

## ПРИНЦИП РАДА УРЕЂАЈА ЗА ОТКРИВАЊЕ И ДИЈАГНОСТИКУ КВАРОВА У НАДЗЕМНИМ ДИСТРИБУТИВНИМ ВОДОВИМА

### PRINCIPLE OF OPERATION OF DEVICES FOR DETECTION AND FAULTS DIAGNOSIS IN OVERHEAD DISTRIBUTION LINES

Горан ЖИВАДИНОВИЋ, Електродистрибуција Србије, Београд

#### КРАТАК САДРЖАЈ

Како се на тржишту појављују уређаји који служе да откривање и дијагностику струје квара на надземним дистрибутивним водовима, аутор сматра да је корисно начелно објаснити начин рада таквих уређаја. Уређаји, чији се принцип рада анализира, откривају струју квара на надземном воду детектујући (мерећи) компоненте електромагнетног поља у околини вода. Обично се постављају на стубу испод проводника, и имају независно батеријско напајање уз коришћење соларних панела. У раду се показује да је помоћу хоризонталних и вертикалних компоненти јачине магнетног поља,  $H$  могуће открити и дијагностиковати не само појаву квара у надземној мрежи, већ и тип квара. Због уштеде простора рад третира само једнофазне, двофазне и трофазне земљоспојеве, али се слична анализа може спровести и за све остале врсте квара, што може бити тема неког другог рада.

Нису дата аналитичка извођења критеријума препознавања врсте квара за све случајеве, већ само за неке, да би рад био читљивији, и да се избегне презентација свих математичких, релативно обимних извођења.

Рад показује да се као критеријум препознавања врсте квара, поред пораста/опадања компоненти магнетног поља, може усвојити и интересантан критеријум који се добија из количника вертикалне и хоризонталне компоненте поља,  $H_Y/H_X$ . Модуло овог количника  $|H_Y/H_X|$ , као и фазни угао  $\arg(H_Y/H_X)$ , могу да послуже за дијагностику и утврђивање врсте квара.

Ради једноставнијег математичког модела, а да би се истакла суштина приступа, чињена су нека поједностављења, али у бројчаном примеру су дати резултати израчунавања без тих упрошћавања.

**Кључне речи:** надземни вод, магнетно поље, електрично поље, врста квара.

#### ABSTRACT

As devices appear on the market that serve to detect and diagnose fault currents on overhead distribution lines, the author considers it useful to explain in principle the way such devices work. The devices, whose working principle is analyzed, detect the fault current on the overhead line by detecting (measuring) the components of the electromagnetic field in the vicinity of the line. They are usually placed on a pole under the conductors, and have an independent battery power supply with the use of solar panels. The paper shows that with the help of horizontal and vertical components of magnetic field strength,  $H$ , it is possible to detect and diagnose not only the occurrence of a fault in the overhead network, but also the type of fault. Due to space savings, the work treats only single, double and triple earth faults, but a similar analysis can be performed for all other types of faults, which may be the subject of another work.

Analytical derivations for recognition criteria of fault types are not given for all cases, but only for some, in order to make the paper more readable, and to avoid the presentation of all mathematical, relatively extensive derivations.

The paper shows that as a criterion for recognizing the type of failure, in addition to the increase / decrease of magnetic and electric field components, an interesting criterion can be adopted which is obtained from the quotient of vertical and horizontal components,  $H_Y/H_X$ .

The modulus of this quotient  $|\underline{H}_Y/\underline{H}_X|$ , as well as the phase angle  $\arg(\underline{H}_Y/\underline{H}_X)$ , can be used to diagnose and determine the type of fault.

For the sake of a simpler mathematical model, and in order to emphasize the essence of the approach, some simplifications have been made, but in the numerical example, the calculation results are given without these simplifications.

**Key words:** overhead line, magnetic field, electric field, type of failure

## 1. УВОД

Како је, због недостатка простора, немогуће обухватити алализом све могуће врсте квара у трофазној надземној мрежи, овај рад се ограничава на једнофазне, двофазне и трофазне земљоспојеве. Циљ овог рада је изналажење критеријума распознавања врсте земљоспојева. За то се користи хоризонтална и вертикална компонента јачине магнетног поља. Компоненте електричног поља се не могу директно користити за дијагностиковање кварова «иза» уређаја, (према потрошачу), јер је јачина електричног поља сразмерна фазним напонима а они зависе од позиције уређаја у односу на место квара. Електрично поље се може користити за анализу кварова «испред» уређаја, али овај текст то не обрађује.

За анализу и критеријум распознавања кварова, разматрају се два приступа: (1) - Модуо количника вертикалне и хоризонталне компоненте поља  $|\underline{H}_Y/\underline{H}_X|$ , аргумент (угао) овог количника  $\arg(\underline{H}_Y/\underline{H}_X)$ , (2) - модуо и угао количника компоненти поља за време земљоспоја и у радном режиму непосредно пре квара  $\underline{H}_Y/\underline{H}_{Y,ref}$ ,  $\underline{H}_X/\underline{H}_{X,ref}$ .

Да би се израчунале компоненте поља, потребно је што прецизније извршити прорачун земљоспојних струја узимајући у обзир поред сопствених и међусобне импедансе фазних проводника, удаљеност места квара, импедансу и фактор снаге потрошње, као и отпорност  $R_0$  у звездшту трансформатора «X/10kV». У тачкама 3 и 4 се долази до израза за струје земљоспоја и то су улазни подаци за остале тачке где се рачуна магнетно поље и успоставља (предлаже могућност) критеријума распознавања врсте кварова.

## 2. ПОДУЖНЕ ИМПЕДАНСЕ ВОДА

За сопствене и међусобне импедансе надземног вода се користе следећи изрази, (видети [8], стр. 113):

Сопствене импедансе фазних проводника се рачунају из обрасца

$$\underline{Z}'_{ii} = \underline{Z}'_s = (R'_{pr} + \pi^2 f 10^{-4}) + j 2\omega 10^{-4} \text{Ln} \frac{658.8\sqrt{\rho/f}}{SGP} [\Omega/km], \quad SGP = k \cdot r_{pr}$$

а међусобне

$$\underline{Z}'_{ij} = \underline{Z}'_m = (\pi^2 f 10^{-4}) + j 2\omega 10^{-4} \text{Ln} \frac{658.8\sqrt{\rho/f}}{D_{ij}} [\Omega/km]$$

где је:

$R'_{pr}$  - „DC“ подужна отпорност фазног проводника,  $[\Omega/km]$ ,

$\omega$  – кружна (угаона) учестаност,  $[rad/s]$ ,

$r_{pr}$  - спољашњи полупречник фазног проводника,  $[m]$ ,

$SGP$  – еквивалентни полупречник фазног проводника,  $SGP = k \cdot r_{pr}$ ,  $[m]$ ,

$\rho$  – специфични отпор тла,  $[\Omega m]$ ,

$D_{ij}$  – растојање оса  $i$ -тог и  $j$ -тог фазног проводника,  $[m]$ . Овде се може користити средње геометријско растојање фазних проводника,  $D_m = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$ . Тада су међусобне импедансе једнаке јер је вод уравнотежен, (симетричан).

Ако се усвоје следећи улазни подаци

Пресек проводника	70 mm <sup>2</sup>	Вертикално растојање горњег проводника у односу на доњу конзолу	0,7 m
Тип проводника (ужета)	Al/Џе 70/12 (ACSR)	Хоризонтални крак конзоле	0,7 m
Пречник фазног проводника	11,7 mm	Средње геометријско растојање фазних проводника	1,11 m
Специфична отпорност тла	80 Ωm	фреквенција	50 Hz

добијају се следеће вредности подужних импеданси надземног вода

$$\underline{Z}'_{ii} = \underline{Z}'_s = 0,464 + j0,761 \text{ } [\Omega/km]; \quad \underline{Z}'_{ij} = \underline{Z}'_m = 0,049 + j0,416 \text{ } [\Omega/km]$$

### 3. ИЗРАЧУНАВАЊЕ СТРУЈА ПРИ ЈЕДНОФАЗНОМ ЗЕМЉОСПОЈУ

На Слици-3.1. је приказана еквивалентна заменска шема дела надземног вода од извора (ТС „X“/10kV), до места квара, при једнофазном земљоспоју фазе „C“. Фиктивно звездиште еквивалентног потрошача није уземљено, јер је примар дистрибутивног трансформатора 10/0.4kV везан у троугао.

Значења симбола на Слици-3.1. су следећа:

$\underline{E}_a, \underline{E}_b, \underline{E}_c$  – симетрични систем напона (Тевененових електромоторних сила) који репрезентују еквивалентну мрежу 110kV или 35kV сведену на 10kV страну,

$\underline{Z}_{p\Delta}$  – еквивалентна импеданса потрошача, везаног у троугао, сведена на 10kV напон,

$\underline{Z}_g$  – комплексна еквивалентна импеданса трансформатора „X“/10kV сведена на 10kV напон, (видети [2]),

$\underline{Z}_v$  – комплексна сопствена импеданса надземног 10kV вода, [2], стр. 83, 84, 102,

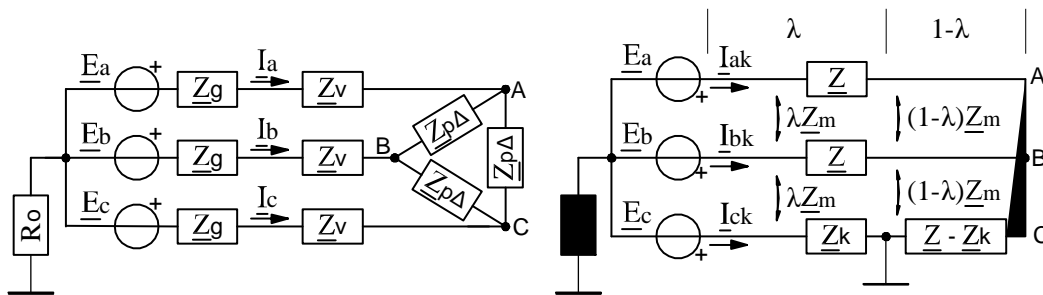
$\underline{Z}_{gv}$  – збир импеданси трансформатора и вода,  $\underline{Z}_{gv} = \underline{Z}_g + \underline{Z}_v$ ,

$\underline{Z}$  – укупна редна импеданса која се добија кад се троугао импеданси потрошача замени одговарајућом звездом,  $\underline{Z} = \underline{Z}_{gv} + \underline{Z}_p = \underline{Z}_g + \underline{Z}_v + \underline{Z}_{p\Delta}/3$ ,  $\underline{Z}_p = \underline{Z}_{p\Delta}/3$ ,

$\underline{Z}_k$  –део укупне сопствене импедансе  $\underline{Z}$  који одговара импеданси квара (од извора до места квара). То је импеданса петље квара,

$\underline{Z} - \underline{Z}_k$  – импеданса дела заменске шеме вода од места квара до фиктивног звездишта потрошача. Ова импеданса обухвата део импедансе вода  $\underline{Z}_v$  који није убухваћен петљом квара и еквивалентну импедансу потрошача (везаног у звезду),

$\lambda \underline{Z}_m$  – међусобна импеданса дела вода од почетка до места квара,  $(1 - \lambda) \underline{Z}_m$  – међусобна импеданса дела вода од места квара до краја вода, (према потрошачу). Параметар  $\lambda$  дефинише удаљеност места квара од почетка вода,  $0 \leq \lambda \leq 1$ . За квар на крају вода је  $\lambda = 1$ .



Слика-3.1. Заменска еквивалентна шема вода при једноструком земљоспоју фазе „C“.

Користећи Киркохова правила, стављајући  $I_a = I_{ak}, I_b = I_{bk}, I_c = I_{ck}$ , због сажетијег писања, може се написати следећи систем линеарних једначина

$$\begin{cases} \underline{E}_b - \underline{Z} I_b - \underline{Z}_m I_{ak} - \lambda \underline{Z}_m I_c + (1 - \lambda) \underline{Z}_m (I_a + I_b) + \underline{Z} I_{ak} + \underline{Z}_m I_b + \lambda \underline{Z}_m I_c - (1 - \lambda) \underline{Z}_m (I_a + I_b) - \underline{E}_a = 0 \\ \underline{E}_a - \underline{Z} I_a - \underline{Z}_m I_b - \lambda \underline{Z}_m I_c + (1 - \lambda) \underline{Z}_m (I_a + I_b) - (\underline{Z} - \underline{Z}_k) (I_a + I_b) + (1 - \lambda) \underline{Z}_m I_b + (1 - \lambda) \underline{Z}_m I_a \\ \quad - R_0 (I_a + I_b + I_c) = 0 \\ \underline{E}_c - \underline{Z}_k I_c - \lambda \underline{Z}_m I_a - \lambda \underline{Z}_m I_b - R_0 (I_a + I_b + I_c) = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Алгебарским операцијама се систем (3.1) може довести на сажетији облик (3.2)

$$\begin{cases} \underline{Z}_{11}I_a - \underline{Z}_{11}I_b + 0 \cdot I_c = \underline{E}_a - \underline{E}_b, \\ \underline{Z}_{21}I_a + \underline{Z}_{22}I_b + \underline{Z}_{23}I_c = \underline{E}_a, \\ \underline{Z}_{23}I_a + \underline{Z}_{23}I_b + \underline{Z}_{33}I_c = \underline{E}_c, \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} \underline{Z}_{11} = \underline{Z} - \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_{21} = 2\underline{Z} - 2(1-\lambda)\underline{Z}_m - \underline{Z}_k + R_0 \\ \underline{Z}_{22} = \underline{Z}_m - 2(1-\lambda)\underline{Z}_m + \underline{Z} - \underline{Z}_k + R_0 \\ \underline{Z}_{23} = \lambda\underline{Z}_m + R_0 \\ \underline{Z}_{33} = \underline{Z}_k + R_0 \end{cases} \quad (3.3)$$

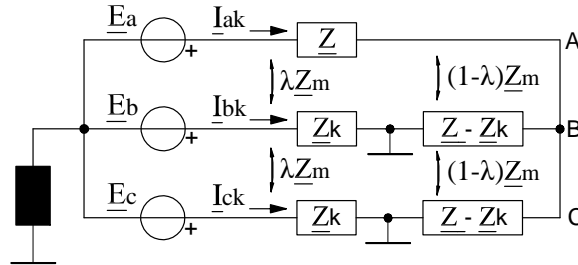
Систем једначина (3.2) се може решити аналитички и добијају се сложени изрази. На пример, струја фазе „С“ која је у земљоспоју се рачуна по формули

$$\underline{I}_{ck} = \frac{\underline{Z}_{23}(\underline{E}_a - \underline{E}_b)(\underline{Z}_{21} - \underline{Z}_{22}) + \underline{Z}_{11}((\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{21})\underline{E}_c - 2\underline{Z}_{23}\underline{E}_a)}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{33}(\underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{23}^2)} \quad (3.4)$$

Изрази за остале струје се неће приказати због уштеде простора. У овом раду није примарни циљ добијање алгебарских израза за струје квара, као што је формула (3.4). Циљ је да се постави што прецизнији математички модел који даје као резултат струје квара по фазама ( $\underline{I}_{ak}, \underline{I}_{bk}, \underline{I}_{ck}$ ), које ће се у другом одељку користити као улазни подаци за прорачун хоризонталне и вертикалне компоненте јачине магнетног поља, а модуо и аргумент количника  $\underline{H}_y/\underline{H}_x$  аутор покушава да искористи као критеријум препознавања врсте квара.

#### 4. ИЗРАЧУНАВАЊЕ СТРУЈА ПРИ ДВОФАЗНОМ ЗЕМЉОСПОЈУ

Заменска шема надземног вода при двофазном земљоспоју фаза „В“ и „С“ је дата на Слици-4.1. И овде фиктивно звездиште еквивалентног потрошача није уземљено, јер је примар трансформатора 10/0.4kV везан у троугао.



Слика-4.1. Еквивалентна шема двоструког земљоспоја фаза „В“ и „С“.

По Киркофовим правилима може се поставити следећи систем једначина

$$\begin{cases} \underline{E}_a - \underline{Z}I_{ak} - \lambda\underline{Z}_m I_{bk} - \lambda\underline{Z}_m I_{ck}(- (1-\lambda)\underline{Z}_m I_{b1} - (1-\lambda)\underline{Z}_m I_{c1}) + (\underline{Z} - \underline{Z}_k)I_{b1} + (1-\lambda)\underline{Z}_m I_{ak} + (1-\lambda)\underline{Z}_m I_{c1} \\ \quad + \underline{Z}_k I_{bk} + \lambda\underline{Z}_m I_{ak} + \lambda\underline{Z}_m I_{ck} - \underline{E}_b = 0 \\ \underline{E}_b - \underline{Z}_k I_{bk} - \lambda\underline{Z}_m I_{ak} - \lambda\underline{Z}_m I_{ck} - R_0(I_{ak} + I_{bk} + I_{ck}) = 0 \\ \underline{E}_c - \underline{Z}_k I_{ck} - \lambda\underline{Z}_m I_{ak} - \lambda\underline{Z}_m I_{bk} - R_0(I_{ak} + I_{bk} + I_{ck}) = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

који се после алгебарског сређивања појављује као

$$\begin{cases} ((3-\lambda)\underline{Z}_m + \underline{Z}_k - 3\underline{Z})I_{ak} + 2(\underline{Z}_k - \lambda\underline{Z}_m)I_{bk} = 2\underline{E}_b - 2\underline{E}_a \\ (\lambda\underline{Z}_m + R_0)I_{ak} + (\underline{Z}_k + R_0)I_{bk} + (\lambda\underline{Z}_m + R_0)I_{ck} = \underline{E}_b \\ (\lambda\underline{Z}_m + R_0)I_{ak} + (\lambda\underline{Z}_m + R_0)I_{bk} + (\underline{Z}_k + R_0)I_{ck} = \underline{E}_c \end{cases} \quad (4.2)$$

Систем једначина (4.2) се може решити и добити алгебарски изрази за фазне струје.

$\underline{I}_{ak} = \frac{2(\underline{E}_b - \underline{E}_a)(\underline{Z}_{22}^2 - \underline{Z}_{21}^2) - \underline{E}_b \underline{Z}_{12} \underline{Z}_{22} + \underline{E}_c \underline{Z}_{12} \underline{Z}_{21}}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{21})[\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{21}) - \underline{Z}_{21} \underline{Z}_{12}]}$ $\underline{I}_{bk} = \frac{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{21})[2(\underline{E}_a - \underline{E}_b)\underline{Z}_{21} + \underline{E}_b \underline{Z}_{11}] + (\underline{E}_b - \underline{E}_c)\underline{Z}_{11} \underline{Z}_{21}}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{21})[\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{21}) - \underline{Z}_{21} \underline{Z}_{12}]}$ $\underline{I}_{ck} = \frac{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{21})[2(\underline{E}_a - \underline{E}_b)\underline{Z}_{21} + \underline{E}_b \underline{Z}_{11}] + (\underline{E}_b - \underline{E}_c)(\underline{Z}_{21} \underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{11} \underline{Z}_{22})}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{21})[\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{21}) - \underline{Z}_{21} \underline{Z}_{12}]}$	$\begin{aligned} \underline{Z}_{11} &= (3 - \lambda)\underline{Z}_m + \underline{Z}_k - 3\underline{Z} \\ \underline{Z}_{12} &= 2(\underline{Z}_k - \lambda\underline{Z}_m) \\ \underline{Z}_{21} &= \lambda\underline{Z}_m + R_0 \\ \underline{Z}_{22} &= \underline{Z}_k + R_0 \end{aligned} \quad (4.3)$
---	---

Дакле и за случај двофазног кратког споја за земљом се добија уређена тројка струја по фазама,  $(\underline{I}_{ak}, \underline{I}_{bk}, \underline{I}_{ck})$ . Струје једнофазног и двофазног земљоспоја израчунате по формулама (3.4) и (4.3) су приближно једнаке струјама које даје прорачун у „Telarm\_26“ софтверу.

## 5. ЈАЧИНА МАГНЕТНОГ ПОЉА

Из практичних разлога уређај који би детектовао (мерио) јачину магнетног поља требало би поставити у оси стуба на довољном растојању од доње конзоле, (2.5 до 3 метара), како би се омогућила монтажа када је вод под напоном. За анализу компоненти јачине магнетног поља је меродавна Слика-5.1.

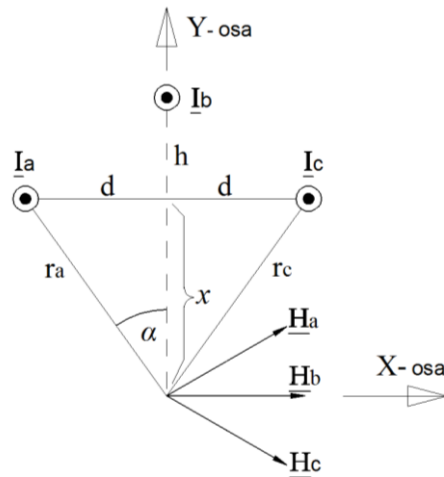
Јачина магнетног поља се одређује из циркулације вектора  $\vec{H}$  по затвореној петљи, тј. кругу полупречника  $r$  са центром у оси проводника, ([1], стр. 44, 53):

$$\underline{H} = \frac{I}{2\pi r} = K_{H(r)} I, \quad K_{H(r)} = \frac{1}{2\pi r} \quad (5.1)$$

Хоризонтална компонента јачине магнетног поља  $\underline{H}$  на месту удаљеном од оса проводника за  $r_a, r_b, r_c$  су

$$\underline{H}_x = (K_{Ha} \underline{I}_{ak} \cos \alpha + K_{Hb} \underline{I}_{bk} + K_{Hc} \underline{I}_{ck} \cos \alpha) \quad (5.2)$$

где је  $K_{Ha} = 1/(2\pi r_a)$ ,  $K_{Hb} = 1/(2\pi r_b)$ ,  $K_{Hc} = 1/(2\pi r_c)$ . За вертикалну копоненту магнетног поља се слично добија, (видети Сliku-5.1.)



Слика-5.1. Хоризонталне и вертикалне компоненте магнетног поља

$$\underline{H}_y = (K_{Ha} \underline{I}_{ak} \sin \alpha - K_{Hc} \underline{I}_{ck} \sin \alpha) = K_{Ha} \sin \alpha (\underline{I}_{ak} - \underline{I}_{ck}) \quad (5.3)$$

Ако је распоред проводника делта-симетричан онда је  $K_{Ha} = K_{Hc}$ , јер је  $r_a = r_c$ . Сада ће се израчунати  $\underline{H}_y/\underline{H}_x$  за магнетно поље вода без квара.

## 5.1. Магнетно поље. Вод без квара.

За делта распоред проводника симетричан у односу на Y-осу и симетричан систем фазних струја које теку водом у коме нема квара је

$$\underline{H}_X = \underline{I}_a (K_{Ha} \cos \alpha + K_{Hb} \underline{a}^2 + K_{Hc} \cos \alpha \underline{a}) = \underline{I}_a (K_{Ha} \cos \alpha (1 + \underline{a}) + K_{Hb} \underline{a}^2)$$

Како је, (видети [4]),  $1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \Rightarrow 1 + \underline{a} = -\underline{a}^2$ ,  $\underline{H}_X = \underline{I}_a (K_{Hb} - K_{Ha} \cos \alpha) \underline{a}^2$   
Вертикална компонента је

$$\underline{H}_Y = \underline{I}_a (K_{Ha} \sin \alpha - K_{Hb} \sin \alpha \underline{a}) = \underline{I}_a \sin \alpha K_{Ha} (1 - \underline{a})$$

$$\frac{\underline{H}_Y}{\underline{H}_X} = \frac{\sin \alpha K_{Ha} (1 - \underline{a})}{(K_{Hb} - K_{Ha} \cos \alpha) \underline{a}^2} = \frac{\sin \alpha K_{Ha}}{(K_{Hb} - K_{Ha} \cos \alpha)} \frac{\sqrt{3} \exp(-30^\circ)}{\exp(-120^\circ)} = \frac{\sqrt{3} \sin \alpha K_{Ha}}{(K_{Hb} - K_{Ha} \cos \alpha)} \exp(90^\circ) \quad (5.4)$$

Даље се израз (5.4) може свести на

$$\frac{\underline{H}_Y}{\underline{H}_X} = \frac{\sqrt{3} \sin \alpha}{\left(\frac{K_{Hb}}{K_{Ha}} - \cos \alpha\right)} \exp(90^\circ) = \frac{\sqrt{3} \sin \alpha}{\left(\frac{1/r_b}{1/r_a} - \cos \alpha\right)} \exp(90^\circ) = \frac{\sqrt{3} \sin \alpha}{\left(\frac{r_a}{r_b} - \cos \alpha\right)} \exp(90^\circ) \quad (5.5)$$

Међутим вредност имениоца у изразу (5.5) може бити позитивна или негативна. Ако је негативна то уноси еквивалентни фазни угао од  $180^\circ$ , и тада аргумент количника,  $\text{Arg}(\underline{H}_Y/\underline{H}_X)$  постаје  $-90^\circ$ . Ако се реши неједначина  $r_a/r_b - \cos \alpha > 0$ ,  $r_a/r_b - x/r_a > 0$  добија се услов  $x < r_a^2/r_b = d^2/h$ , (5.6).  
Коначно уз услов (5.6) се може написати

$$\frac{\underline{H}_Y}{\underline{H}_X} = \frac{\sqrt{3} \sin \alpha}{\cos \alpha - \frac{r_a}{r_b}} \exp(-90^\circ), \quad x > \frac{r_a^2}{r_b} = \frac{d^2}{h} \quad (5.7)$$

До истог обрасца се долази у [7], стр. 3, за случај „pole geometry 3“. Дакле, при делта-симетричном распореду проводника, угао количника  $\underline{H}_Y/\underline{H}_X$  је  $-90^\circ$  када је растојање од доње конзоле до уређаја  $x > d^2/h$ , а тај угао је  $+90^\circ$  када је  $x < d^2/h$ . Ако је  $d = h = 0,7\text{m}$ , као што ће бити усвојено у примеру из тачке 6, онда је услов да је угао  $\text{arg}(\underline{H}_Y/\underline{H}_X) = -90^\circ$  остварен за  $x > d = 0,7\text{m}$ . Практично је овај услов увек испуњен јер су растојања која се користе реда величине око  $x = (2,5 - 3)\text{m}$ . За уобичајене вредности делта распореда проводника надземног вода  $d = h = 0,7\text{m}$  модуо количника вертикалне и хоризонталне компоненте јачине магнетног поља је  $|\underline{H}_Y/\underline{H}_X| = 2,78$ . Дакле, када је вод у нормалном радном режиму без је вертикална компонента магнетног поља већа од хоризонталне компоненте,  $|\underline{H}_Y| > |\underline{H}_X|$ . Видеће се касније да ако је отпорност неутралне тачке мреже  $R_0 = 0\Omega$  је  $|\underline{H}_Y| < |\underline{H}_X|$ , осим за трофазни земљоспој.

## 5.2. Детекција магнетног поља.

У овој тачки због ограниченог простора је дат само у најкраћим цртама, начин како се региструју компоненте поља.

Хоризонталну и вертикалну компоненту јачине магнетног поља је могуће детектовати коришћењем два намотаја бакарне жице са језгром од меког гвожђа чије су осе међусобно под углом од  $90$  степени а када се урађај постави на стуб надземног вода, оса једног намотаја је хоризонтална а другог вертикална. Напони које дају такви намотаји су готово линеарно сразмерни јачини магнетног поља.

## 6. ПРИМЕР ПРОРАЧУНА

У овој тачки ће се извршити прорачун компоненти магнетног поља на примеру једног  $10\text{kV}$  вода користећи обрасце из тачака 3, 4 и 5. Контрола израчунатих струја, видети табелу 6.4, ће се вршити коришћењем софтверског алата «TELARM\_26», ([6]). Варираће се неки параметри као што су: импеданса потрошача, (тј.

струјно оптерећење вода), удаљеност места квара од почетка вода, (тј. параметар  $\lambda = L_{v,k}/L_{v,uk}$ ), отпорност у неутралној тачки (звездишту) трансформатора „X/10 kV“. Поред подужних импеданси вода из тачке 2 користиће се као улазни подаци и импеданса трансформатора [2]):

$$X_T = \frac{u_{k\%} U_L^2}{100 S_n} = \frac{10 \cdot 10^2}{100 \cdot 10} = 1,0 \Omega, \quad R_T = 0,2 \cdot X_T = 0,2 \Omega$$

За фазни напон извора је усвојена вредност  $V_a = 10kV/\sqrt{3} \cong 5774 V \exp 0^\circ$ .

Да би се сагледао утицај разних параметара, мораће да се редукује број величина које се приказују у табелама. Приказаће се стање вода без квара, једнофазни земљоспој C-Z, двофазни BC-Z и трофазни земљоспој ABC-Z. Сви углови у табелама се реферишу на фазни став напона фазе „A“, који је једнак нули

Табела 6.1. – МЕЊА СЕ ОПТЕРЕЋЕЊЕ ВОДА. $ Z_p $ , при $\cos \varphi = 0,99$ , отпор у звездишту $R_0 = 0\Omega$ , и фактору места квара $\lambda = 0,9$ . Вод има укупну дужину $L_{v,uk} = 10km$								
	без квара	C-Z	BC-Z	ABC-Z	без квара	C-Z	BC-Z	ABC-Z
	20 A				100 A			
I <sub>a</sub> (A)	20	19,35	17,27	1078,2	100	97,55	87,37	1078,2
I <sub>b</sub> (A)	20	17,29	830,04	1078,2	100	86,28	849,66	1078,2
I <sub>c</sub> (A)	20	642,99	982,77	1078,2	100	646,52	969,22	1078,2
H <sub>y</sub> (A/m)	0,41	7,42	11,44	21,92	2,033	7,12	10,99	21,92
H <sub>x</sub> (A/m)	0,15	32,19	24,30	7,87	0,730	31,56	23,37	7,87
H <sub>y</sub> /H <sub>x</sub>	2,786	0,231	0,471	2,786	2,786	0,226	0,470	2,786
arg(H <sub>y</sub> /H <sub>x</sub> )	-90°	177,51°	139,82°	-90,00°	-90,00°	166,58°	148,22°	-90,00°

Табела 6.2. – МЕЊА СЕ ПОЗИЦИЈА МЕСТА КВАРА. $ I_{gradno}  = 50 A$ ; $\cos \varphi = 0,99$ ; отпор у звездишту $R_0 = 0\Omega$ . Вод има укупну дужину $L_{v,uk} = 10km$								
	без квара	C-Z	BC-Z	ABC-Z	без квара	C-Z	BC-Z	ABC-Z
	$\lambda = 1,0$				$\lambda = 0,1$			
I <sub>a</sub> (A)	50	48,6	43,5	928,3	50	45,8	39,40	2401,5
I <sub>b</sub> (A)	50	43,2	764,8	928,3	50	44,0	3481,28	2401,5
I <sub>c</sub> (A)	50	586,1	893,0	928,3	50	3068,9	3732,48	2401,5
H <sub>y</sub> (A/m)	1,02	6,60	10,26	18,88	1,02	35,65	43,54	48,83
H <sub>x</sub> (A/m)	0,36	29,05	21,75	6,77	0,36	154,19	122,38	17,52
H <sub>y</sub> /H <sub>x</sub>	2,786	0,227	0,47	2,786	2,786	0,231	0,356	2,786
arg(H <sub>y</sub> /H <sub>x</sub> )	-90,00°	172,89°	143,70°	-90,00°	-90,00°	178,94°	128,64°	-90,00°

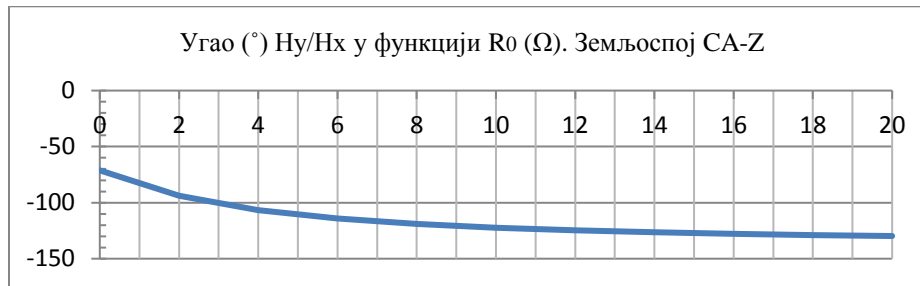
Табела 6.3. – МЕЊА СЕ ОТПОРНОСТ $R_0$ . $ I_{gradno}  = 50 A$ ; $\cos \varphi = 0,99$ ; $\lambda = 0,5$ ; Вод има укупну дужину $L_{v,uk} = 10km$								
	без квара	C-Z	BC-Z	ABC-Z	без квара	C-Z	BC-Z	ABC-Z
	$R_0 = 0 \Omega$				$R_0 = 20 \Omega$			
I <sub>a</sub> (A)	50	47,9	42,7	2716,6	50	47,7	49,0	2716,6
I <sub>b</sub> (A)	50	43,4	1353,1	2716,6	50	50,4	1468,0	2716,6
I <sub>c</sub> (A)	50	1065,6	1564,5	2716,6	50	291,2	1353,6	2716,6
H <sub>y</sub> (A/m)	1,017	12,20	18,12	55,24	1,02	3,69	15,56	55,24
H <sub>x</sub> (A/m)	0,365	53,22	40,13	19,82	0,36	12,52	7,91	19,82
H <sub>y</sub> /H <sub>x</sub>	2,786	0,229	0,452	2,786	2,786	0,295	1,966	2,786
arg(H <sub>y</sub> /H <sub>x</sub> )	-90,00°	176,31°	138,50°	-90,00°	-90,00°	170,81°	149,79°	-90,00°

Табела 6.4. – ПОРЕЂЕЊЕ РЕЗУЛТАТА. $ L_{p,ref}  = 100 \text{ A}$ ; $\cos \varphi = 0,99$ ; отпор у звездишту $R_0 = 20\Omega$ ; фактор места квара $\lambda = 0,9$ ; $\rho = 100 \Omega m$ . Вод има укупну дужину $L_{v,uk} = 10km$								
	без квара	A-Z	B-Z	C-Z	AB-Z	BC-Z	CA-Z	ABC-Z
Резултат израчунавања струја коришћењем образаца из тачака 3 и 4 овог рада								
I <sub>a</sub> (A)	100	298,1	99,9	94,4	937	96,7	830	1014,9
I <sub>b</sub> (A)	100	94,4	298,1	99,9	830	937	96,7	1014,9
I <sub>c</sub> (A)	100	99,9	94,4	298,1	96,7	830	937	1014,9
Резултат израчунавања струја коришћењем „TELARM 26“								
I <sub>a</sub> (A)	100	298	99	94	942	97	826	1015
I <sub>b</sub> (A)	100	94	298	99	826	942	96	1015
I <sub>c</sub> (A)	100	99	94	298	97	826	942	1015

Дакле, претходне табеле приказују резултате израчунавања струја и компоненти поља по моделу који је коришћен у овом раду. При томе су мењани параметри: струјно оптерећење вода, (односно модуо импедансе потрошача), место квара на воду и отпорност уземљења неутралне тачке. Промена фактора снаге (чак од 0,9 до 1.0) не утиче више од (1-2)% на резултате прорачуна.

## 7. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

На Слици-7.1 је за случај двофазног земљоспоја CA-Z, приказана функционална зависност угла количника  $\underline{H}_y/\underline{H}_x$  од вредности отпорности уземљења неутралне тачке мреже. Види се да  $R_0$  знатно утиче на угао.



Слика-7.1. Функционална зависност угла  $\underline{H}_y/\underline{H}_x$  од  $R_0$ , за двофазни земљоспој CA-Z

На основу резултата из претходних тачака, може се дати Табела 7.1 из које се уочава алгоритам за препознавање врсте земљоспоја на надземном воду.

ТАБЕЛА 7.1 – РЕЗУЛТАТИ ИЗРАЧУНАВАЊА. Параметри су мењани у опсезима $R_0 = (0 - 20)\Omega$ , $Z_p = (30 - 1000)\Omega$ , $\lambda = (0.3 - 1)$								
	без квара	A-Z	B-Z	C-Z	AB-Z	BC-Z	CA-Z	ABC-Z
$ H_y/H_x $	>1	<1	<1	<1				>1
$ H_y/H_x $	2,786	0,23-0,45	0,00-0,34	0,23-0,41	0,43-1,34	0,43-2,13	0,49-6,70	2,786
$\arg(H_y/H_x)$	$-90^\circ$	$1,7^\circ$	$146,1^\circ$	$-155,4^\circ$	$79,3^\circ$	$165,4^\circ$	$-65,7^\circ$	$-90^\circ$
	$-90^\circ$	$-19,8^\circ$	$87,2^\circ$	$-179,7^\circ$	$10,9^\circ$	$126,3^\circ$	$-138,3^\circ$	$-90^\circ$
$H_y/H_{y,ref}$	1	1,7-158	1	1,6-158	3,9-207	3,2-223	7,2-873	7,2-402
$\arg(H_y/H_{y,r})$	0	$28^\circ$	$0^\circ$	$-16^\circ$	$18,5^\circ$	$-72^\circ$	$-33^\circ$	$-33^\circ$
	0	$-26^\circ$	$0^\circ$	$-86^\circ$	$-3,5^\circ$	$-105^\circ$	$-48^\circ$	$-46^\circ$
$H_x/H_{x,ref}$	1	11-1886	8-1612	11-1887	10-1268	6-1438	7-4935	7-402
$\arg(H_x/H_{x,r})$	0	$-54^\circ$	$179^\circ$	$59^\circ$	$-83^\circ$	$51^\circ$	$3,9^\circ$	$33^\circ$
	0	$-116^\circ$	$-177^\circ$	$4^\circ$	$-166^\circ$	$7^\circ$	$-67^\circ$	$-46^\circ$



На основу добијених резултата из Табеле 7.1 може се закључити:

1. Величина  $\underline{H}_Y/\underline{H}_X$  се може користити за распознавање врсте разматраних кварова. Овај критеријум пореди вертикалну и хоризонталну компоненту поља када је вод у квару, и претходно стање вода не утиче на овај критеријум. Ако у комплексној равни, прикажемо модуо овог количника у функцији угла, (аргумента количника), добија се поларни дијаграм на Слици-7-1. Из дијаграма се види да свака врста квара има своју област и да се области не преклапају. Непреклапање области значи да постоји могућност препознавања врсте квара. Преклапање углова постоји код земљоспојева В-Z и ВС-Z али се В-Z разликује од свих осталих кварова по  $H_Y/H_{Y,ref} = 1$  па га је могуће ипак разликовати од ВС-Z.

Осим поменутог критеријума  $\underline{H}_Y/\underline{H}_X$  могуће је користити још два:  $H_X/H_{X,ref}, H_Y/H_{Y,ref}$ . По овим критеријумима се стање вода при појави квара пореди са стањем вода непосредно пре појаве квара, док је вод био у нормалном режиму рада. Дакле, стање вода са кваром се пореди са стањем непосредно пре квара, као референтним. Отуда „ref“ у ознаци величине.

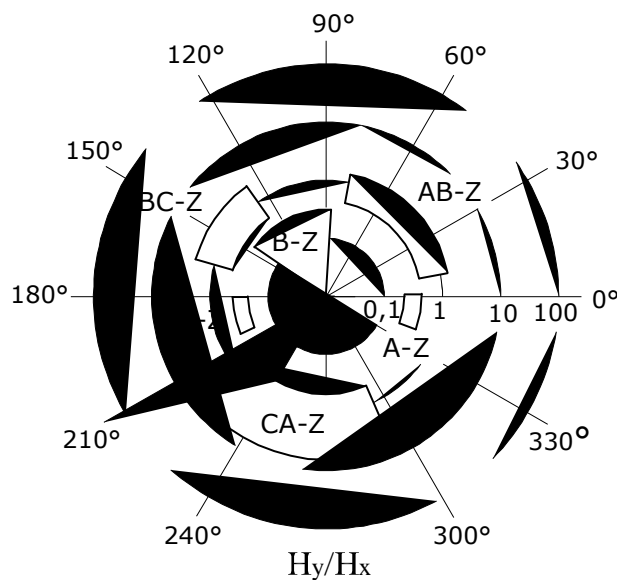
2. Ако се посматра  $H_X/H_{X,ref}$  види се из поларног дијаграма на Слици 7-2 да се области у којима је могућа појава кварова А-Z, С-Z и АВС-Z не преклапају, што опет значи да постоји могућност њиховог међусобног разликовања и разликовања у односу на друге кварове.

3. Могуће је употребити и критеријум  $H_Y/H_{Y,ref}$ . На поларном дијаграму на Слици-7.2 (десно) су приказане области појављивања кварова В-Z, АВ-Z, СА-Z и ВС-Z. Види се опет да се области не преклапају. Карактеристично је да се област која се односи на земљоспој В-Z своди на једну тачку  $|\underline{H}_Y/\underline{H}_{Y,ref}| = 1, \arg(\underline{H}_Y/\underline{H}_{Y,ref} = 0^\circ)$ .

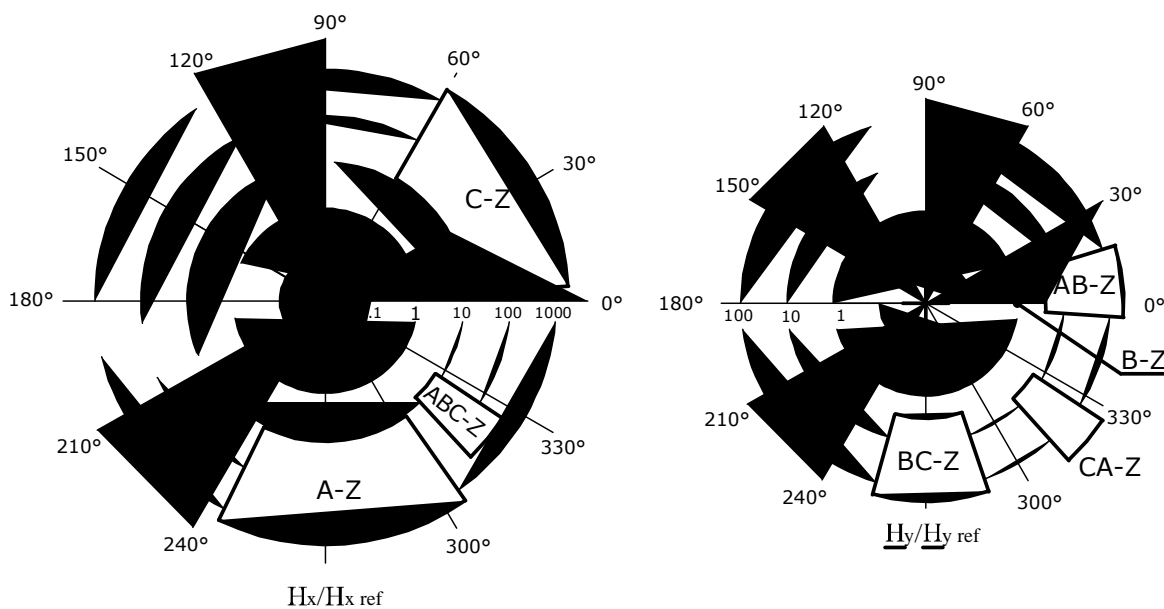
4. Нормални режим рада (пре појаве квара) и трофазни земљоспој су препознатљиви по модулу количника  $|\underline{H}_Y/\underline{H}_{Y,ref}| = 2,786$ . Овај модуо зависи само од геометрије распореда фазних проводника и за дати вод модуо количника је константан, независан од оптерећења вода, од места квара, и од вредности отпорности неутралне тачке мреже. За ова два радна режима је угао  $\arg(\underline{H}_Y/\underline{H}_X) = -90^\circ$ . Трофазни се земљоспој разликује од радног режима без квара по томе што обе компоненте поља порасту. Алтернативно се ова два режима могу препознати и по услову  $\underline{H}_Y/\underline{H}_{Y,ref} = \underline{H}_X/\underline{H}_{X,ref}$ .

5. Као критеријум да се појавио неки квар у мрежи (без препознавања врсте квара) може да послужи једноставан пораст хоризонталне компоненте поља,  $|\underline{H}_X|$ .

6. Ако се фиксира параметар  $R_0$  онда су све области на поларном дијаграму мање, и постоји већа маргина њиховог међусобног непреклапања. Како конкретан вод ради у одређеном режиму који подразумева фиксну вредност отпорности неутралне тачке, могућност да се области преклопе се смањује у односу на приказану Сликама 7-1 и 7-2.



Слика 7.1. Поларни дијаграм  $\underline{H}_Y/\underline{H}_X$  у логаритамској размери за одређивање врсте земљоспоја на воду, при варијацији параметара  $R_0 = (0 - 20)\Omega$ ,  $Z_p = (30 - 1000)\Omega$ ,  $\lambda = (0,3 - 1)$



Слика 7.2. Поларни дијаграми  $\underline{H}_Y/\underline{H}_{Y\text{ref}}$  и  $\underline{H}_X/\underline{H}_{X\text{ref}}$  у логаритамској размери за дијагностику врсте земљоспоја, при варијацији параметара  $R_0 = (0 - 20)\Omega$ ,  $Z_p = (30 - 1000)\Omega$ ,  $\lambda = (0,3 - 1)$

## 8. ЗАКЉУЧАК

Разматрани критеријуми који користе компоненте магнетног поља у околини надземног вода,  $\underline{H}_Y/\underline{H}_X$ ,  $\underline{H}_Y/\underline{H}_{Y\text{ref}}$ ,  $\underline{H}_X/\underline{H}_{X\text{ref}}$  и  $|\underline{H}_X|$  се могу (макар теоретски) користити за распознавање (дијагностику) врсте земљоспојева у мрежи. Како се употребљавају је објашњено у одељку 7. Поред критеријума анализираних у овом раду интересантно је проучити и неке друге као што је  $dI/dt$ , и прелазни период од настанка квара до устаљеног стања на које се односе једначине одељака 3 и 4.

## 9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] – ПОПОВИЋ Бранко, 1981, (друго издање), „Основи Електротехнике 2“, Грађевинска Књига, Београд, страна 44, као и израз (а) на стр. 53.
- [2] – ПОЖАР Хрвоје, 1984, (четврто издање), „Високонапонска Расклопна Постројења“, Техничка Књига, Загреб, стране 83, 84, 102.
- [3] – SKILLING H., 1974, „Electric Network“, John Wiley & Sons, страна 447.
- [4] – МИЛОЈКОВИЋ Слободан, 1985, „Теорија Електричних Кола“, Свјетлост, Сарајево, страна 108.
- [5] – LISSLING F, NEFZGER P., NOLASCO J., KAINZYK U., „Overhead Power Lines“, Springer, 2002, образац (3.12) на стр. 83 и табела 7.6 на стр. 205.
- [6] – Софтверски алат „Telarm\_26“, „Tavrida-Electric“.
- [7] – ЛЕКИЋ Ђ., ЕРЦЕГ Б., МРШИЋ П., ЗЕЉКОВИЋ Ч., 2019, „Generalized Approach for Fault Detection in Medium Voltage Distribution Networks Based on Magnetic Field Measurement“, чланак у IEEE „Transactions on Power Delivery“, Август 2019, <http://www.researchgate.net/publication/335195410>.
- [8] – КАСАШ Каролина, Докторска Дисертација „Моделовање импедансе земље као повратног проводника“, Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких наука, 2015, Прилог, стр. 113
- [9] – IEC 60909 – 3, Edition 3.0, 2009.