

**UTICAJ DUGAČKIH VODOVA NA PRENOSNE MREŽE****INFLUENCE OF LONG OVERHEAD LINES ON TRANSMISSION NETWORKS**Sanja Špica, Dejan Jerkan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu je razvijen MATLAB Simulink model uprošćenog elektroenergetskog sistema (EES-a), kojim se modeluje ponašanje dugačkih vodova u visokonaponskoj prenosnoj mreži. Date su teorijske osnove mehanizma uspostavljanja napona i struja duž dugačkih vodova pomoću tzv. jednačina telegrafičara. Analiziran je uticaj dužine voda na fazne stavove napona i struja na njegovom početku, odnosno kraju, kao i bilans aktivnih, odnosno reaktivnih snaga duž voda.

**Ključne reči:** *Prenosna mreža, MATLAB Simulink, Nadzemni vodovi, Bilans snaga, Fazni pomeraj*

**Abstract** The paper presents MATLAB Simulink model of a simplified power system, which models the behavior of long overhead lines in a high-voltage transmission network. The theoretical basis of the mechanism of establishing voltages and currents along overhead lines are given by means of the so-called telegrapher's equations. The influence of overhead line length on the phase shift of voltages and currents at the beginning and at the end of line, as well as the balance of active or reactive power along the line are analyzed.

**Keywords:** *Transmission network, MATLAB Simulink, Overhead lines, Balance of electric power, Phase shift*

**1. UVOD**

Prenosna mreža elektroenergetskog sistema (EES-a) ima za primarni cilj energetska efikasan prenos električne energije od primarnih izvora, koji se konvertuju u električnu energiju u konvencionalnim elektranama, do velikih distributivnih potrošačkih područja.

Efikasan prenos je jedino moguće ostvariti ukoliko se on vrši na visokom, a često i vrlo visokom naponskom nivou. Sa druge strane, ekonomski je najisplativije konvertovati primarne izvore energije u električnu energiju na mestima gde se primarni izvori geografski i nalaze, što je neretko veoma udaljeno od područja koja zahtevaju isporučivanje velikih količina električne energije.

Samim tim sledi da se prenosna električna mreža često sastoji od elemenata koji moraju da prenose električnu energiju na velike razdaljine, što se postiže izgradnjom nadzemnih vodova odgovarajućih dužina. Stacionarni režimi EES-a podrazumevaju rad u ustaljenim, simetričnim i prostoperiodičnim radnim režimima.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada, čiji mentor je bio dr Dejan Jerkan, docent.

Ustaljeni režimi podrazumevaju rad na mrežnoj učestalosti od 50 Hz, odnosno 60 Hz u nekim zemljama. Sa tehničkog stanovišta, električne veličine na pomenutim mrežnim učestanostima spadaju u sporopromenljive veličine, za koje se često može smatrati da u određenom delu sistema gotovo trenutno postižu iste vrednosti u istim trenucima. Ovo, međutim, ne mora biti slučaj u prenosnim mrežama, u kojima se dužine nadzemnih vodova često mere i u stotinama kilometara. Naime, usled velike dužine vodova kojima se električna energija prenosi, dolazi do situacija u kojima nije zanemarljiva pojava kašnjenja, koja nalikuje efektima rasprostiranja elektromagnetnih talasa.

Na taj način se imaju radni režimi u kojima dolazi do faznog pomeraja između veličina na početku, odnosno kraju dugačkih nadzemnih vodova, a kao posledica kašnjenja u njihovom rasprostiranju. Ovaj efekat kašnjenja može imati negativne posledice po funkcionisanje EES-a, ponajviše sa aspekta pravilnog delovanja određenih tipova zaštite. U prenosnoj mreži se za zaštitu nadzemnih vodova najčešće koristi podužna diferencijalna zaštita, koja radi na principu poređenja vrednosti struja i napona sa različitih strana voda. Ukoliko je vod u stacionarnom stanju, zbog svoje dužine može doći do situacije da se fazni stavovi struja i napona osetnije razlikuju na njegovom početku, odnosno kraju, što može dovesti do pogrešnog i nepotrebnog delovanja zaštite.

Zbog toga je neophodno na pravilan način i unapred tačno poznavati efekat kašnjenja koji vod svojom dužinom unosi u stacionarne radne režime EES-a, kako bi se fazni pomeraj koji tom prilikom nastaje mogao unapred uvažiti.

**2. MODELOVANJE DUGIH NADZEMNIH VODOVA**

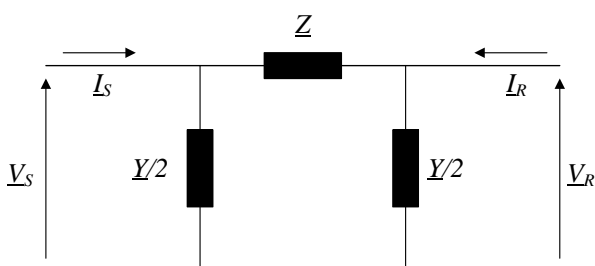
Nadzemni vodovi većih dužina se moraju modelovati tako da uvažavaju efekat kašnjenja koji se manifestuje u pojavi faznog pomeraja između odgovarajućih parova prostoperiodičnih veličina sa početka, odnosno kraja voda.

U tu svrhu se koriste takozvane jednačine telegrafičara, kojima se definišu veze između parova napona, odnosno struja sa kraja voda i proizvoljne tačke na mestu  $x$  na samomvodu:

$$\begin{aligned} \underline{V}(x) &= \underline{V}_R \cdot ch(\underline{\gamma}x) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_R \cdot sh(\underline{\gamma}x) \\ \underline{I}(x) &= \frac{\underline{V}_R}{\underline{Z}_C} \cdot sh(\underline{\gamma}x) + \underline{I}_R \cdot ch(\underline{\gamma}x), \end{aligned} \quad (1)$$

gde je:

$x$  [km] tekuća prostorna koordinata merena od prijemnog kraja voda (indeks „R“);  $V_R$  [kV] i  $I_R$  [A] predstavljaju fazni napon i struju na prijemnom kraju voda;  $Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}}$  [Ω] predstavlja karakterističnu impedansu voda;  $\gamma = \sqrt{zy} = \alpha + j\beta$  predstavlja konstantu prostiranja voda,  $\alpha$  predstavlja koeficijent slabljenja, a  $\beta$  predstavlja fazni koeficijent voda;  $z = r + jx$  [Ω/km] predstavlja podužnu impedansu voda,  $r$  je podužna otpornost, a  $x$  podužna reaktansa voda;  $y = g + jb$  [S/km] predstavlja podužnu admitansu voda,  $g$  je podužna provodnost, dok je  $b$  podužna susceptansa voda. Na slici 2.1 je prikazana pofazna, simetrična  $\pi$  – ekvivalentna šema voda, u kojoj su naznačene redna impedansa i otočne admitanse, koje su dobijene od gore navedenih podužnih parametara množenjem sa dužinom voda.



Slika 2.1. Pofazna  $\pi$  – ekvivalentna šema voda

Da bi se efekat kašnjenja na vodovima mogao pravilno kvantifikovati, neophodno je definisati još neke veličine koje karakterišu električne veličine na mrežnoj učestanosti, koje se sada moraju tretirati kao elektromagnetni talasi.

Talasna dužina, koja predstavlja rastojanje na vodu nakon kojeg se menja fazni stav napona ili struje za celih  $2\pi$  [rad] se može izračunati kao:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\sqrt{b \cdot x}} = \frac{1}{f_n \sqrt{l_1 c_1}}, \quad (2)$$

gde je:

$\lambda$  [km] predstavlja talasnu dužinu;  $f_n$  [Hz] predstavlja mrežnu frekvenciju;  $l_1$  [H/km] i  $c_1$  [F/km] predstavljaju podužnu induktivnost i podužnu kapacitivnost voda, respektivno. Brzina prostiranja elektromagnetnih talasa napona i struje duž voda ( $v$ ), računajući da je reč o rasprostiranju u vakuumu iznosi:

$$v = \lambda \cdot f_n = \frac{1}{\sqrt{l_1 c_1}}, \quad (3)$$

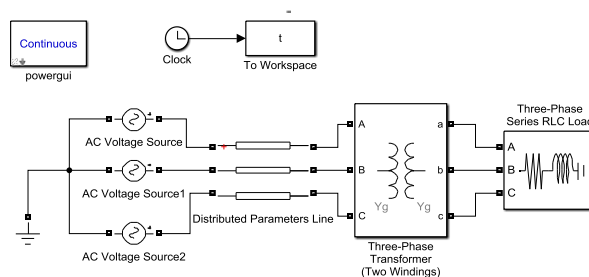
Kako je brzina prostiranja elektromagnetnih talasa napona i struja duž voda za vazdušne vodove bliska brzini svetlosti u vakuumu,  $v_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ , za tu vrstu vodova važi da je, pri nazivnoj učestanosti od  $f_n = 50$  Hz, talasna dužina prostiranja napona i struja duž voda ( $\lambda_v$ ) približno 6000 km.

Napon i struja na početku u funkciji napona i struje na kraju voda mogu se dobiti iz jednačine (1), kada se u nju uvrsti stvarna dužina voda  $L$  [km] umesto tekuće koordinate  $x$ :

$$\begin{aligned} V_S &= V_R \cdot ch(\gamma L) + Z_C \cdot I_R \cdot sh(\gamma L) \\ I_S &= \frac{V_R}{Z_C} \cdot sh(\gamma L) + I_R \cdot ch(\gamma L). \end{aligned} \quad (4)$$

### 3. MATLAB SIMULINK MODEL UPROŠĆENOG EES-a

U svrhu istraživanja uticaja dužine vazdušnog voda na uspostavljanje ustaljenih radnih režima u prenosnim mrežama EES-a načinjen je uprošćeni model u MATLAB Simulink-u, koji je prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1. MATLAB Simulink model uprošćenog EES-a

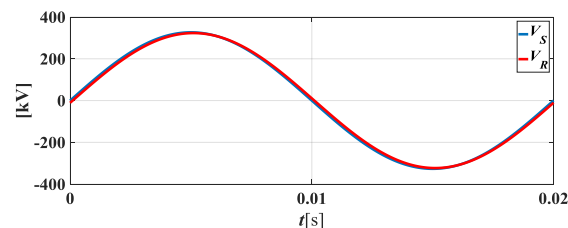
U tabeli 1 dati su osnovni parametri elemenata koji sačinjavaju modelovani EES. Vod je modelovan kao element sa raspoređenim parametrima, koji dopušta uvažavanje efekta kašnjenja, onako kako je to priloženo relacijama u prethodnom poglavlju.

Tabela 1. Parametri elemenata uprošćenog modela EES-a

Element	vod	transformator	potrošač
Naponski nivo	400kV	400/110kV/kV	110 kV
Parametri	$r=0,0127 \frac{\Omega}{km}$ $l=0,934 \cdot 10^{-3} \frac{H}{km}$ $c=12,74 \cdot 10^{-9} \frac{F}{km}$	$u_x=8\%$ $u_r=0,2\%$	/
Snaga	/	$S_n=250$ MVA	P=200 MW Q=50 Mvar

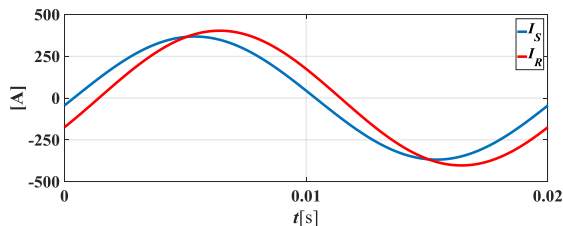
#### 3.1. Karakteristični odzivi voda dužine 100 km

Na razvijenom modelu izvršene su simulacije, u kojima je načinjena varijacija dužine modelovanog voda sa raspoređenim parametrima. Izvedene su varijante sa dužinama voda od 100 km, 400 km i 800 km, gde se, kroz priložene karakteristične odzive jasno mogu uočiti osobenosti koje promenljiva dužina voda manifestuje u njima.



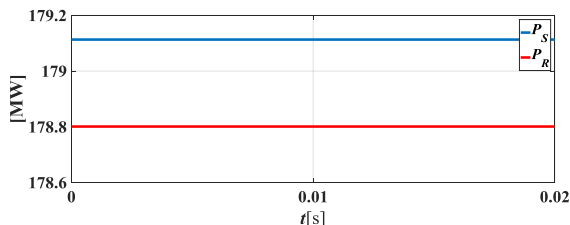
Slika 3.2. Odzivi napona faze a na početku i kraju voda dužine 100 km

Na slici 3.2 dat je uporedni prikaz talasnih oblika napona faze a na početku i kraju voda dužine 100 km. Ovaj vod spada u relativno kratke nadzemne vodove naponskog nivoa 400 kV, tako da je slabo izražen efekat kašnjenja na njemu, što se jasno uočava upoređivanjem prikazanih odziva napona.



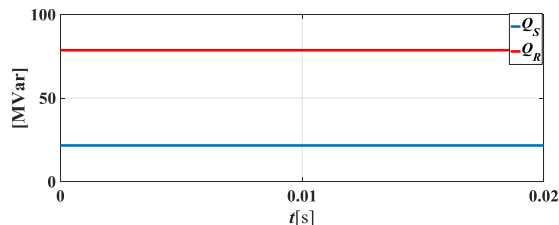
Slika 3.3. Odstivi struja faze a na početku i kraju voda dužine 100 km

Na slici 3.3 dat je uporedni prikaz struja faze a na početku i kraju modelovanog voda dužine 100 km. Uočava se veći fazni pomeraj između struja nego što je bio slučaj sa naponima, što se duguje činjenici da sam vod generiše reaktivnu snagu i time nadoknađuje potrebe potrošača.



Slika 3.4. Odstivi aktivnih snaga na početku i kraju voda dužine 100 km

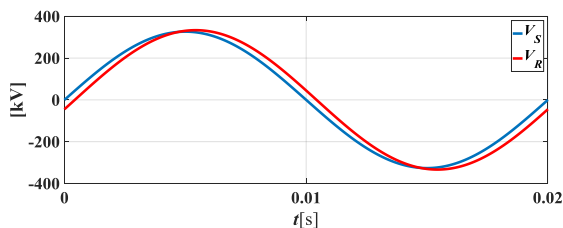
Na slici 3.4 priloženi su odzivi aktivnih snaga na početku i kraju modelovanog voda dužine 100 km. Primećuje se da je ulazna snaga u vod nešto veća od izlazne, zbog postojanja aktivnih gubitaka na samom vodu.



Slika 3.5. Odstivi reaktivnih snaga na početku i kraju voda dužine 100 km

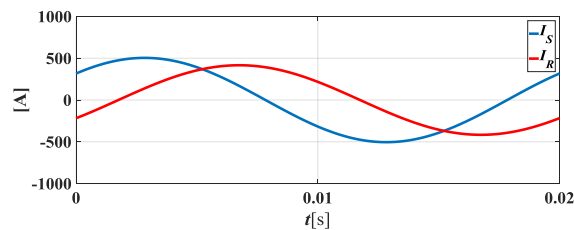
U odzivima reaktivnih snaga sa slike 3.5 na početku i kraju voda dužine 100 km jasno se uočava uticaj generisanja reaktivne snage voda, budući da je izlazna reaktivna snaga veća od ulazne.

### 3.2. Karakteristični odzivi voda dužine 400 km



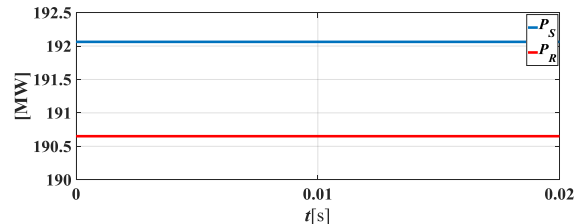
Slika 3.6. Odstivi napona faze a na početku i kraju voda dužine 400 km

Na vodu dužine 400 km se primećuje nešto veći fazni pomeraj nego što je to bio slučaj kod voda dužine 100 km, što je i prema očekivanjima, a to se jasno uočava na slici 3.6.



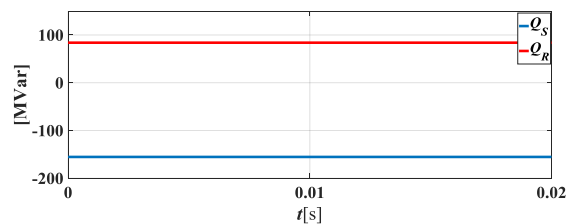
Slika 3.7. Odstivi struja faze a na početku i kraju voda dužine 400 km

Fazni pomeraj struja je svakako ponovo izraženiji i kod ovog voda (slika 3.7) u odnosu na fazni pomeraj napona, što se ponovo objašnjava izmenjenim tokom reaktivnih snaga na početku, odnosno na kraju voda.



Slika 3.8. Odstivi aktivnih snaga na početku i kraju voda dužine 400 km

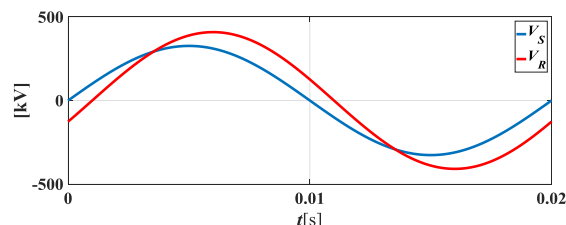
Porastom dužine voda dolazi i do porasta potražnje za aktivnom snagom od izvora, usled povećanih gubitaka na samom vodu, što je prikazano na slici 3.8.



Slika 3.9. Odstivi reaktivnih snaga na početku i kraju voda dužine 400 km

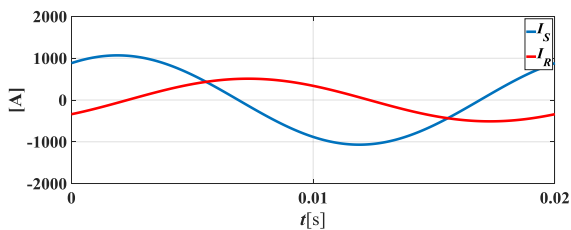
Porast dužine voda je potpuno izmenio tokove reaktivnih snaga, u tolikoj meri da je sada koren mreže postao njen potrošač, što se jasno vidi iz negativne vrednosti reaktivne snage na ulazu u vod, prikazane na slici 3.9.

### 3.3. Karakteristični odzivi voda dužine 800 km



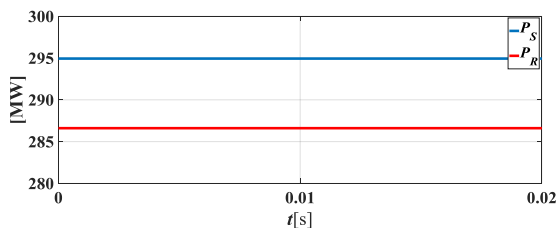
Slika 3.10. Odstivi napona faze a na početku i kraju voda dužine 800 km

Na vodu dužine 800 km je primetno izraženiji fazni pomeraj među naponima nego što je to bio slučaj kod prethodnih odziva (slika 3.10), što je i prema očekivanjima, a ujedno se uočava i skok amplitude napona na kraju voda u odnosu na početak. Vod ove dužine spada u veoma dugačke vodove za prenosnu mrežu 400 kV i u ovom radu je analiziran sa čisto teorijskog aspekta, zbog ekstremno izraženih efekata koji u eksploataciji nisu dopušteni.



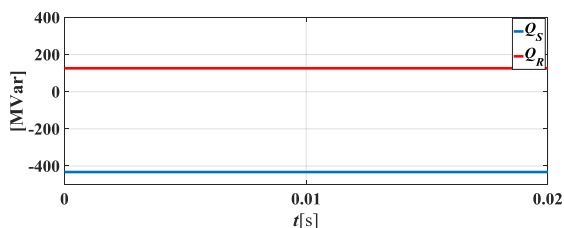
Slika 3.11. Odstivi struja faze a na početku i kraju voda dužine 800 km

Na slici 3.11 dat je uporedni prikaz odziva struja faze a na početku i kraju voda. Primećuju se drastične razlike u amplitudama, što se duguje izraženoj reaktivnoj komponenti struje na početku voda, koja isporučuje reaktivnu snagu korenu mreže.



Slika 3.12. Odstivi aktivnih snaga na početku i kraju voda dužine 800 km

Povećanjem dužine voda dolazi i do značajnog porasta gubitaka na njemu, što se posledično ogleda i u porastu aktivnih snaga na oba kraja voda, što je prikazano na slici 3.12.



Slika 3.13. Odstivi reaktivnih snaga na početku i kraju voda dužine 800 km

Negativni efekti voda veoma velike dužine se, pored odziva napona, najbolje uočavaju u odzivima reaktivnih snaga, prikazanih na slici 3.13. Vod generiše veoma veliku količinu reaktivne snage, koju zatim isporučuje, kako potrošačima, tako i samom korenu mreže, što se ogleda u nedopustivo velikoj negativnoj vrednosti reaktivne snage na početku voda.

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu su izložene teorijske osnove modelovanja nadzemnih vodova u visokonaponskim prenosnim mrežama. Zbog potencijalno velikih dimenzija prenosne mreže, u praksi je moguća pojava upotrebe nadzemnih vodova velikih dužina.

Kao posledica toga u eksploataciji EES-a može doći do uspostavljanja radnih režima u kojima dolazi do izražaja efekat kašnjenja, a koji se može negativno odraziti na implementaciju sistema zaštite, a samim tim i na pouzdanost EES-a. Zbog postojanja efekta kašnjenja, potrebno je električne veličine EES-a tretirati kao elektromagnetne talase, pa se na osnovu te činjenice, a uz primenu jednačina telegrafičara, naponi i struje duž dalekovoda tretiraju kao veličine zavisne od prostorne koordinate.

Na osnovu izloženih teorijskih principa je načinjen simulacioni model u MATLAB *Simulink*-u, na kojem su izvršene karakteristične simulacije sa varijacijom dužine modelovanog voda. Ispostavilo se, prema očekivanjima, da porastom dužine voda dolazi do izraženijeg faznog pomeraja među veličinama sa početka, odnosno kraja, ali ujedno i do uspostavljanja nepovoljnog stacionarnog režima sa dramatično izmenjenim tokovima reaktivnih snaga, koje su u praksi nedopustive.

#### 5. LITERATURA

- [1] Milan S. Čalović, „*Osnovi analize elektroenergetskih sistema i mreža*“, Akademska misao, 2004.
- [2] „*Electrical Transmission and Distribution Reference Book*“, Westinghouse, Pittsburg, PA, USA, 1950.
- [3] M. Ožegović i K. Ožegović, „*Električne mreže: Svezak I*“, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 1982.
- [4] [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)

#### Kratka biografija:

**Sanja Špica** rođena je u Prijepolju 1996. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Distribuirani energetske resursi odbranila je 2020. godine.

**Dejan Jerkan** je docent na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su mu modelovanje i dijagnostika električnih mašina, kao i metoda konačnih elemenata.