

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181088

## 小电流接地配电线路弧光高阻接地故障电压特征分析

邱进<sup>1,2</sup>, 崔鑫<sup>3</sup>, 田野<sup>1,4</sup>, 王宾<sup>3</sup>, 李冠华<sup>4</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084;

4. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110003)

**摘要:** 中性点非有效接地系统单相弧光高阻接地故障检测的难点在于如何实现灵敏启动。现有的检测方法以零序电压的幅值越限作为启动判据, 但是由于对越限阈值的整定直接影响着检测的灵敏性和可靠性, 在实际运行中往往难以同时兼顾。针对该问题, 基于现场实测故障录波数据, 采用数值统计、傅里叶变换、图形对比等方法从时域、频域角度分析了单相弧光高阻故障的暂态电压特征。搭建了弧光高阻接地故障暂态模型, 仿真验证了所提取的暂态电压特征的正确性, 为后续故障选线装置应对单相弧光高阻故障的灵敏启动判据开发提供了基础。

**关键词:** 小电流接地; 配电线路; 弧光; 高阻接地; 零序电压

### Analysis of the arc high impedance grounding faults voltage characteristics in non-effective grounding feeders

QIU Jin<sup>1,2</sup>, CUI Xin<sup>3</sup>, TIAN Ye<sup>1,4</sup>, WANG Bin<sup>3</sup>, LI Guanhua<sup>4</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Department of Electric Engineering of Tsinghua University), Beijing 100084, China; 4. State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110003, China)

**Abstract:** The difficulty of single-phase arc high impedance grounding fault detection in neutral ineffectively grounded system lies in how to realize sensitive start. The current detection methods use the zero sequence voltage amplitude limit as the starting criterion, but the setting of the limit value directly affects the sensitivity and reliability of detection, it is often difficult to take into account both in practical operation. Aiming at this problem, based on the field wave recording data, this paper analyzes the transient voltage characteristics in the event of the single-phase arc high impedance grounding fault by means of numerical statistics, Fourier transform and graph comparison from the time domain and frequency domain. Meanwhile, the transient model of arc high impedance grounding fault is established, which verifies the validity of the transient voltage characteristics features extracted. It lays a foundation for the subsequent development of sensitive start criterion of faulty line selection device when single-phase arc high impedance grounding fault occurs.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. GY71-17-032) "Study on Multi-State Complex Fault Feature Library and Key Technology of Adaptive Identification in Distribution Networks".

**Key words:** small current grounding; distribution lines; arc; high impedance grounding; zero sequence voltage

## 0 引言

配电网结构多变(拉手、开环)、系统接地方式多样(不接地、消弧线圈接地、小电阻接地)、电缆

化或架空电缆混合接线率逐年增高、故障类型复杂(雷击、树闪、断线、人身触电等), 导致了非有效接地系统的故障选线正确率一直不高<sup>[1-2]</sup>。

近年来, 随着基于行波量、暂态量的故障选线技术<sup>[3-9]</sup>的不断推广和应用, 故障选线的正确率得到了显著的提高, 但是在弧光高阻, 特别是间歇性、发展性弧光高阻故障时, 现有的技术仍然存在着失

**基金项目:** 国家电网公司总部项目资助“配电网多态复杂故障特征库及自适应辨识关键技术研究”(GY71-17-032)

效等突出问题。其根源在于，现有的选线技术为了保证动作的可靠性，均以零序电压幅值(有效值)作为启动或者闭锁信号，而零序电压的启动门槛整定非常关键<sup>[10-11]</sup>。整定过低会导致装置受负荷波动或者现场操作等频繁报警；而整定过高就会导致弧光高阻等弱故障电流形态下的装置拒动。

因此，传统的面向单一故障的以幅值、相位、极性、方向等特征的故障分析方法，在应对配电网弧光弱故障时已经显现了明显的不足，亟待开展研究，掌握复杂配电网间歇性弧光高阻故障特征。

文献[12-13]分析了中性点电压与相电压间的稳态相位关系，文献[14-15]从暂态的角度分析了电压、电流间的极性关系和瞬时无功功率方向特征。但是上述相关文献仍然采用的是传统的幅值、相位、极性等特征来描述电压量，而缺乏对电压暂态特性的详细分析。

针对以上问题，本文基于某现场实测的故障录波数据，从时域、频域等角度分析了弧光高阻接地故障发生时显著的暂态电压特征；用 PSCAD 软件搭建了谐振接地系统弧光高阻接地故障的仿真模型，对相关的电压特征进行了仿真验证。

### 1 弧光高阻故障试验概况

现场试验变电站有两台主变压器，其接线方式为 10 kV 单母线分段(I、II 两段)，中性点经消弧线圈接地，选用与 II 段 10 kV 母线相连接的一条馈线作为试验线路，加装接地柜后，将馈线经潮湿的树枝接地，人工模拟弧光高阻接地故障，其接线简图如图 1 所示。

现场以潮湿的树枝为接地介质共进行了 7 次试验，其中 5 次试验(编号为 1~5)发生了间歇性弧光高阻接地故障，2 次试验(编号为 6、7)发生了稳定性高阻接地故障。为了方便分析，以下电压均取标么值。

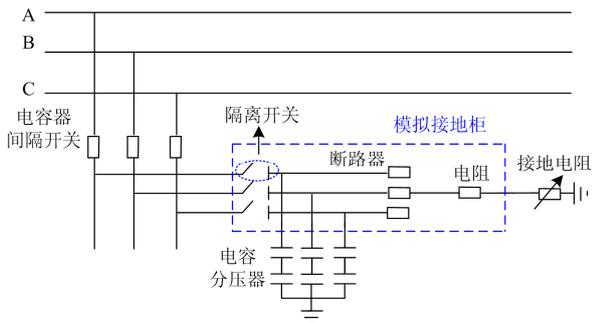


图 1 弧光高阻接地试验接线简图

Fig. 1 Schematic diagram of arc high impedance grounding test

## 2 弧光高阻故障电压特征分析

### 2.1 随机性熄、燃弧及相位差特性

用零序电压来表征电弧的熄灭和重燃，多次间歇性弧光高阻接地试验的分析结果与第 3 次试验中的零序电压波形基本一致，如图 2 所示。图中出现了明显的熄弧、燃弧现象，且零休熄弧的时间较长，间歇性特征非常明显。

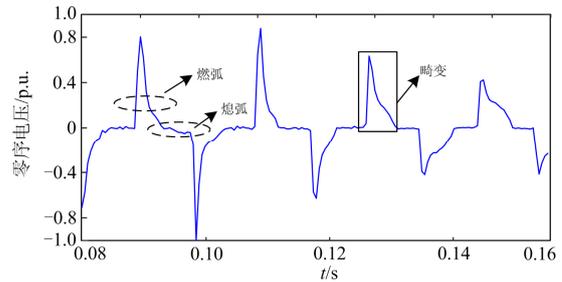


图 2 电弧的随机性熄、燃特性

Fig. 2 Random extinguishing and burning characteristic of arc

每一次间歇性弧光试验均伴随着多次熄弧，统计分析每次试验每次熄弧的平均时长，如图 3 的蓝色柱形图所示；同时，计算每次试验的总熄弧时间占比=每次试验的熄弧总时长/间歇性弧光故障时长，如图 3 的红色柱形图所示。比如第 1 次间歇性弧光试验的平均熄弧时长为 4 ms，总熄弧时间占比为 57%。通过图 3 关于五次试验的分析数据可以看出，间歇性弧光故障每次熄弧的平均时间维持在 5 ms 左右，总熄弧时间占故障总时间的一半以上，与故障明显的间歇性特征相对应。而第 6 次、第 7 次稳态弧光故障由于电弧的稳定燃烧，平均熄弧时间以及总熄弧时间占比均接近于 0。

图 4 为间歇性弧光高阻接地故障发生时，连续几个周波的故障相电压和零序电压的波形图。具体分析其过程：当故障相电压升高到峰值时，绝缘子

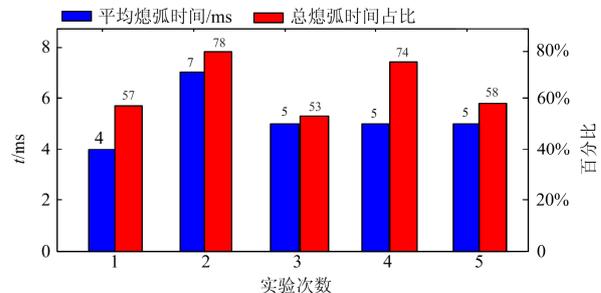


图 3 五次间歇性弧光试验的平均熄弧时间和总熄弧时间占比

Fig. 3 Average extinct time and total extinct time ratio in the five intermittent arc tests

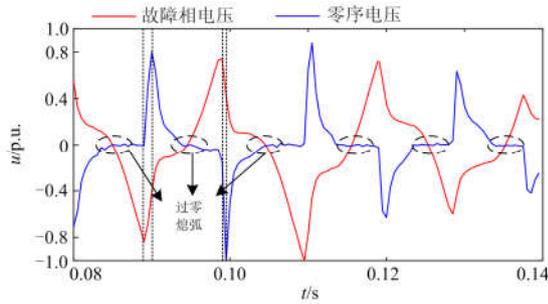


图4 故障相电压与零序电压间的相位差

Fig. 4 Phase angle difference between fault phase voltage and zero sequence voltage

会被击穿, 出现燃弧现象; 随着故障相电压的降低、绝缘的恢复, 电弧会熄灭一小段时间, 并且熄弧段基本位于电压过零点附近, 连续几个周波内重复出现以上现象。在这种电弧的随机性熄、燃过程中, 故障相电压与零序电压波形之间存在相对固定的相位关系, 如图4所示, 故障相电压峰值点与零序电压峰值点基本关于0轴对称, 每半个周波峰值出现一次, 零序电压与故障相电压相位相差接近 $180^\circ$ 。

表1为根据7次现场试验录波数据计算得到的故障相电压与零序电压间的工频相位差, 可以发现相位差保持在 $180^\circ$ 左右。对表1的结果进行分析, 当配电网发生单相接地故障时, 故障点的零序电压与故障相电压是反向的, 相位差为 $180^\circ$ , 而测量点的故障相电压与零序电压的相位差稍微偏离 $180^\circ$ , 主要是由零序网络中零序阻抗的分配造成的, 同时, 测量点与故障点间的故障相电压有一定的电压降, 对相位也会造成一定的影响。

表1 故障相电压与零序电压工频相位差

Table 1 Phase difference between fault phase voltage and zero sequence voltage

试验序号	故障相电压与零序电压工频相位差/ $^\circ$	试验序号	故障相电压与零序电压工频相位差/ $^\circ$
1	175.8	2	169.5
3	171.8	4	190.1
5	195.8	6	185.9
7	180.1		

## 2.2 畸变性及奇次谐波的多变性、差异性

同样, 以第3次试验为例进行分析, 零序电压波形图2和故障相电压波形图5均发生了波形的畸变。可以观察到电压波形由开始的正弦波逐渐畸变为非正弦波, 畸变特征很明显。这种畸变特性一方面是因为非金属性的树枝、沙地、碎石等导电介质本身是非线性的, 所形成的非线性电阻区别于线性电阻, 会对电压波形产生非线性的影响; 另一方面

是因为在接地过程中所产生的电弧也是非线性的, 使电压波形的非线性畸变特征变得更加明显<sup>[16]</sup>。从频域的角度进行考虑, 弧光高阻接地故障发生时, 电压波形畸变的同时伴随着大量的奇次谐波产生, 含量较高的奇次谐波会造成电压波形的非线性畸变。

为了分析谐波含量, 利用7次试验获得的录波数据, 对故障发生时一个周波内的故障相电压和零序电压数据进行傅里叶变换<sup>[17]</sup>, 从频域角度观察故障相电压以及零序电压的谐波含量。

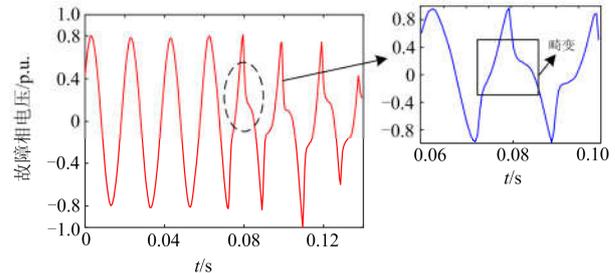


图5 电压波形的非线性畸变特性

Fig. 5 Non-linear distortion characteristic of voltage waveform

单次谐波含量的计算方法如式(1)所示<sup>[18]</sup>。

$$D_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $U_1$  是基波电压的有效值;  $U_n$  是第  $n$  波电压的有效值;  $D_n$  是第  $n$  波的含量。

通过对录波数据的分析, 验证了故障相电压和零序电压波形中含有大量的奇次谐波, 主要的奇次谐波含量如表2所示。

表2 故障相电压和零序电压波形的奇次谐波含量

Table 2 Odd harmonic content in fault phase voltage waveform and zero sequence voltage waveform

试验序号	故障相电压/%			零序电压/%		
	3次	5次	7次	3次	5次	7次
1	63.8	46.3	17.6	35.1	19.3	20.0
2	61.0	30.6	22.7	94.0	74.8	74.3
3	37.2	13.2	5.6	66.2	46.0	35.2
4	70.9	28.3	39.3	44.4	23.4	63.0
5	46.4	22.1	15.7	65.0	51.4	51.9
6	8.8	4.9	1.5	12.1	8.4	3.4
7	0.59	0.51	0.27	9.38	1.15	1.13

进一步分析发现, 电压波形中3次谐波的含量最为显著, 但同时5次、7次谐波的含量也较高。3次、5次、7次谐波均是影响电压波形不可忽视的谐波成分, 体现了弧光高阻接地故障时谐波含量的多样性; 另一方面, 试验结果表明在大多数情况下,

电压波形的谐波含量有如下关系：3次>5次>7次。而在一些试验中，如第4组试验中出现了7次谐波含量大于5次谐波，甚至大于3次谐波含量的情况，体现了谐波含量的差异性。传统的弧光高阻接地故障的检测方法，仅通过3次谐波的含量变化进行判断<sup>[19]</sup>，根据表2可以看出，传统方法存在一定的局限性，应考虑综合分析3次、5次、7次谐波含量的故障检测算法。

为了进一步验证奇次谐波对电压波形畸变的影响，对第3次实验获得的故障相电压和零序电压波形，分别提取其基波、3次谐波、5次谐波、7次谐波，并进行波形的叠加，叠加结果分别如图6、图7所示。可以看出，叠加后的波形与现场实测的电压波形基本一致，证明了3次、5次、7次谐波对电压波形的畸变有较大的贡献。

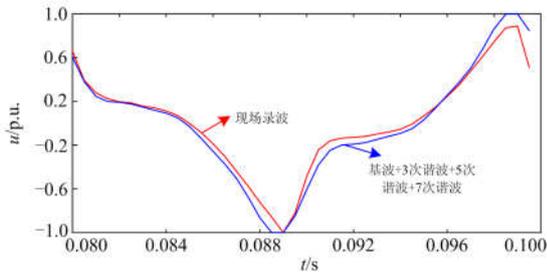


图6 故障相电压的谐波叠加波形

Fig. 6 Harmonic superposition waveform of the fault phase voltage

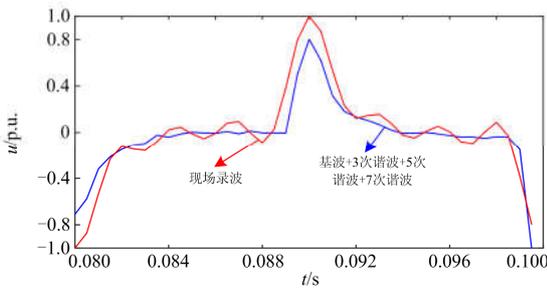


图7 零序电压的谐波叠加波形

Fig. 7 Harmonic superposition waveform of the zero sequence voltage

### 2.3 故障的发展性

弧光高阻接地故障通常具有一定的发展性，第6次现场试验显示了由稳定性弧光接地故障到永久性小电阻接地故障的发展过程，如图8所示，当小电阻的值极小时，即为金属性接地故障。

观察图8，在0.11s时，发生稳定性弧光高阻接地故障，此时故障相电压下降，出现零序电压，其原理为：当线路与潮湿树枝稳定接触，在较大的

故障相电压作用下，绝缘会被击穿发生燃弧，故障相电压过零时，电弧熄灭后立即重燃，几个周内不断重复上述过程，呈基本稳定的燃弧现象，与间歇性弧光高阻故障的明显区别在于无短时熄弧特征，故障持续约0.08s；在0.19s时，故障相电压为零，零序电压基本保持稳定，故障发展为永久性小电阻接地故障，这是因为潮湿的树枝这一非金属导电介质在稳定性电弧的作用下，逐渐被燃烧、碳化，其阻值会降低到很低的水平，甚至接近于金属导体，此时其故障相电压及零序电压的波形特征与金属性接地故障的波形特征基本一致。

除了上述介绍的由稳定性弧光高阻接地故障到永久性小电阻接地故障的发展过程，通常会在故障的最开始阶段发生间歇性弧光高阻接地故障，此类故障也是实际工况中最常见的现象，具体原理见2.1节的内容。

在实际现场中，完整电弧故障发展过程一般为：间歇性弧光高阻接地故障—稳定性弧光高阻接地故障—永久性小电阻接地故障<sup>[20]</sup>。

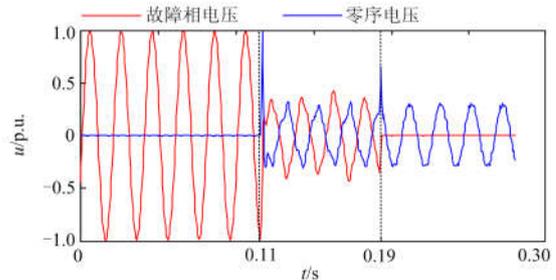


图8 稳定性电弧的发展性图示

Fig. 8 Development diagram of arc

### 3 仿真实证

使用PSCAD仿真软件搭建了包含3条馈线的经消弧线圈接地配电线路的仿真模型，如图9所示。配电线路模型中包含1条电缆线路、1条缆线混合线路、1条架空线路， $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 分别为线路的负荷；故障点采用电弧电阻 $R_{arc}$ 和接地电阻 $R_g$ 串联的形式来模拟过渡电阻，电弧模型采用控制论电弧模型<sup>[21]</sup>，通过调整电弧长度控制零体熄弧的时间，更好地模拟间歇性，线路的具体参数见表3，消弧线圈的补偿度取8%<sup>[22]</sup>，等效电感 $L$ 为

$$L = 1/1.08 \times 1/(3\omega^2 C) = 1.2 \text{ H} \quad (2)$$

式中： $C$ 为系统对地分布电容总和； $\omega$ 为角频率。设置在0.08s时发生间歇性弧光高阻接地故障，现仿真出配电系统故障线路相关电压的波形图进行验证。

表 3 电缆线路和架空线路参数

Table 3 Parameters for cable lines and overhead lines

线路类型	$R_1/$ $\Omega/\text{km}$	$C_1/$ $\mu\text{F}/\text{km}$	$L_1/$ $\text{mH}/\text{km}$	$R_0/$ $\Omega/\text{km}$	$C_0/$ $\mu\text{F}/\text{km}$	$L_0/$ $\text{mH}/\text{km}$
架空线	0.170 0	0.009 7	1.209 6	0.230 0	0.006 0	5.474 9
电缆	0.270 0	0.339 0	0.255 0	2.700 0	0.280 0	1.019 0

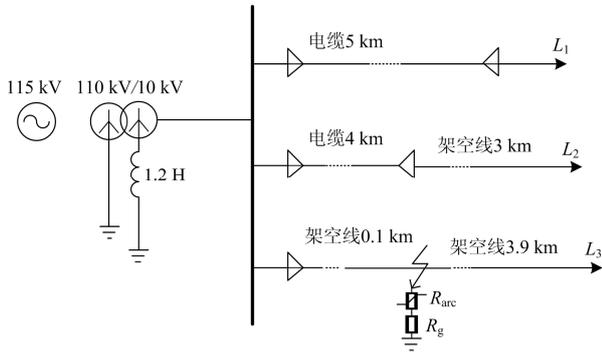


图 9 弧光高阻接地故障仿真模型

Fig. 9 Simulation model for arc high impedance grounding fault

仿真得到的间歇性弧光高阻故障测量点零序电压波形如图 10 所示, 故障相电压波形如图 11 所示, 图 12 是一个周波内故障相电压与零序电压的波形图。通过图 10 可以看出, 弧光高阻故障具有明显的间歇性特征, 零序电压发生了非线性畸变; 通过图 11 可以看出, 故障相电压的非线性畸变特征, 在一定程度上波形接近于方波; 图 12 验证了故障相电压与零序电压间的相位关系, 即故障相电压接近峰值时绝缘击穿, 发生弧光高阻故障, 随着绝缘的恢复, 故障相电压的下降, 电弧熄灭一段时间。同时, 故障相电压的峰值点与零序电压的峰值点几乎关于 0 轴对称, 仿真验证了两种电压间的相位关系。以上的仿真结果很好地验证了弧光高阻接地故障的电压特征。

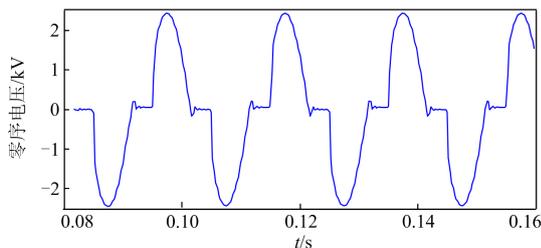


图 10 弧光高阻故障零序电压

Fig. 10 Zero sequence voltage for arc high impedance grounding fault

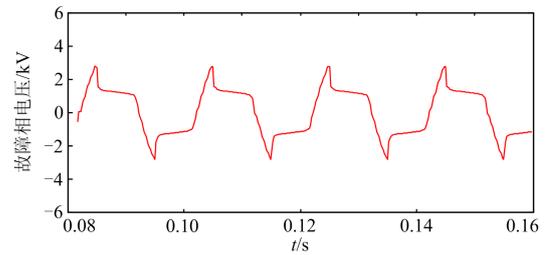


图 11 弧光高阻故障的故障相电压

Fig. 11 Fault phase voltage for arc high impedance grounding fault

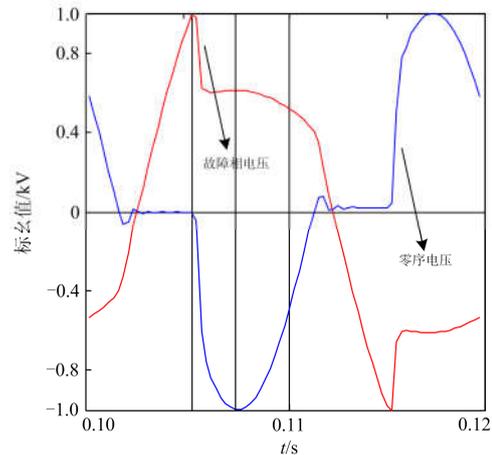


图 12 弧光高阻故障零序电压和故障相电压

Fig. 12 Fault phase and zero sequence voltage for arc high impedance grounding fault

## 4 结论

本文结合某现场实测的故障录波数据, 得到小电流接地配电网弧光高阻接地故障的时、频域暂态电压特征如下:

(1) 故障经常伴随着间歇性的燃、熄弧现象, 体现为零序电压短时消失后又重新出现的重复波形特征; 在重复熄、燃的过程中, 故障相电压与零序电压间的相位差接近  $180^\circ$ ;

(2) 测量点的故障相电压与零序电压波形通常会发生非线性畸变, 畸变程度在很大程度上与含量较高的 3 次、5 次、7 次等奇次谐波的含量有关;

(3) 故障具有一定的发展性, 经常为: 间歇性弧光高阻故障—稳定性弧光高阻故障—永久性金属接地故障。

以上对小电流接地配电网弧光高阻接地故障的时、频域暂态电压特征的分析, 有利于更全面地认识间歇性弧光高阻接地故障, 为新的故障选线启

动判据的设计提供了有效的思路,能够更好地服务于后续配电线路的故障选线工作。

### 参考文献

- [1] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 李天友, 徐丙垠, 薛永端. 配电网高阻接地故障保护技术及其发展[J]. 供用电, 2018, 35(5): 2-6, 24.  
LI Tianyou, XUE Bingyin, XUE Yongduan. High impedance fault protection of distribution networks and its developments[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(5): 2-6, 24.
- [3] 姜博, 董新洲, 施慎行, 等. 自适应时频窗行波选线方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6387-6397.  
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. A method of adaptive time frequency window traveling wave based fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6387-6397.
- [4] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 48-53.  
XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin, et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [5] 潘本仁, 宋华茂, 张秋凤, 等. 小电流接地故障无功功率分析及选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 51-56.  
PAN Benren, SONG Huamao, ZHANG Qiufeng, et al. Reactive power analysis and novel faulty selection method in resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 51-56.
- [6] 董新洲, 王珺, 施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 154-160.  
DONG Xinzhou, WANG Jun, SHI Shenxing. Principle and algorithm of traveling waves based single-phase-to-ground protection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 154-160.
- [7] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUNA B, REDDY M J B, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 16. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.
- [8] 宋金钊, 李永丽, 石峥, 等. 一种新的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 9-15.  
SONG Jinzhao, LI Yongli, SHI Zheng, et al. A fault line selection method for resonant earthed system with high accuracy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 9-15.
- [9] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 1-6.  
DONG Xinzhou, BI Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.
- [10] 束洪春, 彭仕欣, 李斌, 等. 利用测后模拟的谐振接地系统故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 59-64.  
SHU Hongchun, PENG Shixin, LI Bin, et al. A new approach to detect fault line in resonant earthed system using simulation after test[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 59-64.
- [11] 薛永端, 李娟, 陈筱蕾, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.  
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaorui, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.
- [12] 张慧芬. 配电网单相接地故障检测技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.  
ZHANG Huifen. Study on earth fault detection in distribution network[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [13] 宗剑, 牟龙华, 张鑫, 等. 配电网单相接地故障类型及程度的判据[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(4): 27-29.  
ZONG Jian, MU Longhua, ZHANG Xin, et al. Criterion of single-phase ground fault type and its degree for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2004, 16(4): 27-29.
- [14] 胡佐, 李欣然, 石吉银. 基于残流与首半波综合的接地选线方法研究[J]. 继电器, 2006, 34(7): 6-9.  
HU Zuo, LI Xinran, SHI Jiyin. Analysis of earth fault selection based residual current and current angle integration[J]. Relay, 2006, 34(7): 6-9.
- [15] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁, 等. 小电流接地故障暂态方

- 向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.
- XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-65.
- [16] EMANUEL A E, CYGANSKI D, ORR J A, et al. High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 676-686.
- [17] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [18] 耿建昭. 中性点有效接地输配电线路高阻接地故障检测技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- GENG Jianzhao. Research on high impedance faults detection in effectively grounded transmission and distribution lines[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [19] RUSSELL B D, MEHTA K, CHINCHAI R P. An arcing fault detection technique using low frequency current components performance evaluation using recorded field data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4): 1493-1500.
- [20] 许颖. 对消弧线圈“消除弧光接地过电压”的异议[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 75-77.
- XU Ying. Dissidence to “the elimination of ground arcing faults caused overvoltage by Peterson’s coils”[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 75-77.
- [21] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
- XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 58-64.
- [22] 姜博, 董新洲, 施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
- JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. A method of single phase to ground fault feeder selection based on single phase current traveling wave for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227.
- [23] 王珺. 中性点非有效接地系统配电线路单相接地行波保护研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- WANG Jun. Traveling wave based single-phase-to-ground protection in neutral non-effectively grounded system for distribution feeders[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.

收稿日期: 2018-08-24; 修回日期: 2018-09-26

作者简介:

邱进(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电线路故障检测技术; E-mail: qiujiqh@sina.com

崔鑫(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为弧光高阻接地故障诊断等; E-mail: cuix17@mails.tsinghua.edu.cn

王宾(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: binw\_ee@mail.tsinghua.edu.cn

(编辑 许威)