

Mrtva zona poprečne diferencijalne zaštite dvostrukih nadzemnih vodova

Miodrag Forcan

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

Zoran Stojanović

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

Sadržaj—Dvostruki nadzemni vodovi su u praksi najčešće zaštićeni poprečnom diferencijalnom zaštitom, čime se postiže veoma brzo i selektivno isključenje samo onog nadzemnog voda koji je u kvaru. Najvažniji nedostatak poprečne diferencijalne zaštite je postojanje mrtve zone reagovanja za kvarove bliske zajedničkim sabirnicama nadzemnih vodova. U ovom članku je analizirana mrtva zona neusmjerene, usmjerene i poprečne diferencijalne zaštite čije je usmjerenje bazirano samo na priraštajima strujnih signala. Dati su rezultati simulacija rada algoritama digitalne poprečne diferencijalne zaštite za slučajeve kvarova u okolini mrtve zone. Predložena je procedura izbora odgovarajućih pragova reagovanja u odnosu na karakteristike nadzemnih vodova i samu mrtvu zonu zaštite.

Ključne riječi – mrtva zona; poprečna diferencijalna zaštita; dvostruki nadzemni vod; prag reagovanja

I. UVOD

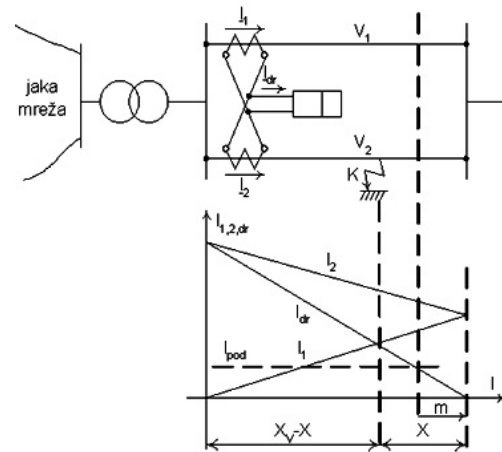
Broj dvostrukih nadzemnih vodova (DNV) u prenosnim sistemima mnogih država je u značajnom porastu, zbog većeg kapaciteta i pouzdanosti prenosa električne energije [1]. U odnosu na jednostruke nadzemne vodove (JNV), DNV-ovi imaju manju cijenu investicije za istu trasu i snagu prenosa [2]. Međutim, jedan od njihovih najvažnijih nedostataka je kompleksnost realizacije relejne zaštite [3].

Najzastupljenije digitalne relejne zaštite DNV-a su usmjerena poprečna diferencijalna i distantna. Od posebnog interesa su veoma brzi algoritmi za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu, zasnovani na priraštajima strujnih signala [3-6]. Osjetljivost ovih algoritama je veoma zavisna od usvojenih vrijednosti pragova reagovanja, zbog čega je njihovo pravilno određivanje od velike važnosti.

U prvom dijelu ovog članka dato je izvođenje izraza za mrtvu zonu poprečne diferencijalne zaštite. Drugi dio analizira posljedice postojanja mrtve zone na rad usmjerene poprečne diferencijalne zaštite. Treći dio rada obuhvata preporuku za modelovanje razlika u parametrima paralelnih nadzemnih vodova (NV), određivanje pragova reagovanja za dva odabrana algoritma digitalne relejne zaštite i utvrđivanje dužine mrtve zone pomenutih algoritama.

II. IZVOĐENJE IZRAZA ZA MRTVU ZONU POPREČNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE

Matematički izraz za mrtvu zonu poprečne diferencijalne zaštite najjednostavnije je izvesti na primjeru neusmjerene zaštite u jednostrano napajanom sistemu. Uopšteni primjer pomenutog sistema, za slučaj kvara na donjemvodu, prikazan je na Sl.1.



Slika 1. Mrtva zona neusmjerene poprečne diferencijalne zaštite [7]

Pri izvođenju je pretpostavljen slučaj trofaznog kratkog spoja (simetričan kvar), čime je izbjegnuto složeniji proračun u okviru primjene metode simetričnih komponenti (posmatra se jedino sistem fazora direktnog redoslijeda). Dodatno uvedene aproksimacije su zanemarenje svih aktivnih otpornosti u sistemu i posmatranje slučaja praznog hoda na kraju nadzemnog voda (zanemaren uticaj potrošnje). Ekvivalentna reaktansa sistema od mjesta napajanja do lokacije kvara je data izrazom:

$$X_e = X_T + \frac{(X_V + X) \cdot (X_V - X)}{2X_V}, \quad (1)$$

gdje su: X_V - reaktansa nadzemnog voda; X_T - reaktansa transformatora; X - dio reaktanse nadzemnog voda od mjesta kvara do završnih sabirnica.

Nakon uvažavanja svih prethodnih pretpostavki može se napisati sljedeći izraz za struju kvara:

$$\underline{I}_K = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \Rightarrow I_K = \frac{U_f}{X_e}, \quad (2)$$

gdje je U_f fazni napon mreže.

Primjenom pravila strujnog djelitelja može se pronaći zavisnost struje I_2 od struje kvara I_K , a potom i primjenom izraza (2) zavisnost struje I_2 od struje I_1 :

$$I_2 = I_K \frac{X_V + X}{2X_V} = I_1 \frac{X_V + X}{X_V - X}. \quad (3)$$

Diferencijalna struja neusmjerene poprečne diferencijalne zaštite definiše se uopšteno pomoću izraza:

$$\underline{I}_{dif} = \underline{I}_1 - \underline{I}_2. \quad (4)$$

Zavisnost diferencijalne struje I_{dif} od struje I_1 je data izrazom (5):

$$I_{dif} = I_1 \frac{2X}{X_V - X}. \quad (5)$$

Na granici mrtve zone (Sl.1), gdje je $X = m$ važi sljedeća jednakost:

$$I_{dif} = I_{pod} = I_1 \frac{2m}{X_V - m}. \quad (6)$$

Kombinovanjem izraza (6), (3) i (2) dobija se sljedeći izraz:

$$\frac{U_f}{X_e} = \frac{X_V}{m} I_{pod}. \quad (7)$$

Uvrštavanjem izraza (1) u izraz (7) i „sređivanjem“ dobija se sljedeća kvadratna jednačina po mrtvoj zoni poprečne diferencijalne zaštite:

$$m^2 + \frac{U_f}{I_{pod}} m - X_V(2X_T + X_V) = 0. \quad (8)$$

Rješenja prethodne kvadratne jednačine su:

$$m_{1,2} = \frac{-\frac{U_f}{I_{pod}} \pm \sqrt{\left(\frac{U_f}{I_{pod}}\right)^2 + 4X_V(2X_T + X_V)}}{2}. \quad (9)$$

Fizikalno prihvatljivo rješenje podrazumijeva pozitivnu vrijednost mrtve zone, pa se usvaja rješenje sa znakom + u brojiocu:

$$m = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{U_f}{I_{pod}}\right)^2 + 4X_V(2X_T + X_V)} - \frac{U_f}{I_{pod}} \right). \quad (10)$$

Na osnovu prethodnog izraza mogu se izvući sljedeći zaključci:

- mrtva zona poprečne diferencijalne zaštite je duža što su veće reaktanse nadzemnog voda i transformatora (X_V i X_T),

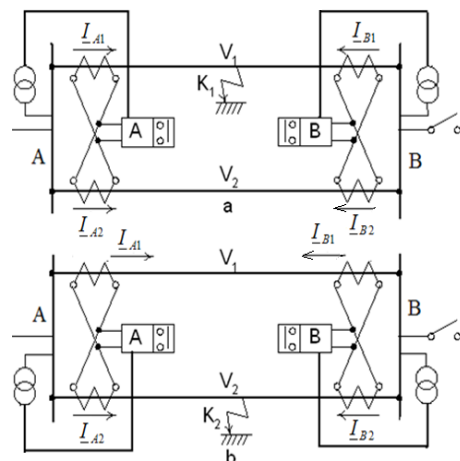
- dodatnim proračunom je moguće pokazati vrijedi sljedeća nejednakost:

$$\frac{dm(I_{pod})}{d(I_{pod})} > 0, \quad (11)$$

koja ukazuje na zaključak da je mrtva zona poprečne diferencijalne zaštite duža što je veća vrijednost podešene struje.

III. UTICAJ MRTVE ZONE NA USMJERENU POPREČNU DIFERENCIJALNU ZAŠTITU

Osnovni koncept usmjerene poprečne diferencijalne zaštite, prikazan na Sl.2, je zasnovan na poređenju faznih stavova struja, pored poređenja efektivnih vrijednosti. Referentna veličina za određivanje smjera struja je napon sabirnica.



Slika 2. Koncept usmjerene poprečne diferencijalne zaštite [7]

Diferencijalne struje se definišu na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \square \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} - \underline{I}_{A2} = I_{A1} e^{j\psi_{A1}} - I_{A2} e^{j\psi_{A2}} = \square I_A e^{j\psi_A}, \\ \square \underline{I}_B &= \underline{I}_{B1} - \underline{I}_{B2} = I_{B1} e^{j\psi_{B1}} - I_{B2} e^{j\psi_{B2}} = \square I_B e^{j\psi_B}, \end{aligned} \quad (12)$$

gdje su: \underline{I}_{A1} i \underline{I}_{A2} fazori struja na početku prvog (gornjeg na šemi) i drugog (donjeg na šemi) nadzemnog voda, redom; \underline{I}_{B1} i \underline{I}_{B2} fazori struja na kraju prvog i drugog nadzemnog voda, redom. Znak diferencijalne struje određuje koji od nadzemnih vodova je u kvaru. Razlikujemo tri slučaja:

(1) režim bez kvara ili kvar van dionice dvostrukog voda:

$$\begin{aligned} I_{A1} \approx I_{A2} \wedge \psi_{A1} \approx \psi_{A2} &\Rightarrow \Delta \underline{I}_A = 0, \\ I_{B1} \approx I_{B2} \wedge \psi_{B1} \approx \psi_{B2} &\Rightarrow \Delta \underline{I}_B = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

(2) kvar na gornjem vodu, važe sljedeći uslovi:

$$\begin{aligned} I_{A1} &> I_{A2}, \psi_{A1} \approx \psi_{A2}, \\ I_{B1} &\approx I_{B2}, \psi_{B1} = \psi_B, \psi_{B2} = \psi_B + 180^\circ. \end{aligned} \quad (14)$$

Pa su diferencijalne struje jednake:

$$\begin{aligned} \Delta I_A &= (I_{A1} - I_{A2}) e^{j\psi_{A1}} = \Delta I_A e^{j\psi_{A1}}, \\ \Delta I_B &= I_{B1} (e^{j\psi_B} - e^{j(\psi_B + 180^\circ)}) = 2I_{B1} e^{j\psi_B}. \end{aligned} \quad (15)$$

(3) kvar na donjem vodu, važe sljedeći uslovi:

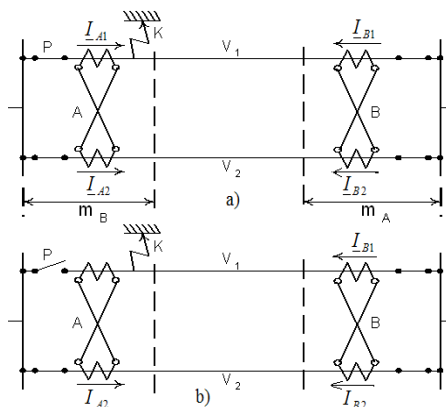
$$\begin{aligned} I_{A1} &< I_{A2}, \psi_{A1} \approx \psi_{A2}, \\ I_{B1} &\approx I_{B2}, \psi_{B1} = \psi_B + 180^\circ, \psi_{B2} = \psi_B. \end{aligned} \quad (16)$$

Pa su diferencijalne struje jednake:

$$\begin{aligned} \Delta I_A &= (I_{A1} - I_{A2}) e^{j\psi_{A1}} = -\Delta I_A e^{j\psi_{A1}}, \\ \Delta I_B &= I_{B1} (e^{j(\psi_B + 180^\circ)} - e^{j\psi_B}) = -2I_{B1} e^{j\psi_B}. \end{aligned} \quad (17)$$

Na osnovu izraza (15) i (17) se može zaključiti da su znakovi diferencijalnih struja suprotni za kvarove na različitim vodovima. Za oba releja (na početku i kraju dionice) neophodno je podesiti pragove reagovanja da bi se izbjeglo neselektivno reagovanje zaštite pri kvarovima izvan štice dionice. Zbog vrijednosti pragova reagovanja koje su veće od nule, za oba releja postoji mrtva zona reagovanja.

Postojanje mrtve zone uzrokuje kaskadno isključenje kvara od strane prekidača, koje je uzrokovano kaskadnim reagovanjem releja. Na Sl.3 je prikazan slučaj kvara u mrtvoj zoni releja na kraju dionice (relej B).



Slika 3. Kaskadni rad usmjerene poprečne diferencijalne zaštite [7]

Nakon nastanka kvara, relej A uspješno detektuje vod u kvaru i daje nalog prekidaču za isključenje. Nakon isključenja gornjeg voda na početku dionice efektivna vrijednost fazora struje I_{B1} se povećava čime se povećava i pozitivna vrijednost diferencijalne struje releja B prema izrazu (14). Kao posljedica prethodnog, relej B izlazi iz mrtve zone i sa zakašnjenjem daje nalog prekidaču da isključi vod u kvaru na kraju dionice, čime se ostvaruje potpuno isključenje. Dakle, releji A i B reaguju kaskadno jedan za drugim. Kaskadno isključenje struje kvara nije poželjno u elektroenergetskom sistemu, jer je na taj način više ugrožena njegova tranzientna stabilnost (režim kvara duže traje).

IV. ODREĐIVANJE PRAGA REAGOVANJA I MRTVE ZONE ODABRANIH ALGORITAMA USMJERENE POPREČNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE

Mrtva zona poprečne diferencijalne zaštite postoji zbog podešene struje, koja predstavlja prag reagovanja releja. Prag reagovanja se mora zadati da bi se obezbjedila selektivnost zaštite. U praksi, trofazni nadzemni paralelni vodovi nisu fizikalno idealno identični, tj. postoje razlike u karakteristikama materijala i geometriji provodnika i razlike u geometrijskom rasporedu provodnika na stubovima. Takođe, prisutne su i dodatne razlike zbog međusobnih odstupanja karakteristika magnećenja strujnih mjernih transformatora. Prethodne razlike uzrokuju različite vrijednosti fazora istofaznih paralelnih struja i u normalnom radnom režimu i u režimu kvara van štice dionice, čime može biti narušena selektivnost zaštite.

Bezobzira o kom algoritmu je riječ, prag reagovanja se određuje na način da se testiraju pokazatelji kvara za slučaj kvarova izvan štice dionice, pri pretpostavljenim maksimalnim fizikalnim razlikama između dva trofazna paralelna nadzemna voda.

U ovom članku se predlaže pojednostavljen način modelovanja fizikalnih razlika nadzemnih vodova. Razlike su modelovane putem različitih vrijednosti svedenih sopstvenih rednih impedansi nadzemnih vodova. Razmatran je netransponovan dvostruki nadzemni vod sa dva zaštitna užeta. Ovakav vod se može modelovati svedenim matricama rednih impedansi i otočnih admitansi (matrice čiji elementi su kompenzovani usljed prisustva nadzemne užadi), koje su reda 6×6 . Dakle, međusobni odnos sopstvenih rednih impedansi se definiše sljedećim izrazom:

$$\underline{Z}_{S1} = R_{S1} + jX_{S1} = k_R \cdot R_{S2} + jk_X \cdot X_{S2}, \quad (18)$$

gdje su: R_{S1} i X_{S1} aktivna i reaktivna impedansa nadzemnog voda 1; R_{S2} i X_{S2} aktivna i reaktivna impedansa nadzemnog voda 2; k_R i k_X koeficijenti razlike aktivne i reaktivne impedanse vodova.

U idealnom teorijskom slučaju vrijedi $k_R = 1$ i $k_X = 1$, što znači da su sopstvene redne impedanse dva voda identične. Posebnim definisanjem koeficijenata razlike za aktivni i reaktivni dio impedanse, mogu se podešavati razlike samo po modulima impedansi $k_R = k_X$ ili i po faznim uglovima $k_R \neq k_X$.

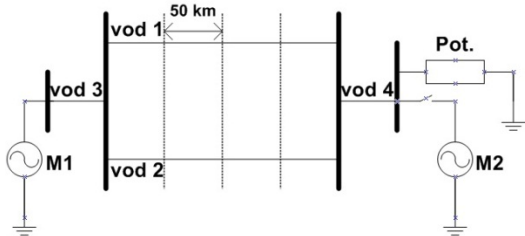
A. Model EES-a

U svrhu utvrđivanja mrtve zone algoritama zaštite modelovan je netransponovan 400 kV dvostruki nadzemni vod (model sa raspodijeljenim parametrima), dužine 200 km, prikazan na Sl.4 (vod 1 i vod 2). Vrijednosti električnih parametara koji određuju dati vod, kada bi on bio idealno transponovan, bi bile jednake: $R_d = 0.014 \Omega/\text{km}$, $R_{OS} = 0.097 \Omega/\text{km}$, $R_{Om} = 0.097 \Omega/\text{km}$, $L_d = 0.8 \text{ mH}/\text{km}$, $L_{OS} = 2.4 \text{ mH}/\text{km}$, $L_{Om} = 1.3 \text{ mH}/\text{km}$, $C_d = 0.014 \mu\text{F}/\text{km}$, $C_{OS} = 0.008 \mu\text{F}/\text{km}$, $C_{Om} = -0.002 \mu\text{F}/\text{km}$ (postoje nulti sopstveni i međusobni parametri).

Dvostruki vod je napajan sa lijeve strane iz realne mreže M1, čiji su parametri $P_{3\text{fsc1}} = 12 \text{ GVA}$ i $X_{M1}/R_{M1} = 10$. Između mreže M1 i dvostrukog voda modelovan je jednostruki vod

(vod 3), dužine 50 km. Sa završnih sabirnica dvostrukog voda nastavlja se jednostruki vod (vod 4), dužine 50 km, koji povezuje potrošnju modelovanu čisto aktivnom otpornošću vrijednosti 150Ω i „opciono“ (u modelu prilagodljivo) mrežu M2 sa parametrima $P_{3fsc2} = 10 \text{ GVA}$ i $X_{M2}/R_{M2} = 8$.

Sve vrste kvarova je moguće modelovati na bilo kojoj udaljenosti na dionici dvostrukog voda ili izvan dionice.

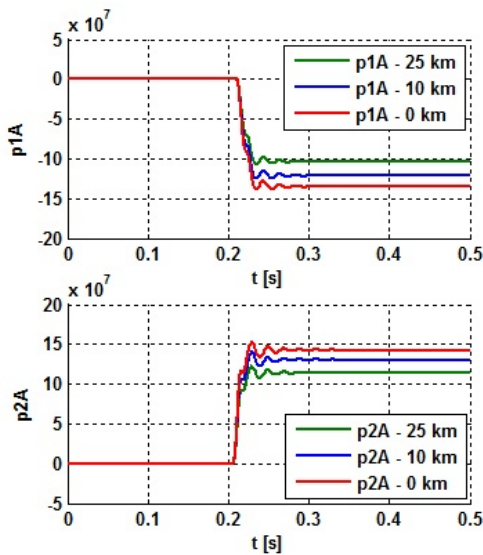


Slika 4. Pojednostavljena jednofazna šema EES-a sa dvostrukim nadzemnim vodom

B. Prag reagovanja algoritma usmjerene poprečne diferencijalne zaštite u radijalnom EES-u

U slučaju radijalnog EES-a sa dvostrukim nadzemnim vodom određivane su vrijednosti praga reagovanja algoritma za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu, baziranog na priraštajima strujnih signala, predloženog u [3,4] (algoritam A1).

Analizirane su sve vrste kvarova na različitim udaljenostima od završnih sabirnica uz pretpostavljenu vrijednost koeficijenata $k_R = k_Y = 1.02$. Kvarovi su inicirani iza dionice dvostrukog voda. Na Sl.5 su prikazani rezultati testiranja pokazatelja algoritma za jednofazni kratak spoj u fazi A.



Slika 5. Pokazatelji algoritma A1, na početku i kraju dionice, za jednofazni kratak spoj u fazi A na različitim udaljenostima od završnih sabirnica

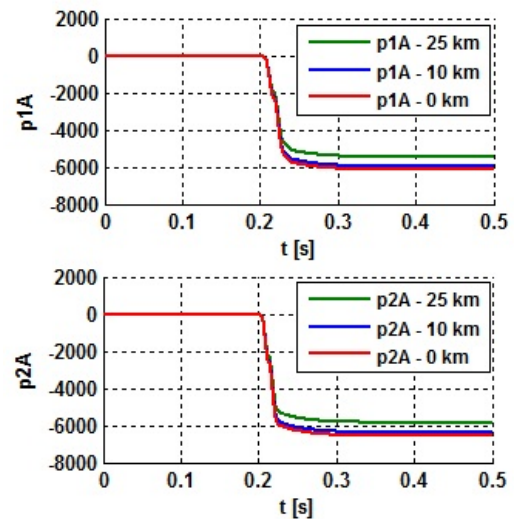
Sa grafika na Sl.5 moguće je zaključiti da minimalno potrebna vrijednost praga reagovanja mora biti veća od $15 \cdot 10^7 \text{ A}^2$. Primjetno je da najkritičniji slučaj predstavlja kvar na

samim završnim sabirnicama (crvena boja pokazatelja na grafiku). Pri testiranju svih ostalih vrsta kvarova na završnim sabirnicama potvrđeno je da minimalna potrebna vrijednost pokazatelja mora biti $15 \cdot 10^7 \text{ A}^2$. Da bi se u praktičnim uslovima uvažio efekat nesavršene usklađenosti karakteristika strujnih mjernih transformatora dva voda, što utiče na povećanje diferencijalne struje, konačno usvojena vrijednost praga reagovanja je $p_{A1} = 20 \cdot 10^7 \text{ A}^2$ (33.33% veća).

C. Prag reagovanja algoritma usmjerene poprečne diferencijalne zaštite u dvostrano napajanom EES-u

U slučaju dvostrano napajanog EES-a sa dvostrukim nadzemnim vodom određivane su vrijednosti praga reagovanja algoritma za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu, baziranog na priraštajima strujnih signala, koji je predložen u [6] (algoritam A2).

Procedura testiranja za ovaj algoritam je potpuno analogna kao za algoritam u radijalnom EES-u. Na Sl.6 su prikazani rezultati testiranja pokazatelja algoritma za jednofazni kratak spoj u fazi A.



Slika 6. Pokazatelji algoritma A2, na početku i kraju dionice, za jednofazni kratak spoj u fazi A na različitim udaljenostima od završnih sabirnica

Sa grafika na Sl.6 moguće je zaključiti da minimalno potrebna vrijednost praga reagovanja algoritma A2 mora biti veća ili jednaka 7 kA. Odabrana vrijednost je $p_{A2} = 9 \text{ kA}$ (za oko 30% veća) zbog uvažavanja razlika strujnih mjernih transformatora. Kroz sve ostale testove je utvrđeno da odabrana vrijednost obezbjeđuje selektivnost zaštite u slučaju kvarova izvan štice dionice.

D. Određivanje dužine mrtve zone algoritama

Testiranjem zaštite za slučajeve različitih kvarova unutar štice zone, veoma bliskih početnim i završnim sabirnicama, aproksimativno su utvrđene odgovarajuće dužine mrtve zone posmatranih algoritama. Rezultati testiranja su prikazani u Tab.I.

TABELA I. DUŽINE MRTVE ZONE ALGORITAMA USMJERENE POPREČNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE

	Radijalan EES		Dvostrano napajan EES	
	R1	R2	R1	R2
A1	6 km	4 km	/	/
A2	/	/	2 km	1.5 km

Na osnovu rezultata iz prethodne tabele, može se vidjeti da je ukupna dužina mrtve zone algoritma A1 jednaka 10 km ili 5% od ukupne dužine dvostrukog nadzemnog voda, što predstavlja dobar rezultat uzimajući u obzir činjenicu da realizacija usmjerene diferencijalne zaštite predstavlja teži slučaj u radijalnom EES-u. Ukupna dužina mrtve zone algoritma A2 je svega 3.5 km ili 1.75% od ukupne dužine dvostrukog voda, što predstavlja odličan rezultat za zaštitu u dvostrano napajanom EES-u.

ZAKLJUČAK

Pravilno podešavanje relejnih zaštita predstavlja jedan od najvažnijih, ali i najtežih zadataka u EES-u. Sastavni dio procedure podešavanja je utvrđivanje vrijednosti pragova reagovanja. Pragovi reagovanja modernih algoritama za digitalne relejne zaštite najčešće se određuju detaljnim simulacijama kratkih spojeva u odgovarajućem dijelu EES-a. U ovom članku dat je jednostavan prijedlog za određivanje pragova reagovanja i određivanje dužine mrtve zone usmjerene poprečne diferencijalne zaštite za proizvoljan algoritam. Detaljno su opisane i teorijske osnove postojanja mrtve zone zaštite, što je od velikog edukacionog značaja za inženjere relejne zaštite.

LITERATURA

- [1] A. Apostolov, D. Tholomier, et al., "Protection of double circuit transmission lines," in *2007 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2007, pp. 85–101.

- [2] Z. Q. Bo, X. Z. Dong, et al., "Adaptive Noncommunication Protection of Double-Circuit Line Systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 1, pp. 43–49, 2003.
- [3] 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.
- [4] M. Forcan, Z. Stojanović, "Osjetljiva usmjerena poprečna diferencijalna zaštita vodova bez naponskih ulaza", 32. *Savetovanje za velike električne mreže CIGRE*, maj 2015, Zlatibor.
- [5] M. I. Gilany, O. P. Malik, and G. S. Hope, "A Digital Protection Technique for Parallel Transmission Lines Using a Single Relay at Each End," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 1, pp. 118–125, 1992.
- [6] M. M. Eissa and O. P. Malik, "A new digital directional transverse differential current protection technique," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 3, pp. 1285–1291, 1996.
- [7] M. Đurić, Z. Stojanović, "Relejna zaštita", KIZ Centar, Beograd, 2014.

ABSTRACT

Double circuit overhead lines are usually protected by transverse differential protection in the field, which benefits fast and selective trip of faulted overhead line. The most important drawback of transverse differential protection is the existence of dead tripping zone for faults close to common busbars of overhead lines. Dead tripping zone for unidirectional, conventional directional and directional protection based on current increments has been analysed in this article. Simulation results of digital relay algorithms' performances are given for the cases of faults near to dead tripping zone. Selection of thresholds procedure is recommended depending on overhead lines characteristics and corresponding dead tripping zone.

Key words - dead tripping zone; transverse differential protection; double circuit overhead line; threshold

DEAD TRIPPING ZONE OF TRANSVERSE DIFFERENTIAL PROTECTION OF DOUBLE CIRCUIT OVERHEAD LINES
M. FORCAN, Z. STOJANOVIĆ