

## **ZAŠTITA OD PREKIDA PROVODNIKA U 10 KV DISTRIBUTIVNOJ MREŽI**

D. PREDIĆ, PD Jugoistok-Niš, Srbija  
S. VASILJEVIĆ, PD Jugoistok-Niš, Srbija  
I. GRBIĆ, PD Jugoistok-Niš, Srbija  
Lj. MLADENOVIĆ, PD Jugoistok-Niš, Srbija

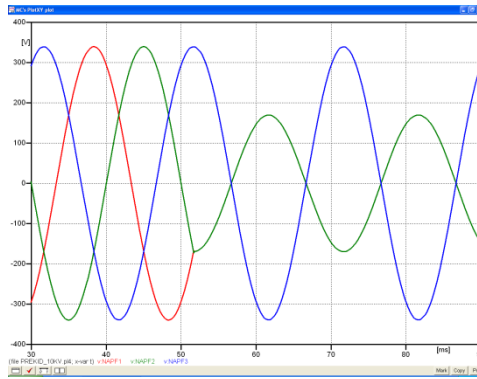
### **UVOD**

Prekid faznog provodnika u prenosnom ili distributivnom sistemu je vrsta kvara koji se ređe dešava u odnosu na druge kvarove kao što su zemljospojevi, kratki spojevi i sl. Radna stanja koja tom prilikom nastaju ne izazivaju naprezanja i oštećenja opreme kao neke druge vrste kvarova, ali dovode sistem u neželjeni režim koji je potrebno prepoznati i otkloniti. Zbog atmosferskih uticaja prekid provodnika je karakterističan za vazdušne vodove, ali je svakako poznat i kod kablovskih vodova. U radu je detaljnije analiziran prekid provodnika i mogućnost detekcije prekida provodnika u izolovanoj distributivnoj mreži. Zbog učestanosti pojave, ali i problema detekcije klasičnim elektromehaničkim relejima, važeće Tehničke preporuke ne razmatraju prekid provodnika u distributivnoj mreži. Pod određenim okolnostima, a posebno u urbanim sredinama, prekid provodnika može predstavljati opasnost za okolinu tako da je poželjno takav režim otkloniti, odnosno vod koji je u kvaru isključiti. Budući da je prekid jednog faznog provodnika nesimetričan kvar, analizom simetričnih komponenti struje i napona zaključuje se da tada dolazi do porasta inverzne komponente struje, tako da se ta informacija može iskoristiti za detekciju ove vrste kvara. U odnosu na prethodne generacije releja, mikroprocesorski zaštitni uređaji omogućavaju kvalitetnije određivanje simetričnih komponenti struje i napona, tako da se njima ovakvi kvarovi mogu efikasnije detektovati.

### **PREKID PROVODNIKA BEZ POJAVE ZEMLJOSPOJA**

Prilikom prekida provodnika najčešće se dešava da jedan ili oba kraja iskidanog provodnika dodiruju zemlju ili deo stuba koji je povezan sa uzemljivačem. Pri tome pored strujnog debalansa dolazi i do promene faznih napona što se može iskoristiti za detekciju kvara. Pri dodiru samo jednog kraja provodnika sa zemljom mogu se razlikovati slučajevi kada je u zemljospoju kraj sa strane izvora (napojne trafo stanice) odnosno slučaj kada je u zemljospoju kraj provodnika sa strane potrošača. Međutim, u izvesnim slučajevima može se dogoditi da nijedan od dva kraja ne dodiruje zemlju ili da provodnik padne na kamenito tlo velike specifične otpornosti, na tlo prekriveno snegom, suvim lišćem i sl., i u takvoj situaciji nema promene faznih napona niti pojave nultog napona što je otežavajuća okolnost za detektovanje kvara. U radu se razmatra upravo ovakav slučaj, i budući da tada postoje samo promene u struji, razmotrena je mogućnost da se kvar prepozna samo na osnovu promena struje. Jasno je da je pri tome neophodno da kroz vod teče struja određene jačine.

Razmatra se 10 kV vod koji napaja transformator 10/0.4kV sprege Dyn5. Pri prekidu jedne faze na napojnom sredjenaponskom vodu, naponske prilike na strani potrošača su takve da je u jednoj fazi napon nepromenjen, a u druge dve je napon jednak polovini napona koji se imao pre kvara sl. 1, dok strujne prilike zavise od vrste potrošača.



Sl. 1. Fazni naponi na potrošaču iza mesta kvara

Radi jednostavnije analize usvojiće se da je potrošač čista termogena otpornost tako da je struja direktno srazmerna naponu. Tada će, na strani potrošača, struja u jednoj fazi ostati nepromenjena a u druge dve faze će biti jednaka polovini vrednosti struje koja se imala pre kvara. Za simetričan trofazni potrošač, snaga potrošača pre kvara je:

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_f, \text{ gde su } U_f \text{ i } I_f \text{ fazni napon i struja na strani potrošača pre kvara.}$$

Nakon prekida provodnika snaga potrošača je jednaka:

$$P_k = U_f \cdot I_f + \frac{1}{2} U_f \cdot \frac{1}{2} I_f + \frac{1}{2} U_f \cdot \frac{1}{2} I_f = \frac{3}{2} U_f I_f, \text{ odnosno } P_k = P/2.$$

Zanemarivanjem gubitaka u sredjenaponskom vodu i transformatoru, ima se da je kao i kod potrošača, snaga koja se predaje mreži nakon kvara jednaka polovini snage pre kvara. Uz uslov da je nakon prekida jednog faznog provodnika na srednjem naponu struja u toj fazi jednaka nuli, kao i da je struja kroz druga dva fazna provodnika u fazi odnosno kontra fazi sa linijskim naponom između "zdravih" faza, dobija se da je snaga koja se predaje mreži nakon kvara jednaka:

$$P_k = U_l \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot I_k = \frac{1}{2} \cdot P = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot U_f \cdot I_f,$$

pri čemu je sa  $U_l$  označen linijski napon, a sa  $I_k$  struja kroz "zdrave" faze nakon kvara.

Odavde se dobija da je struja  $I_k = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_f = 0.866 \cdot I_f$ .

Ova vrednost struje kvara važi uz uslov da je potrošač takve prirode da je struja direktno srazmerna naponu. Međutim za drugačiju vrstu potrošača dobio bi se drugačiji rezultat. Ako se razmatra model potrošača konstantne snage, tada smanjenje napona dovodi do porasta struje. Analogno prethodnoj analizi se dobija da je  $I_k = \sqrt{3} \cdot I_f = 1.732 \cdot I_f$ . U tom slučaju može doći do značajnog preopterećenja pojedinih faza voda, ali i energetskog transformatora, pa je potrebno ovakav kvar prepoznati i isključiti.

Može se zaključiti da pri prekidu jednog faznog provodnika u sredjenaponskoj distributivnoj mreži promena faznih struja ne predstavlja dovoljnu informaciju za detekciju kvara. Kako je pri prekidu provodnika sistem nesimetričan, to tada dolazi do pojave inverzne komponente struje. U nastavku je razmotrena mogućnost detekcije kvara na osnovu simetričnih komponenti.

## SIMETRIČNE KOMPONENTE

Jedna od klasičnih metoda za analizu nesimetričnih režima u trofaznim kolima je metoda simetričnih komponenti. Ona se bazira na činjenici da je nesimetričan trofazni sistem fazora moguće razložiti na dva trofazna simetrična sistema fazora sa suprotnim faznim redosledima (direktnim i inverznim) i jedan monofazni sistem fazora. U trofaznom sistemu fazne struje ( $I_a$ ,  $I_b$  i  $I_c$ ) se pomoću simetričnih komponenti mogu prikazati na sledeći način:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_0$$

$$\begin{aligned} I_b &= a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_0 \\ I_c &= a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i + I_0 \end{aligned}$$

pri čemu je  $a = e^{j2\pi/3} = -0.5 + j \cdot \sqrt{3}/2$ , dok su  $I_d$ ,  $I_i$  i  $I_0$  oznake za direktnu, inverznu i nultu komponentu struje, redom. Simetrične komponente struje se pomoću faznih struja mogu predstaviti na sledeći način:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{1}{3} \cdot (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c) \\ I_i &= \frac{1}{3} \cdot (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c) \\ I_0 &= \frac{1}{3} \cdot (I_a + I_b + I_c) \end{aligned}$$

Naglašava se da su sve struje predstavljene kao fazori odnosno vektorske veličine.

Mikroprocesorski zaštitni uređaji za zaštitu energetskih vodova uglavnom imaju mogućnost podešavanja apsolutne vrednosti inverzne komponente struje, a neki i mogućnost podešavanja odnosa inverzne i direktne komponente struje. Kod zaštite vodova, gde se struja menja u širokom opsegu, praćenje samo inverzne komponente bez saznanja o ukupnoj faznoj struji nema mnogo smisla. Sa više stepeni podešenja inverzne i ukupne struje, uz definisanje uslova reagovanja, može se u izvesnoj meri simulirati karakteristika koja prati odnos  $I_i/I$ . Iz tog razloga će se nadalje razmatrati mogućnost detektovanja prekida provodnika i osetljivost reagovanja korišćenjem karakteristika  $I_i/I_d$  i  $I_i/I$ . Budući da se razmatrane metode zasnivaju na analizi struja, pretpostavlja se da su vrednosti faznih struja dovoljno velike da se na osnovu njih mogu dovoljno tačno odrediti vrednosti direktne i inverzne komponente.

U potpuno simetričnom trofaznom sistemu postoji samo direktna komponenta, a inverzna komponenta je jednaka nuli. Tada je  $I_i/I_d = 0$  i  $I_i/I = 0$ .

Pri prekidu jedne faze, na primer faze „a“, važi da je:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \quad i \\ I_b + I_c &= 0 \text{ odnosno } I_b = -I_c. \end{aligned}$$

Dobija se da je  $I_0 = 0$  i da je  $I_d = -I_i$ , tj.  $I_d = I_i = \text{mod}(I_d) = \text{mod}(I_i)$ , odnosno

$$I_i/I_d = 1 \quad (1)$$

Dalje se dobija da je:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{1}{3} \cdot I_b \cdot (a - a^2) \\ I_i &= \frac{1}{3} \cdot I_b \cdot (a^2 - a) \end{aligned}$$

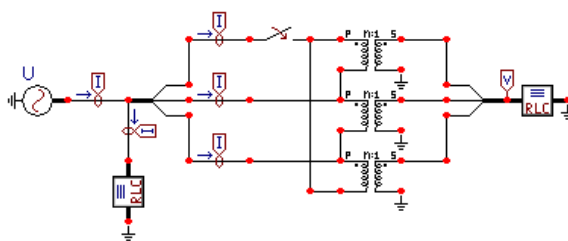
odnosno da je:

$$I_i/I_b = I_i/I_c = 1/\sqrt{3} = 0.5776 \quad (2)$$

U realnoj distributivnoj mreži, iako se teži da sistem bude što više simetričan, izvesna nesimetrija uvek postoji. Ovu nesimetriju je potrebno uzeti u obzir kako ne bi došlo do pogrešnog delovanja zaštitnih uređaja i isključenja izvoda bez kvara. Na osnovu iskustva nekih autora [1], inverzna komponenta u normalnom pogonu može imati vrednost i do 20% u odnosu na direktnu komponentu struje, odnosno prag reagovanja - podešenje  $I_i/I_d$  ne sme biti manje od 0.2. Poznavanjem konzuma kao i na osnovu praćenja vrednosti inverzne komponente struje, u konkretnim mrežama se mogu usvojiti i niža podešenja i time povećati osetljivost.

Relacije (1) i (2) važe u slučajevima kada je sva potrošnja skoncentrisana iza mesta kvara, odnosno prekida provodnika, i na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da u takvim slučajevima oba pomenuta načina mogu efikasno detektovati kvar. Međutim, kako se na svakom distributivnom izvodu najčešće nalazi nekoliko TS 10/0.4 kV realno je očekivati mogućnost da se kvar ne dogodi na početku voda, već na nekoj od deonica između dve TS 10/0.4 kV. U tom slučaju, u svakoj fazi struja na početku voda se sastoji od komponente koje teče kroz potrošače koji su ispred mesta kvara, i od komponente koja teče kroz potrošače koji su iza mesta kvara.

Jasno je da što je kvar dalje od izvora, odnosno što je potrošnja ispred kvara veća, to je udeo inverzne komponente manji pa je time i osetljivost detekcije kvara manja. Radi detaljnije analize u programu EMTP/ATP je napravljen model distributivne mreže prikazan na sl. 2.



Sl. 2 - Model distributivne mreže

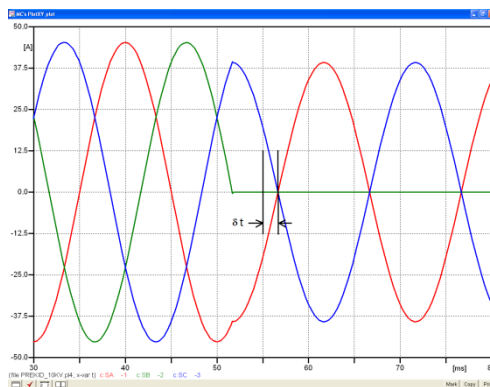
U prikazanom modelu izvor napona je simetričan, faznog napona  $U_f = 6$  kV. Snaga potrošača koji se nalaze iza mesta kvara je 576 kW. Potrošnja koja se nalazi ispred mesta kvara je menjana u opsegu od 0 do 4000 kW. Odnos inverzne i direktne komponente kao i odnos inverzne i ukupne struje za različite vrednosti potrošača ispred mesta kvara prikazan je u tabeli 1. U tabeli je sa  $P_1$  označena snaga potrošača koji se nalaze ispred mesta kvara, a sa  $P_2$  snaga potrošača koji se nalaze iza mesta kvara ( $P_2 = 576$  kW)

Tabela 1.

$P_1$	$P_1/P_2$	$I_i/I_d$	$I_i/I$	$I_b (= I_c)$ [A]	$I_a$ [A]	$I_d$ [A]	$I_i$ [A]
0	0	1	0.58	27.7	0	16	16
100	0.17	0.74	0.49	32.6	5.6	21.6	16
200	0.35	0.59	0.42	37.7	11.1	27.1	16
300	0.52	0.49	0.37	43	16.7	32.7	16
400	0.69	0.42	0.33	48.3	22.2	38.2	16
500	0.87	0.37	0.3	53.6	27.8	43.8	16
600	1.04	0.32	0.27	59	33.3	49.3	16
700	1.215	0.29	0.25	64.4	38.9	54.9	16
800	1.39	0.265	0.23	69.8	44.4	60.4	16
900	1.56	0.24	0.21	75.3	50	66	16
1000	1.7	0.22	0.2	80.8	55.6	71.6	16
1100	1.91	0.21	0.19	86.2	61.1	77.1	16
1200	2.08	0.19	0.17	91.7	66.7	82.7	16
1300	2.26	0.18	0.165	97.2	72.2	88.2	16
1400	2.43	0.17	0.156	102.7	77.8	93.8	16
1500	2.6	0.16	0.15	108.2	83.3	99.3	16
1600	2.77	0.15	0.14	113.7	88.9	104.9	16
1800	3.12	0.14	0.13	124.8	100	116	16
2000	3.47	0.126	0.12	135.8	111.1	127.1	16
2500	4.34	0.1	0.1	163.5	138.9	154.9	16
3000	5.21	0.09	0.08	191.2	166.7	182.7	16
4000	6.94	0.067	0.065	246.6	222.2	238.2	16

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da za određene vrednosti potrošača koji se nalaze ispred mesta kvara, postoji određena oblast na vodu na kojoj kvar ne može da se detektuje. Ako se kao prag reagovanja za odnos inverzne i direktne komponente  $I_i/I_d$  usvoji vrednost 0.2, na osnovu prikazanih rezultata se zaključuje da mrtva zona počinje od mesta na kome je opterećenje dva puta veće od opterećenja koje se nalazi iza tog mesta. Drugim rečima, za slučaj kada je opterećenje linearno raspoređeno duž voda, prekid provodnika na zadnjoj trećini voda se neće detektovati. Iako je analiza obavljena za konstantnu snagu potrošača iza mesta kvara ( $P_2$ ), lako se zaključuje da će za manju snagu  $P_2$  apsolutna vrednost inverzne komponente biti manja.

Iz talasnih oblika dobijenih programom EMTP/ATP može se zapaziti da pri nastanku kvara dolazi do vremenskog pomeraja struja kvara u zdravim fazama, i ova pojava je donekle razmotrena u [1], sl. 3.



Sl. 3. Struje pri prekidu provodnika u srednjenaponskoj mreži

Takođe je potrebno naglasiti da pri korišćenju inverzne komponente struje za detekciju kvara, treba uzeti u obzir mogućnosti pojave inverzne komponente struje i tokom nekih prelaznih pojava u mreži, pa iz tog razloga podešeno vreme isključenja ne sme biti manje od 50 ms. Na osnovu dosadašnjeg iskustva i analiza autori ne mogu preporučiti konkretnu vrednost za vreme nakon kog bi trebalo da se kvar isključi. Radi daljih saznanja o osetljivosti i mogućnosti primene ovakvog vida zaštite, na 10 kV izvodima u TS 35/10 kV na području ogranka Elektrotimok Zaječar (u TS u kojima zaštitni uređaji to omogućavaju) je aktivirana zaštita od prekida provodnika s tim što se ne isključuje izvod već se samo signalizira pojava kvara. Zbog prirode kvara kod prekida provodnika svakako da automatsko ponovno uključenje (APU) ne treba da bude aktivno. Kod prekida provodnika kod kojih dolazi do zemljospoja da ne bi došlo do eventualnog ponovnog uključjenja (ciklus APU-a) potrebno je da vreme delovanja zaštite od prekida provodnika bude manje od vremena delovanja zemljospojne zaštite, ili da tada delovanje zaštite od prekida provodnika blokira automatsko ponovno uključjenje.

## ZAKLJUČAK

Prekid provodnika u srednjenaponskoj distributivnoj mreži dovodi sistem u nesimetričan režim koji je potrebno prepoznati i isključiti. U slučajevima kada je prelazni otpor između provodnika koji je u prekidu i zemlje jako veliki ili uopšte i nema kontakta sa zemljom, naponske prilike ostaju praktično nepromenjene tako da je tada kvar potrebno prepoznati na osnovu promena struja. Problem se javlja ako vod nije dovoljno opterećen, odnosno ako vrednosti faznih struja nisu dovoljno velike. Informacija o promeni ukupne struje kroz fazne provodnike najčešće nije dovoljna da se prepozna ovakav kvar. Kako tada dolazi do povećanja inverzne komponente struje, to se poređenje inverzne i direktne komponente ili inverzne komponente i ukupne fazne struje, može iskoristiti za detekciju kvara. Poređenje inverzne i direktne komponente struje (odnos  $I_i/I_d$ ) je osetljiviji metod u odnosu na metod poređenja inverzne komponente i ukupne fazne struje (odnos  $I_i/I$ ). Kod vodova kod kojih je sva potrošnja skoncentrisana na kraju voda oba pomenuta načina se mogu efikasno primeniti. Međutim problem je složeniji u situaciji kada su potrošači raspoređeni duž voda. Tada se, u zavisnosti od mesta kvara i veličine potrošača javlja mrtva zona, odnosno dužina voda na kojoj se kvar ne može da detektuje. Ovaj problem se odnosi na obe metode, s tim da je problem izraženiji (mrtva zona veća) kod metode poređenja inverzne i ukupne fazne struje. Metode zaštite od prekida provodnika zasnovane na inverznoj komponenti struje imaju izvesnih nedostataka pa je svakako poželjno dalji rad usmeriti ka razvijanju novih metoda za detekciju ovakvih kvarova. Jedna od metoda bi mogla da se bazira na analizi vremenskog pomeraja struja u "zdravim" fazama.

## LITERATURA

[1] A NOVEL DETECTION SYSTEM FOR BROKEN DISTRIBUTION CONDUCTOR ON RADIAL SCHEME, Rungseevijitprapa W, Pongthavornsawad A, 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 6-9 June 2011, Paper 0644