

## 基于磁场的小电流接地系统单相接地选线研究

王亚彩

驻马店职业技术学院, 河南 驻马店 463000

**[摘要]** 考虑到架空线周围存在准静态电磁场, 文章利用电磁场理论进行非接触式故障选线。采用以镜像法为基础的等效电荷法建立架空线周围电磁场数学模型, 分析了故障前后线路下方电磁场与  $n$  次谐波零序电压和零序电流的关系。通过比较各次谐波对电磁场的影响程度, 选取架空线下方 5 次零序谐波电磁场进行故障选线。当线路发生单相接地故障时, 与非故障线路相比较, 故障线路下方 5 次零序谐波电场和磁场的幅值和相位均发生明显改变。通过提取故障特征, 可以实现小电流接地系统的故障选线。最后利用 MATLAB 软件进行电磁场仿真, 仿真验证了该选线方法的可行性。

**[关键词]** 配电网; 小电流接地系统; 架空线; 电场; 磁场; 故障选线

DOI: 10.33142/hst.v2i4.1090

中图分类号: TM862

文献标识码: A

## Research on Single-phase Grounding Line Selection of Small Current Grounding System Based on Magnetic Field

WANG Yacai

Zhumadian Vocational and Technical College, Zhumadian, Henan, 463000 China

**Abstract:** Considering the quasi-static electromagnetic field around the overhead line, the paper makes use of the electromagnetic field theory to conduct non-contact fault line selection. Establishment of Mathematical Model of electromagnetic Field around overhead Line by equivalent charge method based on Mirror Image method. The relationship between the electromagnetic field under the line and the zero sequence voltage and zero sequence current of  $n$  harmonics before and after the fault is analyzed. By comparing the influence of each harmonic on the electromagnetic field, selecting 5 times zero sequence harmonic electromagnetic field below overhead line for fault line selection. When the single-phase grounding fault occurs, compared with the non-fault line, the amplitude and phase of the electric field and magnetic field of the five zero-sequence harmonics below the fault line are obviously changed. The fault line selection of the small-current grounding system can be realized by extracting the fault features. Finally, the simulation of the electromagnetic field is carried out by using the MATLAB software, and the feasibility of the line selection method is verified by simulation.

**Key words:** distribution network; small current grounding system; overhead line; electric field; magnetic field; fault line selection

### 引言

在我国, 配电网中消弧线圈的接入, 减小了短路电流, 使得系统容易熄弧, 但增加了电网故障选线难度。在 35kV 以下的小电流接地系统的线路故障中, 单相接地故障的几率最高, 可占总故障的 80% 左右。为了避免系统长时间带故障运行导致两点或者多点接地短路, 必须及时找到故障线路并予以切除<sup>[1]</sup>。

目前单相接地故障选线的方法主要有<sup>[2]</sup>:

- (1) 基于稳态分量: 应用最多的是基波群体比幅比相法<sup>[3]</sup>、5 次谐波法<sup>[4]</sup>、最大  $I_{\sin\psi}$  或  $\Delta(I_{\sin\psi})$  选线法<sup>[5]</sup>等。
- (2) 基于暂态分量: 首半波法<sup>[6]</sup>、能量法<sup>[7]</sup> [8]、小波选线法<sup>[9]</sup>、暂态电流法<sup>[10]</sup>等。
- (3) 基于外加诊断信号: “S” 信号注入法<sup>[11]</sup>。
- (4) 选线方法的多判据融合: 模糊综合判据法<sup>[12]</sup>等。

以上方法都在电力系统运行中起到了很重要的作用, 但是由于配电网运行情况变化很多, 每一种选线方法均不能保证 100% 选出故障线路, 因此对小电流故障选线进行更深入的研究具有现实意义。传统的选线模块均是直接接触线路, 提取线路中的电压或电流信号进行选线, 本文探讨了架空线周围电磁场和零序电压以及零序电流之间的关系, 通过测量架空线周围电磁场进行故障选线, 实现了非接触式选线, 是一种较为新颖的选线方法。

### 1 架空线路下方电磁场特性分析

#### 1.1 架空线路下方电场特性分析

架空输电线路周围的工频电磁场, 虽随时间变化, 但变化很缓慢, 此时可以忽略电磁感应作用, 即输电线路的工频电

磁场属于准静态电磁场。因为输电线路工频交变电场是一种准静态场,所以它的一些效应可以用静电场的概念来分析,即输电线路的工频电场都是由电荷产生的<sup>[13] [14]</sup>。

导线的电位和等效电荷计算如下:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

系数矩阵 $\lambda$ 是由导线的自电位系数和互电位系数构成,由镜像原理求得。地面为电位等于零的平面,地面的感应电荷可由对应地面导线的镜像电荷代替,如图1所示。

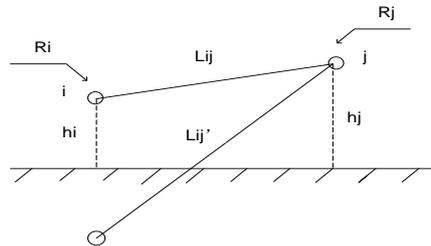


图1 电位系数的计算方法

Fig.1 the Calculation Method of Potential factor

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{R_i} \quad (2)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2L_{ij}'}{L_{ij}} \quad (3)$$

其中,  $h_i$  是输电线的架空高度,  $R_i$  是输电线的半径,  $L_{ij}'$  是  $j$  与  $i$  的镜像  $i'$  之间的距离,  $L_{ij}$  是  $j$  与  $i$  之间的距离,  $\epsilon_0$  为空气的介电常数。

用等效电荷法计算三相架空线路周围的电场强度。<sup>[15] [16]</sup>三相水平排列,在与三相导线垂直的平面上建立坐标系,如图2所示。三相坐标(XK, YK),  $K=1, 2, 3$ , 检测点  $p$  的坐标为  $(x, y)$ 。设导线无限长并与地面平行,地面电位为0,三相导线 A、B、C 的电位分别为  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ , 等效电荷分别为  $Q_A$ 、 $Q_B$ 、 $Q_C$ ,  $Q=QR+QI*j$ 。

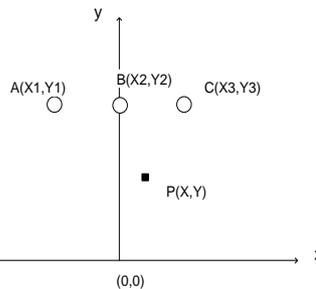


图2 水平排列的三相导线与检测点坐标系

Fig.2 Reference frame of level overhead lines and detection point

对于三相交流输电线路,由于电压为正弦相量,计算各相导线的电压时采用复数表示

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{RA} \\ U_{RB} \\ U_{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{IA} \\ U_{IB} \\ U_{IC} \end{bmatrix} \cdot j \quad (4)$$

相应地

$$\begin{bmatrix} Q_A \\ Q_B \\ Q_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{RA} \\ Q_{RB} \\ Q_{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{IA} \\ Q_{IB} \\ Q_{IC} \end{bmatrix} \cdot j \quad (5)$$

则

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于三相输电线路,  $F = \lambda^{-1}$ 。

则

$$\begin{bmatrix} Q_{RA} \\ Q_{RB} \\ Q_{RC} \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} U_{RA} \\ U_{RB} \\ U_{RC} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{IA} \\ Q_{IB} \\ Q_{IC} \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} U_{IA} \\ U_{IB} \\ U_{IC} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$Q_{RA}$ 、 $Q_{RB}$ 、 $Q_{RC}$  和  $Q_{IA}$ 、 $Q_{IB}$ 、 $Q_{IC}$  分别为待求 A、B、C 三相输电线的等效电荷的实部和虚部。由三相电压在 P 点合成的电场强度分为水平方向电场强度  $E_X$  和垂直电场强度  $E_Y$ , 分别表示为

$$E_X = [H_1 \quad H_2 \quad H_3] \begin{bmatrix} Q_A \\ Q_B \\ Q_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$E_Y = [L_1 \quad L_2 \quad L_3] \begin{bmatrix} Q_A \\ Q_B \\ Q_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$H_k = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{x-x_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} - \frac{x-x_k}{(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2} \right] \quad (11)$$

$$L_k = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{y-y_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} - \frac{y+y_k}{(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2} \right] \quad (12)$$

将式求出的等效电荷代入

$$E_{XR} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^3 Q_{Ri} \left[ \frac{x-x_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} - \frac{x-x_k}{(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2} \right] \quad (13)$$

$$E_{Xi} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^3 Q_{Ii} \left[ \frac{x-x_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} - \frac{x-x_k}{(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2} \right] \quad (14)$$

$$E_{YR} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^3 Q_{Ri} \left[ \frac{y-y_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} - \frac{y+y_k}{(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2} \right] \quad (15)$$

$$E_{Yi} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^3 Q_{Ii} \left[ \frac{y-y_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} - \frac{y+y_k}{(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2} \right] \quad (16)$$

$$\text{则 } E_X = E_{XR} + E_{Xi} \cdot i \quad (17)$$

$$E_Y = E_{YR} + E_{Yi} \cdot i \quad (18)$$

由 13、14、15 和 16, 当检测点靠近输电线,  $(x, y) \rightarrow (x_k, y_k)$  时  $\lim (x-x_k) \rightarrow 0$ , 水平电场信号远弱于垂直电场信号, 线路下方电场取决于垂直电场  $E_Y$ , 水平电场  $E_X$  忽略不计。

## 1.2 线路下方磁场特性分析

导线位置为  $(d, h)$ , 检测点为  $(x, y)$ , 则该导线产生的磁场为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho} \quad (19)$$

其中,  $\rho$  为导线距检测点的距离,  $\mu_0$  为真空磁导常数,  $I$  为导线中流过的电流。

输电线路工频交变电场是一种准静态场, 工频磁场仅由电流产生, 即可以认为工频电场和磁场是分开。在一般情况

下,只考虑处于空间的导线,而不考虑它的镜像已足够精确[17]<sup>[18]</sup>。在图 2 相确定的平面内,产生的磁场由三相电流共同产生。由于电流为正弦相量,计算各相导线的电压时采用复数表示

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{RA} \\ I_{RB} \\ I_{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{IA} \\ I_{IB} \\ I_{IC} \end{bmatrix} \cdot j \quad (20)$$

和电场类似,线路下方的磁场由水平磁场 BX 和垂直磁场 BY 组成,则

$$B_X = [M_1 \quad M_2 \quad M_3] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B_Y = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中,

$$M_k = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{y - y_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (23)$$

$$N_k = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (24)$$

则三相合成的磁场为

$$B_X = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^3 I_i \frac{y - y_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (25)$$

$$B_Y = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^3 I_i \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (26)$$

根据式 23 和 24 当检测点水平靠近输电线时,垂直磁场信号远弱于水平磁场信号,线路下方电场取决于水平磁场 BX,垂直磁场 BY 忽略不计。

## 2 小电流接地系统单相接地故障分析

系统有多条线路存在,且考虑变电站设备对地电容,故障系统模型如图 3 所示。C01、C02 和 C0B 分别是各路的对地电容,则系统总的对地电容  $C \Sigma = C01 + C02 + C0B$ ,当系统 L2 馈线 C 相发生单相接地故障时,接地电阻为 R,实线箭头为容性电流,虚线箭头为感性电流,线路电流分布如图所示。

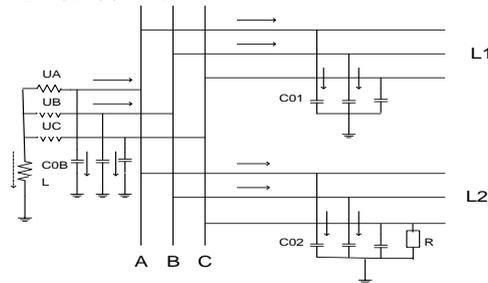


图 3 小电流接地系统故障模型

Fig.3 Fault model of Small current grounding system

系统 n 次谐波零序电压为

$$\begin{aligned} 3\dot{U}_0(n) &= \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C \\ &= 3\cos\theta \cdot e^{j(\pi-\theta)} \end{aligned} \quad (27)$$

其中,

$$\theta = \arctan \left( \frac{1}{R \left( 3n\omega C - \frac{1}{n\omega L} \right)} \right), \omega \text{ 为基波频率, } n \text{ 为谐波次数。}$$

对于非故障线路: C 相电流为 0, A 相和 B 相流有自身的电容电流。

则非故障 L1 馈线 n 次谐波零序电流为

$$\begin{aligned} 3\dot{i}_{01}(n) &= \dot{i}_{A1} + \dot{i}_{B1} + \dot{i}_{C1} \\ &= jn\omega C_{01}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) \\ &= 3jn\omega C_{01}\dot{U}_0 \end{aligned} \quad (28)$$

对于故障线路：在 A 相和 B 相上，与非故障的线路一样，流有它自身的电容电流 IA2 和 IB2，不同之处是在接地点要流回全系统 A 相和 B 相对地的电容电流之总和以及电感分量的电流 IL，因此从接地点流回的总电流为

$$I_f = I_L + I_{C\Sigma} \quad (29)$$

式中，IL 为消弧线圈电流，用 L 表示其电感，则  $I_L = 3U_0 / jn\omega L$ ；

ICΣ 为全系统的对地电容电流，则

$$I_{C\Sigma} = I_{A1} + I_{B1} + I_{A2} + I_{B2} + I_{AB} + I_{BB} \quad (30)$$

从 C 相流出的电流可表示为

$$I_{C2} = -I_f \quad (31)$$

则在故障 L2 馈线始端 n 次谐波零序电流为

$$3\dot{i}_{02}(n) = -3jn\omega \left( C_{0\Sigma} - C_{02} + \frac{1}{3(n\omega^2)L} \right) \dot{U}_0 \quad (32)$$

当 n 取足够大时，

$$C_{0\Sigma} - C_{02} + \frac{1}{3(n\omega^2)L} > 0 \quad (33)$$

由于 n 次谐波零序电压和零序电流很小，为使其在架空线下合成的电磁场便于测量，因而需选择最适合的谐波。根据式 28、29 和 33，n 次谐波主要受对地电容、消弧线圈、接地电阻及谐波次数的影响。

对于 35kV 以下小电流接地系统，在对地电容、消弧线圈和接地电阻一定的情况下，对比各次谐波产生的电场强度如图 4 所示。

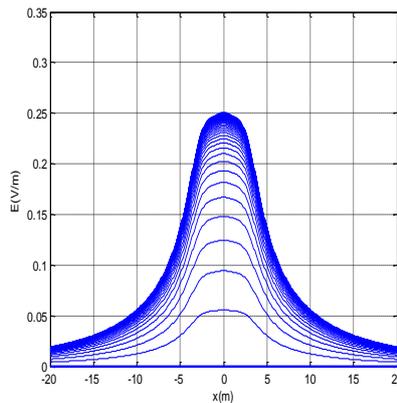


图 4 各次谐波产生的电场强度

Fig. 4 the electric field strength generated by Each harmonic

由图可以看出：随着 n 的增大，n 次谐波零序电压合成出的电场逐渐增大，在架空线下更便于测量。

考虑到随着 n 的增大谐波含量越来越低且主要以奇次为主，选取 5 次谐波零序电压和 5 次谐波零序电流最为合适。

综上所述：利用 5 次谐波零序电压电流在架空线下合成的电磁场变化进行故障选线。

### 3 仿真验证

在上述水平排列的 10kV 架空线结构下，架空线长度为 20km，导线架空高度为 6m，相间距为 2.5m，导线的横截面积为 150mm<sup>2</sup>，避雷线在架空线上方 2m 高度，横截面积为 70 mm<sup>2</sup>，计算得  $C_{01}=C_{02}=C_{0B}=0.535 \mu F$ ，系统单相分布总电容  $C_{0\Sigma}=1.605 \mu F$ ， $L=0.518H$ ，消弧线圈的过补偿程度  $P=10\%$ ，接地电阻为  $50 \Omega$ ， $\theta=45^\circ$ ，检测高度为 1.5m。

图 5 为架空线路的仿真模型，三相水平排列。图中水平直线为检测点所在的位置。

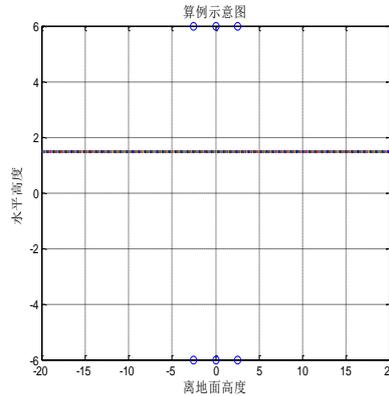


图 5 架空线仿真模型

Fig.4 Overhead line simulation model

图 6 电场强度的变化曲线，其中曲线 1 为故障前垂直电场幅值的变化，曲线 2 为故障后垂直电场幅值变化。从图中可以看出当线路发生单相接地故障之后，架空线路正下方电场强度增大。

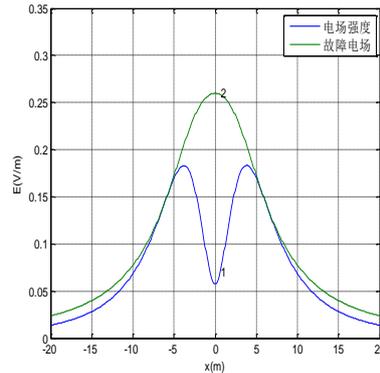


图 6 故障前后线路的电场强度

Fig.4 the electric field strength of prefault and fault

图 7 为故障后各线路的磁场强度，曲线 1 为故障后非故障线路磁场强度的变化曲线，曲线 2 为故障后故障线路磁场强度的变化。从图中可以看出：故障线路的磁场强度远大于非故障线路的磁场强度。

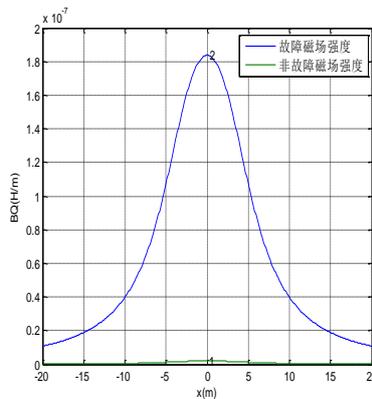


图 7 故障后各线路的磁场强度

Fig.4 the magnetic field intensity of prefault and fault

图 8 为故障前后电场和磁场的相位，曲线 1 为故障前系统的额电场相位，曲线 2 为故障后的电场相位，曲线 3 为

故障前的磁场相位，曲线4为故障线路的磁场相位，曲线5为非故障线路的磁场相位。从图中可以看出：

故障线路的磁场相位滞后于电场相位 90°；

非故障线路磁场相位超前于电场相位 90°。

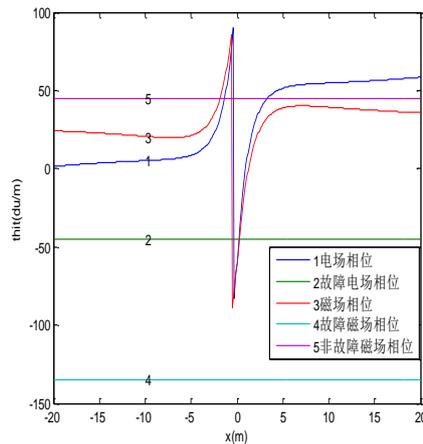


图8 故障前后电场和磁场的相位

Fig.4 the Phase of Electric and magnetic fields of pre-fault and fault

#### 4 结束语

在中性点经消弧线圈接地系统中，消弧线圈主要补偿的是零序基波电流，所以故障线路和健全线路流过的零序电流方向相同，数值上相差不大，因此无法检测出故障线路。本文建立了配电网架空线电磁场模型，分析了不同谐波次数对架空线下方电磁场的影响程度，选取 5 次谐波零序电压和零序电流进行检测；探讨了架空线下空间 5 次谐波电磁场与 5 次谐波零序电压和 5 次谐波零序电流之间的关系，利用电磁场强度和相位的变化判断出线路，并运用 Matlab 进行了仿真，仿真证明了理论的可行性。

#### [参考文献]

- [1] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 4(08): 141-148.
  - [2] 鲁改凤, 化雨, 金小兵, 任志强. 小电流接地系统单相接地故障选线方法探究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 12(2): 44-49.
  - [3] 郝玉山, 杨以涵, 任元恒, 等. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理[J]. 电力情报, 1994, 4(2): 5-19.
  - [4] 陈志亮, 范春菊. 基于 5 次谐波突变量的小电流接地系统选线[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 2(05): 37-41.
  - [5] 檀国彪, 涂东明, 陈大鹏. 基于最大  $I_{sin\psi}$  或  $\Delta(I_{sin\psi})$  原理的微机选线装置[J]. 中国电力, 1995, 4(07): 16-20.
  - [6] 郝来迎, 王崇林, 布朋生, 彭杨. 基于首半波与有功分量的综合选线装置[J]. 煤矿机械, 2008, 1(08): 114-116.
  - [7] 李健, 卢继平, 黎颖, 何尔文. 基于暂态零序电流频带能量的配电系统接地选线方法研究[J]. 继电器, 2007, 11(2): 1-4.
  - [8] 朱丹, 贾雅君, 蔡旭. 暂态能量法原理选线[J]. 电力系统自动化, 2004, 24(3): 75-78.
  - [9] 龚静. 利用小波包分解系数实现配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 24(1): 94-99.
  - [10] 赖平, 周想凌, 邱丹. 小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 1(04): 51-57.
  - [11] 潘贞存, 张慧芬, 张帆, 桑在中. 信号注入式接地选线定位保护的分析和改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 1(04): 71-75.
  - [12] 赵鹏, 刘智显, 王炳革. 基于模糊集理论的小电流接地系统单相故障多判据定位研究[J]. 现代电力, 2010, 3(06): 21-25.
  - [13] 马娜, 邹澎, 张海东, 张雅歌. 高压输电线附近工频电场模型及仿真研究[J]. 微计算机信息, 2009, 3(07): 210-211.
- 作者简介: 王亚彩 (1990-), 女, 汉族, 河南驻马店人, 硕士研究生, 从事教学科研工作。