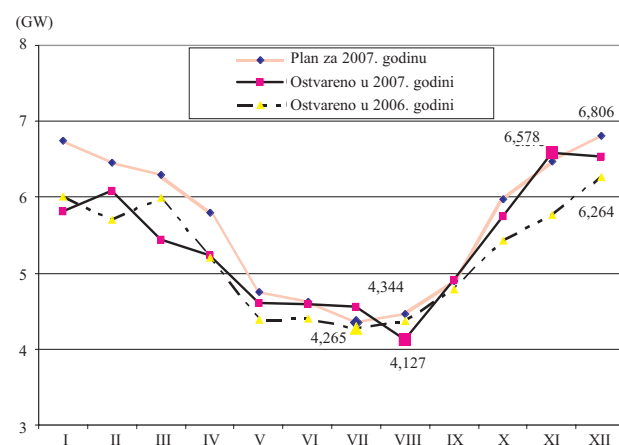
Ostvarene maksimalne snage konzuma u 2007. i 2006 godini u trećoj sredi meseca

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ostvareno u 2007. godini	(GW)	6,295	6,194	5,895	5,576	4,859	4,650	4,568	4,779	5,239	5,933	6,578	7,305
Ostvareno u 2006. godini	(GW)	6,940	6,675	6,435	5,584	4,982	4,780	4,428	4,730	4,912	5,832	6,274	6,876
O. 2007./O. 2006.	(%)	90,7	92,8	91,6	99,9	97,5	97,3	103,2	101,0	106,7	101,7	104,8	106,2



Slika 5. Mesečna proizvodnja i bruto konzum (bez pumpanja) u EPS-u

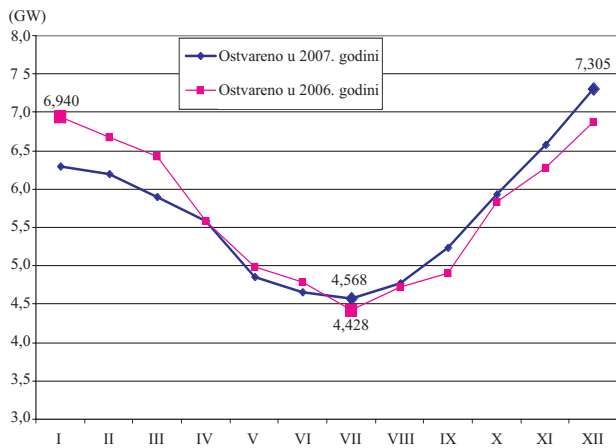
na, ali to je u odnosu na isporučenu električnu energiju u 2006. godini za 0,5 % manje (tabela 6 i slika 8).



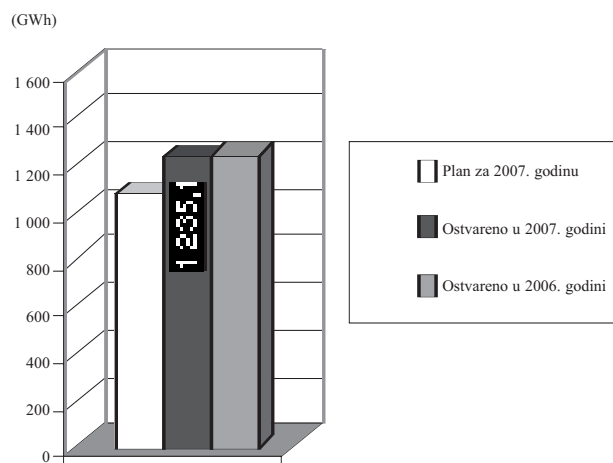
Slika 6. Planirane maksimalne snage konzuma u 2007. godini u trećoj sredi meseca i ostvarene u trećoj sredi 2007. i 2006. godine

2.4. Nabavka i isporuka električne energije od drugih EES

Na slici 9, koja prikazuje planiranu i ostvarenu nabavku električne energije od strane EPS-a tokom



Slika 7. Ostvarene maksimalne snage konzuma u 2007. i 2006. godini



Slika 8. Isporuca EPS za EPCG

Tabela 8.

Isporuca električne energije EPS-a EPCG

EPS za EPCG	2007. godina		Ostvareno 2007. /Plan 2007. godine	2006. godina	Ostvareno 2007. /Ostvareno 2006.
	Plan	Ostvareno	(2/1)	Ostvareno	(2/5)
	(GWh)		(%)	(GWh)	(%)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	1 075	1 235,1	114,9	1 241,9	99,5

Tabela 9.

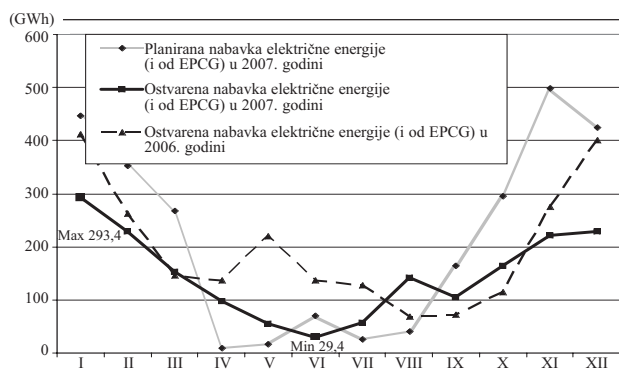
Mesečna nabavka električne energije: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Planirana nabavka električne energije (i od EPCG) u 2007. godini	(GWh)	446,0	353,0	268,0	10,0	17,0	70,0	25,0	40,0	164,0	296,0	498,0	425,0	2 612,0
Ostvarena nabavka električne energije (i od EPCG) u 2007. godini	(GWh)	293,4	229,7	153,1	97,1	55,9	29,4	56,3	142,7	104,7	163,7	221,2	229,0	1 776,4
Ostvarena nabavka (i od EPCG) u 2006. godini	(GWh)	411,4	261,8	146,5	136,0	219,4	136,8	127,2	68,4	72,0	115,2	274,9	400,1	2 370,1

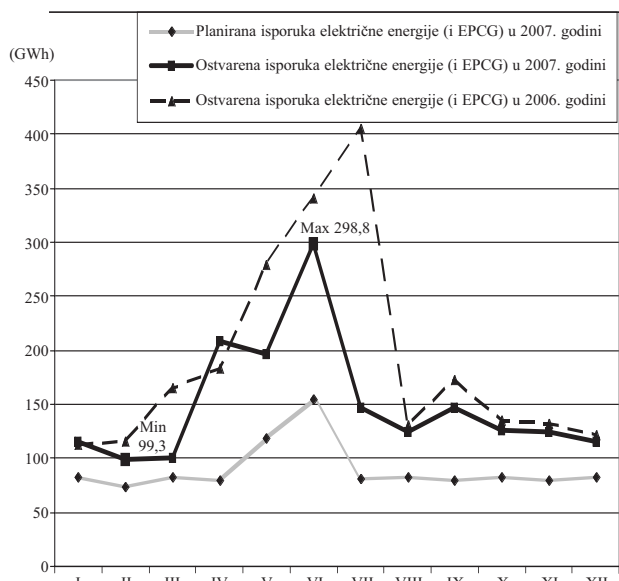
Tabela 10.

Mesečna isporuka električne energije: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Planirana isporuka električne energije (i EPCG) u 2007. godini	(GWh)	82,0	74,0	82,0	79,0	118,0	155,0	81,0	82,0	79,0	82,0	79,0	82,0	1,075 0
Ostvarena isporuka električne energije (i EPCG) u 2007. godini	(GWh)	114,9	99,3	99,9	208,2	196,9	298,8	146,9	124,9	146,3	126,2	124,1	115,3	1,801 6
Ostvarena isporuka električne energije (i EPCG) u 2006. godini	(GWh)	411,4	261,8	146,5	136,0	219,4	136,8	127,2	68,4	72 0	115,2	274,9	400,7	2,370 1



Slika 9. Nabavka



Slika 10. Isporuka

2007. godine se vidi da je ostvarena nabavka bila manja od plana u zimskim mjesecima, a veća u ljetnjim. Razlog je u potrebama potrošnje na Kosovu i Metohiji, koja se odvija mimo planiranja EPS-a. Skoro sva nabavka u ljetnjim mjesecima je za potre-

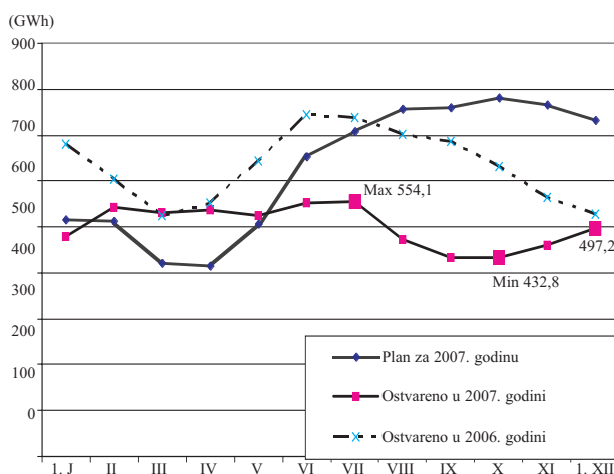
be Kosova i Metohije. Plan nabavke električne energije je iznosio 86,9 % plana (sa EPCG).

Isporuka električne energije drugim sistemima (slika 10 i tabela 10) je, kao što se vidi, bila tokom 2007. godine veća od planirane. Plan isporuka električne energije je iznosio 188,3 % plana (sa EPCG).

2.5. Stanje akumulacija

U tabeli 11. i pripadajućem dijagramu na slici 11. prikazano je stanje akumulacija u EES EPS-a tokom 2007. godine, sa poređenjem u odnosu na 2006. godinu

Stanje je bilo takvo da je 31. 12. 2007. godine dočekan sa **74,7 %** plana akumulacija, a to je **59,6 %** maksimalno mogućih akumulacija EES EPS-a.



Slika 11. Akumulacije EPS-a bez Pive

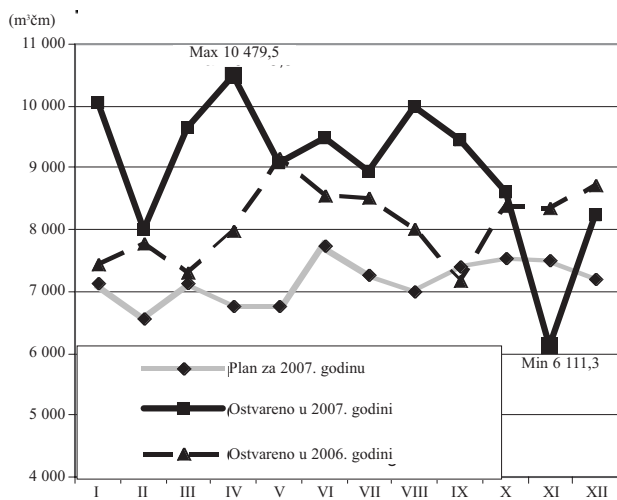
2.6. Otkrivka i proizvodnja uglja

Pošto od veličine otkrivke uglja zavisi proizvodnja uglja, a samim tim i popunjenost deponija uglja i rad TE, to će se u ovom poglavlju kao i na sli-

Tabela 11. Akumulacija za HE: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		01. J	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	01. XII	31. XII
Plan za 2007. godinu	(GWh)	517,0	513,8	419,8	413,5	506,6	651,8	706,7	755,9	761,0	780,7	767,1	731,4	633,4
Ostvareno u 2007. godini	(GWh)	480,1	541,8	530,9	535,5	524,7	552,1	554,1	472,7	432,9	432,8	466,2	497,2	473,2
O. 2007./P. 2007.	(%)	92,4	105,4	126,5	129,5	103,6	84,7	78,4	62,5	56,9	54,4	60,3	68,0	74,7
Ostvareno u 2006. godini	(GWh)	679,4	605,1	523,6	552,1	645,2	743,4	737,0	701,7	685,5	631,8	563,1	526,3	477,3
O 2007./O 2006.	(%)	70,7	89,5	101,4	97,0	81,3	74,3	75,2	67,4	63,2	68,5	82,1	94,5	99,1
O 2007./Maksimum	(%)	60,4	68,2	66,8	67,4	66,0	69,5	69,7	59,5	54,5	54,5	58,2	62,6	59,6

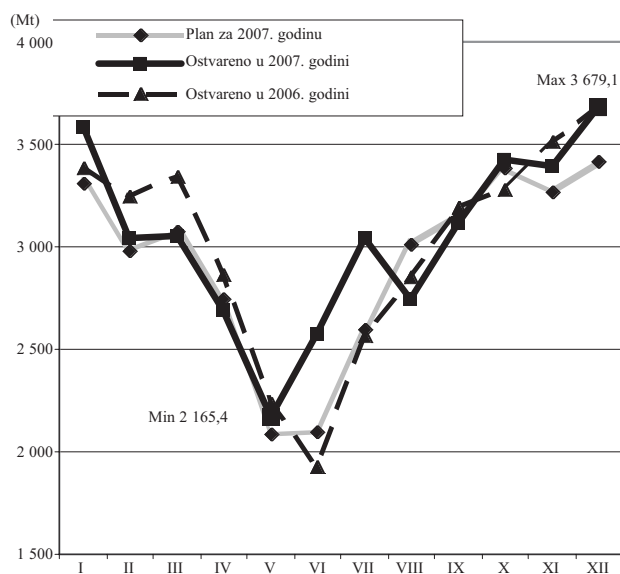
ci 12 i u tabeli 12 dati i ova problematika, jer njena uspešnost itekako utiče na ostale rezultate ostvarenja EB zemlje.



Slika 12. Otkrivka

Ostvarenje plana otkrivke uglja u EPS-u u 2007. godini (bez podataka za plan i proizvodnju na Kosovu i Metohiji) je iznosilo **125,6 %** i veće je od ostvarenja u 2006. godini za **11,1 %**.

Ostvarenje plana proizvodnje uglja u EPS-u u 2007. godini (bez podataka za plan i proizvodnju na



Slika 13. Mesečna proizvodnja uglja

Kosovu i Metohiji) je iznosilo **103,9 %** i veće je od ostvarenja u 2006. godini za **1,3 %** (prikazano na slici 13 i u tabeli 13).

2.7. Deponija uglja

U energetskom bilansu EPS-a, plan deponija uglja za TE i njihovo stanje tokom 2007. godine pri-

Tabela 12.

Mesečna otkrivka: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Plan za 2007. godinu	(m ³ čvrste mase)	7 135,0	6 565,0	7 145,0	6 760,0	6 745,0	7 745,0	7 265,0	6 995,0	7 385,0	7 550,0	7 505,0	7 205,0	86 000,0
Ostvareno u 2007. godini	(m ³ čvrste mase)	10 045,2	8 015,0	9 637,4	10 479,5	9 073,3	9 472,9	8 944,4	9 975,7	9 457,5	8 598,9	6 111,3	8 233,4	108 044,4
O. 2007./P. 2007.	(%)	140,8	122,1	134,9	155,0	134,5	122,3	123,1	142,6	128,1	113,9	81,4	114,3	125,6
Ostvareno u 2006. godini	(m ³ čvrste mase)	7 429,9	7 753,3	7 292,2	7 959,2	9 139,2	8 532,2	8 521,0	8 007,8	7 163,6	8 367,6	8 345,7	8 727,4	97 239,0
O. 2007./O. 2006.	(%)	135,2	103,4	132,2	131,7	99,3	111,0	105,0	124,6	132,0	102,8	73,2	94,3	111,1

Tabela 13.

Mesečna proizvodnja uglja: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

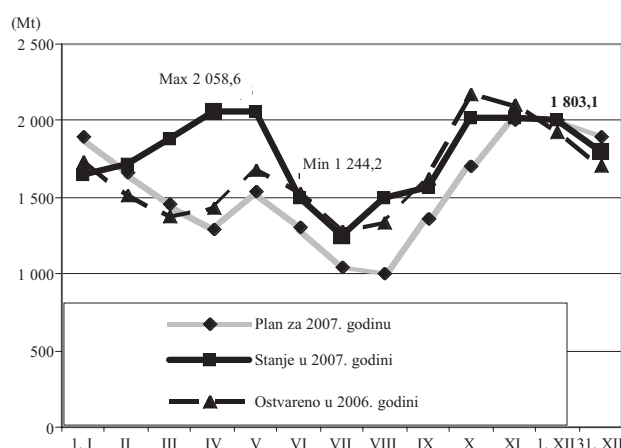
EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Plan za 2007. godinu	(Mt)	3 312,0	2 975,0	3 078,0	2 748,0	2 087,0	2 097,0	2 595,0	3 013,0	3 158,0	3 378,0	3 268,0	3 418,0	35 127,0
Ostvareno u 2007. godini	(Mt)	3 585,9	3 042,0	3 050,9	2 688,3	2 165,4	2 572,9	3 041,1	2 740,1	3 119,3	3 427,9	3 393,9	3 679,1	36 506,7
O. 2007./P. 2007.	(%)	108,3	102,3	99,1	97,8	103,8	122,7	117,2	90,9	98,8	101,5	103,9	107,6	103,9
Ostvareno u 2006. godini	(Mt)	3 383,6	3 247,6	3 337,5	2 866,3	2 232,2	1 920,4	2 566,4	2 852,8	3 188,1	3 273,4	3 506,0	3 679,8	36 054,1
O. 2007./O. 2006.	(%)	106,0	93,7	91,4	93,8	97,0	134,0	118,5	96,0	97,8	104,7	96,8	100,0	101,3

Tabela 14.

Mesečne deponije uglja za TE: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu
sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		01. I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	01. XII	31. XII
Plan za 2007. godinu	(Mt)	1 890,0	1 660,0	1 460,0	1 290,0	1 540,0	1 300,0	1 040,0	1 000,0	1 36,00	1 710,0	2 000,0	2 010,0	1 890,0
Stanje ostvareno u 2007. godini	(Mt)	1 642,0	1 714,9	1 886,0	2 058,6	2 057,1	1 493,3	1 244,2	1 495,6	1 565,5	2 015,9	2 023,1	2 005,5	1 803,1
O. 2007/P. 2007.	(%)	86,9	103,3	129,2	159,6	133,6	114,9	119,6	149,6	115,1	117,9	101,2	99,8	95,4
Ostvareno u 2006. godini	(Mt)	1 731,0	1 511,9	1 370,3	1 422,8	1 676,6	1 522,5	1 282,0	1 330,1	1 622,3	2 176,1	2 096,2	1 924,0	1 700,8
O. 2007/O. 2006.	(%)	94,9	113,4	137,6	144,7	122,7	98,1	97,1	112,4	96,5	92,6	96,5	104,2	106,0
O. 2007/Maksimum	(%)	76,0	79,4	87,3	95,3	95,2	69,1	57,6	69,2	72,5	93,3	93,7	92,8	83,5

kazano je na slici 14 i u tabeli 14, sa poređenjem stanja deponija u odnosu na ostvareno u 2006. godini. Kao što se vidi, kraj godine je dočekan sa **95,4%** plana što je **83,5%** od maksimalno mogućih deponija.



Slika 14. Deponije

2.8. ZAKLJUČAK

Kada se analiziraju proizvodnja i potrošnja električne energije u 2007. godini, kao i ostali aspekti vezani za tu vrstu problematike, može se konstatovati sledeće:

- zadnjih nekoliko godina kao posledica kvalitetnijih remonata, pojedinih obavljenih revitalizacija i održavanja, evidentni su i bolji rezultati u radu i proizvodnji čitavog EES EPS-a, koji su u 2007. godini obilovali nizom rekorda od postojanja EPS-a;
- tarifni sistem i netržišna cijena električne energije, posustaju u smanjenju maksimalnog dnevnog opterećenja u mreži EPS-a, kao i u eventualnom rastu minimalnog dnevnog opterećenja, zbog neusklađenosti-dispariteta cena energenata, što dovodi do nešto manje ravnomernosti dnevnog dijagrama opterećenja na nivou EES;
- delimično se popravljaju i tehnička efikasnost izvora električne energije;
- potrebno je stvoriti uslove za što racionalnije korišćenje električne energije;
- potrebno je nastaviti sa intenzivnim ulaganjem u remonte na svim nivoima, nastavkom revitalizacije i
- što hitnijim novim investicijama, kako u hidro tako i u termo sektoru, jer potrebe su sve veće, a vremešnost postojećih izvora je evidentna.

3. ELEKTROPRIVREDA CRNE GORE

3.1. Proizvodnja električne energije

U 2007. godini, energetske bilansom elektroprivrede Crne Gore predviđena je:

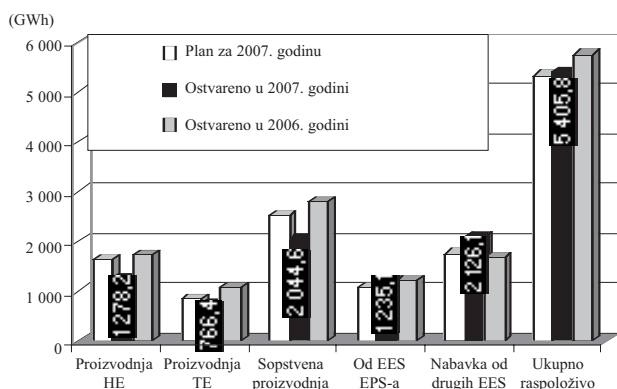
- proizvodnja iz sopstvenih izvora 2 517 GWh (HE 1 658 GWh, TE 859 GWh) i
- nabavka od drugih EES-a (uključujući i od EPS-a) 2 839 GWh.

Ukupna proizvodnja električne energije u EPCG je iznosila **2 044,6 GWh (62,5 % iz HE a**

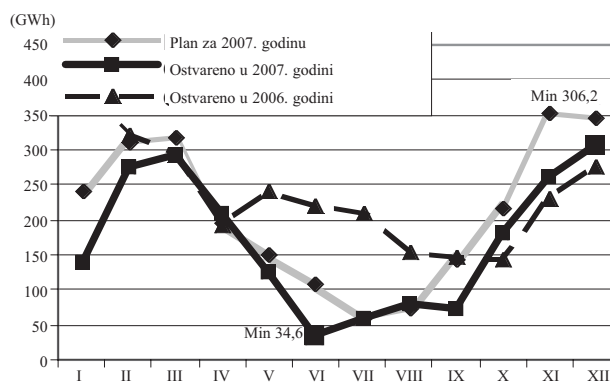
Tabela 15.

Ostvarenje bilansa proizvodnje (na pragu elektrana) i nabavki električne energije EES-a EPCG

Raspoloživo	2007. godina		Ostvareno 2007./ Planirano 2007. (2/1)	Ostvareno 2006. (2/4)	
	Planirano	Ostvareno		(GWh)	(%)
	(GWh)		(%)	(GWh)	(%)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Proizvodnja HE	1 658	1 278,2	77,1	1 743,1	73,3
Proizvodnja TE	859	766,4	89,2	1 075,4	71,3
Ukupna proizvodnja	2 517	2 044,6	81,2	2 818,4	72,5
Nabavka od EES EPS-a	1 075	1 235,1	114,9	1 241,9	99,4
Nabavka od drugih EES	1 764	2 126,1	120,5	1 709,3	124,4
Ukupno raspoloživo	5 356	5 405,8	100,9	5 769,6	93,7



Slika 15. Ostvarenje EEB EPCG-a



Slika 16. Proizvodnja EPCG-a

Tabela 16.

Ostvarenje bilansa potrošnje i isporuka električne energije EES EPCG

Plasman	2007. godina		Ostvareno 2007./ Planirano 2007. (2/1)	2006. godina Ostvareno (2/1)	
	Planirano	Ostvareno		(GWh)	(%)
	(GWh)		(%)	(GWh)	(%)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Direktni potrošači	2 154	2 155,7	101,1	2 142,3	100,6
Distribucije (bruto)	2 270	2 333,8	102,8	2 404,5	97,1
Gubici u prenosu	170	157,2	92,5	156,6	100,4
Ukupna potrošnja	4 594	4 646,7	101,1	4 703,4	98,8
Isporuka EPS-u	762	647,5	85,0	994,2	65,1
Isporuka drugim EES	0	111,6		71,9	155,1
Ukupan plasman	5 356	5 405,8	100,9	5 769,6	93,7

37,7 % iz TE), dok su nabavke električne energije od drugih EES-a (uključujući i od EPS-a) iznosile **3 361,2 GWh**.

Plan proizvodnje iz sopstvenih izvora je manji za **18,8 %**. HE su svoj plan ostvarile sa **77,1 %** a TE je ostvarila sa **89,2 %** plana.

Nabavka električne energije od drugih EES-a (uključujući i od EPS-a) je veća za **18,4 %** od plana.

Ukupno raspoloživa električna energija je bila za **0,9 %** veća od plana za 2007. godinu.

Kada se prave poređenja proizvodnje električne energije u 2007. godini u odnosu na 2006. godinu, onda su odnosi sledeći:

- sopstvena proizvodnja je manja za **27,5%**, pri čemu je proizvodnja HE manja za **26,7 %** a TE manja za **28,7 %**;
- nabavka električne energije od drugih EES-a (uključujući i EPS) je veća za **14,7 %** i
- raspoloživa električna energija je manja za **5,9 %**.

Svi gore navedeni podaci dati su u tabeli 15. i na slici 15.

Karakteristične proizvodnje na pragu elektrana:

- najveća mesečna proizvodnja je bila u **decembru** 2007. godine i iznosila je **306,2 GWh** (najveća mesečna proizvodnja u 2006. godini je bila 395,9 GWh), tog meseca HE su proizvele **195,0 GWh**, a TE **111,2 GWh** i to su njihove najveće proizvodnje u 2007. godini (najveća mesečna proizvodnja HE u 2006. godini je bila 303,3 GWh a TE 121,9 GWh);

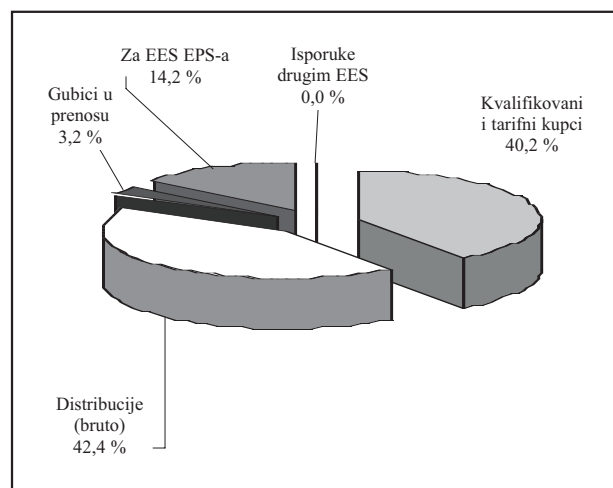
3.2. Potrošnja električne energije

Ukupne potrebe potrošača električne energije u CG su iznosile **4 646,7 GWh**, dok su isporuke drugim EES (uključujući i EPS) iznosile **759,1 GWh**.

Plan potrošnje domaćih potrošača električne energije je ostvaren sa **101,1 %**, a isporuke električne energije drugim EES (uključujući i EPS) je iznosio **99,6 %** plana, tako da je ukupan plasman iznosio **100,9 %** plana. U tabeli 18. i na slici 17. se vidi kakvo je učešće potrošača električne energije. Vidi se da su direktni potrošači ispunili plan sa **101,1 %** (potrošili su električne energije više nego 2006. godine za **0,6 %**). Distributivna potrošnja je **102,8 %** od plana, i ista ima pad od **2,9 %** u odnosu na 2006. godinu. Gubici električne energije u prenosu su manji od planiranih, za **7,5 %** ali su i u odnosu na 2006. godinu veći za **0,4 %**. Na slici 19 i tabeli 19, prikazana je prosečna proizvodnja i potrošnja električne energije bruto konzuma .

Karakteristične potrošnje električne energije:

- najveća mesečna bruto potrošnja je bila u **decembru** 2007. godine i iznosila je **470,7 GWh** (najve-

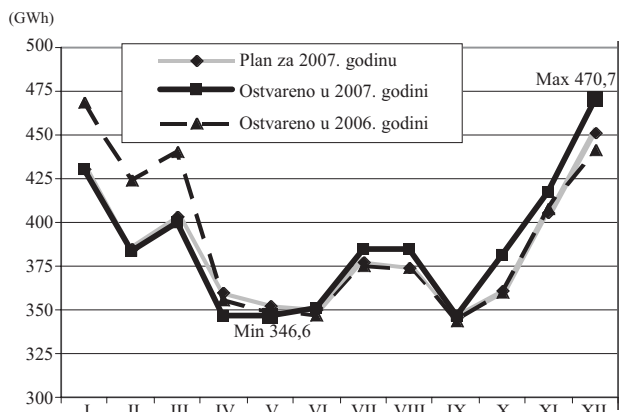


17. Struktura potrošnje

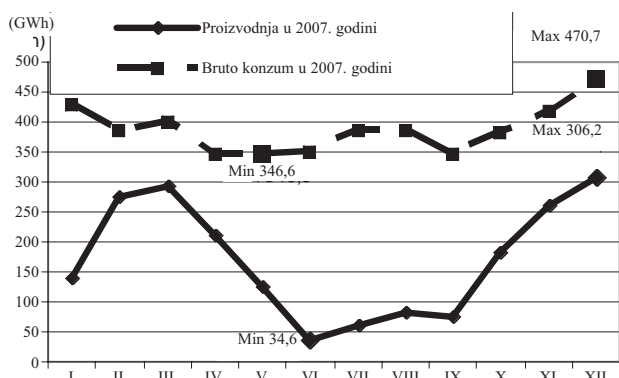
Tabela 17.

Proizvodnja EPCG: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Plan za 2007. godinu	(GWh)	239,0	311,0	319,0	194,0	151,0	108,0	60,0	75,0	143,0	217,0	354,0	346,0	2 517,0
Ostvareno u 2007. godini	(GWh)	139,2	276,4	292,7	211,0	124,8	34,6	60,7	81,7	73,3	182,7	261,3	306,2	2 044,6
O. 2007/P. 2007.	(%)	58,3	88,9	91,8	108,8	82,6	32,0	101,1	109,0	51,2	84,2	73,8	88,5	81,2
Ostvareno u 2006. godini	(GWh)	395,9	319,7	292,9	193,0	239,1	220,8	209,4	152,5	144,9	144,1	230,7	275,4	2 818,4
O. 2007/O. 2006.	(%)	35,2	86,5	99,9	109,3	52,2	15,7	29,0	53,6	50,6	126,8	113,3	111,2	72,5



Slika 18. Bruto konzum

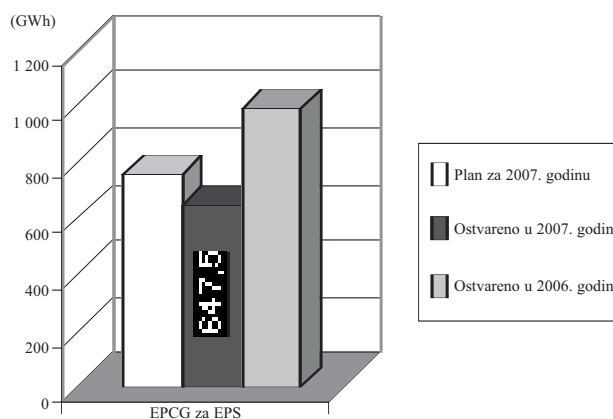


Slika 19. Proizvodnja i Bruto konzum

ća mesečna bruto potrošnja u 2005. godini je bila 468,2 GWh) i
 – prosečna dnevna potrošnja na godišnjem nivou u 2007. godini je iznosila 12,6 GWh (toliko i bila planira a u 2006. godini ostvarena dnevna prosečna potrošnja je bila 12,4 GWh.

3.3. Isporuka električne energije EES EPS-a

U tabeli 20 i na slici 20. prikazana je isporuka električne energije elektroprivredi Srbije. EES EPS-a imao je potrebu ispunjenja svoga plana za 2007. godinu sa 85 % odnosno u odnosu na 2006. godinu 65,3 %.



Slika 20. Isporuka električne energije EPCG za EPS

Tabela 18.
 Bruto konzum: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPCG		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Plan za 2007. godinu	(GWh)	430,0	385,0	403,0	360,0	352,0	350,0	377,0	374,0	346,0	361,0	405,0	451,0	4 594,0
Ostvareno u 2007. godini	(GWh)	430,1	384,0	400,5	347,1	346,6	351,5	385,3	384,9	347,1	381,8	417,1	470,7	4 646,7
O. 2007/P. 2007.	(%)	100,0	99,7	99,4	96,4	98,5	100,4	102,2	102,9	100,3	105,8	103,0	104,4	101,1
Ostvareno u 2006. godini	(GWh)	468,2	423,7	440,6	355,9	349,1	346,7	375,3	373,5	343,3	359,3	408,1	441,1	4 684,7
O. 2007/O. 2006.	(%)	91,9	90,6	90,9	97,5	99,3	101,4	102,7	103,1	101,1	106,3	102,2	106,7	99,2

Tabela 19.

Proizvodnja i Bruto konzum: ostvarenje tokom 2007. godinu

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Proizvodnja u 2007. godini	(GWh)	139,2	276,4	292,7	211,0	124,8	34,6	60,7	81,7	73,3	182,7	261,3	306,2	2 044,6
Bruto konzum u 2007. godini	(GWh)	430,1	384,0	400,5	347,1	346,6	351,5	385,3	384,9	347,1	381,8	417,1	470,7	4 646,7

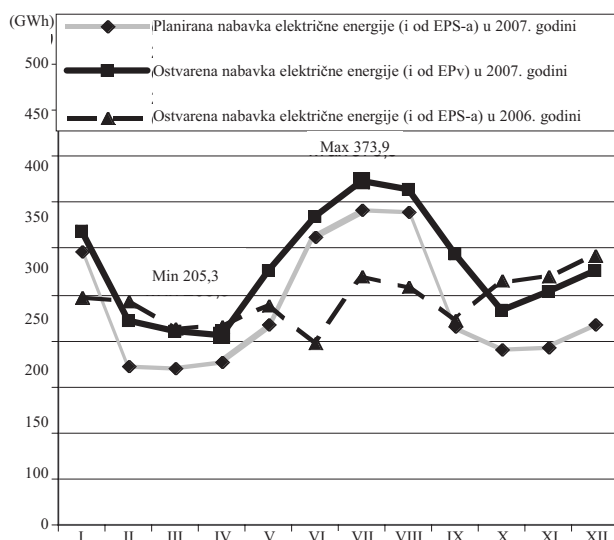
Isporuca električne energije EPCG EPS-u

EPCG za EPS	2007. godina		Ostvareno 2007./ Planirano 2007. (2/1)	Ostvareno 2006. (2/4)	
	Planirano	Ostvareno		(GWh)	(%)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	762	647,5	85,0	991,1	65,3

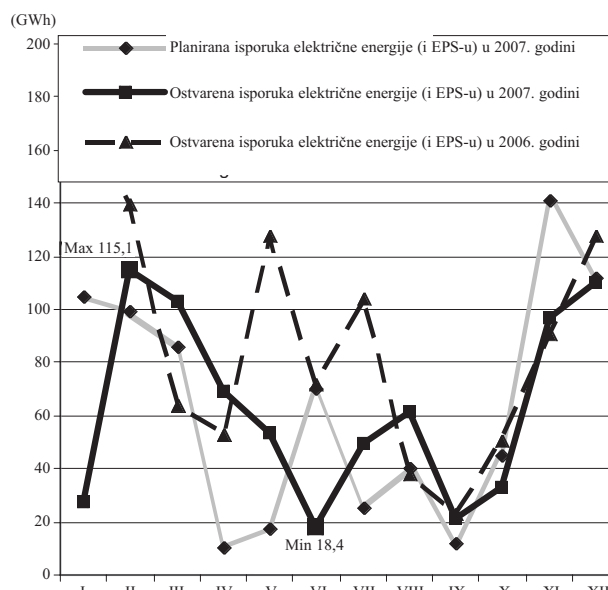
3.4. Nabavka i isporuka električne energije drugim EES

Nabavke električne energije (uključujući i od EPS-a) tokom 2006. godine (slika 21 i tabela 21) bile su, stalno veće od planiranih, zbog izuzetno loših hidroloških uslova.

Isporuke električne energije (i za EPS) tokom 2007. godine bile su, osim u januaru, junu oktobru, i novembru, veće od plana, kao što se to vidi na slici 22 i tabeli 22. i bile su na nivou plana.



Slika 21. Nabavka



Slika 22. Isporuca

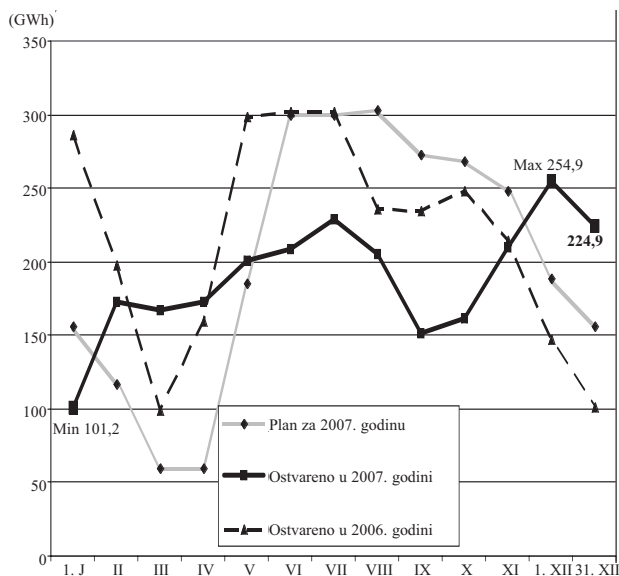
3.5. Stanje akumulacije HE Piva

Kretanje akumulacije za HE Piva, koju dugoročnim ugovorom koristi EPS, prikazano je u tabeli 23. i slikom 23.

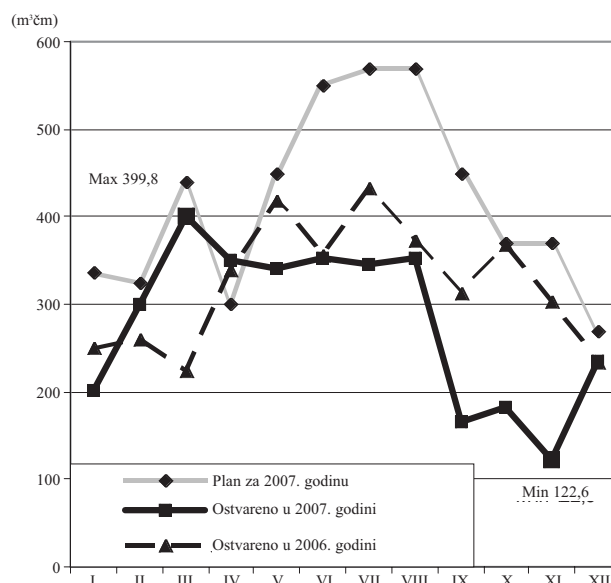
Kraj 2007. godine dočekan sa 144,2 % plana, sto je 73,5 % maksimalne vrednosti te akumulacije, a to je 223,6 % u odnosu na ostvareno krajem 2006. godine.

Isporuca električne energije EPCG EPS-u

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Planirana nabavka električne energije (i od EPS-a) za 2007. godini	(GWh)	296,0	173,0	170,0	176,0	218,0	312,0	342,0	339,0	215,0	189,0	192,0	217,0	2 839,0
Ostvarena nabavka električne energije (i od EPS-a) u 2007. godini	(GWh)	318,1	222,6	210,6	205,3	275,4	335,3	373,9	364,7	295,2	232,0	253,0	274,9	3 361,2
Ostvarena nabavka (i od EPS-a) u 2006. godini	(GWh)	246,0	243,1	211,81	215,7	237,7	197,9	270,1	258,9	221,5	265,8	268,2	292,8	2 929,3



Slika 23. Akumulacija HE Pive



Slika 24. Otkrivka

3.6. Otkrivka i proizvodnja uglja

Pošto od veličine otkrivke uglja zavisi proizvodnja uglja, a samim tim i popunjenost deponija

uglja i rad TE, to će se u ovom poglavlju kao i na slici 24 i u tabeli 24 dati i ova problematika, jer njena uspešnost itekako utiče na ostale rezultate ostvarenja EB zemlje, odnosno na rad TE Pljevlja.

Tabela 22.

Mesečna nabavka električne energije: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPCG		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Planirana isporuka električne energije (i EPS-u) za 2007. godinu	(GWh)	105,0	99,0	86,0	10,0	17,0	70,0	25,0	40,0	12,0	45,0	141,0	112,0	762,0
Ostvarena isporuka električne energije (i EPS-u) u 2007. godini	(GWh)	27,3	115,1	102,8	69,2	53,6	18,4	49,4	61,5	21,4	32,9	97,2	110,4	759,1
Ostvarena isporuka električne energije (i EPS-u) u 2006. godini	(GWh)	173,7	139,1	64,1	52,8	127,68	72,0	104,2	37,9	23,1	50,6	90,8	127,2	1 063,0

Tabela 23.

Akumulacija za HE Piva: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		01. J	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	01. XII	31. XII
Plan za 2007. godinu	(GWh)	156,0	117,0	60,0	59,0	185,0	299,0	300,0	303,0	273,0	268,0	248,0	188,0	156,0
Ostvareno u 2007. godini	(GWh)	101,2	172,2	167,2	173,2	200,4	208,2	229,1	204,8	151,3	161,9	209,4	254,9	224,9
O 2007./P 2007.	(%)	64,9	147,2	278,7	293,6	108,3	69,6	76,4	67,6	55,4	60,4	84,4	135,6	144,2
Ostvareno u 2006. godini	(GWh)	286,4	196,9	99,0	159,5	298,0	301,4	301,3	236,1	234,3	248,1	214,4	146,8	100,6
O 2007./O 2006.	(%)	35,3	87,5	168,9	108,6	67,2	69,1	76,0	86,7	64,6	65,3	97,7	173,6	223,6
O 2007./Maksimum	(%)	33,1	56,3	54,6	56,6	65,5	68,0	74,9	66,9	49,4	52,9	68,4	83,3	73,5

Tabela 24.

Mesečna otkrivka uglja u rudniku Pljevlja: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Plan za 2007. godinu	(Mt)	335	325	440	300	450	550	570	570	450	370	370	270	5 000
Ostvareno u 2007. godini	(Mt)	200,5	300,2	399,8	350,0	341,7	353,6	345,8	351,6	165,8	181,3	122,6	235,5	3 348,5
O. 2007./P. 2007.	(%)	59,9	92,4	90,9	116,7	75,9	64,3	60,7	61,7	36,8	49,0	33,1	87,2	67,0
Ostvareno u 2006. godini	(Mt)	250,0	260,1	222,6	338,8	418,7	355,8	431,2	371,6	312,8	367,0	301,9	233,9	3 864,4
O. 2007./O. 2006.	(%)	80,2	115,4	179,6	103,3	81,6	99,4	80,2	94,6	53,0	49,4	40,6	100,7	86,6

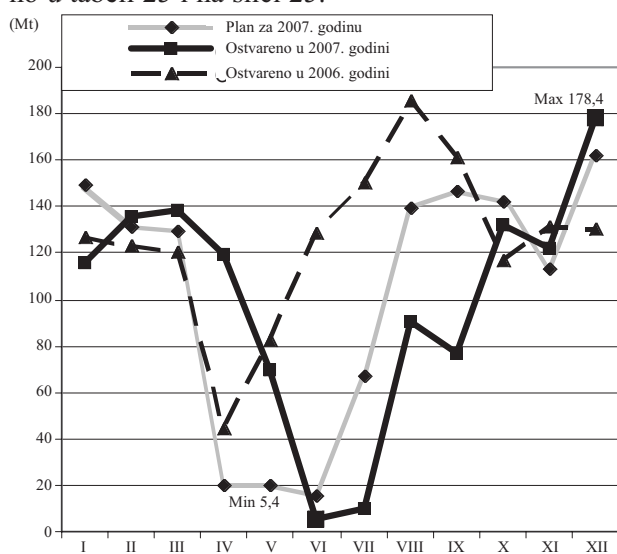
Tabela 25.

Mesečna proizvodnja uglja rudnika Pljevlja: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtom na ostvareno u 2006. godini

EPS		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno
Plan za 2007. godinu	(Mt)	149	131	129	20	20	15	67	139	147	142	113	162	1 234
Ostvareno u 2007. godini	(Mt)	115,8	135,5	138,6	119,8	69,8	5,4	10,2	90,7	76,7	132,3	122,3	178,4	1,195,5
O. 2007./P. 2007.	(%)	77,7	103,4	107,4	599,0	349,1	36,1	15,3	65,3	52,2	93,2	108,2	110,1	96,9
Ostvareno u 2006. godini	(Mt)	126,3	123,0	120,7	44,6	82,5	128,6	150,2	185,9	161,0	117,2	131,5	130,4	1,501,9
O. 2007./O. 2006.	(%)	91,6	110,2	114,8	268,7	84,7	4,2	6,8	48,8	47,7	112,9	93,0	136,8	79,6

Otkrivka uglja u Crnoj Gori u 2007. godini je iznosila **67,0 %** od plana. Ista je manja u odnosu na ostvareno u 2006. godini 13,4 %.

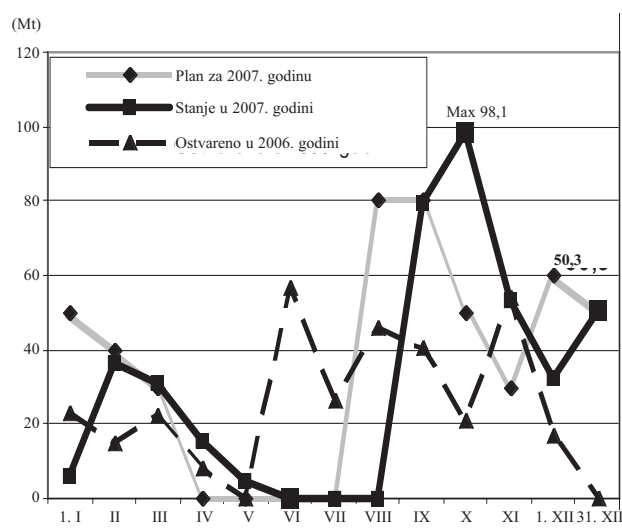
Proizvodnja uglja u Crnoj Gori u 2007. godini je iznosila **96,9 %** od plana. Ista je manja u odnosu na ostvareno u 2006. godini 20,4 %, isto je prilazano u tabeli 25 i na slici 25.



Slika 25. Mesečna proizvodnja uglja

3.7. Deponija uglja

U energetske bilansu Crne Gore, plan deponija uglja za TE i njihovo stanje tokom 2007. godine prikazano je na slici 26. i u tabeli 26, sa poređenjem: stanja deponija u odnosu na ostvareno u 2006. godini.



Slika 26. Deponija uglja TE

Tabela 26.

Deponija uglja TE Pljevlja: plan i ostvarenje tokom 2007. godinu sa osvrtnom na ostvareno u 2006. godini

EPS		01. I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	01. XII	31. XII
Plan za 2007. godinu	(Mt)	50,0	40,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	80,0	80,0	50,0	30,0	60,0	50,0
Ostvareno u 2007. godini	(Mt)	6,3	36,6	31,2	15,5	4,8	0,0	0,0	0,0	79,7	98,1	53,1	32,2	50,3
O. 2007./P. 2007.	(%)	12,6	91,6	104,0					0,0	99,6	196,2	177,1	53,7	100,5
Ostvareno u 2006. godini	(Mt)	23,1	15,0	22,1	8,4	0,0	56,5	26,2	45,8	40,4	21,0	53,6	16,6	6,3
O. 2007./O. 2006.	(%)	27,3	244,2	141,3	183,5		0,0	0,0	0,0	197,2	467,5	99,1	194,0	797,4
O2007/Maksimum	(%)	3,9	22,9	19,5	9,7	3,0	0,0	0,0	0,0	49,8	61,3	33,2	20,2	31,4

3.7. ZAKLJUČAK

Kada se analiziraju proizvodnja i potrošnja električne energije u 2007. godini, kao i ostali aspekti vezani za tu vrstu problematike, može se konstatovati sledeće:

- i dalje, već decenijski, je veliki nedostatak električne energije, koji se svake godine povećava, danas je veći od trećine potreba, posebno u uslovima loše hidrologije;
- nedovoljna otkrivka, samim tim i nedostajuća količina uglja, umanjuju mogućnost proizvodnje električne energije iz TE Pljevlja, koja zadnjih godina, posle kapitalnog remonta i velike stručnosti i zalaganja osoblja, postiže veliki stepen tehničke efikasnosti;
- potrebno je stvoriti uslove za što racionalnije korišćenje električne energije, posebno smanjiti gubitke u distributivnoj mreži – dovesti ih na nivo tehničkih gubitaka;
- potrebno je nastaviti sa intenzivnim ulaganjem u remonte na svim nivoima, pripremom revitalizacije, kao i
- izgradnjom novih proizvodnih kapaciteta i prenosne mreže.

Generalna napomena čitaocima:

Ukoliko bi čitalac proveravao zbirve u tabelama, našao bi mala neslaganja, što je posledica zaokruživanja na jednu decimalu, jer su podaci dati, recimo u kWh, a u tabelama su prikazivani u GWh, pa otuda i razlika. Isto važi i kada su procenti (%) u pitanju. Takođe i pojedina ostvarenja u 2006. godini, se razlikuju od datih u broju 1/2007, jer su neki od podataka korigovani i posle objavljivanja komercijalnih podataka, na osnovu kojih je vršena obrada podataka za 2006. godinu.

Rad je primljen u uredništvo 15. 02. 2008. godine



Branislav A. Bošković je rođen 1946. godine u Kolašinu. Srednju tehničku školu i prvi stepen elektrotehničkog fakulteta završio u Titogradu (danas Podgorica), a drugi stepen u Beogradu. Po završetku studija, radio u „Minelu” i „Elektronu”, kao i za strane kompanije, na izgradnji elektroenergetskih i industrijskih postrojenja u zemlji i inostranstvu. Od 1996. godine zaposlen u Zajednici jugoslovenske elektroprivrede. Oblast rada u ZJE je bio EEB SRJ.

4. LITERATURA

- [1] UGOVOR O DUGOROČNOJ POSLOVNO–TEHNIČKOJ SARADNJI, mart 1991. godine.
- [2] EEB REPUBLIKE SRBIJE (aktuelizovani) U 2006, i 2007. GODINI.
- [3] EB REPUBLIKE CRNE GORE U 2006, I 2007. GODINI.
- [4] KOMERCIJALNI PODACI EPS-a O OSTVARENJU EEB u 2006, Beograd, 21. 01. 2008. godine.
- [5] IZVEŠTAJ EPS-a O OSTVARENJU PROIZVODNJE UGLJA, Beograd, br. II-29/2-08 14. 01. 2007. godine.
- [6] IZVEŠTAJ RUDNIKA UGLJA PLJEVLJA O OSTVARENJU PROIZVODNJE UGLJA, Pljevlja, januar 2008. godine.
- [7] ELEKTROPRIVREDA SRBIJE 2007. GODINA, Beograd, 2008. godine.
- [8] ELEKTROPRIVREDA CRNE GORE 2007. GODINA, Nikšić, 2008. godine.
- [9] ELEKTROPRIVREDA SRBIJE 2007. GODINA, Beograd, 2008. godine.
- [10] Branislav A. Bošković, OSTVARENJE ELEKTROENERGETSKOG BILANSA ELEKTROPRIVREDE SRBIJE I CRNE GORE U 2006. GODINI, Časopis „Elektroprivreda”, br. 1, 2007.

Prenos električne energije

Autor prof. dr Dobrivoje Stojanović

Izdavač: Elektronski fakultet, Niš, A. Medvedeva 14

Knjiga ima 412 strana koje sadrže predgovor, osnovni tekst, ilustracije i urađene primere. Podeljena je na 12 glava. Uz osnovni tekst dodati su i prilozi kao 13. glava koji obuhvataju dopunsku materiju iz oblasti analize nesimetričnih kratkih spojeva i modelovanja elemenata mreža i postrojenja u ovim analizama. Spisak literature sadrži 85 bibliografskih podataka.

U Prvoj glavi razmatraju se opšta pitanja strukture elektroenergetskih sistema, njihove osnovne karakteristike i specifičnosti kao i vrste s obzirom na ulogu koju obavljaju u snabdevanju potrošača električnom energijom. Daje se pregled karakterističnih rešenja u svetu i našoj zemlji uključujući specifičnosti prenosa energije na daljinu jednosmernom strujom. Ukazuje se na ulogu malih elektrana koje se direktno uključuju u distributivne sisteme. Procenjuju se trendovi daljeg razvoja elektroenergetskih sistema generalno, kako u tehničkom, tako i u organizacionom i komercijalnom vidu.

Druga glava bavi se problematikom proračuna parametara nadzemnih i kablovskih vodova različite konstrukcije. Detaljno se izvode izrazi za proračune induktivnosti, kapaciteta i aktivne otpornosti. Prikazuje se način obuhvatanja efekata korone, nesimetričnog rasporeda provodnika, transponovanja faza, uzajamnog uticaja provodnika višestrukih vodova i faznog snopa.

Proračunima radnih stanja vodova posvećena je Treća glava. Izvode se različite zamen-

ske šeme za vodove i pokazuju načini proračuna svih karakterističnih veličina kod različitih skupova početnih podataka. U sklopu ovih razmatranja prikazuju se načini modelovanja potrošača preko statičkih karakteristika zavisnih od napona i učestanosti. Ukazuje se na moguća uprošćenja u zavisnosti od dužina vodova i naponskog nivoa.

Predmet razmatranja u Četvrtoj glavi su nadzemni vodovi najviših napona i velikih dužina kakvi se često imaju u savremenim elektroenergetskim sistemima. Izvode se jednačine voda sa raspodeljenim parametrima i zamenske šeme za vodove sa korekcionim faktorima, zasnovane na pomenutim jednačinama. Posebno se razmatra rad sa prirodnom snagom, koji je vrlo značajan u pogledu naponskih prilika i tokova reaktivne snage u sistemu, kao i rad u praznom hodu koji dovodi do povišenja napona.

Peta glava posvećena je energetskim transformatorima. Prikazuju se vrste transformatora prema tipu, načinu prenosa energije, broju faza i daju njihove zamenske šeme za proračune tokova snaga i naponskih prilika. Razmatraju se uslovi paralelnog rada s obzirom na sprege, prenosne odnose i impedanse kratkog spoja, kao i ekonomičnost paralelnog rada i broja uključenih transformatora. Vrlo detaljno se razmatra problematika zagrevanja transformatora. Ona je od izuzetnog značaja kod vođenja pogona transformatora koji, zbog velikih vremenskih

konstanti zagrevanja, mogu da podnose privremena preopterećenja.

Sinhroni generatori razmatraju se u Šestoj glavi. Polazeći od potpunih Parkovih (Park) diferencijalnih jednačina za prelazne procese, izvode se zamenske šeme generatora za modelovanje u pojedinim karakterističnim vremenskim periodima i odgovarajuće uprošćene relacije koje se koriste kod praktičnih proračuna struja kratkih spojeva. Razmatraju se stacionarni pogonski dijagrami generatora na osnovu kojih se utvrđuju granična moguća pogonska stanja u radu elektroenergetskog sistema.

Sedma glava razmatra problematiku prenosa električne energije preko međusobno spregnutih delova sistema različitih naponskih nivoa. Opisuje se način obrazovanja zajedničke galvaniski povezane ekvivalentne šeme, način modelovanja transformatora sa nominalnim i nenominalnim prenosnim odnosima i primena relativnih jedinica. Uvode se opšte konstante prenosnog sistema i na osnovu ovih izvode kružni dijagrami i ugaone karakteristike za snage na krajevima prenosa u različitim okolnostima.

Kratki spojevi u elektroenergetskom sistemu obrađuju se u Osmoj glavi. Izvode se relacije za prikazivanje vremenskog toka struja trofaznih kratkih spojeva i određivanje karakterističnih vrednosti ovih struja od značaja za izbor i dimenzionisanje elemenata elektroenergetskog sistema u pogledu mehaničkih i toplotnih naprezanja.

Deveta glava bavi se načinima uzemljenja neutralne tačke visokonaponskih mreža. Problematika uzemljenja, posebno distributivnih mreža, vrlo je važna u praktičnoj primeni zbog složenosti uslova rada mreža, prenaponskih pojava i delovanja zaštite i automatike u otklanjanju posledica i lociranju mesta kvara. Preko odgovarajućih relacija i dijagrama za procene efekata kvarova detaljno su prikazane karakteristike svih rešenja koja se primenjuju u praksi što olakšava izbor najboljeg rešenja u specifičnim uslovima.

U obimnoj Desetoj glavi izlaže se složena problematika modelovanja i analize statičke i dinamičke stabilnosti elektroenergetskih sistema. Detaljno se izvode relacije za proračune

jednomašinskih sistema uz iscrpna objašnjenja prirode elektromehaničkih prelaznih procesa koji nastaju kod poremećaja različite vrste. Razvijaju se modeli za analize višemašinskih, složenih elektroenergetskih sistema i prikazuju mogući uprošćeni postupci.

Prognoza potrošnje električne energije razmatra se u Jedanaestoj glavi. Prikazuju se različiti ekstrapolacioni modeli koji se zasnivaju na podacima iz prošlosti, kao i metode koje uzimaju u obzir i očekivane nove trendove razvoja i promene strukture potrošnje. Detaljno se prikazuje primena metode najmanjih kvadratnih odstupanja kod određivanja opštih parametara u ekstrapolacionim formulama.

U Dvanaestoj glavi razmatraju se tehnički i ekonomski uslovi za optimalni izbor preseka provodnika nadzemnih vodova s obzirom na investicione troškove i cenu gubitaka električne energije.

U Prilozima su dati izrazi za proračune struja i napona na mestu kvara kod mogućih vrsta kratkih spojeva i zamenske šeme za nulti redosled transformatora različite vrste.

Kao zaključak, može se reći da knjiga obrađuje tehnička i ekonomska pitanja prenosa i distribucije električne energije koja su vrlo važna u obrazovanju inženjera elektroenergetike. Razmatrana problematika obrađena je detaljno i sistematično. U pojedinim svojim delovima, kao što je zagrevanje transformatora, prelazni procesi u sinhronim generatorima, uzemljenje neutralne tačke mreža, materija prevazilazi po obimu i dubini izlaganja uobičajene univerzitetske kurseve iz predmetne oblasti. Knjiga je tehnički vrlo dobro obradjena, napisana je jasno i lepim jezikom, za šta autor zaslužuje posebno priznanje. Kao takva, ona će dobro poslužiti studentima elektroenergetike da savladaju složenu materiju prenosa električne energije, a biće i od velike koristi inženjerima u praksi, za osveženje već stečenih i sticanje novih znanja u razmatranoj oblasti.

U Beogradu, 24. 1. 2008.

Dr Jovan Nahman, dipl. ing. el.

Red. prof. Univerziteta u Beogradu, u penziji

Uputstvo autorima za saradnju u stručnom glasilu „Elektroprivreda”

**U stručnom glasilu se objavljuju kategorisani članci:
originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi i stručni radovi
iz oblasti elektroprivrede, odnosno energetike.**

Pismo: ćirilica ili latinica. Na početku se navode imena autora sa zvanjima i akademskim titulama, naziv preduzeća, odnosno dela preduzeća ili ustanove sa adresom, kao i naslov rada (na srpskom i engleskom jeziku). Rezime rada (na srpskom i engleskom jeziku) sadrži kratko izloženu osnovnu strukturu i sadržaj rada, i ne treba da sadrži više od 200 reči. Ključne reči se takođe navode na srpskom i engleskom jeziku.

Treba izbegavati celovita matematička izvođenja vezana za relacije koje opterećuju proučavanje rada. Neophodna matematička izvođenja mogu se dati, po potrebi, kao celine u vidu jednog ili više priloga. Treba obavezno koristiti SI sistem jedinica i opšte prihvaćene pojmove.

Jednačine treba numerisati uz desnu marginu teksta, u malim (okruglim) zagradama. Pozivanje na jednačine u tekstu vrši se pomoću malih zagrada, a pozivanje na literaturu pomoću srednjih (uglastih) zagrada. Značenje skraćeniće objasniti pri njenom prvom korišćenju u tekstu. Strane reči se prevode na srpski, a original se piše u zagradi iza prevoda. Napomena u tekstu treba da bude što manje, a ukoliko ih ima, treba da budu kratke. Napomene se označavaju rednim arapskim brojevima i navode se na dnu stranice, kao fusnote. Napomene u tabelama označavaju se malim slovima i navode se odmah ispod tabele. Na kraju rada prilaže se spisak korišćene literature. Za članke, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naslov ra-

da, pun naziv časopisa, broj i godina publikovanja i prvi i poslednji broj stranice. Za knjige, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naslov knjige, izdavač i godina izdanja. Za referate sa konferencija, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naziv referata, pun naziv konferencije, broj referata, mesto i vreme održavanja konferencije.

Rad ne treba da prelazi 15 kucanih strana formata A4 sa marginama od 3 cm. Tabele, slike i fotografije treba obeležiti po redosledu i uključiti u tekst.

Autor može dati predlog kategorizacije rada u skladu sa Uputstvom za uređivanje časopisa (originalni naučni rad, prethodno saopštenje, pregledni članak i stručni članak). Autor ne može istu ili sličnu verziju rada istovremeno ponuditi drugim časopisima radi objavljivanja.

Autor dostavlja rad u elektronskom obliku na disketi i na papiru, u tri primerka. Za elektronski oblik rada, preporučuje se autoru da koristi program za pisanje teksta Word i tip slova Times New Roman (font 12, a razmak 1,5).

Rad se šalje na adresu:

**ZAJEDNICA
JUGOSLOVENSKE
ELEKTROPRIVREDE**
Balkanska 13/II, 11000 Beograd

Kriterijumi za kategorizaciju radova u stručnom časopisu „Elektroprivreda”

ORIGINALNI NAUČNI RAD

U ovu kategoriju svrstavaju se radovi, koji sadrže originalne rezultate istraživanja, interesantne za širi krug stručnjaka u području koje je predmet rada. Primena dobijenih rezultata treba da bude prikazana na realnim primerima iz inženjerske prakse. Ovi radovi treba da su napisani tako, da je na osnovu izloženih sadržaja i informacija, moguće praktično primeniti saopštene rezultate i proveriti urađene primere.

PRETHODNO SAOPŠTENJE

Kao prethodno saopštenje svrstava se rad koji sadrži elemente originalnosti, ali koji nisu dovoljni da bi se rad mogao smatrati u potpunosti originalnim naučnim radom iz jednog ili više navedenih razloga:

- doprinosi su manjeg značaja*
- nisu obuhvaćeni neki od značajnih činilaca*
- nema primene na realnom primeru*
- rešenje nije realizovano (kada je reč o novom uređaju, mernoj metodi ili objektu)*

PREGLEDNI RAD

Ovi radovi sadrže celoviti prikaz stanja i tendencija razvoja pojedinih oblasti nauke i tehnologije. Radovi ove kategorije obavezno sadrže kritički osvrt i ocenu onoga što je razmatrano. Citirana literatura u radu treba da bude dovoljno obuhvatna, kako bi se na osnovu nje omogućio što širi i bolji uvid u predmetne sadržaja. Obavezno je citiranje relevantnih referenci autora, koje se odnose na razmatranu problematiku, čime se potvrđuje kompetentnost sa pisanje radova iz ove kategorije. Ukupan broj razmatranih citata ne bi trebalo da bude manji od 15 i trebalo bi pretežno da bude iz vodećih svetskih publikacija.

STRUČNI RAD

Ovi radovi mogu da sadrže prikaz rešenja nekog uređaja, sklopa ili instrumenta koje je originalno u domaćim uslovima, kao i prikaz značajnih praktičnih realizacija, projekata, studijskih analiza i sl. Radovi ove kategorije mogu da sadrže doprinose primeni poznatih metoda i naučnih rezultata i njihovom prilagođenju potrebama aktuelne prakse.

REDAKCIJA
časopisa „Elektroprivreda”