

Analiza simetričnih procesa na nadzemnim vodovima u praznom hodu

Miodrag Forcan
Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet,
Beograd, Srbija
miodrag.forcan@live.com

Mladen Banjanin, Goran Vuković
Univerzitet u Istočnom Sarajevu,
Elektrotehnički fakultet,
Istočno Sarajevo, RS, BiH
banjanin@ymail.com, goranvukovic@etf.unssa.rs.ba

Sadržaj— U ovom radu analizirani su simetrični procesi na nadzemnom vodu u praznom hodu. Napravljeno je nekoliko različitih modela nadzemnog voda u programskom okruženju MATLAB/Simulink. Eksperimentalni proračun je vršen pomoću fizičkog modela nadzemnog voda sastavljenog od deset PI sekcija. Na osnovu uporednog eksperimentalnog i simulacionog istraživanja, analizirane su pojave Ferantijevog efekta i uključenja voda u praznom hodu. Dati su rezultati eksperimentalnog i simulacionog proračuna koeficijenata Ferantijevog efekta i sklopnog prenapona.

Ključne riječi- nadzemni vod; fizički model; Ferantijev efekat; sklopni prenapon;

I. UVOD

Analiza simetričnih procesa na nadzemnim vodovima (NV) spada u grupu elementarnih i svakodnevnih zadataka inženjera elektroenergetskih sistema. NV se vrlo često može naći u režimu praznog hoda, koji je okarakterisan sa nekoliko fenomena, od kojih su najvažniji Ferantijev efekat i sklopni prenapon prilikom uključenja.

U današnje vrijeme, mnogo različitih simulacionih programa se može koristiti u analizi simetričnih procesa na NV, kao npr. EMT-ATP [1] ili MATLAB/Simulink [2]. EMT-ATP se češće koristi u inženjerskoj praksi pri proračunu tranzijentnih režima, ali MATLAB/Simulink raspolaže sa detaljnijim "Help" opcijama za korisnike, koje sadrže opise elemenata, ulaznih podataka i proračunskih procedura. Za tačnu i preciznu analizu prelaznih procesa na NV potrebno je koristiti adekvatne modele i preporuke [3-5].

Direktna mjerenja tranzijentnih signala na NV su poprilično zahtjevna i ne tako često dostupna. Sa druge strane, eksperimentalna mjerenja predstavljaju najpouzdaniji izvor informacija u svakom kvalitetnom istraživačkom procesu. Kao povoljno kompromisno rješenje se nameće upotreba fizičkog modela NV.

U drugom poglavlju ovog rada prikazan je osnovni kriterijum za odabir adekvatnog modela NV u zavisnosti od željene analize. Treće poglavlje daje opis nekoliko različitih modela NV, koji su napravljeni u MATLAB/Simulink-u. Takođe su prikazani rezultati električnog proračuna 400 kV-nog NV dužine 100 km.

Četvrto poglavlje analizira realizaciju fizičkog modela NV uz prikaz metodologije ispitivanja i mjerenja.

U petom i šestom poglavlju predstavljeni su rezultati analize Ferantijevog efekta i uključenja NV u praznom hodu, respektivno.

II. MODELOVANJE NADZEMNIH VODOVA

Postoji nekoliko različitih modela nadzemnog voda (NV) koji mogu biti korišteni u inženjerskim proračunima. Primjena specifičnog modela zavisi od vrste proračuna. Pošto je po prirodi stvari NV element sistema kod koga efekat raspodjeljenosti dominira, to je svakako model NV sa raspodjeljenim parametrima (distribuirani model) najtačniji. Model NV sa skoncentrisanim parametrima (najčešće kaskadno povezane PI šeme - PI model) je proračunski manje zahtjevan, ali takođe i manje tačan. Kada se radi o specifičnim tipovima proračuna, kao npr. uključenje i isključenje NV, PI model se može koristiti uz zadovoljavajuću tačnost [3,4].

Da bi se dovoljno tačno aproksimirala distribuirana priroda NV, neophodan je veći broj kaskadno povezanih PI sekcija. Minimalan broj PI sekcija je definisan preciznošću proračuna i direktno je zavisian od frekvencije analiziranog prelaznog procesa. Ukoliko se na NV analizira prelazni proces maksimalne frekvencije f_{\max} i brzine prostiranja talasa v , dužina jedne PI sekcije NV mora biti kraća od [5]:

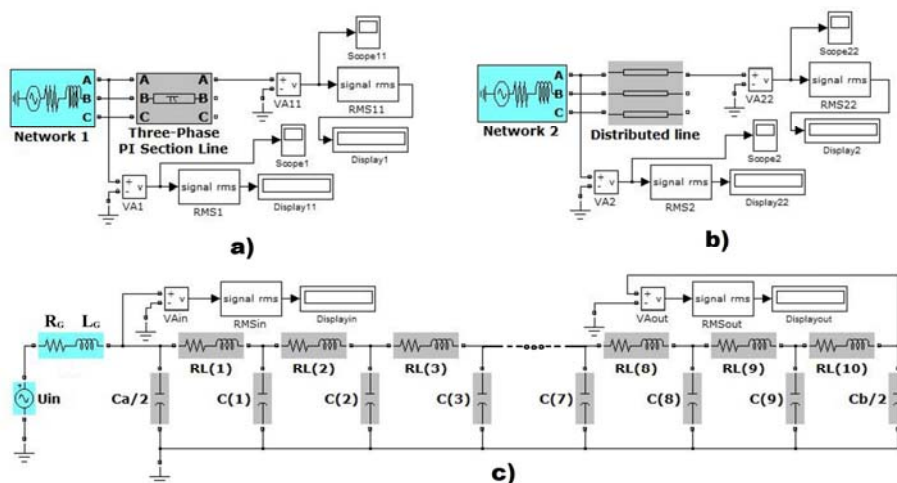
$$l = \frac{v}{5 \times f_{\max}} \quad (1)$$

Npr. ukoliko se analiziraju stacionarna stanja, gdje su $f_{\max} = 50$ Hz i $v = 300000$ km/s, maksimalna dužina jedne PI sekcije iznosi čak $l = 1200$ km. U slučaju prelaznih procesa, prisutne su veće frekvencije signala, npr. za $f_{\max} = 6$ kHz maksimalna dužina jedne PI sekcije iznosi svega $l = 10$ km.

III. MODELI NADZEMNOG VODA U MATLAB/SIMULINK PROGRAMSKOM OKRUŽENJU

U ovom radu analiziran je 400 kV NV dužine 100 km. Simulacije u MATLAB/Simulink-u su vršene za tri tipa modela NV: distribuirani model, trofazni PI model i jednofazni PI model sa 10 PI sekcija.

Na Sl.1 su prikazane ekvivalentne šeme korišćenih modela NV.



Slika 1. Ekvivalentne šeme modela NV u MATLAB/Simulink-u: a) trofazni PI model; b) distribuirani model; c) jednofazni PI model (10 sekcija)

A. Električni proračun nadzemnog voda

Parametri 400 kV NV su estimirani upotrebom programa RLC Line Parameters tool, koji je sastavni dio programskog paketa MATLAB. Pretpostavljeno je da se radi o NV sa horizontalno raspoređenim faznim provodnicima i sa dva zaštitna užeta. Preporuke o podacima ulaznih veličina električnog proračuna NV mogu se pronaći u literaturi [3-5]. U Tab.I su dati ulazni podaci potrebni za električni proračun NV.

TABELA I. OSNOVNI ULAZNI PODACI ZA ELEKTRIČNI PRORAČUN 400 kV NV

Frekvencija	50 Hz
Specifična otpornost tla	100 Ω m
Visina faznih provodnika	23 m
Visina zaštitne užadi	29 m
Ugib faznih provodnika	12 m
Ugib zaštitne užadi	10 m
Vanjski prečnik faznog provodnika	3.06 cm
Vanjski prečnik zaštitnog užeta	1.1 cm
Podužna otpornost faznog provodnika	0.059 Ω /km
Podužna otpornost zaštitnog užeta	2.6 Ω /km
Broj faznih provodnika u snopu	2
Prečnik snopa faznih provodnika	40 cm

Nakon proračuna, dobijeni su sljedeći podužni parametri direktnog redosljeda 400 kV NV: $R_d = 0.03 \Omega/\text{km}$, $L_d = 1 \text{ mH}/\text{km}$ i $C_d = 11.62 \text{ nF}/\text{km}$. Pošto se u ovom radu analiziraju samo simetrični procesi na NV, parametri inverznog i nultog redosljeda nisu od značaja.

B. Simulacioni ekvivalent fizičkog modela nadzemnog voda

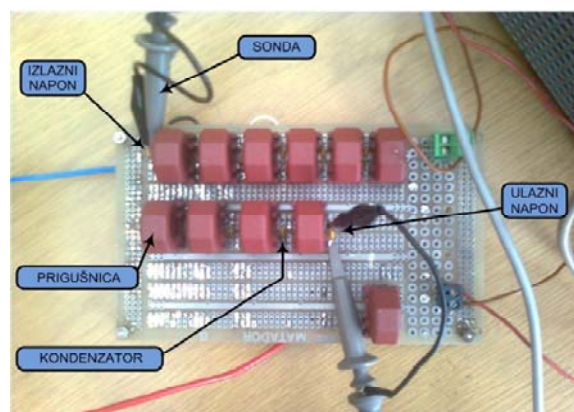
Jednofazni PI model (10 sekcija) sa Sl.1.c) ujedno predstavlja i simulacioni ekvivalent fizičkog modela NV.

U svrhu adekvatnog poređenja simulacionih i eksperimentalnih rezultata, podešeni parametri simulacionog ekvivalenta fizičkog modela NV moraju biti identični parametrima elemenata eksperimentalno realizovanog fizičkog modela NV. Parametri ekvivalenta impedanse mreže iznose: $R_G = 1.4 \Omega$ and $L_G = 47 \text{ mH}$

IV. FIZIČKI MODEL NADZEMNOG VODA

Eksperimentalno realizovani fizički model NV se sastoji od 10 PI sekcija, od kojih svaka modeluje dužinu od 10 km. Odgovarajuće vrijednosti koncentrisanih parametara su: $R = 0.3 \Omega$, $L = 10 \text{ mH}$ i $C = 0.1 \mu\text{F}$. Kapacitivnosti prvog i posljednjeg kondenzatora u fizičkom modelu iznose $C_a/2 = C_b/2 = 0.047 \mu\text{F}$ umjesto potpuno odgovarajućih $0.05 \mu\text{F}$, što je posljedica nedostataka eksperimentalnog materijala. Fizički model NV je prikazan na Sl.2.

Mjerna šema za analizu fizičkog modela voda je prikazana na Sl.3. Korišćeni elementi mjerne šeme su: trofazni transformator, jednofazni i trofazni prekidač, regulacioni otpornik, ampermetar, voltmetar i digitalni osciloskop.



Slika 2. Fizički model nadzemnog voda sa mjernim priključim



Slika 3. Mjerna šema za analizu fizičkog modela nadzemnog voda

A. Metodologija ispitivanja i mjerenja

Trofazni transformator se priključuje na mrežu preko prekidača, koristi se sprega trougao-zvijezda da bi se smanjio udio trećeg harmonika i celobrojnog umnoška istog u ulaznom signalu fizičkog modela NV. Sa sekundara transformatora se vodi monofazni napon na regulacioni otpornik, čija je vrijednost mijenjana u cilju dobijanja potrebnog napona na ulazu modela. Na ulazu fizičkog modela NV podešavana je vrijednost od približno 10, 15, 20, 25 i 30 V. Na osciloskopu su prikazivani ulazni i izlazni signali, očitavane su i njihove efektivne vrijednosti. Ampermetar je korišten za praćenje vrijednosti struje u kolu iz bezbjedonosnih razloga.

V. ANALIZA FERANTIJEVOG EFEKTA

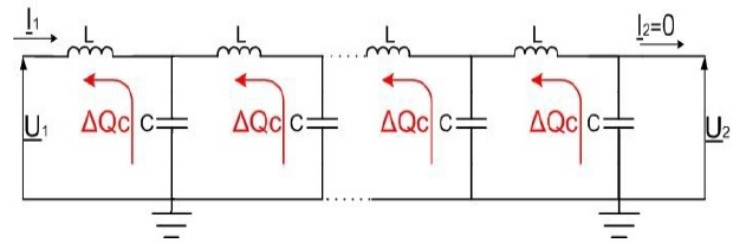
Ferantijev efekat predstavlja fenomen porasta napona na kraju NV, koji je slabo opterećen ili se nalazi u praznom hodu. Uzrok Ferantijevog efekta je proticanje kapacitivne struje (struje praznog hoda) kroz redne reaktanse NV. O ovoj pojavi se mora posebno voditi računa kod dugačkih vodova.

U režimu praznog hoda idealnog NV, kada je ispunjen uslov $I_2 = 0$, izraz za prividnu snagu na ulazu voda glasi:

$$S_1 = -j \frac{U_1^2}{Z_C} \operatorname{tg}(\beta l), \quad (2)$$

gdje su: βl - električna dužina voda, Z_C - karakteristična impedansa idealnog voda i U_1 - napon na ulazu voda.

Na osnovu izraza (2) može se zaključiti da je prividna snaga na ulazu NV jednaka reaktivnoj snazi sa negativnim predznakom, što znači da NV proizvodi reaktivnu snagu. Zato se kaže da je Ferantijev efekat pojava koja nastaje na račun proizvedene kapacitivne snage u svakom od elementarnih $L - C$ kola. Na Sl.4 je prikazana reaktivna snaga koju proizvodi svaki elementarni kondenzator pojedinih segmenata NV.



Slika 4. NV u praznom hodu kao generator reaktivne snage

Osnovni pokazatelj povećanja napona NV u praznom hodu je Ferantijev koeficijent, koji se definiše sljedećom relacijom:

$$k_f = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos(\beta l_v)}. \quad (3)$$

U Tab.II prikazane su vrijednosti Ferantijevog koeficijenta, za različite dužine NV, proračunate na osnovu relacije (3).

Na osnovu rezultata prikazanih u Tab.II može se zapaziti da povećanje napona nije linearna funkcija porasta dužine NV. U prethodnom razmatranju je smatrano da napon na početku NV ima konstantnu vrijednost.

U svrhu analize Ferantijevog efekta izvršeno je mjerenje Ferantijevog koeficijenta u slučaju fizičkog modela NV, za različite podešene vrijednosti ulaznog napona. Izmjerene vrijednosti su upoređene sa vrijednostima dobijenim proračunom u slučaju simulacionog ekvivalenta fizičkog modela NV. Rezultati komparativne analize su prikazani u Tab.III.

Dobijena srednja vrijednost Ferantijevog koeficijenta u slučaju simulacionog ekvivalenta NV je 1.0052. Dok u slučaju fizičkog modela NV odgovarajuća srednja vrijednost iznosi 1.0054. Teorijska vrijednost Ferantijevog koeficijenta, proračunata na osnovu relacije (3), iznosi 1.0055. Može se zaključiti da razmatrani modeli NV imaju vrlo mala odstupanja u pogledu rezultata proračuna Ferantijevog koeficijenta.

U nastavku analize izvršen je proračun Ferantijevog koeficijenta za različite dužine NV. Upotrebljeni su sljedeći modeli NV: trofazni PI model sa jednom i deset PI sekcija i distribuirani model. Rezultati komparativne analize su prikazani u Tab.IV.

Na osnovu rezultata u Tab.IV može se zaključiti da je za tačno modelovanje Ferantijevog efekta, na NV do dužine 500 km, dovoljna samo jedna PI sekcija, što je u saglasnosti sa teorijskom relacijom (1).

TABELA II. VRIJEDNOSTI FERANTIJEVOG KOEFICIJENTA ZA RAZLIČITE DUŽINE NV U PRAZONOM HODU

$l_v [km]$	100	200	400	600	800	1000
$\beta l_v [^\circ]$	6	12	24	36	48	60
U_2/U_1	1.005	1.022	1.094	1.236	1.494	2

TABELA III. VRIJEDNOSTI FERANTIJEVOG KOEFICIJENTA ZA RAZLIČITE NAPONE NA ULAZU NV

Simulacioni ekvivalent NV			Fizički model NV		
U_1 [V]	U_2 [V]	k_f	U_1 [V]	U_2 [V]	k_f
10	10.053	1.0053	9.938	9.9907	1.0052
15	15.078	1.0052	14.883	14.968	1.0057
20	20.105	1.0052	19.818	19.910	1.0047
25	25.131	1.0052	24.727	24.860	1.0054
30	30.158	1.0053	29.711	29.908	1.0066

TABELA IV. VRIJEDNOSTI FERANTIJEVOG KOEFICIJENTA ZA RAZLIČITE DUŽINE NV

Dužina NV [km]	Trofazni PI model		Distribuirani model - k_f
	k_f - 1 PI sekcija	k_f - 10 PI sekcija	
50	1.001435	1.001435	1.001435
100	1.005762	1.005762	1.005762
200	1.023385	1.023384	1.023384
300	1.053925	1.053920	1.053921
400	1.099321	1.099304	1.099307
500	1.162711	1.162663	1.162683

VI. UKLJUČENJE NADZEMNOG VODA U PRAZNOH HODU

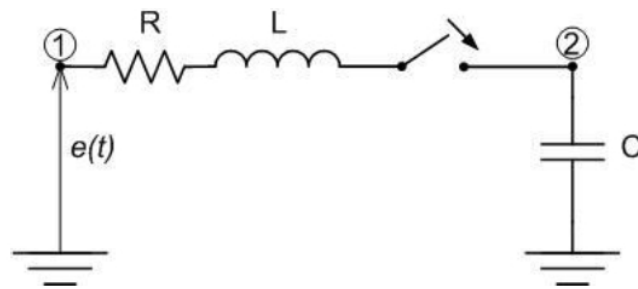
Uključenje voda u praznom hodu predstavlja sklopnu operaciju koja se relativno često događa. Povezivanje jednog dijela sistema sa drugim ili izvora sa ostatkom sistema najčešće se obavlja operacijom ukjučenja voda u praznom hodu. Prelazni proces prilikom uključenja voda u praznom hodu može se modelovati na različite načine u zavisnosti od željene tačnosti.

Sklopni prenaponi spadaju u unutrašnje prenapone čiji je uzrok nagla promjena režima u kolu zbog sklopnih operacija. Amplituda sklopnih prenapona vezana je za unutrašnju energiju sadržanu u kolu i zbog toga je ograničena. Iako u pojedinim slučajevima sklopni prenaponi mogu da postignu značajnu amplitudu, ipak je ta amplituda vezana za radni napon mreže [6].

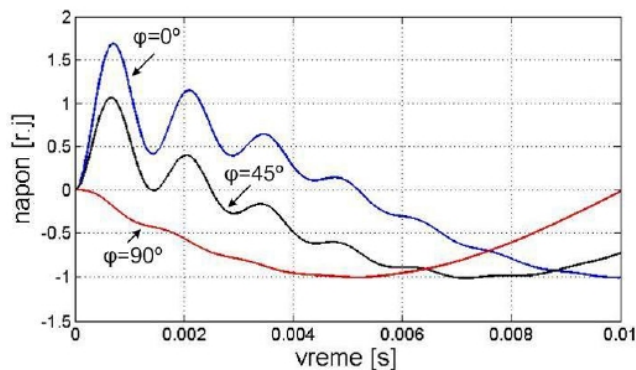
Na Sl.5 prikazana je pojednostavljena ekvivalentna šema sa skoncentrisanim parametrima za proračun prenapona pri uključenju NV u praznom hodu. Elektromotorna sila na ulazu sistema se može predstaviti kosinusnom funkcijom prema sljedećoj relaciji:

$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

Najvažniji uticaj na visinu prenapona pri uključenju voda u praznom hodu ima trenutak uključenja. Na Sl.6 prikazana su tri prelazna režima za trenutke uključenja: kada elektromotorna sila ima maksimalnu vrednost ($\varphi = 0$ [°]), kada je početna faza elektromotorne sile $\varphi = 45$ [°] i kada je elektromotorna sila jednaka nuli ($\varphi = 90$ [°]).



Slika 5. Pojednostavljena ekvivalentna šema sa skoncentrisanim parametrima za proračun prenapona pri uključenju NV u praznom hodu



Slika 6. Vremenske promjene napona NV pri uključenju u režimu praznog hoda za tri različite vrijednosti ugla uključenja

Najvažniji pokazatelj sklopnih prenapona se naziva faktor prenapona i definisan je narednom relacijom:

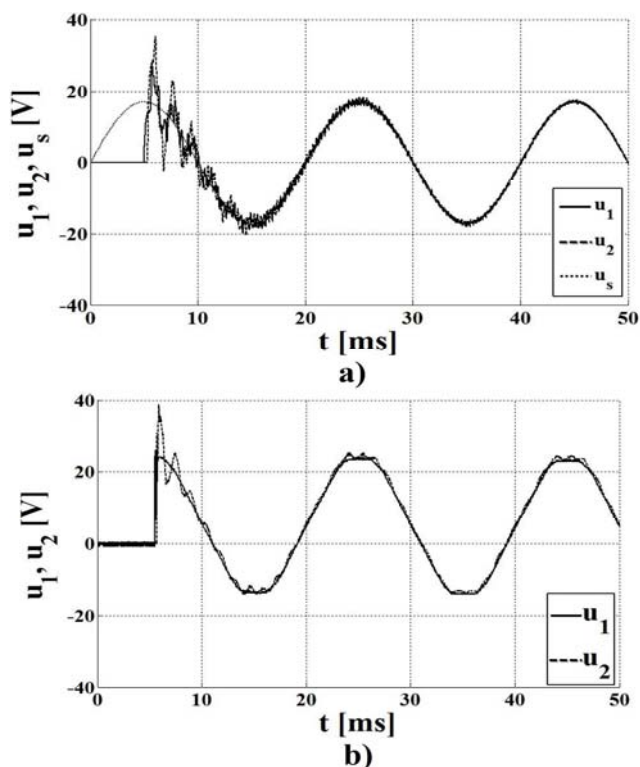
$$k_{OV} = \frac{u_{2max}}{U_{2max}}, \quad (5)$$

gdje su: u_{2max} - maksimalna trenutna vrijednost faznog prenapona na kraju NV i U_{2max} - amplituda faznog napona na kraju NV u novom stacionarnom stanju (nakon uključenja NV).

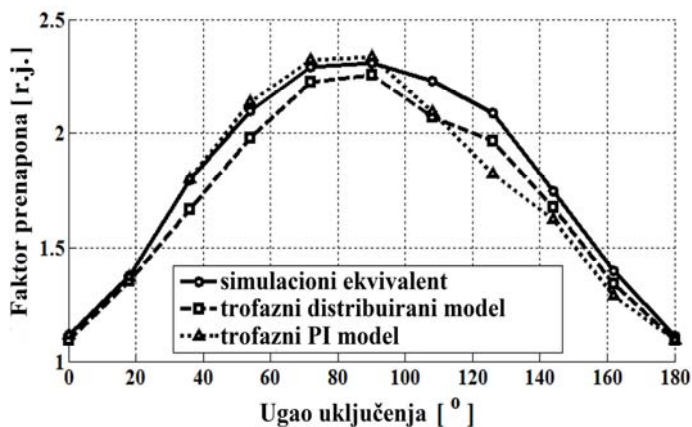
Maksimalna vrijednost faktora prenapona (ugao uključenja $\varphi = 90$ [°], zbog sinusne promjene napona izvora) je analizirana za slučajeve fizičkog modela NV i njegovog simulacionog ekvivalenta. Efektivna vrijednost ulaznog napona NV je podešena na 12 V. Odgovarajuće vremenske promjene napona su prikazane na Sl.7.

Proračunate vrijednosti faktora prenapona iznose: $k_{OV} = 2.323$ za fizički model NV i $k_{OV} = 2.118$ za simulacioni ekvivalent.

Na osnovu vremenskih promjena napona sa Sl.7 može se zaključiti da mjereni napon (fizički model NV) sadrži manje visoko-frekventnih komponenti (manje izobličenje). Takođe, odgovarajuća vrijednost faktora prenapona je nešto veća u slučaju fizičkog modela voda.



Slika 7. Vremenske promjene napona NV za slučaj ugla uključenja $\varphi = 90$ [°] (u_s - napon idealnog generatora, u_1 - napon na početku NV, u_2 - napon na kraju NV): a) simulacioni ekvivalent fizičkog modela NV; b) fizički model NV



Slika 8. Vrijednosti faktora prenapona pri uključenju NV u praznom hodu za različite modele NV

Odabir modela NV utiče na vrijednosti faktora prenapona pri analizi uključenja NV u praznom hodu. Razmatrani su naredni modeli: simulacioni ekvivalent fizičkog modela NV, trofazni distribuirani i trofazni PI model. Na Sl.8 prikazane su vrijednosti faktora prenapona za različite uglove uključenja.

Analizom rezultata sa Sl.8 može se zaključiti da su vrijednosti faktora prenapona u slučaju distribuiranog modela

manje u odnosu na slučaj modela NV sa skoncentrisanim parametrima, za uglove uključenja manje od 90° .

Najveća odstupanja vrijednosti faktora prenapona su prisutna za uglove uključenja veće od 90° , zbog različitih oscilatornih talasnih oblika prenapona i vremenskih trenutaka njihovih maksimuma.

ZAKLJUČAK

U radu su dati rezultati analize karakterističnih simetričnih procesa na nadzemnom vodu u praznom hodu. Pokazano je da se nadzemni vod, u zavisnosti od procesa koji se proučava, može modelovati na razne načine sa većom ili manjom tačnošću. Realizovani su različiti simulacioni modeli 400 kV-nog nadzemnog voda dužine 100 km u programu MATLAB/Simulink, kao i odgovarajući fizički model nadzemnog voda. Izvršena je analiza Ferrantijevog efekta i dobijeno je dobro podudaranje rezultata proračuna Ferrantijevog koeficijenta za slučajeve različitih modela nadzemnog voda. Na osnovu analize uključenja nadzemnog voda u praznom hodu dobijene su karakteristične vrijednosti koeficijenta sklopnog prenapona za kritični ugao uključenja.

LITERATURA

- [1] Canadian-American EMTF User Group. ATP Rule Book. European EMTF – ATP Users Group Association, 2011.
- [2] MATLAB/Simulink. MathWorks, Inc. Natick. Massachusetts. United States.
- [3] IEEE Working Group 15.08.09. *Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs*. Technical report PES-TR7 Formerly TP133, 1998.
- [4] CIGRE Subcommittee 33-02 Working Group 02. *Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients*. Report, 1990.
- [5] International Standard IEC 60071-4: 2004. Computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks.
- [6] Milan Savić, „Visokonaponski sklopni aparati“, Beograd 2004.

ABSTRACT

An analysis of symmetrical processes at overhead transmission line (OHL) with no consumption has been presented in this paper. Several different OHL models have been created by using MATLAB/Simulink software package. Experimental calculations have been performed by using a physically scaled system consisting of ten Pi sections. On the basis of comparative experimental and simulation studies, Ferranti effect and OHL energization with no consumption have been analyzed. The results of the Ferranti coefficient and switching overvoltage factor calculations have been presented. Good agreements between experimental and simulation results have been estimated.

THE ANALYSIS OF SYMMETRICAL PROCESSES AT OVERHEAD TRANSMISSION LINES WITH NO CONSUMPTION

Miodrag Forcan, Mladen Banjanin, Goran Vuković