

MODELIRANJE DVOSISTEMSKEGA DALJNOVODA S SNOPI DVEH VRVI

Aleš BELE, Klemen DEŽELAK, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

Članek obsega model dvosistemskega daljnovoda z dvema vrvema v snopu, tako imenovan izpopolnjen vezni model. Prikazana je primerjava rezultatov izpopolnjenega modela z rezultati študije z naslovom "Medsebojni vplivi med večimi daljnovodnimi sistemi" ter primerjava z ekvivalentnim veznim modelom. V ta namen smo potrebovali ustrezne parametre kapacitivnosti, induktivnosti in upornosti vodov. Izveden izpopolnjen model smo uporabili še za izračune induciranih napetosti in sicer na primeru daljnovoda Beričevo–Krško.

ABSTRACT

Proposed paper deals with the development of the double-circuit overhead power line model with the two-conductor bundle – with so called "advanced model". The results obtained by proposed model are compared with the results given in the study titled "Mutual influences within the several circuits of overhead line" and results obtained by so-called "equivalent model". The equations for capacitance, inductance and resistance calculations are presented, as well. Finally, the advanced model was used for calculations of induced voltages in the case of overhead power line Beričevo–Krško.

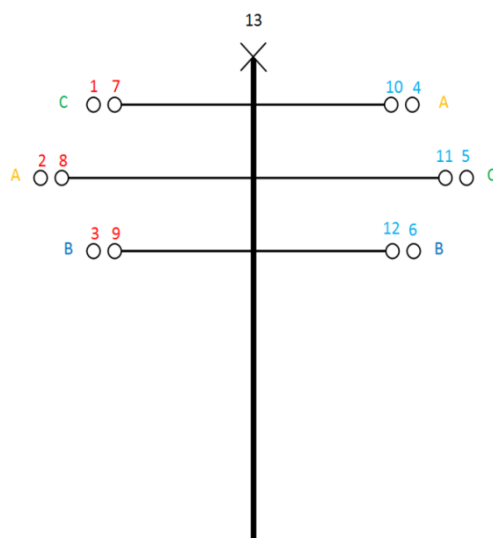
1. UVOD

Prenos električne energije predstavlja pomemben segment pri vsakdanji oskrbi z električno energijo, predvsem ob zavedanju, da si življenja brez električne energije ne znamo več predstavljati. Sodobne in pametne tehnologije hitro napredujejo. Ravno zaradi tega sta povpraševanje in potreba po električni energiji vedno večja. Omenjeno nas pripelje do tega, da je potrebno elektroenergetska omrežja nadgraditi in tako zadovoljiti potrebam po električni energiji. Ključni elementi sodelujoči pri prenosu električne energije so prav gotovo visokonapetostni daljnovodi, katerim se posvečamo znotraj predstavljenega dela. Članek tako obravnava možnost modeliranja dvosistemskega daljnovoda z dvema vrvema v snopu [1].

2. DOLOČITEV PARAMETROV MODELA VODA

Pomembni dejavniki pri izdelavi veznega modela dvosistemskega daljnovoda so vhodni parametri voda R (upornost), L (induktivnost) in C (kapacitivnost). Celoten izračun parametrov smo opravili v programskem paketu Matlab (m.file), prav tako smo v tem programu izvajali simulacije (simulink) [1]. Daljnovod smo najprej shematsko predstavili v simulinku in označili vrvi z izbranim vrstnim redom faz (slika 1). Nato smo s pomočjo ustreznih enačb in vhodnih podatkov izračunali parametre ter izvedli simulacijo. Za izračun parametrov smo potrebovali vhodne podatke (nadzemna višina vrvi, dolžina daljnovoda, upornost zemlje, itd.) in podatke, ki smo jih pridobili z naslednjimi izračuni:

- izračun razdalj med posameznimi vrvmi in strelovodno vrvjo,
- izračun razdalj med vrvmi v snopu faznega vodnika,
- izračun razdalj med posameznimi vrvmi faznih vodnikov,
- izračun razdalj med vrvmi faznih vodnikov in njihovo lastno zrcalno sliko,
- izračun razdalj med vrvmi in zrcalnimi slikami vrvmi in
- izračun razdalj med strelovodno vrvjo in zrcalnimi slikami faznih vrv [1].



Slika 1: Dvosistemski daljnovod z izbranimi oznakami vrvi.

Izračun induktivnosti L smo pričeli z izračunom Carsonove razdalje (1), katero smo potrebovali za izračun medsebojne in lastne induktivnosti (2). Carsonova razdalja je odvisna od upornosti tal, zaradi tega, ker določene silnice segajo tudi v zemljo. Torej večja kot je upornost tal večja je Carsonova razdalja. Pri izračunu induktivnosti moramo upoštevati vse prispevke magnetnega polja znotraj in izven vrv. Torej notranjo in zunanjo induktivnost, ki jo upoštevamo z geometrijskim srednjim polmerom. Pri izračunu lastne induktivnosti smo uporabili geometrijski srednji polmer v primeru medsebojne induktivnosti pa razdalje med vrvmi [1], [2].

$$d_c = 93\sqrt{\rho_z} \quad (1)$$

kjer je:

d_c – Carsonova razdalja [m] in

ρ_z – specifična upornost tal [Ωm] [3].

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d_c}{r} \quad (2)$$

kjer je:

L – induktivnost [H],

d_c – Carsonova razdalja [m] in

r – geometrijski srednji polmer vrvi [m] [1], [3].

Lastno upornosti R smo izračunali s pomočjo enačbe (3). V tem primeru se seštejejo upornosti vrvi faznega vodnika in upornost zemlje. Medsebojni vpliv upornosti pa smo upoštevali v enačbi (4), kjer smo upoštevali samo upornost zemlje [3].

$$R_1 = R_z + R_f \quad (3)$$

kjer je:

R_1 – lastna upornost vrvi 1 [Ω],

R_z – upornost zemlje [Ω],

R_f – upornost vrvi [Ω].

$$R_{1-4} = R_z \quad (4)$$

kjer je:

R_{1-4} – upornost (zemlje) med vrvema 1 in 4 [Ω],

R_z – upornost zemlje [Ω].

S pomočjo induktivnosti smo lahko določili reaktanco (5). Upornost ter reaktanca pa seveda določata impedanco voda (6) [1], [3].

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (5)$$

kjer je:

X_L – reaktanca [Ω],

ω – krožna frekvenca [rad/s],

L – induktivnost [H] in

f – frekvenca [Hz].

$$Z = \sqrt{R + X_L} \quad (6)$$

Kjer je:

Z – impedanca voda [Ω],

R – upornost [Ω],

X_L – reaktanca [Ω].

Določili smo vse potrebne razdalje za izračun kapacitivnosti posameznih vrvi. Za izračun le-teh smo uporabili enačbo (7) [3],

$$C = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \ln \frac{d_{sr}}{r}} \quad (7)$$

kjer je:

C – kapacitivnost [F/km],

d_{sr} – razdalja do sosednjih vrvi [m],

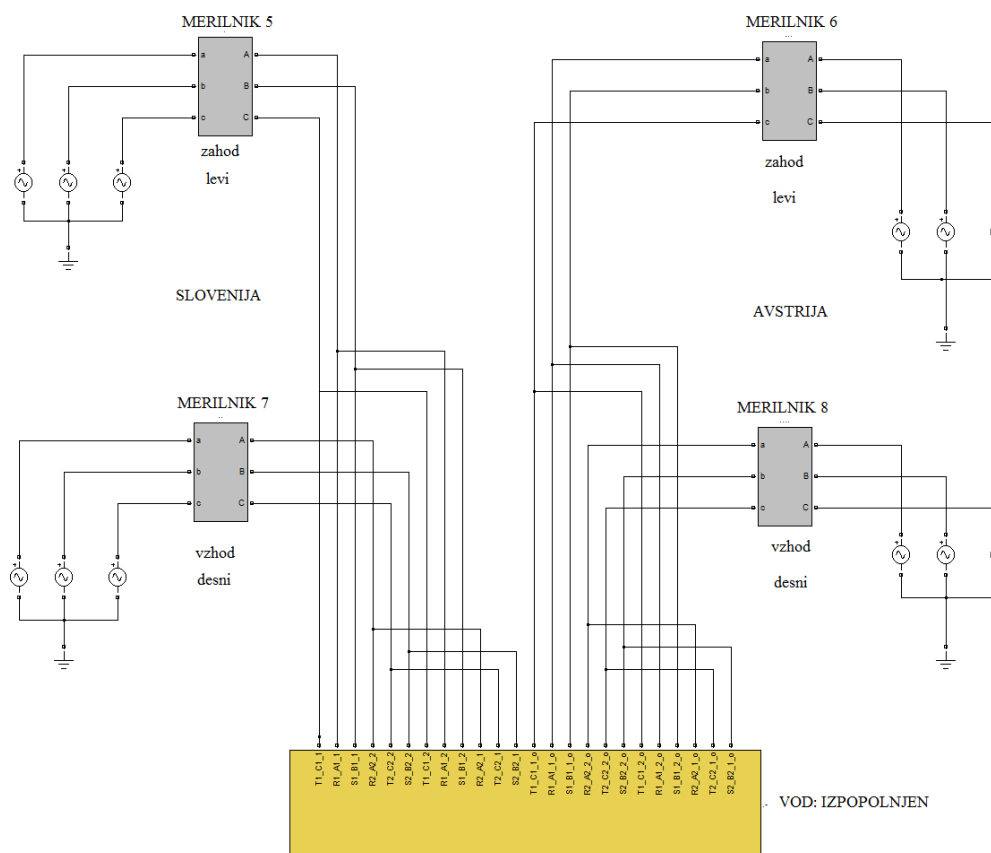
r – geometrijski srednji polmer vrvi [m] [3].

Izračunane vrednosti parametrov smo predstavili v obliki matričnega zapisa. Diagonalni elementi matrike so bile lastne vrednosti parametrov, izven diagonalni elementi pa medsebojne vrednosti parametrov.

3. MODEL DALJNOVODA BERIČEVO–KRŠKO

Po izračunu parametrov dvosistemskega daljnovoda je sledila izdelava modela daljnovoda. V tem delu smo takšen model imenovali s terminom "izpopolnjen" model voda. Rezultati modela daljnovoda so primerjani z rezultati tako imenovanega "ekvivalentnega" veznega modela voda ter rezultati študije z naslovom "Medsebojni vplivi med večimi daljnovodnimi sistemi" [4]. Razlika med ekvivalentnim in izpopolnjenim modelom je v predstavitvi faznega vodnika v obliki snopa vrvi. Tako je pri ekvivalentnem modelu namesto dveh vrvi v snopu uporabljen samo en vodnik z ustrezno večjim ekvivalentnim premerom. Vse skupaj je bilo izvedeno na delu realnega 400 kV dvosistemskega daljnovoda med Slovenijo in Avstrijo. Kasneje smo spremenili vhodne podatke za daljnovod Beričevo–Krško in na takšen način izvedli zelene izračune. Model dvosistemskega daljnovoda smo predstavili kot vezni (izpopolnjen) model voda, ki ima na obeh straneh vhode in izhode predstavljene s faznimi napetostmi (slika 2).

Na vseh in izhodih smo torej določili napetosti in fazne kote (robni pogoji). Uporabili smo tudi merilnike, ki smo jih vezali pred vezni model voda, in ob tem izračunavali tudi toke in moči na vseh in izhodih modela voda [1].



Slika 2: Shema izpopolnjenega modela voda v programskem paketu Matlab.

4. PRIKAZ IZRAČUNANIH VREDNOSTI

Pravilnost izračunanih parametrov in rezultatov simulacije smo preverili tako, da smo rezultate dobljene na osnovi izpopolnjenega veznega (dve vrvi v snopu) modela voda primerjali z dobljenimi rezultati na osnovi ekvivalentnega veznega (en ekvivalentni vodnik) modela in z rezultati študije [1], [4]. Vhodni podatki dela 400 kV dvosistemskega daljnovoda med Slovenijo in Avstrijo, natančneje med Mariborom in Kainachthalom, so bili enaki tako pri izpopolnjenem kot pri ekvivalentnem modelu ter študiji [3]. Pri tem pa smo primerjali delovno in jalovo moč ter toke in fazne kote tokov. Tabela 1 kaže primerjavo izračunanih delovnih in jalovih moči. Moč levo in desno (Slovenija) pomeni moč na prvem in drugem sistemu daljnovoda na slovenski strani, moč levo in desno (Avstrija) pa pomeni moč prvega in drugega sistema na avstrijski strani. Iz rezultatov je razvidno, da odstopanja niso velika, približno $\pm 3\%$.

Torej, če primerjamo rezultate (tabela 1) med največjo delovno močjo ekvivalentnega modela, ki znaša 131,503 in največjo delovno močjo veznega izpopolnjenega modela katera znaša 131,494 so odstopanja majhna. Prav tako so bila odstopanja mala pri tokih.

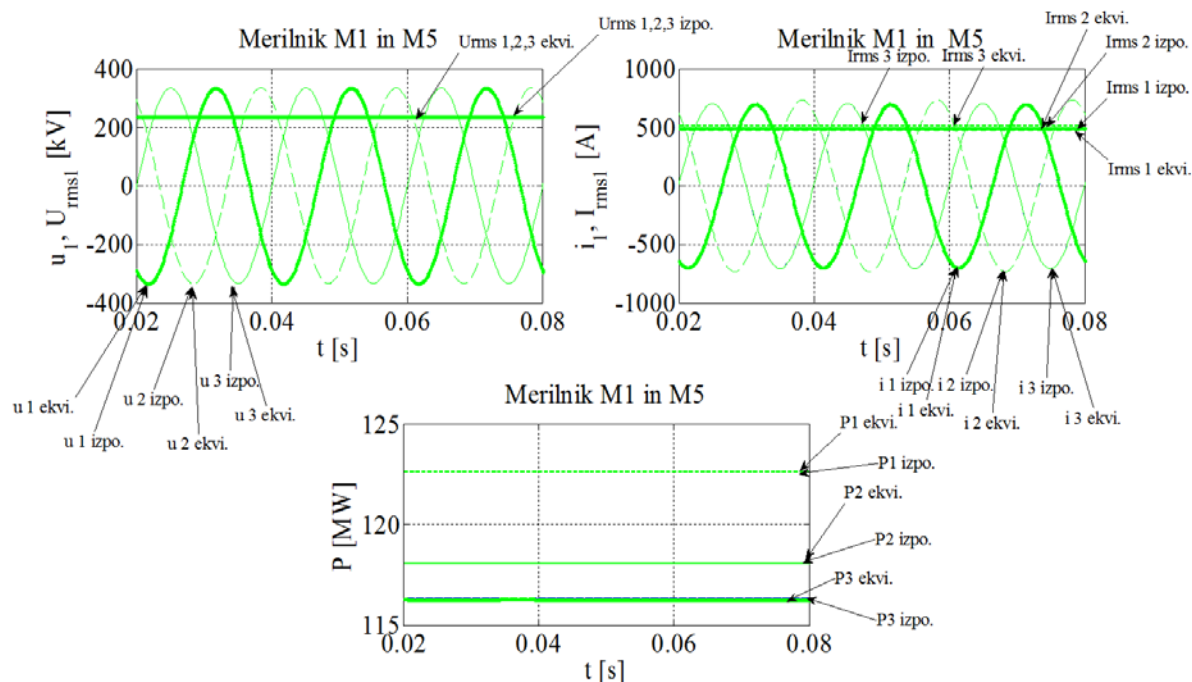
Tabela 1: Primerjava moči [1].

	Primerjava moči		
	Študija [17]	Ekvivalentni model	Izpopolnjen model
Moč (slovenska stran, levi sistem) P [W]	131,5640	131,5034	131,4938
	118,2000	118,2438	118,2422
	126,3970	126,4227	126,4019
Jalova moč (slovenska stran, levi sistem) Q [MVar]	-14,9620	-14,7097	-14,7095
	3,2690	3,2884	3,2872
	-30,3870	-29,9442	-29,9394
Moč (avstrijska stran, levi sistem) P [MW]	131,8860	131,8053	131,7998
	118,5890	118,6348	118,6159
	126,0710	126,0951	126,1048
Jalova moč (avstrijska stran, levi sistem) Q [MVar]	-17,5610	-17,9229	-17,9314
	0,8180	0,7487	0,7200
	-33,0680	-33,3886	-33,4155
Moč (slovenska stran, desni sistem) P [MW]	132,6100	132,5401	132,5559
	114,4530	114,5047	114,4870
	132,9980	132,9705	132,9642
Jalova moč (slovenska stran, desni sistem) Q [MVar]	10,2490	10,6330	10,6436
	-19,1060	-19,0985	-19,0812
	-6,1710	-5,8516	-5,8594
Moč (avstrijska stran, desni sistem) P [MW]	133,3750	133,3046	133,2901
	114,4050	114,4581	114,4579
	133,0900	133,1240	133,1138
Jalova moč (avstrijska stran, desni sistem) Q [MVar]	7,6980	7,3152	7,2941
	-21,6300	-21,7104	-21,7206
	-22,7750	-9,0443	-9,0609

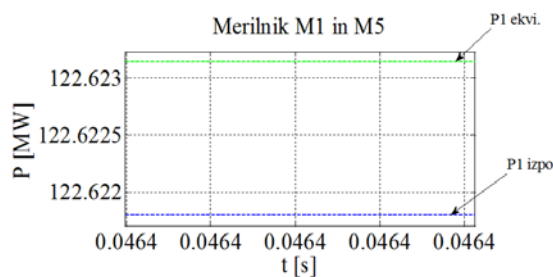
5. IZRAČUN INDUCIRANIH NAPETOSTI

Vhodne podatke, katere smo prej imeli za primer dvosistemskega daljnovođa Maribor–Kainanhtal smo sedaj spremenili v vhodne podatke za dvosistemski daljnovod Beričevo–Krško. Izračun parametrov pa smo v tem primeru izvedli z upoštevanjem povesa, torej smo vodnike postavili na 2/3 vrednosti povesa. Vrstni red faz gledano iz Krškega proti Beričevem smo določili kot ACB levi sistem in BCA desni sistem. Pri tem nas je zanimalo, kolikšna napetost se inducira, če je desni sistem izklopljen levi pa pretežno obremenjen. Daljnovod

smo najprej pretežno delovno obremenili. Rezultati so prikazani za merilnik M1 (ekvivalentni model) in merilnik M5 (izpopolnjen model) slika 3. Iz slike je razvidno, da je odstopanje moči minimalno. Največja delovna moč ekvivalentnega modela je bila tako enaka 122,6236 MW, delovna moč izpopolnjenega modela pa 122,6223 MW – odstopanje 0,001%. Rezultati največje delovne moči (povečava) so prikazani na sliki 4.

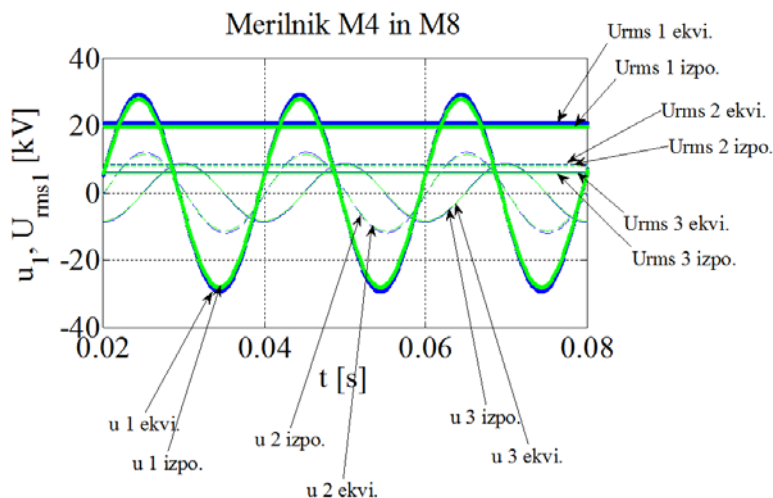


Slika 3: Rezultati obratovanja daljnovoda pri pretežno delovni obremenitvi [1].



Slika 4: Rezultati obratovanja daljnovoda pri pretežno delovni obremenitvi – delovna moč (povečava) [1].

Sedaj smo daljnovod najprej ustrezno preoblikovali in izvedli simulacijo, ko je desni sistem iz Krškega proti Beričevem izklopljen in ne obratuje. Levi sistem pa obratuje normalno. Vidimo lahko, da se je na sistemu, ki ne obratuje, inducirala napetost (slika 5). Odstopanje faznih vrednosti induciranih napetosti izračunanih z ekvivalentnim in z izpopolnjenim modelom je približno enako 1 kV. Največja faza inducirana napetost izračunana z ekvivalentnim modelom je tako znašala 20,75 kV, faza inducirana napetost izračunana z izpopolnjenim modelom pa 19,79 kV [1].



Slika 5: Prikaz rezultata ujemanja induciranih napetosti [1].

6. SKLEP

Bistveni del prispevka se nanaša na določitev parametrov dvosistemskega daljnovoda s snopom dveh vrvi ter na izdelavo izpopolnjenega modela dvosistemskega daljnovoda.

Rezultati izračunov takšnega daljnovoda (primer: Slovenija–Avstrija) se niso pretirano razlikovali od rezultatov dobljenih z modelom dvosistemskega daljnovoda z enim vodnikom, ki predstavlja snop. Ko smo v simulinku izdelali pripadajoči izpopolnjen in ekvivalentni model (primer: Slovenija–Avstrija) smo ugotovili, da izračunane moči in toki minimalno odstopajo. V nadaljevanju smo na primeru daljnovoda Beričevo–Krško enega od sistemov izklopili, pri čemer smo lahko izračunavali inducirano napetost v izklopljenem sistemu. Pri tem smo ugotovili, da odstopanja med induciranimi napetostmi ekvivalentnega in izpopolnjenega modela daljnovoda lahko znašajo tudi do 1 kV, kar pa seveda ne predstavlja zanemarljive vrednosti.

Zaključimo torej lahko, da so pri obravnavi normalno obremenjenih daljnovodov rezultati dobljeni z ekvivalentnim in izpopolnjenim modelom, zelo podobni. Torej je v takšnih primerih uporaba ekvivalentnih modelov daljnovodov ustrezna. V primerih, ko računamo inducirane napetosti pa priporočamo uporabo izpopolnjenih modelov.

7. LITERATURA

- [1] Aleš Bele, Model dvosistemskega daljnovoda s snopom dveh vrvi, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Diplomaska naloga, 2014.
- [2] Igor Papič, Peter Žunko Elektroenergetska omrežja in naprave zapisnik iz učbenika, zimski semester 2012/13.

- [3] Jože Voršič, Razdeljevanje električne energije, laboratorij za energetiko UM FERl, električne lastnosti vodov.
- [4] M. Koželj, "Medsebojni vplivi med večimi daljnovodnimi sistemi, 1. zvezek", ELES, maj 1997.

NASLOV AVTORJA

Aleš Bele, dipl. inž. el. (VS)
doc. dr. Klemen Deželak, univ. dipl. inž. el.
red. prof. dr. Gorazd Štumberger, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 71 80 Fax: + 386 2 252 54 81 ali + 386 2 220 72 72
Elektronska pošta: klemen.dezelak@um.si