

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210029

配电网线路经生物体高阻接地故障特性对比分析

刘琨^{1,2}, 崔鑫³, 王宾³, 李一泉^{1,2}, 邓旭阳^{1,2}, 陈桥平^{1,2}, 王育学^{1,2}, 刘世丹^{1,2}

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 广东电网有限责任公司RTDS 继电保护仿真重点实验室, 广东 广州 510600; 3. 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084)

摘要: 配电网高阻接地故障电气量微弱, 特征复杂, 实现对此类故障检测的成功率较低。如果故障发生而未能被及时发现、切除, 可能给设备、人员安全带来极大的危害。现有的研究对不同类型的高阻接地介质, 尤其是人体介质的阻抗性质及故障特征分析不足。针对该问题, 基于对数电弧模型及人体阻抗模型从时、频域角度利用图形对比分析、傅里叶变换等技术分析了非生物体导电介质与人体介质的阻抗特性及故障特征。结合现场试验数据, 验证了两类介质的阻抗特性及其典型故障特征。以上分析为后续设计有效的配电网高阻接地故障检测方案奠定了基础。
关键词: 配电网; 高阻; 特征分析; 人体; 非生物体介质

Comparative analysis of high impedance grounding fault characteristics via an organism in distribution lines

LIU Kun^{1,2}, CUI Xin³, WANG Bin³, LI Yiquan^{1,2}, DENG Xuyang^{1,2}, CHEN Qiaoping^{1,2}, WANG Yuxue^{1,2}, LIU Shidan^{1,2}

(1. Power Dispatch Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Key Lab for Protective Relaying Real Time Digital Simulation of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment (Department of Electric Engineering of Tsinghua University), Beijing 100084, China)

Abstract: The high impedance grounding fault in power distribution networks has weak electric capacity and complex fault characteristics, so the success rate of detecting such fault is low. If the fault occurs and cannot be found and removed in time, it may bring great harm to the safety of equipment and personnel. Existing research on different types of high impedance grounding medium, especially the human body medium, is insufficient to analyze the impedance property and fault characteristics. For this problem, based on the logarithmic arc model and human impedance model, the impedance characteristics of non-living body conductive medium and human body are compared and analyzed from time and frequency domain aspects using the techniques of graphic morphology analysis, Fourier transform and so on. Also, combined with the field test data, the impedance features and typical fault features of the two types of grounding media are verified. The above analysis lays a foundation for the subsequent design of an effective detection scheme for a high impedance grounding fault in power distribution networks.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077116) and the Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20184472).

Key words: distribution network; high impedance; feature analysis; human body; non-living body medium

0 引言

配电网结构复杂, 分支线多且常馈入居民区,

在狂风、暴雪等恶劣的自然环境下, 线路容易跌落, 发生经非生物体导电介质(如: 树枝、沥青和沙地)或者直接经人体接地的高阻接地故障(过渡电阻一般在几百甚至上万欧姆)^[1-7]。此类故障的危害性极大, 故障容易引发山火、毁坏电力设备; 当电流经人体流入大地时还会给人体的皮肤、心脏等组织或

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077116); 广东电网有限责任公司科技项目资助(GDKJXM20184472)

器官造成严重的损伤,甚至导致人员死亡^[8-10]。准确、及时的故障检测和定位对于故障快速恢复至关重要^[11-14]。现有的研究对高阻接地故障不同类型接地介质(尤其是人体介质)的阻抗特性及典型故障特征的分析明显不足,导致故障检测的正动率一直不高^[15-20]。

早期的研究仅将高阻接地故障接地介质的阻抗看作是一个定值电阻,比如,文献[21]将过渡电阻直接看作是一个固定电阻,建立了高阻接地故障的等效电路,这种分析方法严重忽略了介质阻抗的非线性。考虑到接地介质的非线性,文献[22]和文献[23]分别以电弧模型和分段线性等效模型来模拟非生物体导电介质的非线性,但其缺少更多现场试验数据的支撑,效果有待进一步验证。文献[24]基于安全电压等级下的试验平台,以大量的人体与设备的接触触电数据拟合出了一种人体阻抗的等效电路,但由于其试验场景与配电网故障场景的差异性较大,可信度不高。另外,对于高阻接地故障典型特征的分析,文献[25]基于高阻接地故障等效电路给出了故障稳态零序电流值的变化规律。文献[26]指出:高阻接地故障发生时,电压和电流中伴随着比重较大的暂态主谐振分量,但该分量主要集中在 50 Hz 左右,在实际现场中实现对该分量提取的难度较大。文献[27-28]主要从统计学的角度分析了高阻接地故障相关电气量的幅值、频率成分和概率分布等,但相关故障特征的物理意义不明确。因此,有必要进一步对高阻接地故障接地介质的阻抗特性及典型故障特征进行更为全面细致的研究。

针对上述问题,本文基于对数电弧模型及人体阻抗模型从时、频域角度利用图形形态分析、傅里叶变换等技术对比分析了非生物体导电介质与人体阻抗特性,并结合现场试验数据验证了两类介质的阻抗特性及典型故障特征。以上分析为后续设计有效的配电网高阻接地故障检测方案奠定了基础。

1 配电网非生物体介质阻抗及故障特性分析

高阻接地故障接地介质的类型繁多,根据接地介质性质的不同,总体上可以将接地介质划分为:生物体介质(以人体为主)和非生物体导电介质(如:树枝、沥青和沙地)两大类。

为了分析不同接地介质下配电网高阻接地故障的阻抗特性,搭建如图 1 所示的 10 kV 配电网故障仿真模型。系统中含有 F₁—F₄ 共计 4 条馈线(包括 1 条分支线路,1 条纯电缆线路,1 条架空线路和 1 条电缆-架空线混合线路),线路的主要参数如表 1 所示,消弧线圈的补偿度取 8%^[29]。在距离母线 8 km 设置故障点 *f*,线路过渡电阻(基于人体、非生物

体导电介质模型构建)接地。

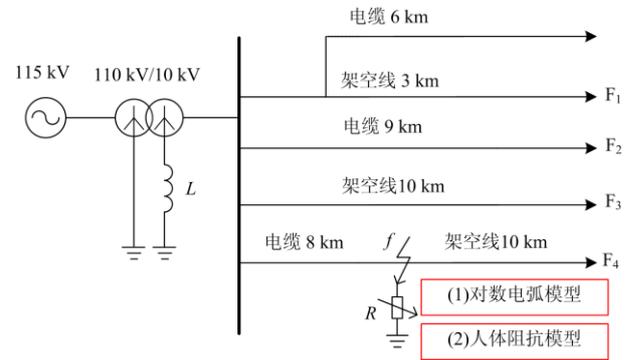


图 1 配电网高阻接地故障仿真模型

Fig. 1 Simulation model of high impedance grounding fault in power distribution networks

表 1 电缆及架空线参数

Table 1 Parameters of cable lines and overhead lines

线路类型	$R_l/$ (Ω/km)	$C_l/$ ($\mu\text{F}/\text{km}$)	$L_l/$ (mH/km)	$R_0/$ (Ω/km)	$C_0/$ ($\mu\text{F}/\text{km}$)	$L_0/$ (mH/km)
架空线	0.170 0	0.009 7	1.209 6	0.23	0.006	5.474 9
电缆	0.270 0	0.339 0	0.255 0	0.27	0.280	1.019 0

1.1 非生物体导电介质阻抗特性分析

1) 波形畸变特性

经非生物体导电介质接地的高阻接地故障发生时,通常伴随着电弧的产生,现有的研究基于电弧模型描述接地介质绝缘的击穿、恢复,并以电弧电阻(由电弧模型决定)与固定电阻(表征塔基电阻,一般取 300 Ω)的串联来表征过渡电阻,基于此,本文利用对数电弧模型分析非生物体导电接地介质的阻抗性质,电弧模型的表达式为^[22]

$$u_{\text{arc}} = \text{sgn}(i_{\text{arc}}) U_{\text{T}} \ln\left(\frac{|i_{\text{arc}}|}{I_{\text{s}}} + 1\right) \quad (1)$$

其中: u_{arc} 为电弧电压; i_{arc} 为电弧电流; U_{T} (一般取线路电压的 10%) 和 I_{s} (一般取 0.001~0.01) 分别为由线路参数决定的电压常数和电流常数。

在馈线 F₄ 故障点 *f* 处接入电弧电阻(基于电弧模型的解析表达式给出)及塔基固定电阻后获得的非生物体导电介质的相电压、电流和电阻波形如图 2 所示(设置 $U_{\text{T}}=1$, $I_{\text{s}}=0.001$)。可见,非生物体导电介质的阻抗以非线性电阻的形式呈现,其周期性矩形波显著,电阻波形形象地反映出非生物体导电介质绝缘的击穿及逐步恢复过程:电阻的最小值与绝缘被完全击穿的时刻相对应;电阻的最大值对应绝缘的完全恢复时刻;同时,受接地介质非线性的影响,故障相电流波形也发生了明显的畸变,以过零点处的畸变最为严重,而故障相电波形无明显畸变,

接近于稳定的正弦波。

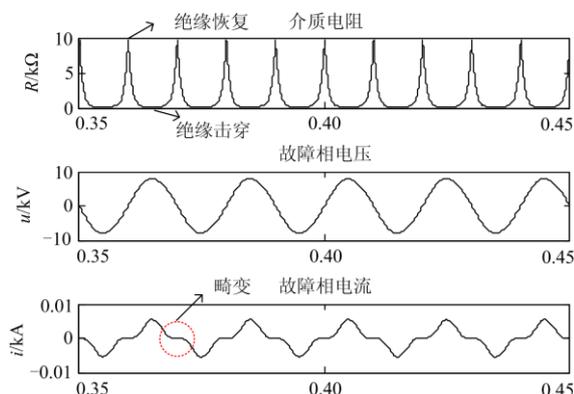


图 2 非生物体导电介质的电压、电流、电阻波形
Fig. 2 Waveforms of voltage, current and resistance of non-living body conductive medium

2) 非线性伏安特性

如图 3 所示, 在一个周波内故障相电压与故障相电流所形成的伏安特性曲线大致呈磁滞回线状, 主要分布在第 1、3 象限, 曲线所围成的图形基本以过零点(0,0)为中心呈中心对称分布; 此外, 不同参数下伏安特性曲线的整体倾斜程度不同, 反映了不同类型非生物体接地介质性质的差异性, 各曲线的整体走势基本相同。

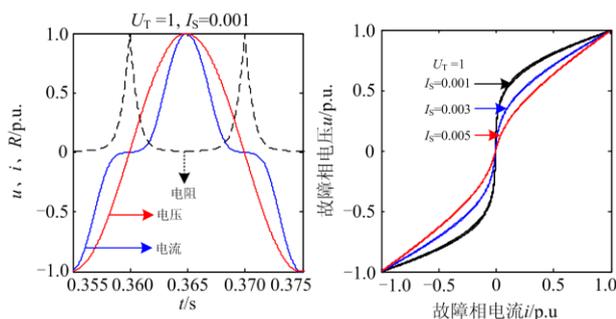


图 3 非生物体导电介质的伏安特性
Fig. 3 Volt-ampere characteristics of non-living body conductive medium

1.2 基于非生物体导电介质的故障特征分析

1) 波形畸变特性

在实际的现场中, 当故障发生时, 很难直接获取故障点处的电气量信息, 往往是基于馈线出口处容易获取的电气量设计相应的检测算法。基于此, 进一步分析故障馈线出口处零序电压、电流的波形特征。

故障线路出口处的零序电压、电流波形如图 4 所示, 可以看出: 零序电压波形出现了类似于接地介质电阻的矩形波特征; 零序电流波形的过零畸变显著。与图 2 的故障相电流特征类似。

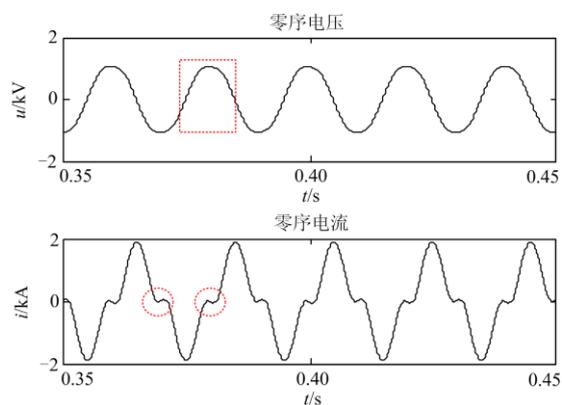


图 4 非生物体导电介质的零序电压、电流波形
Fig. 4 Waveforms of zero-sequence voltage and current of non-living body conductive medium

2) 谐波特性

利用傅里叶变换技术, 分析零序电压、电流中主要谐波的含量, 结果如图 5 所示, 可以看出: 零序电压、电流中奇数次、低次谐波的含量较高, 而偶数次、高次谐波的含量较低; 零序电流中以 3 次(33%)和 5 次(4%)谐波为主, 零序电压中以 3 次谐波(5%)为主, 相比于零序电压, 零序电流中 3 次谐波的含量更高。

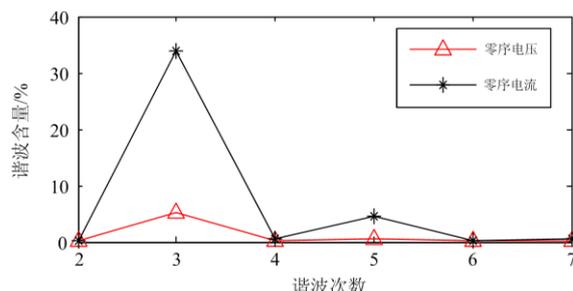


图 5 基于非生物体导电介质的谐波特性
Fig. 5 Harmonic characteristics based on non-living body conductive medium

2 配电网人体阻抗及故障特性分析

2.1 人体阻抗特性分析

对于人体阻抗, 采用 H. Freiberger(弗莱贝尔格)提出的与带电设备接触触电的人体等效电路模型进行表征^[30], 将人体阻抗看作是内部人体电阻 R_0 和外部皮肤阻抗的串联, 如图 6 所示。其中: 内部电阻 R_0 为不受外部环境条件影响的固定值, 一般取 500Ω ; 外部皮肤阻抗为皮肤电阻 R_s 和皮肤电容 C_s 的并联, R_s 受外部环境(如: 皮肤破损情况、湿度和清洁程度)的影响较大, 取值范围在 $1000 \Omega \sim 100 \text{ k}\Omega$, C_s 一般取固定值 20 nF/cm^2 。

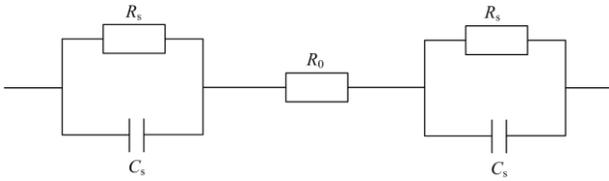


图 6 人体阻抗等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of human impedance

在故障发生的初始暂态阶段，燃弧特征一般较为明显，基于此，在故障点 f 处，以图 6 所示的人体阻抗等效电路(R_s 取 $1\ 000\ \Omega$)和式(1)所示的对数电弧模型的串联来表征过渡电阻；而当介质被完全击穿到达故障稳态时，电弧一般熄灭，此时，仅用人体阻抗等效电路来表征过渡电阻，获得的阻抗、故障相电压、电流波形如图 7 所示。可见：在初始燃弧过程中，阻抗及故障相电压、电流波形与基于非生物介质的波形类似；而当电弧熄灭时，虽然有电容的存在，但人体阻抗基本呈电阻性；故障相电压、电流波形接近于稳定的正弦波，无明显的波形畸变特征。

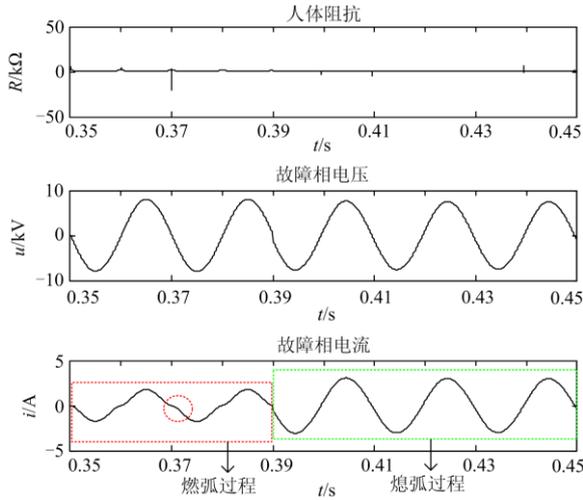
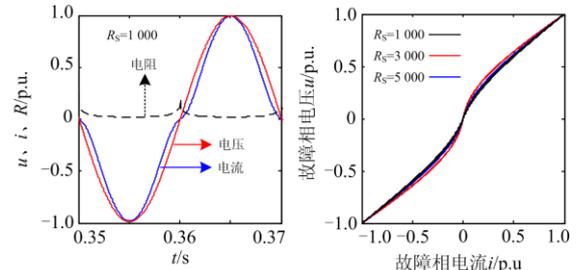


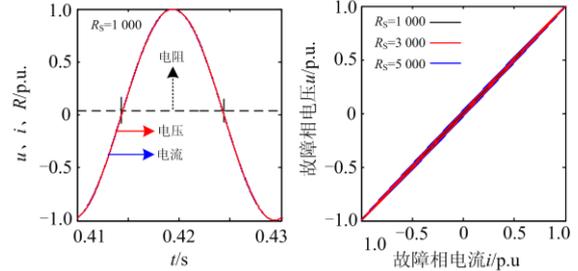
图 7 人体的电压、电流、阻抗波形

Fig. 7 Waveforms of voltage, current and resistance of human body

考虑到人体皮肤电阻 R_s 在外部环境的影响下波动范围较大，进一步分析在不同皮肤阻值 R_s 下的伏安特性曲线，结果如图 8 所示。可见，电弧熄灭时，在不同的皮肤阻值 R_s 下，故障相电压、电流所形成的伏安特性曲线基本呈线性(如图 8(b)所示)，与燃弧阶段的磁滞回线状曲线差异性明显(如图 8(a)所示)，熄弧时人体电压与电流间的相位差异不明显(电流仅略微超前于电压)。



(a) 燃弧过程



(b) 熄弧过程

图 8 人体伏安特性

Fig. 8 Human body volt-ampere characteristic

2.2 基于人体介质的故障特征分析

馈线出口处的零序电压、电流波形及谐波分量分别如图 9 和图 10 所示。燃弧时，零序电流波形仍有较强的过零畸变，熄弧时零序电压、电流为较为稳定的正弦波，无明显的波形畸变特征；从频域角

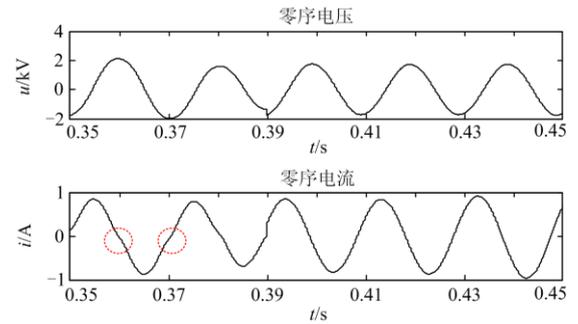


图 9 基于人体阻抗的零序电压、电流波形

Fig. 9 Waveforms of zero-sequence voltage and current based on human body impedance

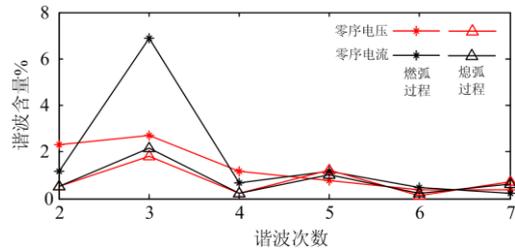


图 10 基于人体阻抗的谐波特性

Fig. 10 Harmonic characteristics based on human body impedance

度来看,熄弧时各次谐波含量均维持在较低的水平,基本在 3% 以下,明显低于燃弧过程的谐波含量。

3 现场试验数据验证

为了进一步验证对数电弧模型和人体阻抗等效模型的效果,基于现场试验数据,从时、频域角度,利用图形形态分析、傅里叶变换等手段进一步对比分析经生物体和非生物体两种介质的阻抗特性及典型故障特征。其中:经非生物体导电介质接地的故障数据来自国网河南电网真型试验场的现场录波数据^[31],电压等级为 10 kV,故障线路分别经干、湿土地,干、湿水泥,沥青混凝土共 5 种不同类型的非生物体导电介质接地;经生物体接地的故障数据由生物体触电试验平台提供^[27],电压等级为 380 V,以 3 只猪和 3 只羊(编号均为 1~3,且触电位置的毛发被剔除以保证试验数据的准确性)来代替人体作为试验对象进行多次试验。触电通道为:左或右前肢-左或右后肢,通过试验给出了无熄弧过程的相关电气量的信息。

3.1 阻抗特性验证

线路经不同类型的非生物体介质接地时,现场获得的故障相电压、电流波形与图 11(a)、图 11(b)(以干水泥和沥青混凝土为例)所示的波形基本一致,电流的过零畸变特征显著;而线路经生物体介质(以 1 号猪和 1 号羊为例)接地时,电流波形并无明显的畸变,如图 11(c)、图 11(d)所示。现场试验波形与图 2 和图 7(熄弧过程)所示的仿真波形基本一致。

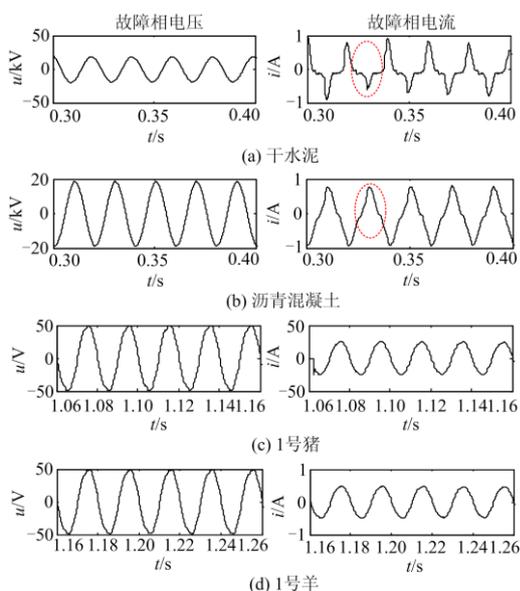


图 11 不同接地介质下的故障相电压、电流波形
Fig. 11 Waveforms of fault phase voltage and current based on different mediums

在实际现场中,不同接地介质下故障相电压、电流所形成的伏安特性曲线如图 12 所示。可以看出,经非生物体导电介质接地时所获得的伏安特性曲线的磁滞回线特征显著,与图 3 基于对数电弧模型给出的伏安特性曲线的整体走势基本一致;差异性在于,实测伏安特性曲线的包络特征明显,且包络面积受非生物体接地介质类型的影响较大(如:相比于湿水泥和沥青混凝土,以干、湿土地和干水泥为接地介质时,包络面积相对更大),这种包络性主要是因为:在绝缘击穿的瞬间,电弧的温度较高且耗散速度较慢,使得介质电阻的最小值往往滞后于电弧电压的峰值,进而使得电弧电流滞后于电弧电压。而对于猪、羊这类人体等效介质,当无电弧时,实测伏安特性曲线的线性特征明显,无明显的包络特征,电压、电流几乎是同相位的,与图 8(b)的仿真图形基本一致,这也反映出:在线路与生物体稳定接触触电的过程中,生物体的阻抗主要以大电阻的形式呈现。

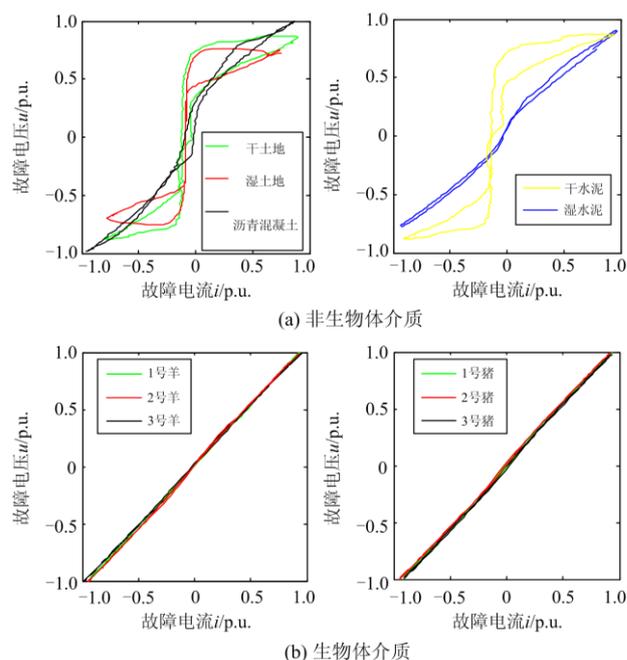


图 12 现场实测的伏安特性曲线

Fig. 12 Volt-ampere characteristic curve measured in field

3.2 故障特征验证

线路经非生物体导电介质接地时,典型的零序电压、电流波形如图 13(a)、图 13(b)所示,零序电流的过零畸变特征和零序电压的矩形波特征均较为显著,与图 4 的仿真波形一致;而以猪、羊等生物体为接地介质时,零序电压、电流波形没有明显的畸变特征,如图 13(c)、图 13(d)所示,其与图 9 中

熄弧时的零序电压、电流波形基本一致。

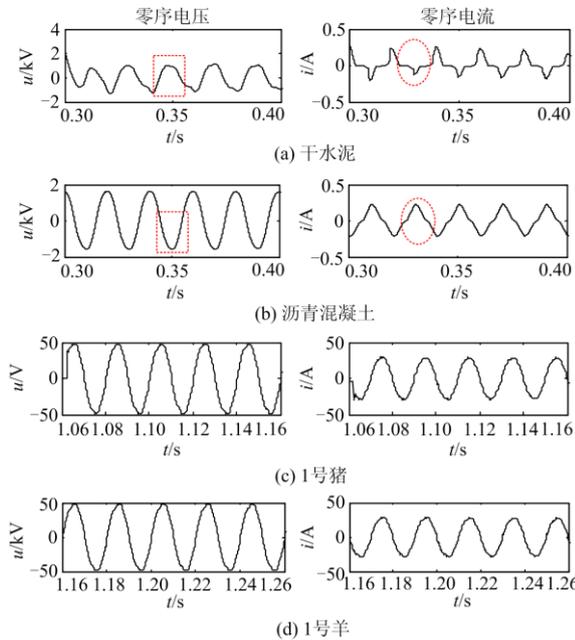


图 13 现场实测的零序电压、电流

Fig. 13 Fault waveforms of zero sequence voltage and current measured in field

此外，不同接地介质下实测零序电压、电流波形的谐波含量如图 14 所示。可以看出：以干、湿土

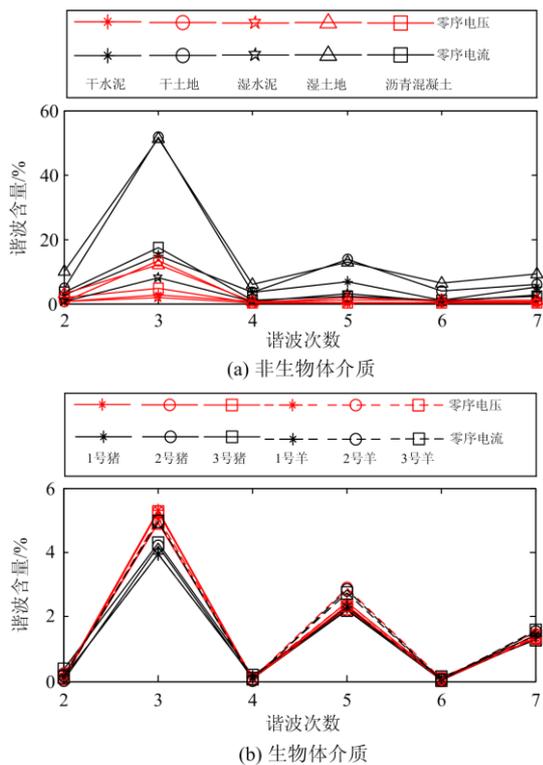


图 14 不同接地介质的谐波特性

Fig. 14 Harmonic characteristics of different grounding mediums

地，干、湿水泥和沥青混凝土等 5 种不同的非生物体为接地介质时，零序电压、电流中 3 次的含量较高，其与图 5 基于仿真数据的分析结果基本一致；而线路与猪、羊躯体稳定接触时，根据图 14(b)，各次谐波含量均维持在 6% 以下，与图 10(熄弧过程)所示的分析结果基本一致。可见：对于经非生物体导电介质的故障，由于 3 次谐波的含量较高，在一定程度上可将 3 次谐波作为此类故障的特征谐波；而对于猪等生物体，受较大皮肤电阻值的影响，熄弧时的谐波含量过低，无明显的特征谐波。

4 结论

本文结合对数电弧模型和人体等效电路模型分析了不同类型高阻接地介质的阻抗特性和典型故障特征。获得的主要结论如下：

1) 干土地、沥青混凝土、干水泥等非生物体接地介质电阻的非线性特征显著，其伏安特性曲线呈明显的磁滞回线状；生物体(以猪为例)介质的阻抗受高阻值表皮电阻的影响，在熄弧时往往呈现出明显的电阻性，伏安特性曲线基本表现为线性。

2) 线路经非生物体导电介质接地时，故障零序电流具有明显的畸变特征，3 次谐波在一定程度上可作为此类故障的特征谐波；而线路经生物体稳定接触时，电流波形无明显的畸变，谐波含量相对较低。

以上基于配电网仿真模型及现场试验数据的高阻接地故障特性分析有利于更加全面地认识配电网高阻接地故障，为后续设计有效的故障检测算法奠定了基础。

致谢

感谢新疆农业大学机电工程学院李春兰教授提供的生物体触电试验数据和帮助。

参考文献

[1] 康奇豹, 丛伟, 盛亚如, 等. 配电网单相断线故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 127-136. KANG Qibao, CONG Wei, SHENG Yaru, et al. Protection methods of single-phase broken-line fault for distribution line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 127-136.

[2] COSTA F B, SOUZA B A, BRITO N S D, et al. Real-time detection of transients induced by high impedance faults based on the boundary wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5312-5323.

[3] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 配网高阻接地故障伏安特性分析及检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3815-3823.

- WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics for high impedance faults in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3815-3823.
- [4] 贺家礼, 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.
- [5] 陈钦柱, 张涵, 赵海龙, 等. 基于FSWT-SSAEs的配电网内部过电压自动提取与分类识别[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 166-172.
- CHEN Qinzhu, ZHANG Han, ZHAO Hailong, et al. Automatically extracting and classification recognition internal overvoltage measured in distribution networks based on FSWT-SSAEs[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 166-172.
- [6] 刘恒, 陈文鸿, 沈剑韬, 等. 一种电力变压器绝缘电阻的高压高阻电桥测量方法[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 224-228.
- LIU Heng, CHEN Wenhong, SHEN Jiantao, et al. Method for measuring power transformer insulation resistance based on high-voltage and high-resistance bridge[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 224-228.
- [7] 周正雄, 夏向阳, 朱鹏, 等. 高压电缆早期间歇性电弧接地故障识别方法[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 167-176.
- ZHOU Zhengxiong, XIA Xiangyang, ZHU Peng, et al. Identification method for incipient intermittent arc ground fault of high-voltage cables[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 167-176.
- [8] XIAO Yang, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-w.
- [9] KANAI H, CHATTERJEE I, GANDHI O P. Human body impedance for electromagnetic hazard analysis in the vlf to mf band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(8): 763-772.
- [10] MAMISHEV A V, RUSSELL B D, BENNER C L. Analysis of high impedance faults using fractal techniques[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1): 5636-5645.
- [11] 马瑞, 张海波, 王建雄, 等. 考虑负荷时变性的配电网故障抢修恢复策略[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 20-27.
- MA Rui, ZHANG Haibo, WANG Jianxiong, et al. Research on fault rush repair and recovery strategy of distribution network considering time variation of load[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 20-27.
- [12] 张丽虹, 常成, 熊炜, 等. 基于智能控制终端的主动配电网故障处理方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 22-29.
- ZHANG Lihong, CHANG Cheng, XIONG Wei, et al. Research on fault processing of active power distribution network based on intelligent control terminal[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 22-29.
- [13] 梁梦可, 滕欢, 李雪松, 等. 考虑非平衡特性的辐射状配电网故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 61-68.
- LIANG Mengke, TENG Huan, LI Xuesong, et al. A novel fault location algorithm for radial distribution networks considering the unbalanced characteristics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 61-68.
- [14] 朱逸凡, 赵宏程, 陈争光, 等. 适用于逆变型电源接入的配电网故障方向判别元件[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 76-82.
- ZHU Yifan, ZHAO Hongcheng, CHEN Zhengguang, et al. Fault direction discriminating element used for the distribution network with IIG integration[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 76-82.
- [15] 曾祥君, 王媛媛, 庞方亮, 等. 基于故障电阻测量的小电流接地系统保护方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 26-30.
- ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, PANG Fangliang, et al. Grounding fault protection based on fault resistance measurement for ineffectively earthed distribution systems[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 26-30.
- [16] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 85-90.
- ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study for negative sequence current distributing and ground fault protection in middle voltage power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 85-90.
- [17] 方毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.
- FANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.
- [18] 邱进, 田野, 李冠华, 等. 基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 180-187.
- QIU Jin, TIAN Ye, LI Guanhua, et al. Study on transient line selection of small current grounding fault based on field recorded waveform[J]. Power System Protection

- and Control, 2019, 47(6): 180-187.
- [19] 李震球, 王时胜, 吴丽娜. 一种谐振接地系统电弧高阻接地故障选线新方法及其仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 44-49.
LI Zhenqiu, WANG Shisheng, WU Lina. A new method and simulation for arcing high-impedance-grounding fault line selection in resonant grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 44-49.
- [20] 龙茹悦, 黄纯, 汤涛, 等. 一种谐振接地系统的配电网线路接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 21-29.
LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, et al. Line selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 21-29.
- [21] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [22] 王宾, 倪江, 王海港, 等. 输电线路弧光高阻接地故障单端测距分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1333-1341.
WANG Bin, NI Jiang, WANG Haigang, et al. Single-end fault location for high impedance arc grounding fault in transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1333-1341.
- [23] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 基于介质击穿原理的配电网线路高阻接地故障精确建模[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 62-66, 106.
WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. High-impedance fault modeling based on solid dielectric electrical breakdown theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 62-66, 106.
- [24] KAMIMURA Y, INAGAKI S, WAKE K. Development of human body impedance equivalent circuit for contact current measurement[C] // 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2018, Amsterdam, Netherlands: 855-859.
- [25] 杨帆, 金鑫, 沈煜, 等. 10 kV 架空配电网接地故障原因模拟试验及特征分析[J]. 供用电, 2019, 36(3): 37-43.
YANG Fan, JIN Xin, SHEN Yu, et al. Simulation test and characteristic analysis of grounding fault causes of 10 kV overhead distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 37-43.
- [26] 薛永端, 李娟, 陈筱菁, 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 Xiaoru, 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.
- [27] 李春兰, 叶豪, 王成斌, 等. 基于猪触电试验的人体触电规律研究[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2019, 40(5): 553-558, 565.
LI Chunlan, YE Hao, WANG Chengbin, et al. Human electric shock law based on pig electric shock experiment[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2019, 40(5): 553-558, 565.
- [28] 关海鸥, 李伟凯, 杜松怀, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的生物触电电流检测模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 202-209.
GUAN Hai'ou, LI Weikai, DU Songhui, et al. Detection model of biological electric shock current based on Hilbert-Huang transform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 202-209.
- [29] 姜博, 董新洲, 施慎行. 基于单相电流行波的配电网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.
- [30] 杜松怀, 张筱慧, 王淑平, 等. 电力系统接地技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [31] 韦明杰, 张恒旭, 石访, 等. 基于谐波能量和波形畸变的配电网弧光接地故障辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 148-161.
WEI Mingjie, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Identification of arcing grounded fault in distribution network based on harmonic energy and waveform distortion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 148-161.

收稿日期: 2021-01-09; 修回日期: 2021-05-17

作者简介:

刘 琨(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护专业管理和电力系统数字仿真工作; E-mail: tjulk@126.com

崔 鑫(1993—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统故障分析和继电保护; E-mail: 396590422@qq.com

王 宾(1978—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: binw_ee@mail.tsinghua.edu.cn

(编辑 葛艳娜)