

# Distantna zaštita dvostrukih nadzemnih vodova

Miodrag Forcan

Elektrotehnički fakultet u Beogradu  
Elektrotehnički fakultet u Istočnom Sarajevu  
Beograd, Srbija; Istočno Sarajevo, BiH  
miodrag.forcan@live.com

Zoran Stojanović

Elektrotehnički fakultet u Beogradu  
Beograd, Srbija  
stojanovic@etf.rs

**Sadržaj**—U radu su analizirane mogućnosti primjene konvencionalne distantne zaštite za slučaj dvostrukog nadzemnog voda. Realizovan je model trofaznog elektroenergetskog sistema sa dvostrukim vodom. Implementirana je distantna relejna zaštita sa korekcijom mjerene struje u svrhu prilagođenja dvostrukom vodu. Vršeno je testiranje selektivnosti distantnih releja za sve vrste kvarova u prvom i drugom stepenu zaštite. Analizirana je osjetljivost zaštite u zavisnosti od uvedene korekcije i preciznosti modela dvostrukog voda.

**Ključne riječi** - dvostruki vod; distantni relej; mjerna impedansa; kratak spoj.

## I. UVOD

Dvostruki nadzemni vodovi omogućavaju prenos veće električne snage u odnosu na jednostruke nadzemne vodove za istu udaljenost [1]. Selektivna zaštita nadzemnih vodova u petljastim mrežama najčešće se postiže distantnim relejima [2]. Primjena konvencionalne distantne zaštite u slučaju dvostrukog voda ne garantuje zahtijevanu osjetljivost i selektivnost zbog postojanja značajne vrijednosti međusobne impedanse nultog redosljeda [3,4], zbog čega se često koristi koncept poprečne diferencijalne zaštite [5].

Modifikovana distantna zaštita sa korekcijom mjerne impedanse [3], može predstavljati korisnu alternativu poprečnoj diferencijalnoj zaštiti dvostrukog voda, ukoliko se pronađu dobra rješenja za postizanje adekvatne osjetljivosti i selektivnosti.

## II. MJERNE IMPEDANSE DISTANTNIH RELEJA

Realna trofazna distantna relejna zaštita nadzemnog voda se sastoji od šest individualnih distantnih releja čime je postignuta osjetljivost za svaku vrstu kvara. Ulazne veličine releja trofazne distantne zaštite su prikazane u Tab.I.

TABELA I. ULAZNE VELIČINE DISTANTNIH RELEJA

Oznaka releja	Ulazni napon $\underline{U}_r$	Ulazna struja $\underline{I}_r$	Vrsta kvara
R1	$\underline{U}_{AB}$	$\underline{I}_A - \underline{I}_B$	AB,ABC,AB0
R2	$\underline{U}_{BC}$	$\underline{I}_B - \underline{I}_C$	BC,ABC,BC0
R3	$\underline{U}_{CA}$	$\underline{I}_C - \underline{I}_A$	AC,ABC,AC0
R4	$\underline{U}_A$	$\underline{I}_A + k\underline{I}_0$	A0,AB0,AC0,ABC
R5	$\underline{U}_B$	$\underline{I}_B + k\underline{I}_0$	B0,AB0,BC0,ABC
R6	$\underline{U}_C$	$\underline{I}_C + k\underline{I}_0$	C0,AC0,BC0,ABC

Kod distantnih releja koji detektuju jednofazne kvarove, u izrazu za ulaznu struju, koristi se koeficijent kompenzacije  $k$  (uticaj struje nultog redosljeda), definisan sljedećim izrazom:

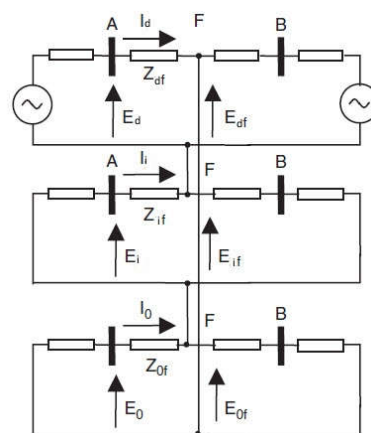
$$k = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_d}{\underline{Z}_d}, \quad (1)$$

gdje su  $\underline{Z}_d$  i  $\underline{Z}_0$  impedanse direktnog i nultog redosljeda nadzemnog voda.

### A. Korekcija mjerne impedanse za dvostruki vod

Osnovni problem u realizaciji distantne zaštite dvostrukog voda jesu jednofazni kratki spojevi. Iako su međusobne impedanse (impedanse između dva jednostruka voda) direktnog i inverznog redosljeda zanemarljive, postoji značajna vrijednost međusobne impedanse nultog redosljeda.

Na Sl.1 prikazano je kolo simetričnih komponenti za slučaj zemljospoja faze A jednostrukog nadzemnog voda.



Slika 1. Kolo simetričnih komponenti pri jednofaznom kratkom spoju u fazi A jednostrukog nadzemnog voda [Horowitc]

Na osnovu električne šeme sa Sl.1, uz pretpostavku da je napon na mjestu kvara jednak nuli, moguće je napisati sljedeći izraz:

$$\begin{aligned} \underline{E}_{af} &= \underline{E}_{df} + \underline{E}_{if} + \underline{E}_{0f} \\ &= (\underline{E}_d + \underline{E}_i + \underline{E}_0) - \underline{Z}_{df}(\underline{I}_d + \underline{I}_i) - \underline{Z}_{0f}\underline{I}_0 \\ &= \underline{E}_a - \underline{Z}_{df}\underline{I}_a - (\underline{Z}_{0f} - \underline{Z}_{df})\underline{I}_0 = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Iz jednakosti (2) dobija se izraz za mjernu impedansu:

$$\underline{Z}_m = \underline{Z}_{df} = \frac{\underline{E}_a}{\underline{I}_a + \frac{\underline{Z}_{0f} - \underline{Z}_{df}}{\underline{Z}_{df}} \underline{I}_0}. \quad (3)$$

U slučaju dvostrukog voda, prilikom proračuna mjerne impedanse, neophodno je uvažiti uticaj nultih struja oba jednostruka voda ( $\underline{I}_{01}$  i  $\underline{I}_{02}$ ) zbog postojanja značajne vrijednosti međusobne impedanse nultog redoslijeda. Izraz za mjernu impedansu distantnog releja za jednofazni kratak spoj u fazi A je:

$$\underline{Z}_m = \underline{Z}_{df} = \frac{\underline{E}_a}{\underline{I}_a + \frac{\underline{Z}_{0f} - \underline{Z}_{df}}{\underline{Z}_{df}} \underline{I}_{01} + \frac{\underline{Z}_{0mf}}{\underline{Z}_{df}} \underline{I}_{02}}. \quad (4)$$

Izraz za ulaznu struju distantnog releja R1 (Tab.1) u slučaju dvostrukog voda glasi:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_a + k\underline{I}_{01} + m\underline{I}_{02}, \quad (5)$$

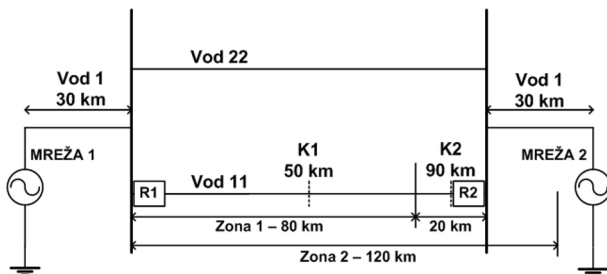
gdje je  $m$  koeficijent kompenzacije usljed struje nultog redoslijeda drugog jednostrukog voda, dat sljedećim izrazom:

$$m = \frac{\underline{Z}_{0m}}{\underline{Z}_d}, \quad (6)$$

gdje je  $\underline{Z}_{0m}$  međusobna impedansa nultog redoslijeda dva jednostruka voda u sistemu dvostrukih vodova.

### III. MODELOVANJE ENERGETSKOG SISTEMA SA DVOSTRUKIM VODOM

Primjenom programskog paketa MATLAB/Simulink [6], realizovan je model dvostrano napajano dvostrukog voda prikazan na Sl.2.



Slika 2. Model elektroenergetskog sistema sa dvostrukim nadzemnim vodovod

Dvostruki vod sa Sl.2 je modelovan šemom sa raspodijeljenim parametrima u fazorskom domenu sa punim matricama podužnih impedansi i otočnih admitansi (slučaj netransponovanog voda). Vrijednosti podužnih parametara za slučaj modela potpuno transponovanog voda su:  $R_{1d} = R_{2d} = 0.014 \Omega/\text{km}$ ,  $R_{10} = R_{20} = 0.191 \Omega/\text{km}$ ,  $R_{m0} = 0.176 \Omega/\text{km}$ ,  $L_{1d} = L_{2d} = 0.812 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $L_{10} = L_{20} = 2.87 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $L_{m0} = 1.77 \Omega/\text{km}$ ,  $C_{1d} = C_{2d} = 14.48 \text{ nF}/\text{km}$ ,  $C_{10} = C_{20} = 8.53 \text{ nF}/\text{km}$ ,  $C_{m0} = -2.34 \text{ nF}/\text{km}$ . Dužina voda je  $l = 100 \text{ km}$ . Nazivni napon sistema je 400 kV.

Mreže su modelovane kao realni izvori napajanja sa sljedećim parametrima:

- Mreža 1: 400 kV, 1200 MVA, X/R = 10,

- Mreža 2: 385 kV, 1000 MVA, X/R = 10.

#### A. Modelovanje distantne zaštite

Pri modelovanju algoritama za distantne releje, korišćen je prethodno razvijeni simulator relejne zaštite u realnom vremenu [7]. Analiziran je rad distantne zaštite voda 11 (releji R1 i R2 sa Sl.2). Naponi i struje na ulazu releja prolaze kroz proces filtriranja, zbog eliminacije viših frekventnih komponenti i opadajuće jednosmjerne komponente. Za eliminisanje viših frekventnih komponenti upotrebljen je analogni filter, klase Butterworth, trećeg reda, sa graničnom frekvencijom 150 Hz. Eliminisanje opadajuće jednosmjerne komponente je realizovano upotrebom digitalnog filtera CharmDF [8], sa odgovarajućom amplitudnom i faznom korekcijom. Fazori električnih signala su estimirani primjenom rekurzivne Furijeove metode. Frekvencija odabiranja releja je podešena na vrijednost  $f_{od} = 4 \text{ kHz}$ .

Pri realizaciji distantnih releja, odabrana je ugaono admitansna karakteristika reagovanja (mho karakteristika), definisana sljedećim izrazom:

$$(\text{real}(\underline{Z}_m) - zR_C)^2 + (\text{imag}(\underline{Z}_m) - zX_C)^2 \leq \left( z \frac{|\underline{Z}_v|}{2} \right)^2, \quad (7)$$

gdje su:  $\underline{Z}_m$  - mjerna impedansa distantnog releja,

$\underline{Z}_v$  - impedansa voda direktnog redoslijeda,

$z$  - koeficijent za podešavanje zone reagovanja,

$R_C, X_C$  - koordinate centra mho karakteristike, definisane izrazima (8) i (9).

$$R_C = \frac{|\underline{Z}_v|}{2} \cos(\arg(\underline{Z}_v)), \quad (8)$$

$$X_C = \frac{|\underline{Z}_v|}{2} \sin(\arg(\underline{Z}_v)). \quad (9)$$

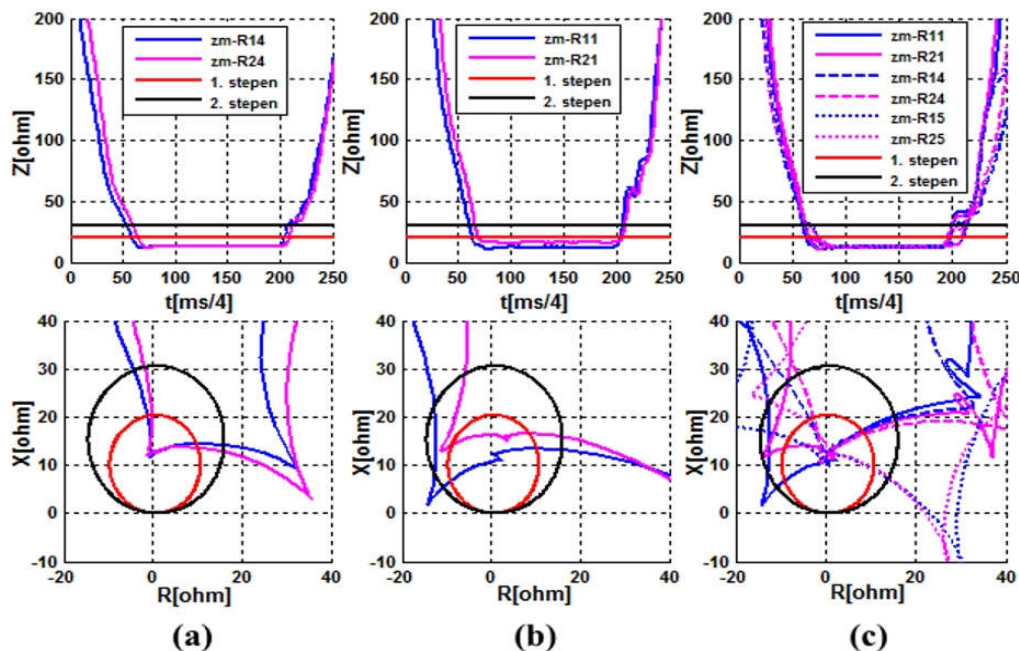
Vrijednosti mjerne impedanse  $\underline{Z}_m$  su određene ulaznim veličinama releja (Tab.1), uz korekcije struje za dvostruki vod u slučaju releja R4, R5 i R6. Vrijednost impedanse voda direktnog redoslijeda je  $\underline{Z}_v = 1.43 + j25.43 \Omega$ . Koeficijent za podešavanje zone reagovanja u prvom stepenu ima vrijednost  $z_1 = 0.8$  (80% dužine voda), dok je njegova vrijednost u drugom stepenu  $z_2 = 1.2$  (120% dužine voda).

Uslovi reagovanja distantne zaštite u prvom i drugom stepenu su određeni ispunjenošću uslova (7) u toku vremena  $T = 20 \text{ ms}$  i  $2T = 40 \text{ ms}$ , respektivno.

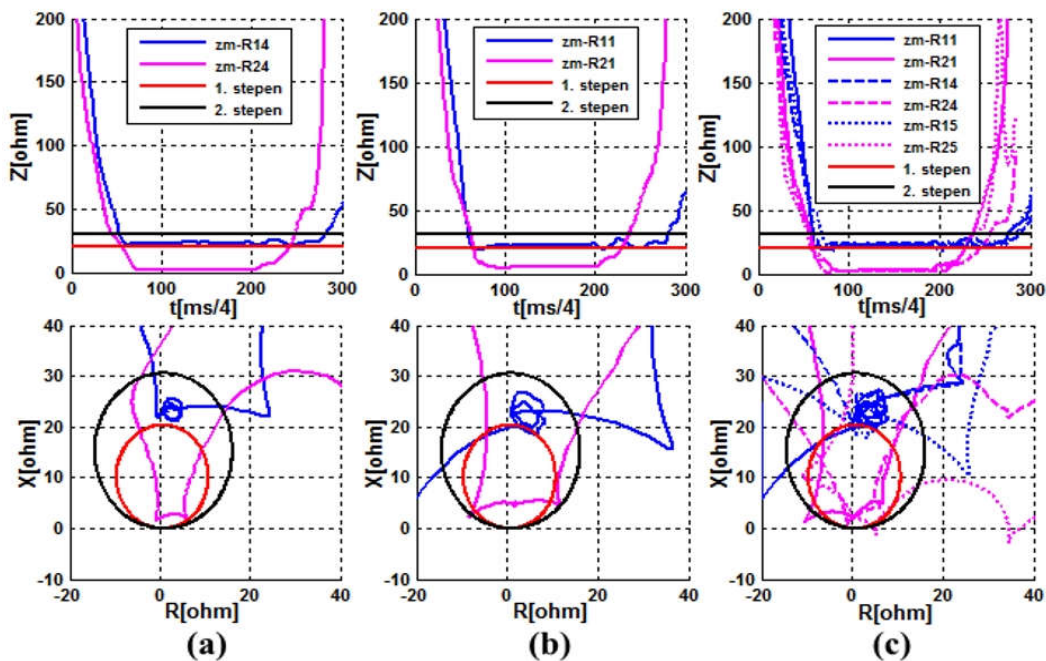
#### IV. TESTIRANJE SELEKTIVNOSTI DISTANTNE ZAŠTITE

U svrhu testiranja selektivnosti distantne zaštite, analizirane su dvije lokacije kvara (Sl.2): K1-50 km udaljenost od početka voda (zona prvog stepena) i K2 - 90 km udaljenost od početka voda (zona drugog stepena). Na Sl.3 su prikazani rezultati

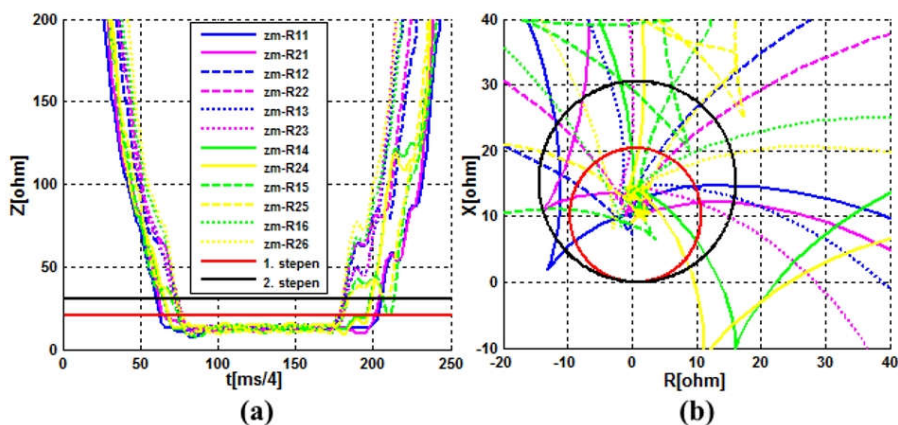
testiranja za slučaj kvarova A0, AB i AB0, na lokaciji K1. Dok su na Sl.4 prikazani rezultati testiranja za slučaj istih vrsta kvarova na lokaciji K2. Analizirane su promjene modula mjernih impedansi i hodografi distantnih releja. Rezultati testiranja za trofazni kratak spoj ABC su prikazani na Sl.5 i Sl.6, za lokacije K1 i K2, respektivno.



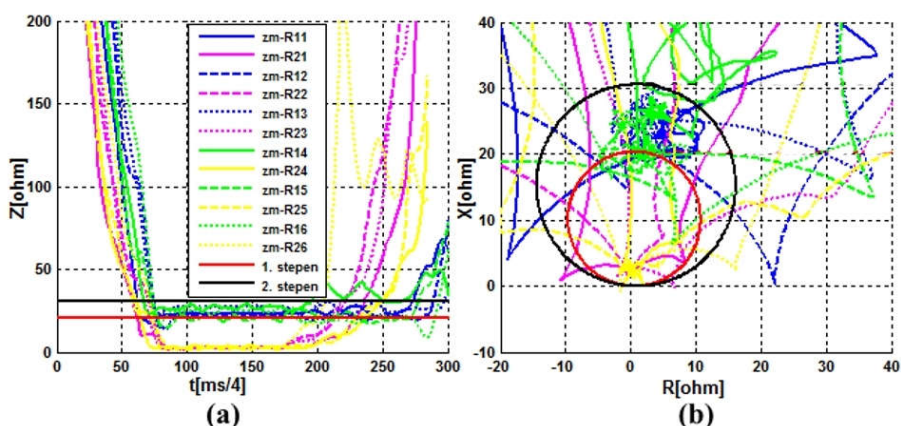
Slika 3. Promjene modula mjerne impedanse i odgovarajući hodografi distantnih releja R1 i R2 za slučaj kvarova na lokaciji K1: (a) jednofazni kratak spoj A0; (b) dvofazni kratak spoj bez zemljspoja AB; (c) dvofazni kratak spoj sa zemljspojem AB0



Slika 4. Promjene modula mjerne impedanse i odgovarajući hodografi distantnih releja R1 i R2 za slučaj kvarova na lokaciji K2: (a) jednofazni kratak spoj A0; (b) dvofazni kratak spoj bez zemljspoja AB; (c) dvofazni kratak spoj sa zemljspojem AB0



Slika 5. Testiranje selektivnosti distantnih releja R1 i R2 za slučaj trofaznog kratkog spoja ABC na lokaciji K1: (a) promjena modula mjerne impedanse; (b) hodografi releja



Slika 6. Testiranje selektivnosti distantnih releja R1 i R2 za slučaj trofaznog kratkog spoja ABC na lokaciji K2: (a) promjena modula mjerne impedanse; (b) hodografi releja

Sa grafika na Sl.3.a može se uočiti da su u prvom stepenu reagovali releji R14 i R24 (relej R4 iz Tab.1), na početku i kraju voda za slučaj kvara A0, čime je ostvarena selektivnost distantne zaštite. Identičan zaključak važi za releje R11 i R21 u slučaju kvara AB (Sl.3b). Pri kvaru AB0, za koji su rezultati prikazani na Sl.3c, reaguju po tri releja na početku i kraju voda: R11, R21, R14, R24, R15 i R25, čime je takođe ostvarena selektivnost zaštite.

Pri analizi kvarova A0, AB i AB0 na lokaciji K2, selektivnost zaštite je ostvarena ukoliko releji R1 reaguju u prvom stepenu, a releji R2 u drugom stepenu. Analizom grafika sa Sl.4 može se zaključiti da je zaštita selektivna za sve tri vrste razmatranih kvarova.

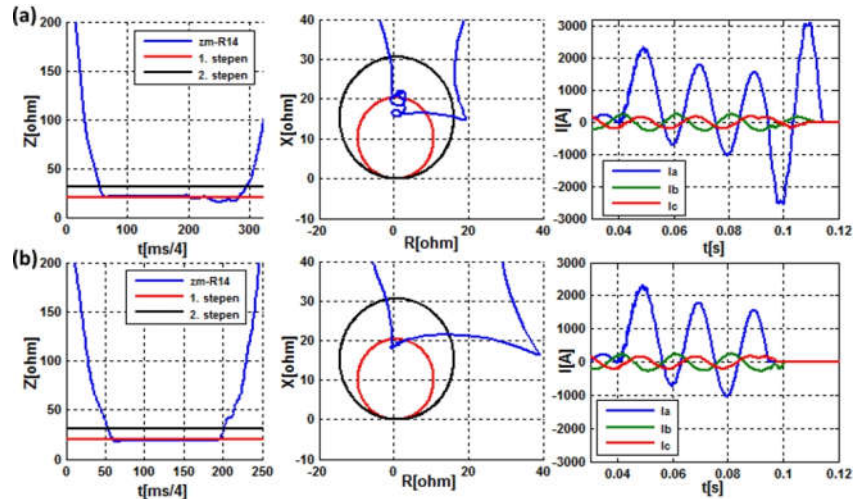
U slučaju trofaznog kvara ABC na lokaciji K1 (Sl.5) selektivnost zaštite je ispunjena, jer je u prvom stepenu reagovalo svih šest releja na početku i kraju dionice nadzemnog voda (R1 i R2). Na Sl.6 prikazani su rezultati za trofazni kvar ABC na lokaciji K2. Može se zaključiti da su svi releji na početku voda (R1) reagovali u drugom stepenu zaštite, dok su svi releji na kraju voda (R2) reagovali u prvom stepenu zaštite, čime je ostvarena selektivnost.

## V. TESTIRANJE OSJETLJIVOSTI DISTANTNE ZAŠTITE

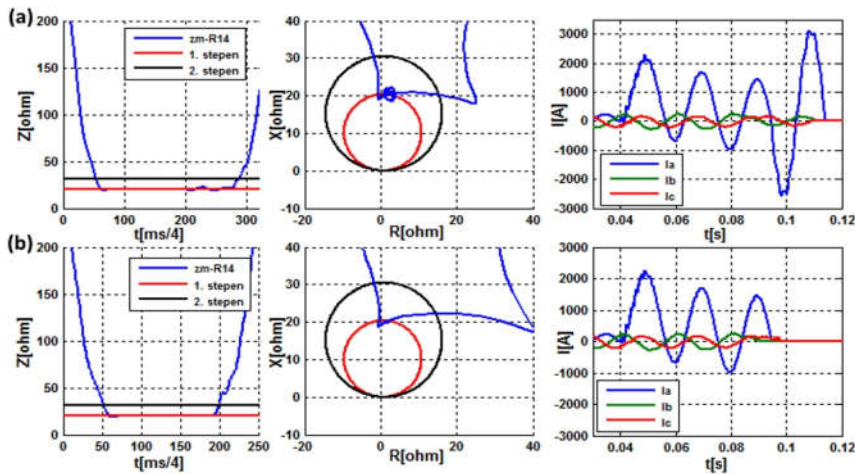
Osjetljivost releja distantne zaštite dvostrukog voda je testirana za slučaj jednofaznog kvara A0. Analizirani su sljedeći karakteristični slučajevi:

- 1. Uticaj korekcije mjerne impedanse distantnog releja dvostrukog voda (uvažavanje međusobne nulte impedanse).** Pri kvaru na udaljenosti 75 km od početka voda (prvi stepen), upoređeni su rezultati distane zaštite bez i sa korekcijom mjerne struje (5). Ogovarajući rezultati su prikazani na Sl.7.
- 2. Uticaj modela transpozicije dvostrukog voda (netransponovan i potpuno transponovan dvostruki vod).** Pri kvaru na udaljenosti 79 km od početka voda (prvi stepen), upoređeni su rezultati distane zaštite za slučajeve netransponovanog voda (pune matrice parametara) i potpuno transponovanog voda (zanemarene međusobne impedanse i admitanse direktnog i inverznog redosljeda). Ogovarajući rezultati su prikazani na Sl.8.
- 3. Uticaj zanemarenja međusobne kapacitivnosti nultog redosljeda dvostrukog voda ( $C_{m0} \approx 0$ ).** Pri kvaru na udaljenosti 79.5 km od početka voda (prvi stepen), upoređeni su rezultati distane zaštite bez i sa zanemarenjem  $C_{m0}$  (Sl.9).

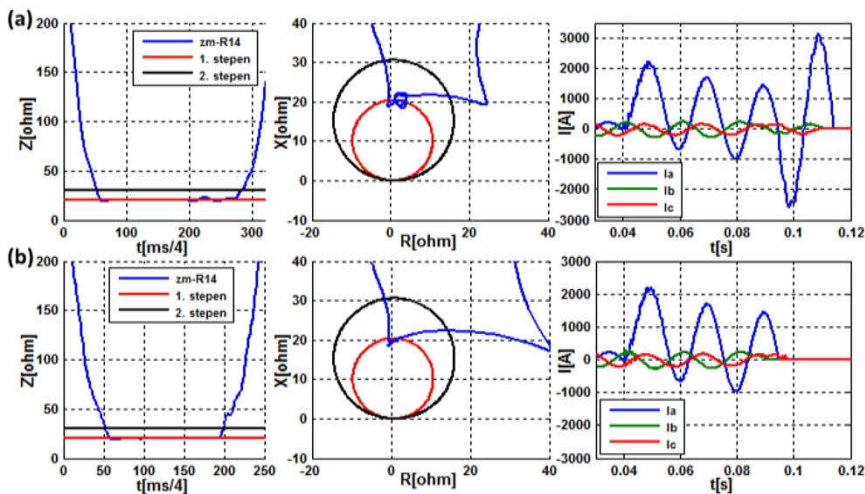




Slika 7. Osjetljivost distantnog releja R1 za slučaj kvara A0 na udaljenosti 75 km od početka voda (promjena modula mjerne impedanse, hodograf releja i struje na početku voda): (a) bez korekcije mjerne struje za dvostruki vod; (b) sa korekcijom mjerne struje za dvostruki vod



Slika 8. Osjetljivost distantnog releja R1 za slučaj kvara A0 na udaljenosti 79 km od početka voda (promjena modula mjerne impedanse, hodograf releja i struje na početku voda): (a) netransponovan dvostruki vod; (b) potpuno transponovan dvostruki vod



Slika 9. Osjetljivost distantnog releja R1 za slučaj kvara A0 na udaljenosti 79.5 km od početka voda (promjena modula mjerne impedanse, hodograf releja i struje na početku voda): (a) bez zanemarenja međusobne nulte kapacitivnosti  $C_{m0}$ ; (b) sa zanemarenjem međusobne nulte kapacitivnosti  $C_{m0}$

Na osnovu grafika sa Sl.7.a, može se zaključiti da relej R14 nije reagovao u prvom stepenu za slučaj kvara A0 na udaljenosti 75 km od početka voda (došlo je do reagovanja u drugom stepenu). U ovom slučaju mjerna impedansa releja je veća od stvarne impedanse do mjesta kvara, jer je ulazna struja releja bez korekcije usljed nulte struje drugog jednostrukog voda manja. Uvažavanjem korekcije referentne struje za dvostruki vod, koja je definisana izrazom (5), dobijaju se rezultati prikazani na Sl.7.b. Može se zapaziti da je osjetljivost distantnog releja R14 u prvom stepenu ostvarena i da je došlo do selektivnog reagovanja.

Analizom grafika sa Sl.8.a, uviđa se neosjetljivost distantnog releja R14 u prvom stepenu, za slučaj kvara A0 na udaljenosti 79 km od početka voda, iako je uvažena korekcija mjerne struje za dvostruki vod. Uzrok neosjetljivosti je model netransponovanog voda, koji uvažava međusobne impedanse direktnog i inverznog redosljeda (pune matrice parametara). Distantna zaštita je zasnovana samo na mjerenju impedanse direktnog redosljeda, na osnovu čega su i podešene zone reagovanja. Kod modela netransponovanog voda mjerna impedansa releja R14 je veća od pretpostavljene ( $Z_d$ ), što uzrokuje smanjenu osjetljivost. Za potpuno isti slučaj kvara, upotrebom modela potpuno transponovanog dvostrukog voda, distantna zaštita je osjetljiva u prvom stepenu, što se može zaključiti na osnovu grafika prikazanih na Sl.8.b.

Za slučaj kvara A0 na udaljenosti 79.5 km od početka voda, distantni relej R14 je neosjetljiv u prvom stepenu, iako su uvaženi korekcija mjerne struje, usljed međusobne impedanse nultog redosljeda, i model potpuno transponovanog dvostrukog voda (Sl.9.a). Neosjetljivost je prisutna zbog postojanja međusobne kapacitivnosti nultog redosljeda  $C_{m0}$  u modelu potpuno transponovanog dvostrukog voda. Zbog konačne vrijednosti kapacitivnosti  $C_{m0}$ , mali dio nulte struje se uspostavlja od jednostrukog voda bez kvara, prema mjestu kvara na drugom jednostrukom, čime je mjerna struja releja R14 manja, a kao posljedica mjerna impedansa veća od stvarne impedanse do mjesta kvara. Zanemarenjem  $C_{m0}$  u modelu dvostrukog voda, distantni relej R14 će reagovati u prvom stepenu, što se može vidjeti sa grafika na Sl.9.b.

#### ZAKLJUČAK

U radu je realizovan simulator rada distantne zaštite dvostrukog voda u realnom vremenu. Uočeni su osnovni nedostaci konvencionalnih distantnih releja, koji su predviđeni za jednostruke vodove, u slučaju dvostrukog voda. Primjena konvencionalne distantne zaštite za dvostruki vod može dovesti

do neselektivnog reagovanja, zbog čega je preporučena implementacija korekcije mjerne struje, koja uvažava uticaj međusobne nulte impedanse. Osjetljivost distantne zaštite dvostrukog voda može biti poboljšana pravilnim odabirom granica zona reagovanja u zavisnosti od što preciznijeg prilagođenja modela realnom nadzemnom vodu.

#### LITERATURA

- [1] N. D. Tleis, *Power Systems Modelling and Fault Analysis*, In Newnes Power Engineering Series, Newnes, Oxford, 2008, pp. 74-199.
- [2] M. Đurić, Z. Stojanović, "Relejna zaštita", KIZ Centar, Beograd, 2014.
- [3] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, *Power System Relaying: Third Edition*, 2008, pp. 121-123.
- [4] A. Apostolov et al., "Protection of double circuit transmission lines", in *Proceedings of 60th Annual Conference on Protective Relay Engineers*, 2007, pp. 85-101.
- [5] M. Forcan, Z. Stojanovic, "An algorithm for sensitive directional transverse differential protection with no voltage inputs", *Electric Power Systems Research*, Volume 137, August 2016, pp. 86-95.
- [6] MATLAB 2014a, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [7] M. Forcan, Z. Stojanovic, „Testiranje algoritama poprečne diferencijalne zaštite bez naponskih ulaza na trofaznom modelu EES-a", *INFOTEH - JAHORINA*, Vol. 14, Mart 2015, pp. 192-197.
- [8] J. Lázaro et al., "Newquick-convergence invariant digital filter for phasor estimation", *Electric Power Systems Research*, Volume 79, 2009, pp. 705-713.

#### ABSTRACT

Possibilities of conventional distance protection applications to double circuit overhead lines have been analysed in this article. The model of three phase power system with double circuit lines has been realized. Distance relay protection with correction of measured current, has been implemented for double circuit line. Selectivity testing of distance relays has been performed in the case of various fault types. Sensitivity of protection has been analysed with respect to adopted correction and double circuit line modelling precision.

**Key words - double circuit line; distance relay; measurement impedance; short circuit.**

#### DISTANCE PROTECTION OF DOUBLE CIRCUIT OVERHEAD LINES

M. FORCAN, Z. STOJANOVIĆ