

# 配网单相接地故障的零序暂态电流选线研究

衡 星

(国网连云港供电公司, 江苏 连云港 222002)

**摘 要:** 为提高配网单相接地故障选线方法准确性, 分析了故障发生后的暂态电流分量特征, 提出了一种以初始故障角为判据, 将零序暂态电容电流法和电感电流法相结合的选线方法。该方法中, 当出现大故障角时, 利用零序暂态电容电流特征进行选线。当出现小故障角时, 利用暂态电感电流特征进行选线。当故障角为中间值时, 应同时采用暂态电容电流和暂态电感电流特征进行选线。Matlab 实例仿真结果表明了所提方法的有效性。

**关键词:** 消弧线圈; 单相接地; 故障选线; 零序暂态电流

## 0 引言

由于熄弧性能好、可靠性高、运行维护量小等优点, 中性点经消弧线圈接地方式普遍在城市配网中采用。但配网分支线较多、故障点电流微弱, 当发生单相接地时, 这种中性点接地方式的故障选线比较困难。

目前, 单相接地故障选线可分为基于稳态电流信号原理和暂态电流信号原理两类<sup>[1]</sup>。由于小电流接地故障中, 稳态电流幅值小, 易受到接地电阻、电弧和电流互感器不平衡电流的影响, 灵敏度低, 因此基于稳态电流信号原理<sup>[2-5]</sup>的选线效果不佳。相比稳态电流, 暂态电流信号幅值通常较高, 容易判别, 故基于暂态电流信号的接地故障选线方法成为工程首选方案<sup>[6]</sup>。当前的暂态电流信号接地故障选线通常利用暂态零序电流突变量、能量、幅值或极性来实现, 因此需提取接地零序电流的暂态特征分量, 目前已有大量关于特征分量分析和提取的报道<sup>[7-10]</sup>。然而系统故障初始时刻对暂态量的成分和大小影响极大, 若采用单一方法进行故障选线, 效果往往不够理想, 故应根据接地时刻初始故障角的不同来修正选线方法, 实现精确选线, 该方面的研究相对较少。

为提高配网单相接地故障选线方法的精度和实用性, 本文分析了故障发生后的暂态电流分量特征, 提出了一种以初始故障角为判据, 零序暂态电容电流和电感电流相结合的选线方法, 实例仿真表明了该方法的有效性。

## 1 单相接地故障暂态电流分析

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时, 流过故障点的暂态电流由暂态电容电流和暂态电感电流两部分组成。中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时的等效电路如图 1 所示。

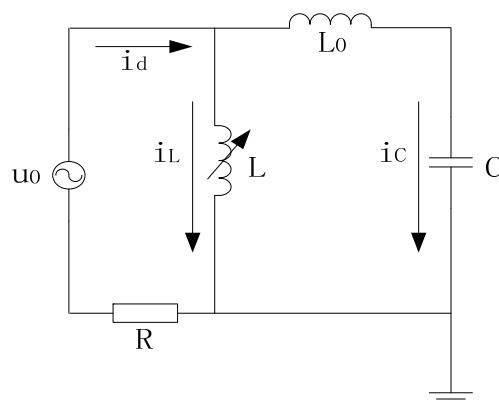


图 1 经消弧线圈接地配电网单相接地零序等效回路图

图中,  $C$  为中性点经消弧线圈接地系统的三相零序电容,  $L_0$  为三相电路和电源变压器等在零序回路中的等效电感,  $R$  为零序回路中的等效电阻 (其中包括故障点的接地电阻和弧道电阻),  $L$  为消弧线圈的电感,  $u_0$  为故障激励电压, 与故障前故障点电压大小相等, 方向相反。当分析电容电流的暂态特性时, 因其自由振荡频率一般较高, 考虑到消弧线圈的电感  $L \gg L_0$ , 故图中的  $L$  通常可以不予考虑。

根据图 1 可列出如下微分方程式<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} Ri_C + L_0 \frac{di_C}{dt} + \frac{1}{C_0} \int i_C dt = U_0 \\ U_0 = U_m \sin(\omega t + \phi) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $i_c$  为暂态电容电流,  $U_m$  为相电压的幅值,  $\omega$  为工频电流的频率,  $\phi$  为接地时刻的初始故障角。

利用(1)式求得  $i_c$  的时域表达式:

$$\begin{aligned} i_c &= i'_c + i''_c \\ &= I_{cm} \left[ \left( \frac{\omega_f}{\omega} \sin \phi \sin \omega t - \cos \phi \cos \omega t \right) e^{-\delta t} \right. \\ &\quad \left. + \cos(\omega t + \phi) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $I_{cm}$  为电容电流的幅值;  $\omega_f$  为暂态自由振荡分量的角频率;  $\delta$  为自由振荡分量的衰减系数, 且有  $\delta = 1/\tau_c = R/2L_0$ ,  $\tau_c$  为回路的时间常数。

同样, 易得消弧线圈支路的暂态电感电流表达式如下:

$$i_L = I_{Lm} \left[ \cos \phi e^{-\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \phi) \right] \quad (3)$$

其中,  $I_{Lm}$  为电感电流的幅值,  $\tau_L$  为电感回路的时间常数。

暂态接地电流  $i_d$  由暂态电容电流和暂态电感电流叠加而成, 故由(2)、(3)式得

$$\begin{aligned} i_d &= i_c + i_L \\ &= (I_{cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \phi) \\ &\quad + I_{cm} \left[ \frac{\omega_f}{\omega} \sin \phi \sin \omega t - \cos \phi \cos \omega t \right] e^{-\frac{t}{\tau_c}} \\ &\quad + I_{Lm} \cos \phi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \end{aligned} \quad (4)$$

可见,  $i_d$  由接地电流稳态分量和接地电流的暂态分量组成。稳态分量等于稳态电容电流和稳态电感电流的幅值之差; 暂态分量为电容电流的暂态自由振荡分量与电感电流的暂态直流分量之和。当单相接地故障发生后, 暂态电容电流衰减较快, 而暂态电感电流衰减较慢。而  $\phi = 0^\circ$  时, 暂态电感电流最大, 暂态电容电流最小, 暂态接地电流主要由暂态电感电流表现。当  $\phi = 90^\circ$  时, 暂态电容电流最大, 暂态电感电流最小, 暂态接地电流主要由暂态电容电流表现。

## 2 基于零序暂态电流的选线方法

### 2.1 暂态电容电流选线法

当中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障的瞬间, 系统中性点产生零序电压, 系统三相电压同时降低(或升高), 使得线路三相零序电容同时放电(或充电)。此时暂态电容电流的分布如图 2 所示。当故障相电压突然降低, 故障相对地电容放电, 此电流通过母线而流向故障点, 放电电流衰减很快, 其振荡频率高达几千赫兹, 此电流的频率特性主要由电网中线路的参数(电阻和电感的数值)、故障点的位置以及过渡电阻的数值决定。而非故障相电压降低引起的放电电容电流通过电源形成回路, 最终流向故障点, 此放电电流由于回路中电感量较大, 衰减较慢, 振荡频率较低(仅为数百赫兹)。

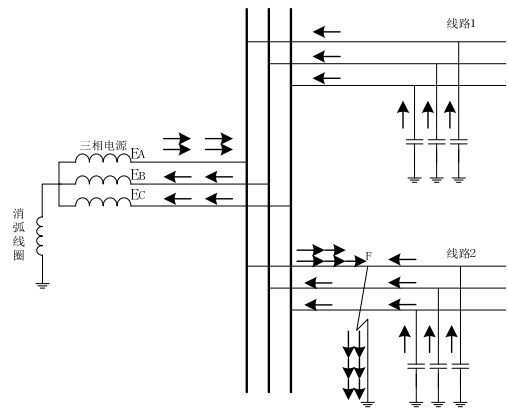


图 2 接地暂态电容电流的分布

由上图可知故障线路的零序暂态电容电流最大, 而非故障线路的零序暂态电容电流相对较小, 而且两者的暂态电流方向相反。故可利用零序暂态电容电流的方向和大小等信息进行故障选线和定位。

### 2.2 暂态电感电流选线法

当系统发生单相接地故障时, 系统中性点产生零序负电压(正电压), 消弧线圈上产生由接地点流向中性点(由中性点流向接地点)接地点形成回路, 此电流的频率很低, 此电流与故障点的位置, 接地电阻的大小等有关。且只有故障点之前的线路上才能检测到零序暂态电感电流, 故零序暂态电感电流这一特性可用于故障选线和定位。接地暂态电感电流的分布如图 3 所示。

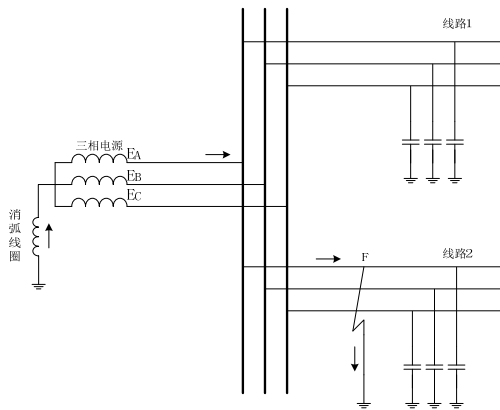


图3 接地暂态电感电流的分布

### 2.3 零序暂态电感电流和电容电流结合选线法

由（4）式的分析，提出如下选线判据：

判据一：当 $\phi$ 较大时，单相接地暂态电感电流较小，不易测量，但暂态电容电流较大，故应利用暂态电容电流选线法进行故障选线；

判据二：当 $\phi$ 较小时，暂态电容电流较小，不易测量，但单相接地暂态电感电流较大，故应利用暂态电感电流法进行故障选线；

当 $\phi$ 处中间值时，同时利用判据一和判据二进行故障选线。本文提出的这种故障选线方法利用故障角作为判据的新方法，在大故障角和小故障角时采用不同的方法进行选线，可弥补单独采用暂态电感电流或电容电流选线的不足，增加选线准确性。

## 3 实例仿真

### 3.1 仿真模型的建立

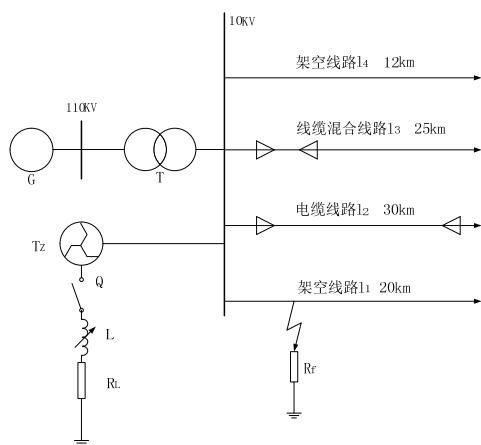


图4 中性点经消弧线圈接地系统结构

仿真模型中采用的中线点经消弧线圈接地系统

由4条线路组成的辐射状网络，如图4所示。模型采用无限大电源，主变压器采用 Three-Phase Transformer 模型，变比为 110kV/10kV，联结组别为 Yg/Yn，容量为 31.5MVA；Yn 侧中性点经消弧线圈接地，补偿度为过补偿 10%；接地电阻为 20 $\Omega$ 。输电线路采用贝杰龙数学模型，仿真线路参数如表1，各线路的长度、组成成分如表2所示。

表1 仿真线路参数

线路参数	[R1 R0]	[L1 L0]	[C1 C0]
	单位: $\Omega$	单位: mH	单位: nF
架空线	[0.17 0.23]	[1.21 5.48]	[9.7 6]
电缆	[0.193 1.93]	[0.422 1.477]	[143 143]

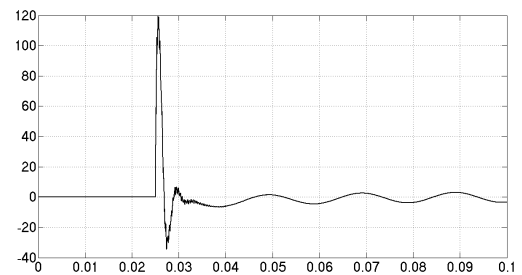
表2 仿真线路长度

线路 (km)	L1	L2	L3	L4
架空线	20	0	10	12
电缆	0	30	15	0

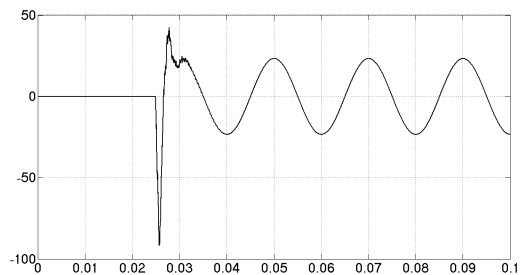
### 3.2 单相接地故障仿真分析

#### 3.2.1 $\phi = 90^\circ$ 时仿真分析

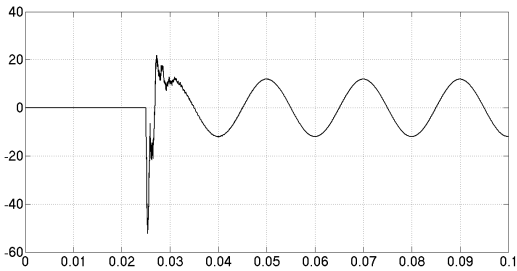
设线路 L1 发生单相接地故障，故障相为 A 相，故障点距离母线 5km，故障时刻为 0.025s，即 A 相电压达到最高值时，发生单相接地故障，仿真得到各线路零序电流、零序电压、三相电压的波形，如图5所示。



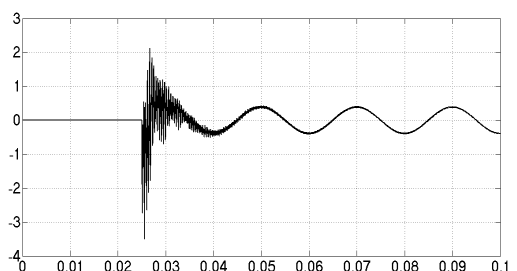
(a)线路1 零序测量电流



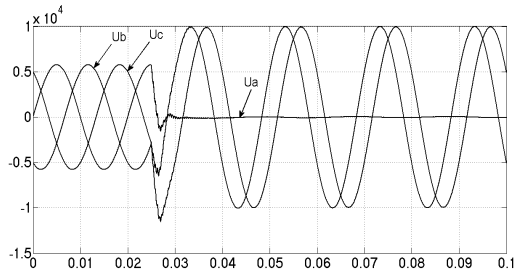
(b) 线路2 零序测量电流



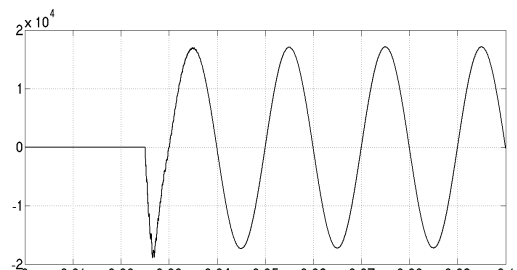
(c) 线路 3 零序测量电流



(d) 线路 4 零序测量电流



(e) 母线三相电压波形



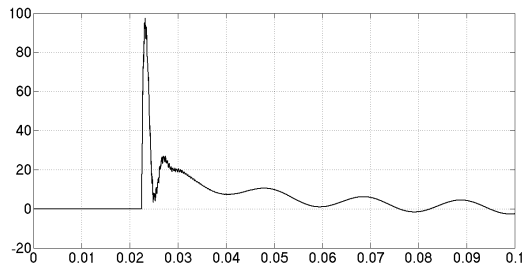
(f) 母线零序电压波形

图 5 各线路仿真波形图

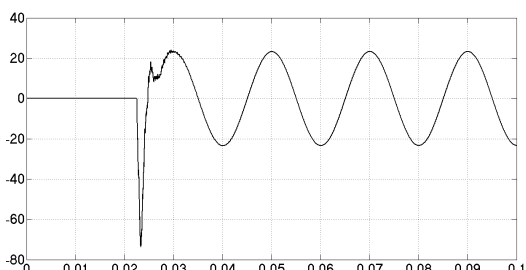
由图 5 可见，当单相接地故障发生在故障相电压峰值附近时，故障线路和非故障线路在故障起始时都有较高的高频振荡频率，故障线路与非故障线路的零序测量电流的暂态高频信号方向相反，而且故障线路的零序电流幅值大于非故障线路，符合选线判据一的选线特征，可以准确选线。

3.2.2  $\varphi = 45^\circ$  时仿真分析

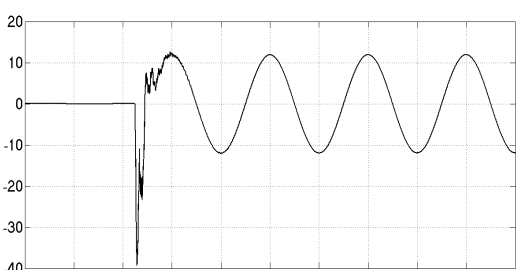
设线路 L1 发生单相接地故障，故障相为 A 相，故障点距离母线 5km,故障时刻为 0.0225s，即 A 相电压处于  $45^\circ$ 时，发生单相接地故障，仿真得到各线路零序电流、零序电压、三相电压的波形，如图 6 所示。



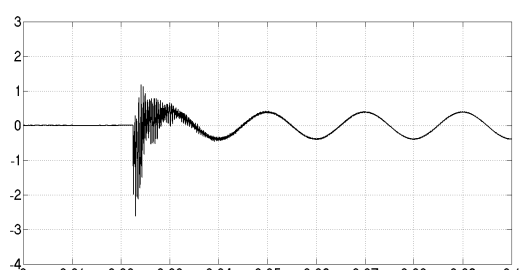
(a)线路 1 零序测量电流



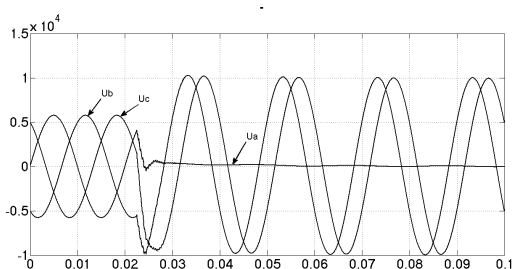
(b) 线路 2 零序测量电流



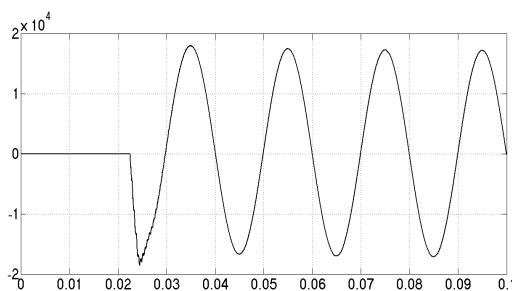
(c) 线路 3 零序测量电流



(d) 线路 4 零序测量电流



(e) 母线三相电压波形



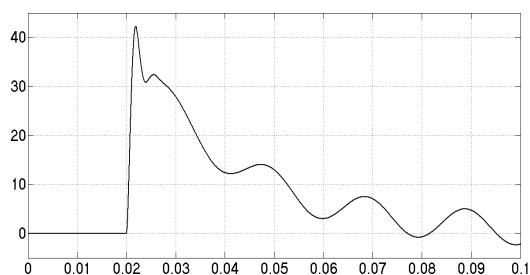
(f) 母线零序电压波形

图 6 各线路仿真波形图

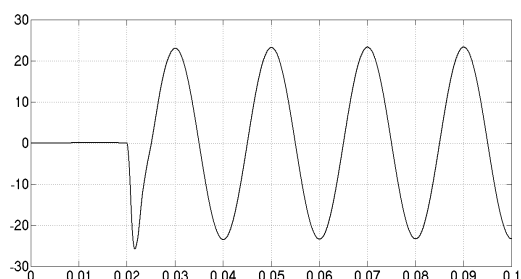
由图 6 可见, 当单相接地故障发生在故障相电压  $45^\circ$  处, 故障线路和非故障线路在故障起始时都有较高的高频振荡频率, 故障线路与非故障线路的高频电流方向相反, 且故障线路高频电流幅值大于非故障线路高频信号, 符合选线判据一中的选线特征; 故障线路有衰减直流分量流过, 而非故障线路上基本没有衰减直流分量, 符合选线判据二中的选线特征。可以同时使用选线判据一和判据二进行故障选线, 可以准确选线。

### 3.2.3 $\varphi = 0^\circ$ 时仿真分析

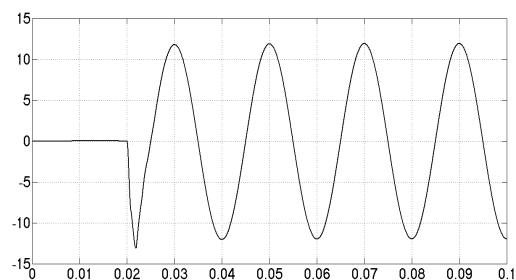
中性点经消弧线圈接地系统, 线路 L1 发生单相接地故障, 故障相为 A 相, 故障点距离母线 5km, 故障时刻为 0.02s, 即 A 相电压接近于 0 时, 发生单相接地故障, 仿真得到各线路零序测量电流、零序电压、三相电压的波形, 如图 7 所示。



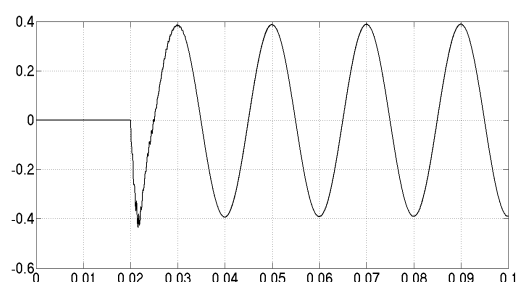
(a) 线路 1 零序测量电流



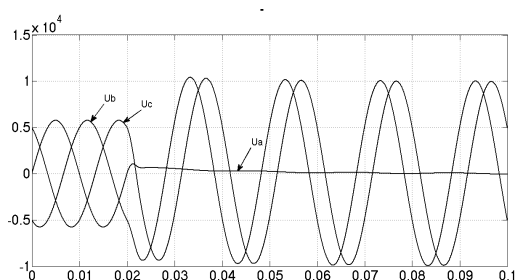
(b) 线路 2 零序测量电流



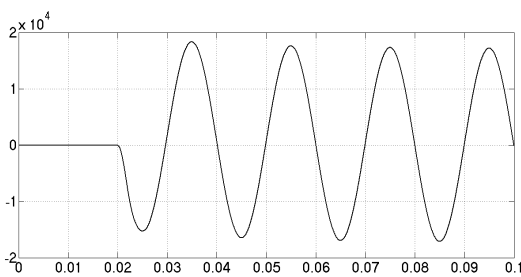
(c) 线路 3 零序测量电流



(d) 线路 4 零序测量电流



(e) 母线三相电压波形



(f) 母线零序电压波形

图 7 各线路仿真波形图

由图可见, 当单相接地故障发生在故障相电压

为 0 时,故障线路在故障发生后,有衰减直流分量流过,非故障线路在故障发生后,基本没有衰减直流分量。符合选线判据二的选线特征,可以准确选线。

#### 4 结束语

本文对中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障时暂态电流过程进行了分析,提出了一种以初始故障角为判据,零序暂态电容电流和电感电流相结合的选线方法,并利用 Matlab 建立了实例仿真模型,仿真结果显示当故障角较大时,选线判据一的选线特征明显,可准确选线;当故障角较小时,选线判据二的选线特征明显,亦可准确选线;在故障角接近  $45^\circ$  时,选线判据一和判据二选线特征均比较明显,可以同时作为选线判据。本文所提出的选线方法将两种选线方法结合使用,弥补了各自的缺点,增加了选线的准确性。

#### 参考文献

- [1] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2):146-152.
- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.
- [3] 桑在中, 潘贞存, 李磊, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线和定位的新技术[J]. 电网技术, 1998, 22(10): 22-26
- [4] 徐丙垠, 薛永端, 李天友. 小电流接地故障选线技术综述[J]. 电力设备, 2005, 6 (4): 1-7.
- [5] 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, 18(5): 37-41, 69.
- [6] 束洪春, 朱梦梦, 黄文珍, 等. 基于暂态零序电流时频特征量的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9):1-6.
- [7] 张艳霞, 王清亮. 应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 76-80.
- [8] 束洪春, 赵文渊, 彭仕欣. 配电网电缆-线混合线路故障选线的 HHT 检测方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 4-9.
- [9] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.
- [10] 王耀南, 霍百林, 王辉等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
- [11] 束洪春. 配电网故障选线[M]. 机械工业出版社, 2008.

#### 作者简介:

衡 星 (1990-) 女, 江苏连云港人, 从事电气试验工作。