

Ljupko Teklić
HEP Operator prijenosnog sustava d.o.o.
ljupko.teklic@hep.hr

Božidar Filipović-Grčić
FER Zagreb
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr

Darko Vugrinski
HRT
darko.vugrinski@hrt.hr

MODELIRANJE DALEKOVODA U PRORAČUNIMA PRIJELAZNIH POJAVA

SAŽETAK

Pri proračunima prijelaznih pojava u EES-u potrebno je posebnu pažnju posvetiti modeliranju prijenosnih dalekovoda. Dalekovodi imaju parametre koji su po prirodi raspodijeljeni, za razliku od transformatora i generatora čiji se parametri mogu smatrati koncentriranim. EES u uvjetima prijelaznih stanja može biti podvrgnut naprezanjima uslijed napona i struja koji imaju širok frekvencijski spektar, od pogonske frekvencije do frekvencija reda 100 kHz i više. Pri ovakvim frekvencijama parametri dalekovoda i zemlje kao povratnog puta imaju vrijednosti koje se mijenjaju s frekvencijom. Veliki broj pojava u EES-u su posljedica sklopnih operacija u postrojenjima. Sklopne operacije mogu biti uzrokovane pojavom kratkog spoja (isklapanje kratkog spoja) ili uklapanjem/isklapanjem neopterećenih dalekovoda. Pri proračunu prijelaznih pojava potrebno je izbor modela dalekovoda prilagoditi vrsti prijelazne pojave koja se analizira.

Ključne riječi: prijelazne pojave, modeliranje dalekovoda, parametri dalekovoda

MODELLING OF TRANSMISSION LINES IN TRANSIENT CALCULATIONS

SUMMARY

In calculations of transient phenomena in power system, special attention is needed while modelling transmission lines. Transmission lines have parameters that are naturally distributed, as opposed to the transformers and generators, whose parameters are considered to be concentrated. Power system in terms of transient state can be subjected to stresses due to currents and voltages in a wide frequency range, from operating frequencies up to frequencies of 100 kHz and more. At these frequencies the transmission line parameters and the return path through ground have values that are dependent on the frequency. A large number of transients in power system are the result of switching operations in power facilities. Switching can be caused by the appearance of a short circuit (switching off short-circuit current) or energizing/de-energizing the unloaded transmission line. In the calculation of transients it is necessary to apply an appropriate transmission line model regarding the type of transient being analyzed.

Key words: transients, transmission lines modelling, line parameters

1. UVOD

U radu je provedena usporedba različitih modela dalekovoda u programu za proračun elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP-ATP. U programu su dostupni različiti modeli dalekovoda: PI model, model s distribuiranim parametrima (K. C. Lee), Semlyen, J. Marti frekvencijski ovisan model i Taku Noda. Analizirani su sljedeći modeli dalekovoda: PI model, model sa distribuiranim parametrima te frekvencijski ovisan model J. Marti. Provedeni su proračuni za navedene modele dalekovoda na primjeru 110 kV dalekovoda. Točnost modela analizirana je u slučajevima sljedećih prijelaznih pojava:

- a) jednopolni kratki spoj,
- b) trolni kratki spoj,
- c) uklop neopterećenog dalekovoda,
- d) isklon neopterećenog dalekovoda.

Za navedene modele dalekovoda izvršena je usporedba rezultata proračuna u stacionarnom stanju. Na kraju rada je na temelju rezultata proračuna predložen način pravilnog odabira modela dalekovoda ovisno o vrsti prijelazne pojave koja se analizira.

2. MODELI DALEKOVODA

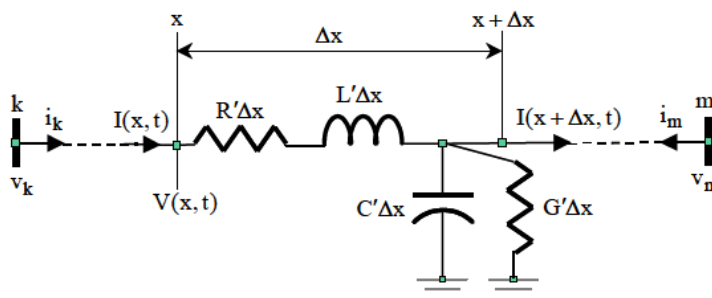
2.1. PI model dalekovoda

PI model je diskretna aproksimacija modela dalekovoda s distribuiranim parametrima i nije pogodan za analizu prijelaznih pojava. Vrijeme proračuna traje kraće ako se koristi model dalekovoda s distribuiranim parametrima, te se u tom slučaju dobiju točniji rezultati proračuna. Kod analize stacionarnih stanja PI model daje točne rezultate, međutim dalekovodi s frekvencijski ovisnim parametrima se ne mogu prikazati pomoću PI modela [1], [2]. U proračunima koji su provedeni u radu dalekovod je modeliran jednom PI shemom.

2.2. Model dalekovoda s distribuiranim parametrima

U modelu dalekovoda s distribuiranim parametrima koristi se matrica transformacije koja je za prepleteni dalekovod konstantna, ali za neprepleteni dalekovod ona je frekvencijski ovisna. Frekvencijska ovisnost transformacijske matrice je izraženija kod kabela nego kod nadzemnih vodova. Time se uviđa potreba odabira pravilnog iznosa frekvencije kod proračuna parametara dalekovoda. Budući da su vrijednosti izračunate linearnom interpolacijom, rezultati se mogu razlikovati za različite vremenske korake proračuna, ako analizirani signal sadrži visoke vršne vrijednosti. Glavno ograničenje modela s distribuiranim parametrima je pretpostavka da se parametri dalekovoda ne mijenjaju s promjenom frekvencije. Za kratke dalekovode ili kabele, model sa distribuiranim parametrima zahtijeva da vremenski korak mora biti manji od vremena rasprostiranja. Dakle, to zahtijeva dulje trajanje proračuna. Unatoč svojim ograničenjima, ovaj model je znatno točniji od PI modela [1], [2].

Struja i napon mijenjaju se uzduž dalekovoda i tokom vremena. Na slici 1 prikazane su struje i naponi na dalekovodu duljine dx .



Slika 1. Struje i naponi na dalekovodu duljine dx

Valne jednačbe za napon i struju mogu se napisati u sljedećem obliku:

$$\frac{dU(x,t)}{dx} = -R'I(x,t) - L' \frac{dI(x,t)}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dI(x,t)}{dx} = -G'U(x,t) - C' \frac{dU(x,t)}{dt} \quad (2)$$

Konstante R' , G' , L' , C' su jedinične vrijednosti. Primjenom Laplaceove transformacije izrazi (1) i (2) prelaze u:

$$\frac{dU(x,s)}{dx} = -Z'I(x,s) \quad (3)$$

$$\frac{dI(x,s)}{dx} = -Y'V(x,s) \quad (4)$$

gdje je:

$$Z' = R' + sL' \quad (5)$$

$$Y' = G' + sC' \quad (6)$$

Deriviranjem jednadžbi (3) i (4) dobije se:

$$\frac{d^2U(x,s)}{dx^2} = \gamma^2 U(x,s) \quad (7)$$

$$\frac{d^2I(x,s)}{dx^2} = \gamma^2 I(x,s) \quad (8)$$

Konstanta prodiranja sastoji se od realnog i imaginarnog dijela:

$$\gamma = \sqrt{(R' + sL')(G' + sC')} = \alpha + j\beta \quad (9)$$

gdje je:

α konstanta prigušenja;
 β fazna konstanta.

Opće rješenje jednadžbi (7) i (8):

$$U(x,s) = V^+ e^{-\gamma x} + V^- e^{\gamma x} \quad (10)$$

$$I(x,s) = \frac{1}{Z_c} (V^+ e^{-\gamma x} - V^- e^{\gamma x}) \quad (11)$$

gdje je:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R' + sL'}{G' + sC'}} \quad (12)$$

Ovo rješenje pokazuje da struja i napon na dalekovodu nastaju superpozicijom dvaju valova koji se gibaju u suprotnim smjerovima. Ako su poznate prilike na početku i kraju dalekovoda, jednađbe (10) i (11) prelaze u:

$$U_k - Z_c I_k = (U_m + Z_c I_m) \cdot e^{-\gamma l} \quad (13)$$

$$U_k + Z_c I_k = (U_m - Z_c I_m) \cdot e^{\gamma l} \quad (14)$$

Struje i naponi u čvorištu k i m se mogu odrediti iz sljedećih izraza:

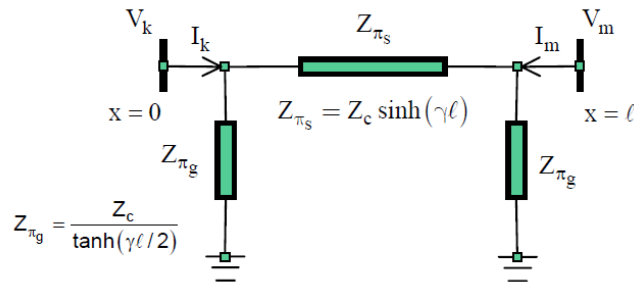
$$U_k = \cosh(\gamma l) U_m - Z_c \sinh(\gamma l) I_m \quad (15)$$

$$I_k = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) U_m - \cosh(\gamma l) I_m \quad (16)$$

$$U_m = \cosh(\gamma l) U_k - Z_c \sinh(\gamma l) I_k \quad (15)$$

$$I_m = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) U_k - \cosh(\gamma l) I_k \quad (16)$$

Nadomjesna PI shema dalekovoda prikazana je na slici 2.



Slika 2. PI shema dalekovoda

2.3. J. Marti frekvencijski ovisan model dalekovoda

Prema frekvencijski ovisnom J. Marti modelu dalekovoda [3], frekvencijski ovisna karakteristična impedancija (17) $Z_c(\omega)$ i faktor rasprostiranja (18) $A_p(\omega)$ aproksimiraju se racionalnim funkcijama višeg reda.

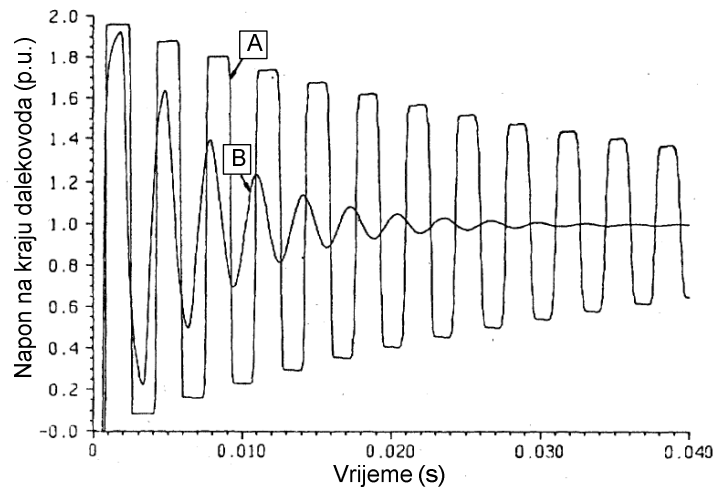
$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R'(\omega) + j\omega L'(\omega)}{G'(\omega) + j\omega C'(\omega)}} \quad (17)$$

$$A_p(\omega) = e^{-\gamma l} \quad (18)$$

U vremenskoj domeni aproksimacija je određena kao suma realnih eksponenata, omogućujući tako upotrebu rekurzivne konvolucije u vremenskoj domeni. Konstanta prodiranja se računa prema izrazu (19).

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R'(\omega) + j\omega L'(\omega))(G'(\omega) + j\omega C'(\omega))} \quad (19)$$

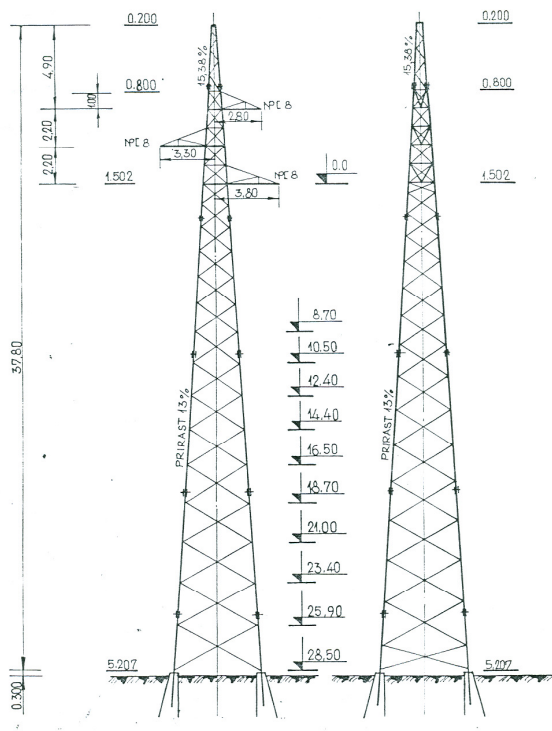
Dalekovi se nadomještaju modalnim vrijednostima valnih otpora, kao i modalnim brzinama širenja putnih valova. Programskom rutinom JMARTI SETUP generiraju se podaci potrebni za proračun u EMTP-ATP-u. Postoje i drugi frekvencijski ovisni modeli dalekovoda, međutim J. Marti model koristi se najčešće. Jedno od ograničenja je da se koristi konstantna transformacijska matrica. Za nadzemne vodove to i nije toliko važno kao što je za kabele. Model se ponaša nestabilno na vrlo niskim frekvencijama. Na slici 3 prikazana je usporedba napona na kraju neopterećenog dalekovoda pri uklopu na step funkciju napona [3].



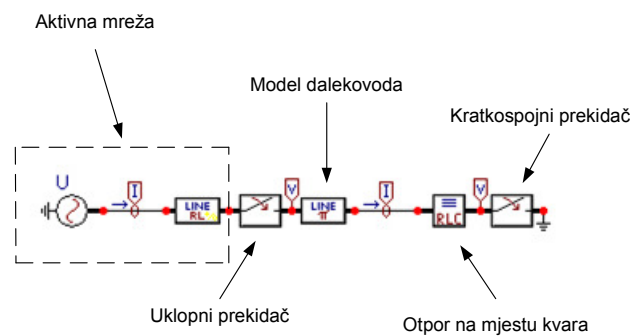
Slika 3. Usporedba napona na kraju neopterećenog dalekovoda pri uklopu na step funkciju napona (A – konstantni parametri; B – frekvencijski ovisni parametri)

3. USPOREDBA MODELA NA PRIMJERU 110 kV DALEKOVODA

Za potrebe analize u ovom radu korišten je postojeći tip stupa (slika 4). Prethodno opisani modeli dalekovoda uspoređeni su na primjeru 110 kV dalekovoda duljine 100 km. Podaci o vodičima dalekovoda su sljedeći: fazni vodiči Al/Č-240/40 mm² i jedno zaštitno uže 120 mm².



Slika 4. Skica tipiziranog stupa



Slika 5. Model za proračun kratkog spoja u EMTP-ATP-u

Iz podataka o dalekovodu izračunati su parametri dalekovoda za frekvenciju 50 Hz (tablica I). Dalekovod je priključen na aktivnu mrežu koja je u EMTP-ATP-u nadomještена Theveninovim ekvivalentom (slika 5) za trolnu struju kratkog spoja $I''_{k3}=18.51\angle -81.3^\circ$ kA i jednopolnu struju kratkog spoja $I''_{k1}=18.45\angle -81.5^\circ$ kA (tablica II). Nadomjesni parametri mreže u direktnom i nultom sustavu izračunati su iz struja kratkog spoja prema izrazima (20) i (21).

$$Z_d = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{k3}}, \quad (20)$$

$$Z_0 = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{3}{I''_{k1}} - \frac{2}{I''_{k3}} \right), \quad (21)$$

u kojima su:

I''_{k1}, I''_{k3} – struje jednopolnog i trolnog kratkog spoja (kA),

U_n – nazivni napon (kV),

$c=1.1$ – naponski faktor,

Z_d, Z_i, Z_0 – nadomjesne impedancije aktivne mreže direktnog, inverznog i nultog sustava.

Tablica I. Izračunati parametri dalekovoda za frekvenciju 50 Hz

Direktna i nulta komponenta otpora	Direktna i nulta komponenta induktiviteta	Direktna i nulta komponenta kapaciteta
$R_d=0.1189 \Omega/\text{km}$ $R_0=0.3360 \Omega/\text{km}$	$L_d=1.3123 \text{ mH}/\text{km}$ $L_0=4.2014 \text{ mH}/\text{km}$	$C_d=8.5842 \text{ nF}/\text{km}$ $C_0=5.2006 \text{ nF}/\text{km}$

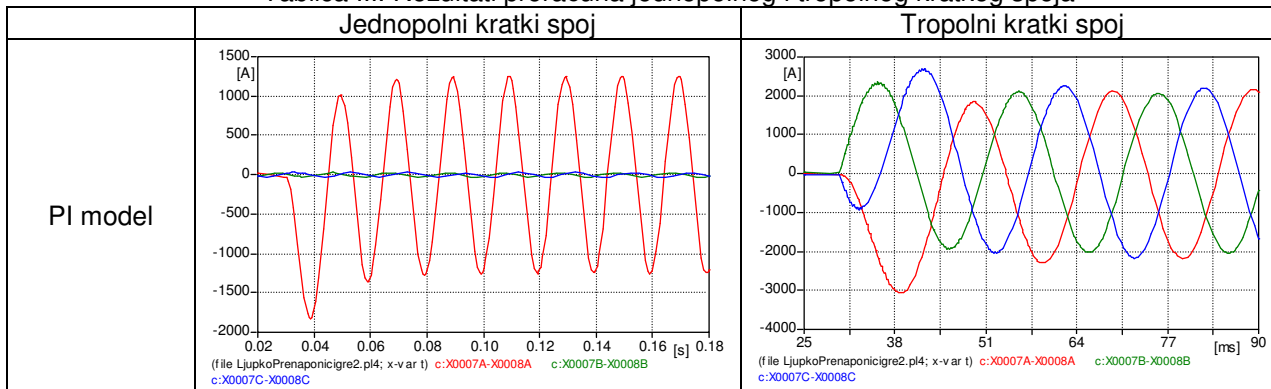
Tablica II. Nadomjesne impedancije aktivne mreže

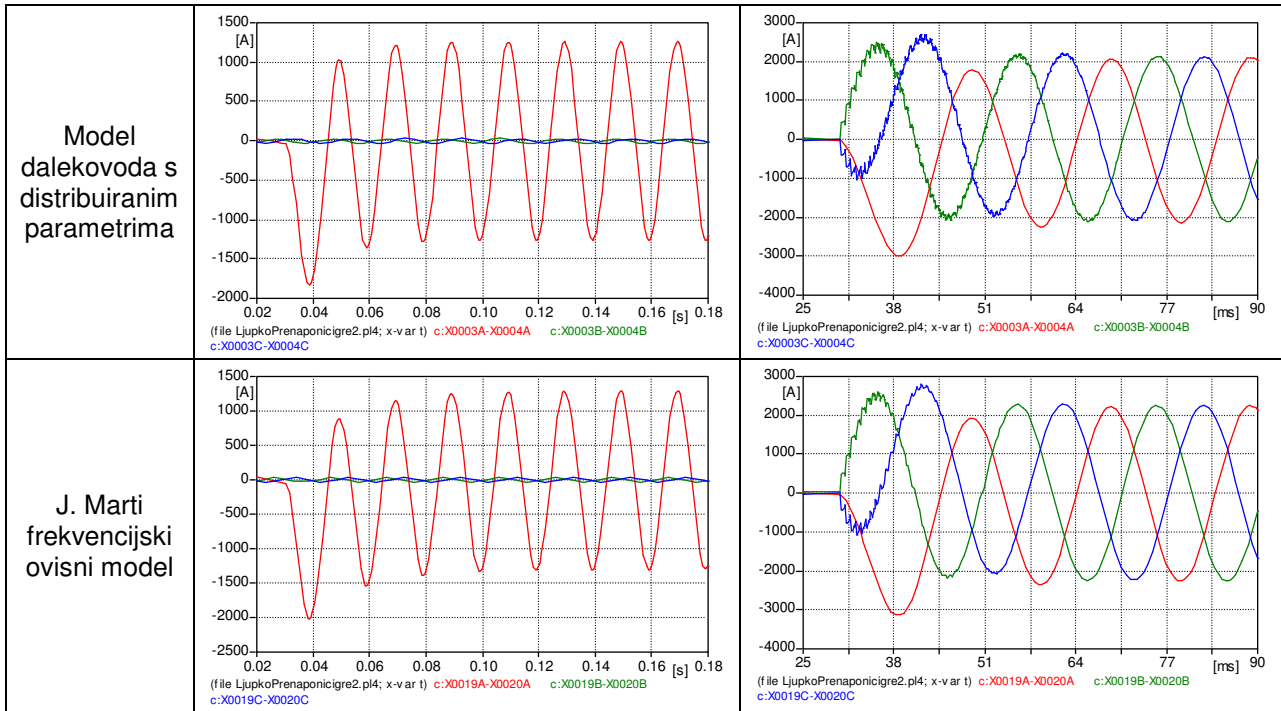
Direktna i nulta komponenta otpora	Direktna i nulta komponenta induktiviteta
$R_d=0.5189 \Omega/\text{km}$ $R_0=0.4887 \Omega/\text{km}$	$L_d=10.8 \text{ mH}/\text{km}$ $L_0=10.9 \text{ mH}/\text{km}$

3.1. Jednopolni i trolni kratki spoj

Simulacija jednopolnog kratkog spoja sa zemljom omogućuje usporedbu nulte komponente u stacionarnom stanju, dok simulacija trolnog kratkog spoja sa zemljom omogućuje usporedbu direktne komponente u stacionarnom stanju (tablica III).

Tablica III. Rezultati proračuna jednopolnog i trolnog kratkog spoja





Iz rezultata proračuna (tablica III) očitani su za slučaj jednopolnog kratkog spoja iznosi udarnih struja I_u i vršne vrijednosti struja kratkog spoja u stacionarnom stanju I_{st} (tablica IV). Za slučaj trojnog kratkog uspoređene su vršne vrijednosti struja po fazama za različite modele dalekovoda.

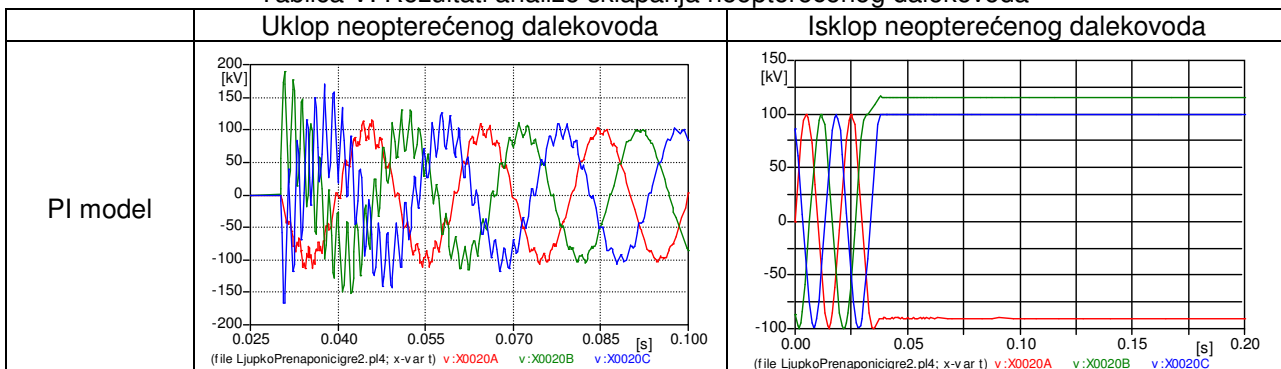
Tablica IV. Vršne vrijednosti struja jednopolnog i trojnog kratkog spoja

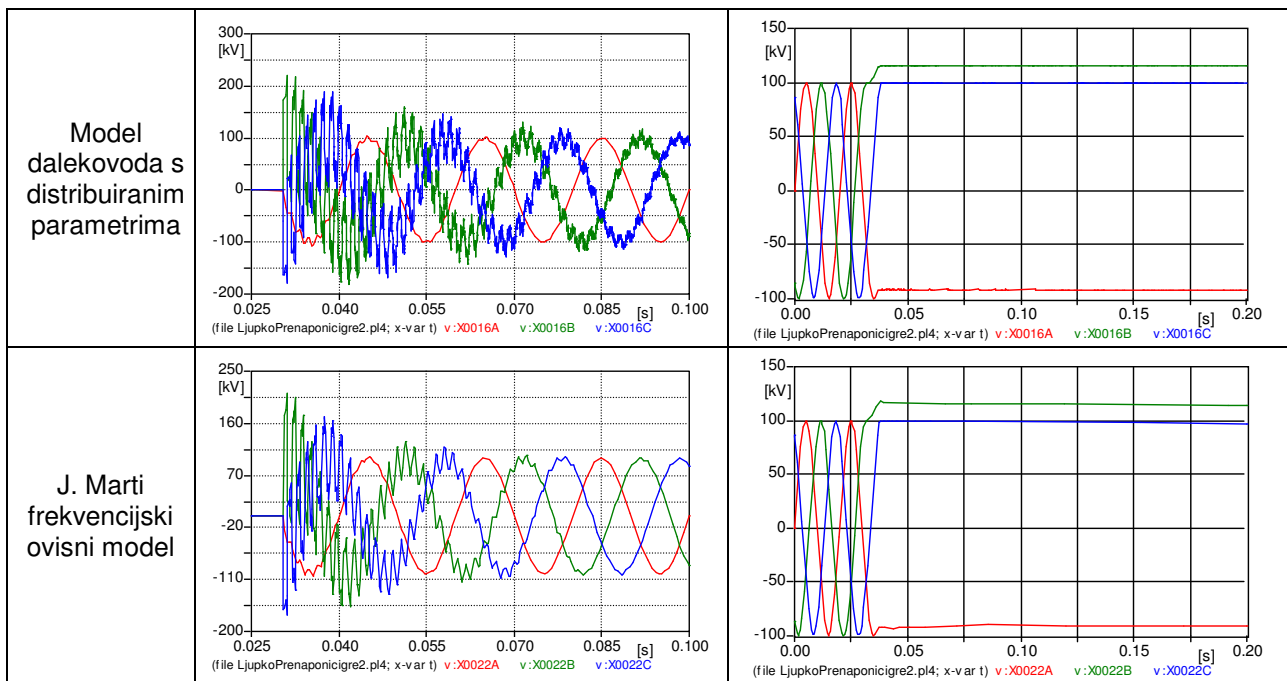
	Jednopolni kratki spoj I_{k1} [kA]	Trojni kratki spoj I_{k3} [kA]
PI model	$I_u = -1.828$ $I_{st} = 1.253$	$I_{maxA} = 3.075$ $I_{maxB} = 2.354$ $I_{maxC} = 2.693$
Model dalekovoda s distribuiranim parametrima	$I_u = -1.827$ $I_{st} = 1.257$	$I_{maxA} = 3.002$ $I_{maxB} = 2.495$ $I_{maxC} = 2.706$
J. Marti frekvencijski ovisni model	$I_u = -2.014$ $I_{st} = 1.298$	$I_{maxA} = 3.147$ $I_{maxB} = 2.606$ $I_{maxC} = 2.802$

3.2. Uklop i isklop neopterećenog dalekovoda

Provedene su simulacije za tri različita modela dalekovoda i analizirane su razlike u rezultatima proračuna napona na kraju neopterećenog dalekovoda (tablica V).

Tablica V. Rezultati analize sklapanja neopterećenog dalekovoda





Pri uklopu neopterećenog dalekovoda dolazi do refleksije naponskih putnih valova na kraju dalekovoda. Uspoređena je brzina prigušenja visokofrekvencijskih oscilacija napona na kraju dalekovoda koje nastaju zbog refleksije putnih valova, i vrijeme trajanja prijelazne pojave. Neopterećeni dalekovod se nakon isklopa i dalje nalazi pod naponom zbog remanentnog naboja. Naboj se prazni preko odvoda dalekovoda, a pražnjenjem naboja smanjuje se preostali napon na dalekovodu. U tablici VI prikazane su vršne vrijednosti napona na kraju dalekovoda pri uklopu i isklupu dalekovoda.

Tablica VI. Vršne vrijednosti napona na kraju dalekovoda pri uklopu i isklupu neopterećenog dalekovoda

	Uklup neopterećenog dalekovoda [kV]	Isklup neopterećenog dalekovoda [kV]
PI model	$U_{\max A}=113.86$ $U_{\max B}=189.92$ $U_{\max C}=170.22$	$U_{\max B}=116.26$
Model dalekovoda s distribuiranim parametrima	$U_{\max A}=106.75$ $U_{\max B}=220.11$ $U_{\max C}=188.17$	$U_{\max B}=115.90$
J. Marti frekvencijski ovisni model	$U_{\max A}=105.25$ $U_{\max B}=211.96$ $U_{\max C}=172.30$	$U_{\max B}=117.59$

4. ZAKLJUČAK

U radu je provedena usporedba sljedećih modela dalekovoda u programu za proračun elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP-ATP: PI model, model s distribuiranim parametrima (K. C. Lee) i J. Marti frekvencijski ovisan model. Točnost modela analizirana je u slučajevima jednopolnog i trolnog kratkog spoja, te u slučaju sklapanja neopterećenog 110 kV dalekovoda.

Rezultati proračuna pokazuju da je istosmjerna komponenta struje pri jednopolnom kratkom spoju veća u slučaju kada je dalekovod modeliran frekvencijski ovisnim J. Marti modelom. U prijelaznom stanju model dalekovoda s distribuiranim parametrima i PI model daju približno jednake iznose struja jednopolnog kratkog spoja. U stacionarnom stanju vršna vrijednost struje kratkog spoja približno je jednaka za sve analizirane modele. Pri trolnom kratkom spoju vršne vrijednosti struja u prijelaznom stanju približno su jednake za PI model i model s distribuiranim parametrima, dok J. Marti model rezultira nešto većim vrijednostima struje. Vršna vrijednost struje kratkog spoja u stacionarnom stanju približno je jednaka za sva tri modela.

Pri uklopu neopterećenog dalekovoda, visokofrekvencijske oscilacije napona na kraju dalekovoda brže se prigušuju korištenjem J. Marti modela u odnosu na ostale modele. Budući da uklop neopterećenog dalekovoda rezultira visokofrekvencijskom prijelaznom pojavom, točniji rezultati proračuna postižu se upotrebom J. Marti modela, dok PI model daje najveća odstupanja u prijelaznom stanju. Kod isklopa neopterećenog dalekovoda vrijednosti napona na kraju dalekovoda dobro se podudaraju za sve analizirane modele.

5. LITERATURA

- [1] Hermann W. Dommel, „EMTP THEORY BOOK“, *Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver*, British Columbia, Canada, May 1992.
- [2] Orlando P. Hevia, "Alternative Transients Program – Comparison of transmission line models“, Santa FE, Argentina.
- [3] Marti, J.R., "Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol: PAS-101, 1982., stranice 147-157.