

PRORAČUN MAGNETNE INDUKCIJE U BLIZINI SREDNjenAPONSKIH NADZEMNIH VODOVA ZA POTREBE DETEKCIJE STRUJE KVARA

Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci

Sadržaj – U radu su istražene mogućnosti detekcije kratkih spojeva mjerjenjem efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije u blizini srednjenaponskih distributivnih nadzemnih vodova. Predložen je potpun matematički model srednjenaponskog nadzemnog voda sa proizvoljnom geometrijom stubova, pogodan za proračun struja kratkih spojeva pojedinih faza i odgovarajućeg magnetnog polja. Na osnovu predloženog modela izvršen je proračun efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije duž ose stuba za različite kvarove na konkretnom distributivnom nadzemnom vodu nazivnog napona 20 kV na području opštine Banja Luka.

1. UVOD

Kvarovi u radikalnim distributivnim mrežama obično se isključuju prekidačima koji su ugrađeni u napojne transformatorske stanice, jer u takvim mrežama, sa izuzetkom reklozera, rijetko postoje drugi uređaji za prekidanje struje kvara [1]. Ukoliko kvar nije prolaznog karaktera i ne može se otkloniti primjenom tehnike automatskog ponovnog uključenja (APU) ili u slučaju da mreža nije automatizovana, dolazi do prekida napajanja električnom energijom krajnjih potrošača. Trajanje prekida utiče na pokazatelje pouzdanosti sistema kao što su SAIDI (eng. *System Average Interruption Duration Index*) ili CAIDI (eng. *Customer Average Interruption Duration Index*) i u velikoj mjeri zavisi od vremena koje je potrebno da se kvar lokalizuje. Stoga se u savremene distributivne mreže ugrađuju tzv. *lokatori* ili *indikatori kvara* (eng. FPI – *Fault Passage Indicators*), čiji je zadatak da detektuju prolazak struje kvara kroz dionicu voda na kojoj su postavljeni [2]. Postavljanjem ovih uređaja na pogodne lokacije u radikalnoj distributivnoj mreži moguće je znatno ubrzati proces nalaženja mjesta kvara, koje se u tom slučaju nalazi između poslednjeg indikatora koji je detektovao prolazak struje kvara i prvog narednog koji nije detektovao prolazak struje kvara.

Struja kvara u srednjenaponskim distributivnim mrežama, u zavisnosti od tipa uzemljenja, može dostići vrijednosti i do 20 kA, tako da je direktno mjerjenje ove struje nepraktično [1]. Iz navedenog razloga svi indikatori kvara indirektno mjeru struju kvara posredstvom njenog magnetnog polja. Konvencionalni načini mjerjenja podrazumijevaju upotrebu strujnih mjernih transformatora (SMT), u vidu obuhvatnih SMT-a za detekciju zemljospaja i/ili u vidu više SMT-a od kojih svaki obuhvata jedan fazni provodnik za detekciju međufaznih kvarova. Dok je postavljanje SMT-a pogodno za kabloske vodove, ono je izuzetno nepraktično za nadzemne vodove. Zbog toga se za detekciju kvara na srednjenaponskim distributivnim nadzemnim vodovima koriste indikatori koji mjeru pokazatelje magnetnog polja u blizini faznih provodnika.

U praksi se sreću dvije varijante ovakvih indikatora: *indikatori koji se postavljaju na same fazne provodnike* i *indikatori koji se postavljaju na stub dalekovoda na udaljenosti do 3 m ispod faznih provodnika* [1]. U obje varijante lokalna indikacija prolaska struje kvara je u vidu svjetlosne signalizacije na samom indikatoru. Daljinska indikacija kvara podrazumijeva povezanost indikatora sa jedinicom udaljenih terminala (eng. RTU – *Remote Terminal Unit*) i sistemom za daljinsku komunikaciju koji su postavljeni na isti ili susjedni stub ili čak u isto kućište sa indikatorom [1].

Efektivna vrijednost vektora magnetne indukcije na mjestu postavljanja indikatora kvara će, zbog nesimetričnog rasporeda pojedinih faznih provodnika u odnosu na sam indikator, biti različita od nule čak i u slučaju normalnog, uravnoteženog režima rada. To pokazuju mnogobrojna istraživanja koja se uglavnom odnose na mjerjenje i ispitivanje uticaja električnog i magnetnog polja u blizini nadzemnih vodova na zdravlje ljudi [3], [4]. IEEE (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) daje upute za mjerjenje električnog i magnetnog polja u blizini nadzemnih vodova [5] dok ICNRP (eng. *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection*) propisuje graničnu vrijednost od 100 µT na visini 1 m iznad zemlje, ispod dalekovoda u slučaju normalnog, uravnoteženog režima rada [6]. Sprovedena istraživanja, standardi i upute ukazuju na činjenicu da je vrijednost magnetne indukcije u blizini normalno opterećenog i uravnoteženog dalekovoda reda desetina mikrotesli i da izuzetno brzo opada sa porastom rastojanja. Međutim, malobrojna istraživanja se odnose na proračun magnetnog polja u blizini nadzemnih vodova za slučaj različitih tipova kratkih spojeva [7]. Opravdano se postavlja pitanje mogućnosti detekcije razlika u vrijednosti magnetne indukcije za slučaj normalnog pogona i za slučaj kvara, a sa ciljem otkrivanja struje kvara pomoću senzora magnetnog polja postavljenog u blizini nadzemnog voda.

U ovom radu ispitana je mogućnost detekcije struje kvara mjerjenjem efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije pomoću indikatora koji bi bio postavljen na stub ispod faznih provodnika srednjenaponskog nadzemnog voda. U poglavljju 2 predložen je potpun matematički model srednjenaponskog nadzemnog voda sa proizvoljnom geometrijom stubova, pogodan za proračun struja kratkih spojeva pojedinih faza i odgovarajućeg magnetnog polja. U poglavljju 3 dati su rezultati proračuna efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije duž ose stuba za različite kvarove na konkretnom distributivnom nadzemnom vodu nazivnog napona 20 kV na području opštine Banja Luka. U poglavljju 4 su navedeni zaključci i date su napomene koje se odnose na visinu postavljanja indikatora na stub, kao i na eventualne algoritme za detekciju kvara.

2. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model obuhvata izraze za proračun parametara nadzemnog voda, zatim faznih struja za različite tipove kratkih spojeva i, konačno, efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije koji potiče od tih struja. U ovom modelu biće zanemareni otočni parametri nadzemnog voda, s obzirom na to da oni ne utiču bitno na proračun struja kratkih spojeva. Uticaj ugiba faznih provodnika na vrijednosti podužnih parametara nadzemnog voda, kao i na efektivnu vrijednost magnetne indukcije u njegovoj neposrednoj blizini, će, takođe, biti zanemaren. Korekcija vrijednosti podužnih parametara nadzemnog voda se može izvršiti tako što se umjesto visine y_i vješanja i -tog provodnika na stub usvoji njegova srednja visina vješanja, data sljedećim izrazom [8]:

$$y_i^{sr} = y_i - \frac{2}{3} \cdot s, \quad (1)$$

u kome je sa s označen ugib provodnika. Alternativno, moguće je uzeti u obzir da se visina provodnika iznad zemlje, duž jednog raspona, mijenja po jednačini lančanice [8], [9]. Kako se visine stubova za srednjenačinske nadzemne vodove kreću od 10 m do 15 m, dok su rasponi relativno kratki i iznose oko 100 m, dobijaju se ugibi od svega par metara i njihov uticaj na vrijednosti podužnih parametara nadzemnog voda se može zanemariti [8]. U [9] je pokazano da ugib provodnika ima uticaj na magnetno polje samo u neposrednoj blizini faznih provodnika, dok se njegov uticaj na većim udaljenostima može zanemariti. Zato ćemo u svim proračunima smatrati da su fazni provodnici nadzemnog voda pravolinijski provodnici beskonačne dužine, postavljeni paralelno sa površinom zemlje. Sa udaljavanjem od faznih provodnika nadzemnog voda, sve veći uticaj na vrijednost magnetnog polja imaju indukovane struje u zemlji, kao geološkom provodniku, što je u proračunu uzeto u obzir uvođenjem fiktivnih povratnih provodnika, koji su postavljeni na određenim „kompleksnim“ dubinama ispod površine zemlje, prema teoriji Carson-a [10].

2.1. Model nadzemnog voda

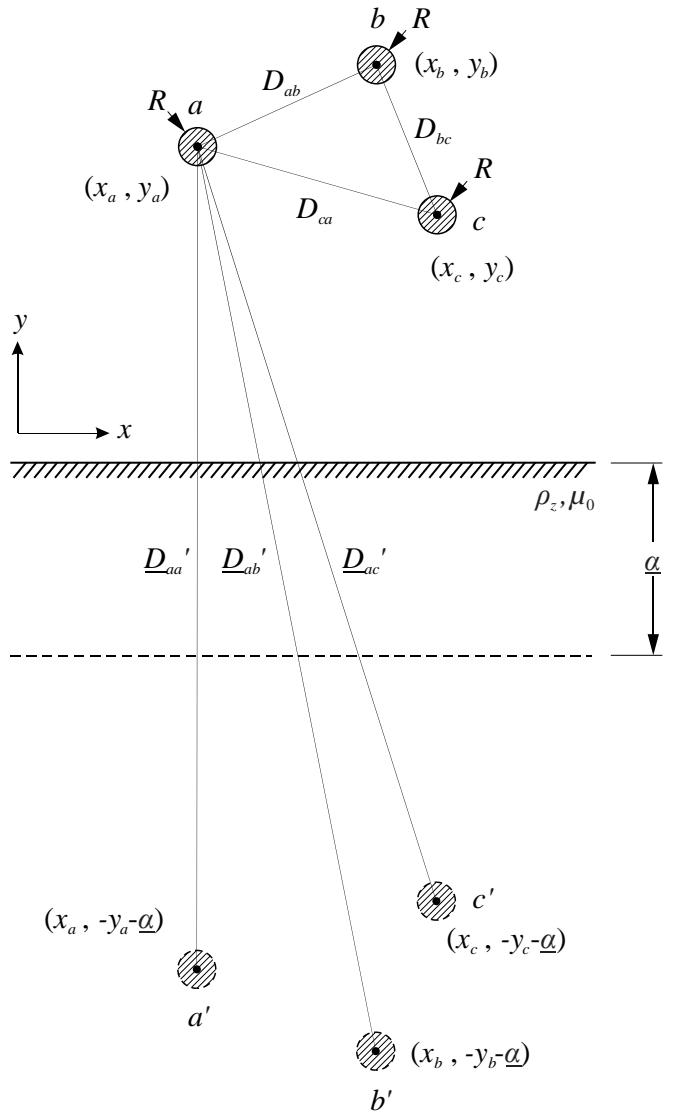
Model nadzemnog voda podrazumijeva izraze za proračun podužnih parametara nadzemnog voda za datu geometriju stuba, te formiranje matrice podužnih kompleksnih impedansi. Na Sl. 1 prikazan je raspored faznih provodnika i njihovih fiktivnih likova iznad i ispod površine zemlje, respektivno.

Međusobno rastojanje između provodnika i -te i j -te faze je, prema Sl. 1, dato sljedećim izrazom:

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (2)$$

gdje je $i, j = a, b, c$.

Fazni provodnici srednjenačinskih nadzemnih vodova su obično tako raspoređeni da međusobna rastojanja data izrazom (2) nisu jednaka za svaka dva fazna provodnika. Osim toga, za ovakve vodove se ne vrši transpozicija faznih provodnika, tako da će se u određenoj mjeri razlikovati i podužni parametri pojedinih faza, dok matrica podužnih kompleksnih impedansi neće biti ciklično simetrična [8].



Sl. 1. Raspored faznih provodnika nadzemnog voda i njihovih fiktivnih likova u odnosu na površinu zemlje

Kompleksno rastojanje provodnika faze i , odnosno j , prema fiktivnom liku provodnika faze j , odnosno i , dato je sljedećim izrazom [10]:

$$\underline{D}_{ij}' = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j + \underline{\alpha})^2}, \quad (3)$$

gdje je $i, j = a, b, c$.

U izrazu (3) definisana je tzv. „kompleksna“ dubina prodiranja struje i magnetnog polja u zemlju, koja je označena na Sl. 1 i data sljedećim izrazom [9] – [11] :

$$\underline{\alpha} = \sqrt{2} \cdot \delta \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}} = \delta \cdot (1 - j), \quad (4)$$

gdje je $\delta \approx 503 \cdot \sqrt{\rho_z/f}$.

Dubina prodiranja zavisi od specifične otpornosti zemljista ρ_z , koja uzima vrijednosti od $10 \Omega\text{m}$ do $1000 \Omega\text{m}$ [9], te od frekvencije f . Uvrštavajući ove vrijednosti u izraz (4) zaključujemo da se fiktivni povratni provodnici nalaze više stotina metara ispod površine zemlje, što opet opravdava zanemarenje uticaja ugiba provodnika na vrijednosti podužnih parametara nadzemnog voda.

Na osnovu dimenzija označenih na Sl. 1 sopstvena podužna kompleksna impedansa petlje koju čine i -ti fazni provodnik i njegov fiktivni lik, izražena u Ω/km , data je sljedećim izrazom [11]:

$$\underline{z}_{ii} = r_z + j4\pi \cdot f \cdot 10^{-4} \cdot \ln\left(\frac{\underline{D}_{ii}'}{R_e}\right), \quad (5)$$

gdje je \underline{D}_{ii}' – kompleksno rastojanje i -og faznog provodnika od njegovog fiktivnog lika, koje se dobija iz izraza (3), za $i = j$. U izrazu (5) r je podužna otpornost faznog provodnika u Ω/km , dok je r_z – podužna otpornost zemlje u Ω/km , koja prema Carson-u iznosi [10]:

$$r_z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4}. \quad (6)$$

Sa R_e je označen ekvivalentni poluprečnik faznog provodnika koji zavisi od konstrukcije Al/Fe užeta, ali se u slučaju srednjenačonskih distributivnih vodova može aproksimirati sledećim izrazom [8]:

$$R_e = R \cdot e^{-\frac{1}{4}} \approx 0,7788 \cdot R, \quad (7)$$

koji se odnosi na pun okrugli provodnik, gdje je R – geometrijski (stvarni) poluprečnik užeta.

Međusobna podužna kompleksna impedansa petlji koju čine i -ti fazni provodnik i njegov fiktivni lik, te j -ti fazni provodnik i njegov fiktivni lik, izražena u Ω/km , data je sljedećim izrazom [11]:

$$\underline{z}_{ij} = r_z + j4\pi \cdot f \cdot 10^{-4} \cdot \ln\left(\frac{\underline{D}_{ij}'}{\underline{D}_{ij}}\right), \quad (8)$$

gdje su rastojanja D_{ij} i \underline{D}_{ij}' data izrazima (2) i (3), respektivno. Zbog simetrije važi jednakost $\underline{z}_{ij} = \underline{z}_{ji}$.

Konačno, moguće je formirati matricu podužnih kompleksnih impedansi nadzemnog voda:

$$[\underline{z}] = \begin{bmatrix} \underline{z}_{aa} & \underline{z}_{ab} & \underline{z}_{ac} \\ \underline{z}_{ba} & \underline{z}_{bb} & \underline{z}_{bc} \\ \underline{z}_{ca} & \underline{z}_{cb} & \underline{z}_{cc} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

2.2. Proračun struja kratkih spojeva

Srednjenačonske distributivne mreže se u većini slučajeva, u električnom smislu, nalaze na relativno velikom rastojanju u odnosu na elektrane, tj. sinhronе generatorе u tim elektranama. Zbog toga struje kratkih spojeva u srednjenačonskim distributivnim mrežama nemaju izraženu subtranzientnu i tranzientnu prelaznu komponentu.

Zbog relativno malog odnosa X/R u srednjenačonskim distributivnim mrežama, aperiodična komponenta struje kratkog spoja relativno brzo isčezava. Stoga ćemo u ovom radu postupiti kao što je uobičajeno u proračunu struja kratkih spojeva za potrebe dimenzionisanja elektroenergetske opreme, te izbora vrste i podešenja relejne zaštite, tj. računaćemo struje ustaljenog kratkog spoja, kao i odgovarajuće magnetsko polje koje potiče od ustaljenih struja kratkog spoja. Ovakav postupak je opravдан za srednjenačonske distributivne mreže u kojima nema distribuiranih izvora električne energije.

Za proračun nesimetričnih kratkih spojeva tradicionalno se koristi Fortescue-ova metoda simetričnih komponenti [12].

Preduslov za primjenu ove metode u proračunu struja nesimetričnih kratkih spojeva na nadzemnim vodovima je jednakost podužnih parametara pojedinih faznih provodnika. Ukoliko taj uslov nije ispunjen, matrica (9) nije ciklično simetrična, što za posljedicu ima da komponentni sistemi nisu međusobno raspregnuti [8]. Stoga ćemo struje kratkih spojeva u ovom radu odrediti prema trofaznoj ekvivalentnoj šemi prikazanoj na Sl. 2, pretpostavljajući da je vod priključen na mrežu beskonačne snage.

Na osnovu ekvivalentne šeme na Sl. 2 možemo napisati sljedeću matričnu jednačinu:

$$[\Delta \underline{U}] = [\underline{E}] - [\underline{U}] = [\underline{Z}] \cdot [\underline{I}], \quad (10)$$

gdje je: $[\Delta \underline{U}] = [\Delta \underline{U}_a \ \Delta \underline{U}_b \ \Delta \underline{U}_c]^T$ – vektor padova napona na pojedinim fazama nadzemnog voda, $[\underline{E}] = [E_a \ E_b \ E_c]^T$ – vektor faznih napona na početku nadzemnog voda, $[\underline{U}] = [U_a \ U_b \ U_c]^T$ – vektor faznih napona na mjestu kvara, dok je $[\underline{I}] = [I_a \ I_b \ I_c]^T$ – vektor faznih struja.

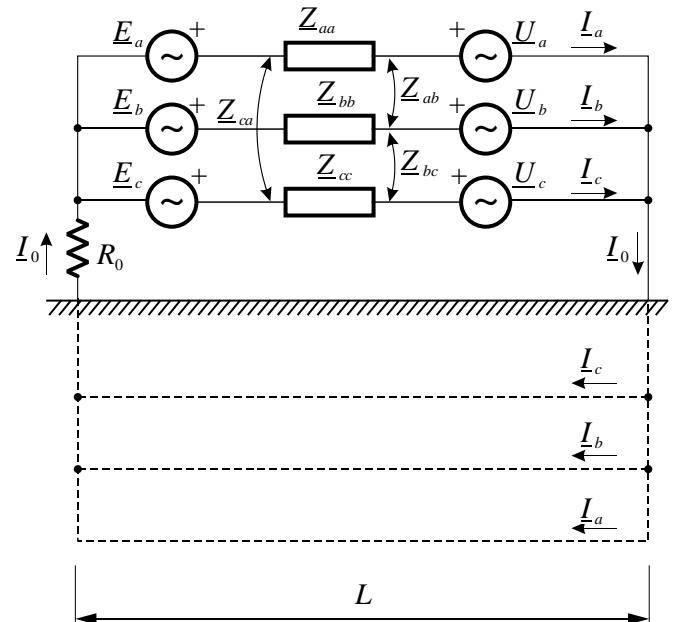
U matričnoj jednačini (10) uvedena je ekvivalentna matrica impedansi sistema predstavljenog na Sl. 2, koja je definisana na sljedeći način:

$$[\underline{Z}] = [\underline{z}] \cdot L + [J] \cdot R_0, \quad (11)$$

gdje je: L – udaljenost od početka nadzemnog voda do mjesta kvara u km, $[J]$ – matrična dimenzija 3×3 , čiji su svi elementi jedinice, dok je R_0 – otpornost radnog uzemljenja u napojnoj transformatorskoj stanici kojom se ograničava struja jednofaznog kratkog spoja u posmatranoj mreži. Fazne struje za različite tipove kratkih spojeva dobijaju se na osnovu matrične jednačine (10) i tzv. jednačina fizičke očiglednosti za odgovarajući tip kvara.

Fazne struje za slučaj tropolnog kratkog spoja (3PKS) se direktno dobijaju iz matrične jednačine (10), uzimajući u obzir da je $\Delta \underline{U}_i = \underline{E}_i$ ($i = a, b, c$) i date su sljedećim matričnim izrazom:

$$[\underline{I}] = [\underline{Z}]^{-1} \cdot [\Delta \underline{U}] = [\underline{Z}]^{-1} \cdot [\underline{E}]. \quad (12)$$



Sl. 2. Trofazno ekvivalentno kolo nadzemnog voda za proračun faznih struja kratkog spoja

Fazna struja i -te faze, za slučaj jednopolognog kratkog spoja (1PKS) i -te faze, dobija se transformacijom matrične jednačine (10), uzimajući u obzir to da je $\Delta \underline{U}_i = \underline{E}_i$, $\underline{I}_j = \underline{I}_k = 0$ ($i,j,k = a,b,c \wedge i \neq j \neq k$) i data je sljedećim izrazom:

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{E}_i}{\underline{Z}_{ii}}. \quad (13)$$

Fazne struje i -te i j -te faze, za slučaj dvopolognog kratkog spoja (2PKS) i -te i j -te faze, dobijaju se transformacijom matrične jednačine (10), uzimajući u obzir to da je $\Delta \underline{U}_i - \Delta \underline{U}_j = \underline{E}_i - \underline{E}_j$, $\underline{I}_i = -\underline{I}_j$, $\underline{I}_k = 0$ ($i,j,k = a,b,c \wedge i \neq j \neq k$) i date su sljedećim izrazima:

$$\underline{I}_i = -\underline{I}_j = \frac{\underline{E}_i - \underline{E}_j}{\underline{Z}_{ii} + \underline{Z}_{jj} - 2 \cdot \underline{Z}_{ij}}. \quad (14)$$

Fazne struje i -te i j -te faze, za slučaj dvopolognog kratkog spoja sa zemljom (2PKSZ) i -te i j -te faze, dobijaju se transformacijom matrične jednačine (10), uzimajući u obzir to da je $\Delta \underline{U}_i = \underline{E}_i$, $\Delta \underline{U}_j = \underline{E}_j$, $\underline{I}_k = 0$ ($i,j,k = a,b,c \wedge i \neq j \neq k$) i date su sljedećim izrazima:

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{Z}_{jj} \cdot \underline{E}_i - \underline{Z}_{ij} \cdot \underline{E}_j}{\underline{Z}_{ii} \cdot \underline{Z}_{jj} - \underline{Z}_{ij}^2}, \quad (15)$$

$$\underline{I}_j = \frac{\underline{Z}_{ii} \cdot \underline{E}_j - \underline{Z}_{ij} \cdot \underline{E}_i}{\underline{Z}_{ii} \cdot \underline{Z}_{jj} - \underline{Z}_{ij}^2}. \quad (16)$$

2.3. Proračun magnetnog polja

Možemo smatrati da je magnetno polje u okolini nadzemnog voda kvazistacionarno, te da se može odrediti nezavisno od električnog polja [9]. Kako potiče od harmoničnih struja, za određivanje vektora magnetne indukcije možemo koristiti kompleksnu, tj. fazorsku notaciju. Osim toga, kako se zanemaruje uticaj ugiba faznih provodnika, vektor magnetne indukcije računamo pomoću *Biot-Savart-ovog* zakona primjenjenog na pravolinijski provodnik beskonačne dužine.

Vektor magnetne indukcije u okolini nadzemnog voda računamo uvažavajući prisustvo fiktivnih likova pojedinih faznih provodnika ispod površine zemlje. Zemlja se pri tome smatra nemagnetnim, provodnim materijalom magnetne permeabilnosti $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, tako da je opravdana primjena principa superpozicije.

Ako se i -ta faza nalazi na visini y_i i fazor struje u toj fazi iznosi \underline{I}_i , tada se, prema Sl. 1, njen fiktivni lik nalazi na kompleksnoj dubini $y_i + \underline{\alpha}$ i struja u njemu iznosi $-\underline{I}_i$. Zbog usvojenog koordinatnog sistema na Sl. 1 vektor magnetne indukcije će imati samo x i y komponentu, dok će z komponenta biti jednaka nuli. Vektor magnetne indukcije u tački sa koordinatama (x, y) uslijed struje u i -toj fazi je dat izrazom [4]:

$$\underline{\mathbf{B}}_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \underline{I}_i \cdot \left(\frac{\underline{\mathbf{u}}_i}{R_i} - \frac{\underline{\mathbf{u}}_i'}{R_i'} \right). \quad (17)$$

Rastojanja posmatrane tačke od provodnika i -te faze i njegovog fiktivnog lika su data sljedećim izrazima:

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad (18)$$

$$R_i' = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y + y_i + \underline{\alpha})^2}. \quad (19)$$

U izrazu (17) definisani su sljedeći vektori [4]:

$$\underline{\mathbf{u}}_i = -\frac{y - y_i}{R_i} \cdot \underline{\mathbf{u}}_x + \frac{x - x_i}{R_i} \cdot \underline{\mathbf{u}}_y, \quad (20)$$

$$\underline{\mathbf{u}}_i' = -\frac{y + y_i + \underline{\alpha}}{R_i'} \cdot \underline{\mathbf{u}}_x + \frac{x - x_i}{R_i'} \cdot \underline{\mathbf{u}}_y, \quad (21)$$

gdje su $\underline{\mathbf{u}}_x$ i $\underline{\mathbf{u}}_y$ jedinični vektori (ortovi) u xy koordinatnom sistemu.

Rezultantni vektor magnetne indukcije u tački sa koordinatama (x, y) dobija se superpozicijom vektora magnetne indukcije uslijed struja u pojedinim faznim provodnicima i dat je sljedećim izrazom [4]:

$$\underline{\mathbf{B}} = \sum_i \underline{\mathbf{B}}_i = \underline{\mathbf{B}}_x \cdot \underline{\mathbf{u}}_x + \underline{\mathbf{B}}_y \cdot \underline{\mathbf{u}}_y, \quad (22)$$

pri čemu su njegove pojedine komponente:

$$\underline{\mathbf{B}}_x = -\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_i \underline{I}_i \cdot \left(\frac{y - y_i}{R_i^2} - \frac{y + y_i + \underline{\alpha}}{R_i'^2} \right), \quad (23)$$

$$\underline{\mathbf{B}}_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_i \underline{I}_i \cdot (x - x_i) \cdot \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_i'^2} \right), \quad (24)$$

dok mu je efektivna vrijednost:

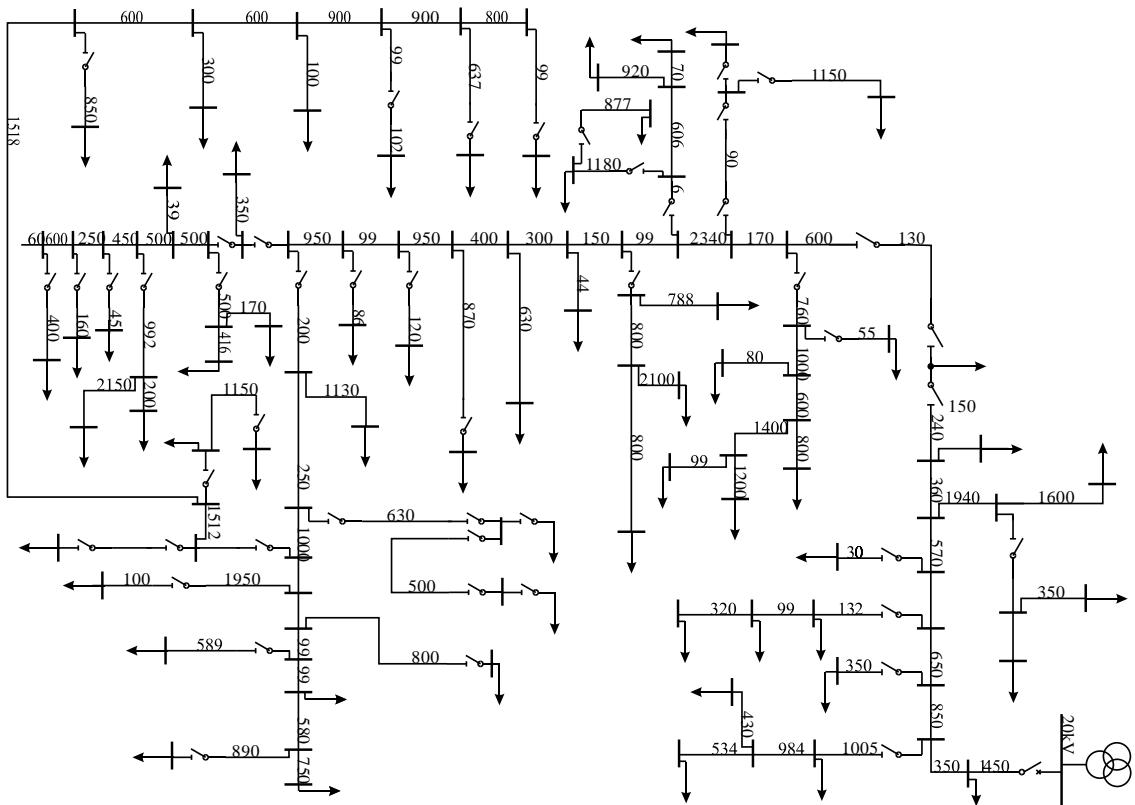
$$B = \sqrt{|\underline{\mathbf{B}}_x|^2 + |\underline{\mathbf{B}}_y|^2}. \quad (25)$$

3. REZULTATI PRORAČUNA

Na osnovu predloženog matematičkog modela napisan je program za proračun efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije duž ose stuba za tipičan srednjenačinski distributivni nadzemni vod i za različite tipove kratkih spojeva. Posmatrana je konkretna distributivna mreža 20 kV, 50 Hz sa područja opštine Banja Luka. Na Sl. 3 je prikazana jednopolna šema pomenute distributivne mreže, gdje je pored svakog voda naznačena i njegova dužina u m. Proračuni su vršeni za slučaj kada su struje kvara najmanje, tj. kada je udaljenost mjesta kvara od napojne transformatorske stanice najveća. Za razgranatu mrežu na Sl. 3 može se ustanoviti da je kritična udaljenost mjesta kvara $L \approx 20$ km.

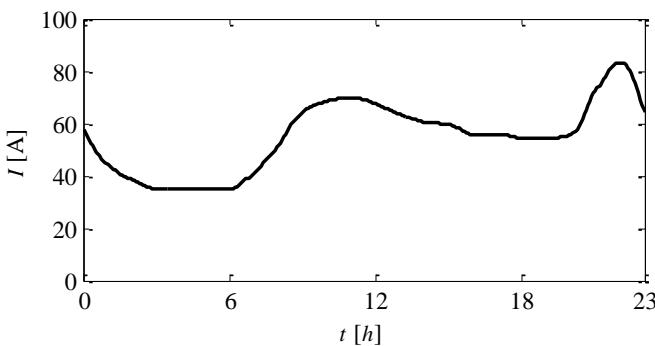
Efektivna vrijednost vektora magnetne indukcije uslijed struje kvara u navedenom kritičnom slučaju je upoređena sa odgovarajućom indukcijom za slučaj vršnog opterećenja u normalnom režimu rada. Za proračun magnetne indukcije uslijed radnih struja je usvojena vršna struja od 80 A, prema tipičnom dnevnom dijagramu opterećenja napojnog voda na Sl. 4.

U srednjenačinskim distributivnim mrežama na području opštine Banja Luka se najčešće koriste armirano-betonski stubovi visine 12 m koji su ukopani 2 m u zemlju, tako da visina provodnika iznad zemlje iznosi oko 10 m. Na armirano-betonski stub se postavljuju vršne konzole kod kojih su sva tri fazna provodnika u ravni, kao što je prikazano na Sl. 5. Za provodnike se najčešće koriste *Al/Fe* užad presjeka $25/4$ mm 2 ili $35/6$ mm 2 , a za magistralni dio voda $50/8$ mm 2 . U proračunu je usvojeno uža *Al/Fe* $25/4$ mm 2 sa sljedećim podacima: $r = 1,2027$ Ω/km, $R = 3,375$ mm [13]. Osim toga, usvojene su oznake i raspored faza prikazan na Sl. 5. Za specifičnu otpornost zemljišta je usvojena tipična vrijednost od $\rho_z = 100$ Ωm.

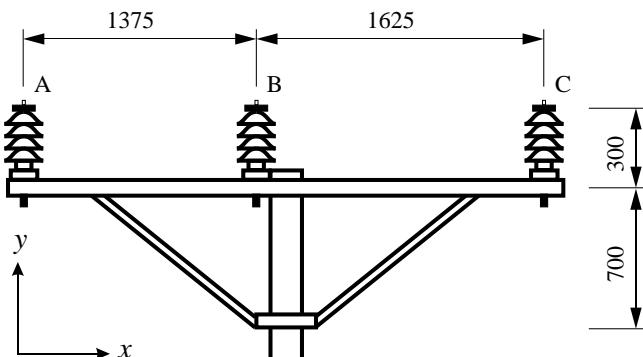


Sl. 3. Konkretna distributivna mreža nazivnog napona 20 kV na području opštine Banja Luka

Smatrajući da su faktori napona na početku napojnog voda $E_a = 20/\sqrt{3}$ kV 0° , $E_b = 20/\sqrt{3}$ kV -120° i $E_c = 20/\sqrt{3}$ kV 120° , te da je struja 1PKS ograničena na 300 A ($R_0 = 40 \Omega$), izvršen je proračun faznih struja za različite tipove kratkih spojeva za kritičnu udaljenost mesta kvara od napojne transformatorske stanice. Rezultati proračuna su prikazani u tabeli 1.



Sl. 4. Tipičan dnevni dijagram opterećenja napojnog voda u posmatranoj mreži



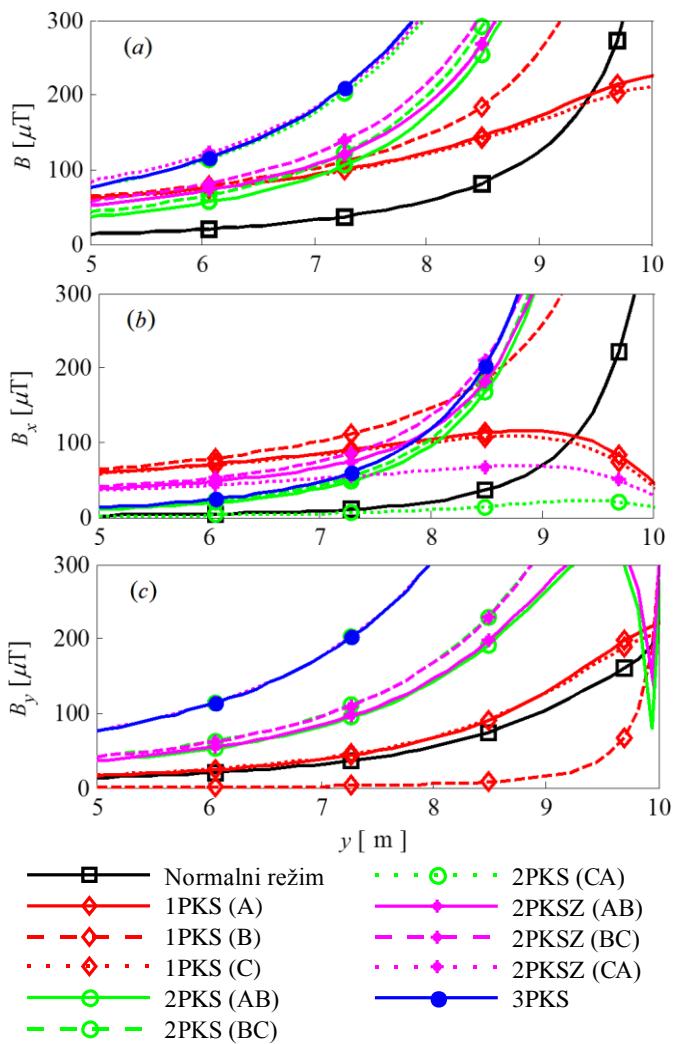
Sl. 5. Dimenzije (u mm) glave tipičnog armirano-betonskog stuba

Na Sl. 6 prikazana je efektivna vrijednost vektora magnetne indukcije, te efektivne vrijednosti njegovih komponenti B_x i B_y , duž ose stuba, za visine od 5 m do 10 m. Na Sl. 6 (a) vidimo da je za visine do 9 m magnetna indukcija uslijed struje kratkog spoja, za sve kvarove, veća od magnetne indukcije uslijed radnih struja.

Za visine iznad 9 m, magnetno polje pri 1PKS faze A ili C je manje od magnetnog polja uslijed radnih struja. Izuzimajući normalan režim, za visine iznad 7 m najslabije je magnetno polje pri 1PKS bilo koje faze, dok je za visine ispod 7 m najslabije magnetno polje pri 2PKS i 2PKSZ između faza A i B ili B i C. Na Sl. 6 (b) vidimo da je do visine 9 m, osim u slučaju 2PKS faza C i A, komponenta B_x vektora magnetne indukcije uslijed struje kratkog spoja veća od komponente B_x vektora magnetne indukcije uslijed radnih struja. Na Sl. 6 (c) vidimo da je do visine 9 m, osim u slučaju 1PKS faze B, komponenta B_y vektora magnetne indukcije uslijed struje kratkog spoja veća od komponente B_y vektora magnetne indukcije uslijed uravnoteženih radnih struja.

Tabela 1 – Fazne struje kvara za kritičnu udaljenost mješta kvara u posmatranoj distributivnoj mreži

Režim rada	\underline{I}_a [A]	\underline{I}_b [A]	\underline{I}_c [A]
Normalan	80 /0°	80 /-120°	80 /120°
1PKS (A)	170 /-14°	0	0
1PKS (B)	0	170 /-134°	0
1PKS (C)	0	0	170 /106°
2PKS (AB)	395 /12°	395 /-168°	0
2PKS (BC)	0	394 /-109°	394 /71°
2PKS (CA)	390 /-50°	0	390 /130°
2PKSZ (AB)	387 /5°	394 /-161°	0
2PKSZ (BC)	0	403 /-116°	392 /79°
2PKSZ (CA)	387 /-43°	0	401 /122°
3PKS	442 /-19°	459 /-138°	460 /100°



Sl. 6. Raspodjela efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije (a) i njegovih komponenti B_x (b) i B_y (c) duž ose posmatranog stuba

4. ZAKLJUČAK

U radu su obrađene osnove matematičkog modelovanja srednjenačinskog nadzemnog voda. Izvedeni su izrazi za proračun faznih struja kratkih spojeva i odgovarajuće efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije u blizini nadzemnog voda. Na osnovu teorijske analize proračunate su fazne struje kratkog spoja za najgori scenario u tipičnoj distributivnoj mreži nazivnog napona 20 kV. Za izračunate struje kvara određena je raspodjela efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije duž ose armirano-betonskog stuba sa rasporedom faznih provodnika u ravni na visini 10 m iznad površine zemlje. Nakon sprovedenog proračuna zaključujemo da razumne visine za postavljanje indikatora kvara na razmatrani tip stuba leže u opsegu od oko 7 m do oko 9 m. Takođe, zaključujemo da je većinu kvarova moguće detektovati na osnovu porasta komponente B_x vektora magnetne indukcije.

5. ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju preduzeću *Elektrokraina a.d. Banja Luka*, na pruženoj pomoći pri izradi ovog rada. Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srbije u okviru projekta INGRID.

6. LITERATURA

- [1] J.Northcote-Green, R.Wilson, *Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems*, New York: CRC Press, 2007.
 - [2] E.Vidyasagar, P.V.N.Prasad, A.Fatima, "Reliability Improvement of a Radial Feeder Using Multiple Fault Passage Indicators," in *2nd International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2011)*, 2011.
 - [3] A.V.Mamishev, B.D.Russell, "Measurement of Magnetic Fields in the Direct Proximity of Power Line Conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1211-1216, July 1995.
 - [4] C.Garrido, A.F.Otero, J.Cidras, "Low-Frequency Magnetic Fields From Electrical Appliances and Power Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 4, pp. 1310-1319, 2003.
 - [5] *IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*, IEEE Std. 644, 1994.
 - [6] ICNRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, pp. 494-552, April 1998.
 - [7] P.Pao-la-or, A.Isaramongkolrak, T.Kulworawanichpong, "Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems," *Engineering Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 1-9, 2010.
 - [8] M.B.Đurić, *Elementi EES-a*, Beograd: ETF, 1998.
 - [9] A.V.Mamishev, R.D.Nevils, B.D.Russel, "Effects of Conductor Sag on Spatial Distribution of Power Line Magnetic Field," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1571-1576, 1996.
 - [10] J.R.Carson, "Wave Propagation in overhead wires with ground," *Bell System Technical Journal*, no. 5, pp. 539-554., 1926.
 - [11] F.Rachidi, S.Tkachenko, *Advances in Electrical Engineering and Electromagnetics*, Southampton, Boston: WIT Press, 2008.
 - [12] C.L.Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," in *AIEE*, Atlantic City, 28 June 1918.
 - [13] D.Kajzer, *Elektrotehnički priručnik*, Zagreb: Tehnička knjiga, 1971.
- Abstract** – In this paper, possibilities for detection of short circuits by measuring the effective value of magnetic B-field vector in the vicinity of overhead medium voltage transmission lines are investigated. A complete mathematical model of an overhead transmission line with arbitrary pole geometry, suitable for calculation of short circuit phase currents and corresponding magnetic fields, is proposed. Based on the proposed model, the effective value of magnetic B-field vector along the pole axis is calculated for various types of short circuits for a specific 20 kV transmission line in the area of Banja Luka.

CALCULATION OF MAGNETIC FIELDS IN THE VICINITY OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES FOR THE PURPOSE OF FAULT DETECTION

Dorđe Lekić, Čedomir Željković, Predrag Mršić