

基于磁场分布特性的接地网故障诊断研究

于建立^{1,2}, 吴传斌², 冷 赫², 鲁志伟²

(1. 潍坊学院信息与控制工程学院, 山东潍坊 261061;

2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林吉林 132012)

摘 要: 为了避免变电站接地网故障诊断时现场开挖, 提出了一种基于磁场分布特性的接地网故障诊断方法, 该方法能够区分接地网故障类型并可实现对断裂和腐蚀区域的准确定位. 结合曼哈顿距离理论与增大激励电流幅值和频率等物理方法, 对接地网导体故障特征进行量化与放大. 计算表明: 通过研究故障接地网地表磁场分布规律, 分析断裂点和辐射点的分布特征可判断故障类型和区域; 利用腐蚀和断裂特征值可量化故障特征, 增大激励电流的幅值和频率可放大故障特征, 提高了诊断的精度和效率. 研究结果为变电站接地网故障诊断工作提供了理论参考.

关键词: 接地网; 故障诊断; 磁场强度; 曼哈顿距离理论; 故障特征值; 腐蚀特征值

中图分类号: TM863

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)03-0598-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210218

Research on Fault Diagnosis of Grounding Grid Based on Magnetic Field Distribution Characteristics

YU Jian-li^{1,2}, WU Chuan-bin², LENG He², LU Zhi-wei²

(1. College of Information and Control Engineering, Weifang University, Weifang, Shandong 261061, China;

2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin, Jilin 132012, China)

Abstract: In order to avoid on-site excavation during the fault diagnosis of the substation grounding grid, a method of grounding grid fault diagnosis based on magnetic field distribution characteristics is proposed. This method can distinguish the types of grounding grid faults and achieve accurate positioning of fracture and corrosion areas. This method combined with Manhattan distance theory and physical methods such as increasing the amplitude and frequency of excitation current, it can quantify and amplify the grounding grid conductor faults characteristics. The calculations show that the fault type and area can be judged by studying the distribution of the fault grounding grid surface magnetic field and analyzing the distribution characteristics of the fracture points and radiation points; the fault characteristics can be quantified by using the corrosion and fracture characteristic values, and the fault characteristics can be amplified by increasing the amplitude and frequency of the excitation current. These methods can improve the accuracy and efficiency of diagnosis. The research results provide a theoretical reference for the fault diagnosis of the substation grounding grid.

Key words: grounding grid; fault diagnosis; magnetic field strength; Manhattan distance theory; fault characteristic value; corrosion characteristic value

1 引言

变电站接地网是保证电力系统正常运行的重要设备之一, 对保障站内工作人员的人身安全和电气设备的正常运行有重要意义^[1]. 我国普遍采用钢质接地网, 腐蚀问题尤为严重. 对接地网进行故障检测和诊断对于了解接地网运行状态和尽早发现并排除安全隐患具有重要意义^[2].

目前, 国内外很多学者对接地网腐蚀诊断进行了深入的研究. 许磊、罗光鸿等利用电网络方法对接地网腐蚀状态进行检测^[3-5]. 通过测量可触及节点间电阻以及利用接地网的拓扑结构与接地引线间的电阻, 建立并求解接地网的腐蚀诊断方程, 通过接地网支路导体的变化值判断接地网的腐蚀程度. 刘洋、崔翔等利用电磁场方法对接地网进行故障诊断^[6-8]. 向接地网注入激

励电流,通过研究接地网导体地表电场和磁场大小变化规律,进而判断故障类型及区域.刘洋、赵志斌等在此基础上讨论了接地网注入激励电源的设计问题^[9].刘健、王树奇等从接地网拓扑方面研究了接地网腐蚀诊断的可测性问题并找到确诊的支路集合.研究指出经过简化的拓扑网络规模一般大于原网络且回代过程需大量运算,从而增加了计算成本^[10].本文以变电站接地网地表磁场为研究对象,在获取磁场分布的基础上结合曼哈顿距离理论,实现了接地网故障的分类及准确定位.

2 数学模型及方法

2.1 诊断原理

向接地网注入激励电流会在地网导体上产生轴向电流和泄漏电流,同时在接地网导体周围产生磁场.在静磁学中,可由毕奥-萨伐尔定律对电流元在空间任意点处所激发的磁场进行描述^[11].若接地体中电流满足:电流是连续的电荷,电流大小不随时间而改变,电荷不会在任意位置累积或消失.则接地网导体中的电流在地表产生的磁感应强度可按式(1)计算^[12]:

$$B = \iint_L \frac{\mu_s I}{4\pi} \frac{dl e^r}{r^2} \quad (1)$$

式中: B 为单元电流在接地网导体地表产生的磁感应强度(T); μ_s 为土壤磁导率(H/m); e^r 为电流元指向测量点的单位向量; I 为导体线单元的电流大小(A); dl 是源电流的微小线元素; r 为导体线单元点与测量点的位置矢量,通过矢量的叠加与分解可计算出地表任一点的磁感应强度.

由式(1)可知,地表磁感应强度的大小与土壤磁导率 μ_s ,导体电流大小 I 和位置矢量 r 有关.当接地网因腐蚀变细或断裂时,通过导体的电流会变小,从而导致接地网导体周围磁场随之减小,甚至接近于零.由此,可通过接地网磁场变化强度判断故障程度.

2.2 故障识别与分析

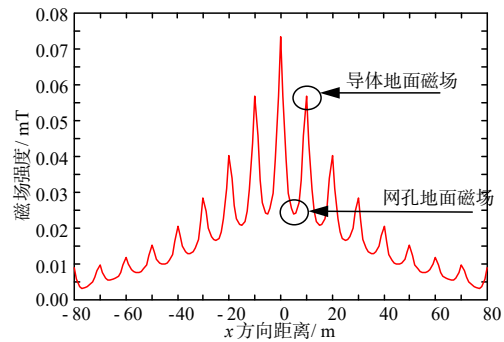
假设接地网存在腐蚀区域及断点,可设立观测线与观测点通过分析地表磁场分布规律进行识别.设置接地网面积为 $160\text{ m} \times 160\text{ m}$, x 、 y 方向分别有17根电阻率 $1.7 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 半径0.01 m的圆钢导体,相对磁导率为636,相邻两点间距10 m.接地网埋设于土壤电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 的均匀土壤中,埋设深度为0.6 m.因变电站磁场环境复杂,为了抑制工频、各奇次谐波以及线路中电流变化等对测量结果的干扰^[13],在 O 点(接地网中心点)施加幅值为10 A的异频电流,频率为80 Hz.

2.2.1 观测点的选取和布置

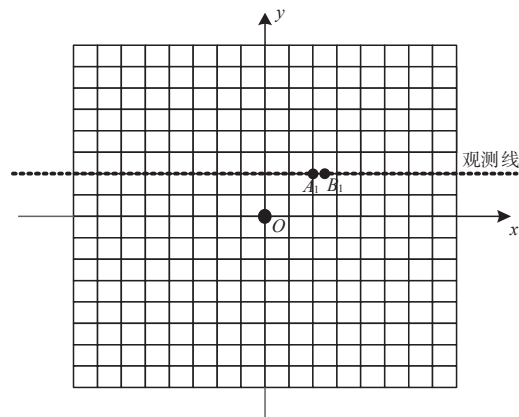
选择合适的观测点位置,可以方便测量和提高测量的灵敏度.图1(a)所示为当观测线取 $y=25\text{ m}$, $x=$

$(-80, 80)$ 时(该观测线上既有导体对应的地面磁场,又有网孔对应的地面磁场)地表磁场分布结果,此时相邻两观测点间距为1 m.由图1(a)可知,接地网导体地表磁场强度明显高于网孔地表磁场强度.实际测量中,磁场强度越大越易于测量,所产生的测量误差也相对较小.故本文在后续计算和分析过程中,将观测线均设置于地网导体所对应的地面位置,观测线上相邻两观测点间距可视具体需求确定.

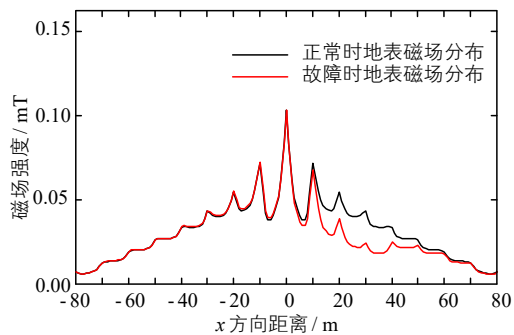
图1(b)所示为假设接地网中 $A_1(20, 20)$ 至 $B_1(20.2, 20)$ 间存在0.2 m的断裂长度.设置 $y=20\text{ m}$ 为观测线, x 取值为 $x=(-80, 80)$,相邻两观测点间距离为1 m.图1



(a) 观测线取 $y=25\text{ m}$ 时的地表磁场分布



(b) 接地网断裂故障及对应观测线设置



(c) 正常及存在断裂故障时磁场对比

图1 接地网模型及磁场分布结果

(c)给出了计算所得此时观测线上正常时和存在断裂故障时两种磁场分布情况。

由图1(c)可见,观测线上存在断裂故障时可以灵敏地反映到磁场计算结果,其地表磁场较正常时出现明显下降,由于本文在接地网故障诊断中以观测线上正常时和故障时的磁场强度差值为判断依据,故此种观测线的设置方式是合理的.现场实际测量中,在满足测量精度的基础上为了提高工作效率一般在观测线上的导体交点处(网孔顶点)设置测量点.

2.2.2 故障特性分析

在图2(a)所示接地网模型俯视图中,假设存在以下故障:

(1)A(-52.6,20)到B(-52.4,20)处断裂.

(2)C(-2,20)到D(2,20)导体段因腐蚀使导体半径变为原来的一半,即 $r=0.005$ m.

(3)E(38.2,20)到F(38.8,20)处断裂.

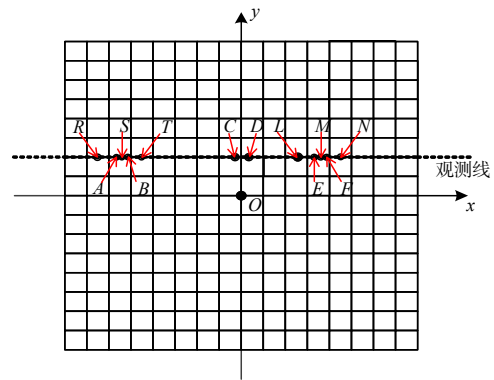
观测线设置在 $y=20, x=(-80, 80)$ 处,图2(b)所示为相邻两观测点间距取10 m时接地网正常与故障时地表磁场仿真结果.

由图2(b)可知,接地网出现故障后观测线上不同位置的磁场强度会出现不同程度的降低.发生导体断裂的(1)和(3)两处地表磁场降低现象较其他位置尤为明显.若排除变电站其他设备对地表磁场的影响,可以根据地表磁场的变化对故障位置进行“区域性”锁定.

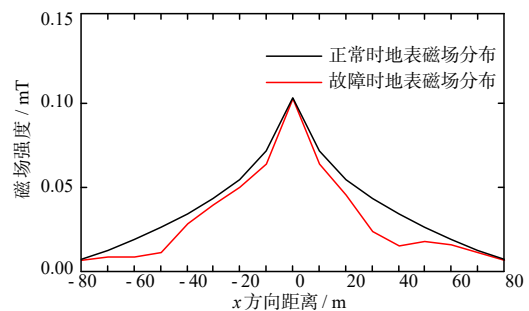
为了进一步分析各个导体段上磁场分布,将相邻两个观测点间距设置为1 m,其他条件保持不变,图2(c)所示为正常与故障时观测线上磁场分布的仿真结果.由图2(c)可见,接地网中断裂和腐蚀处的磁场均出现了明显的降低现象,但断裂处的磁场降低强度明显超过腐蚀区,前者的降低强度可达后者的2~3倍.因此,可通过磁场降低强度对接地网故障类型进行“预判”.

值得注意的是,当接地网存在导体断裂时,除断裂位置地表磁场出现明显的降低外,其临近导体的地表磁场亦存在一定程度的降低.为了便于后文的计算与分析,以正常和故障时地表磁场强度的“差值”为判断依据,定义差值最大点所对应的导体位置为“断裂点”(图2(a)中的S和M两点),定义与“断裂点”在同一观测线上且相邻的两个导体段的中点为“辐射点”.(图2(a)中R、T为S的辐射点,L、N为M的辐射点).计算发现,断裂点和辐射点对于确定故障所在区域乃至其具体位置具有很重要的研究意义.

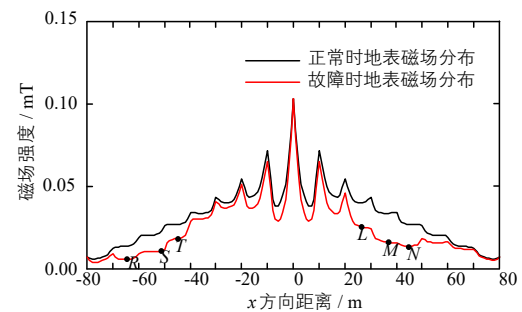
为了更全面地体现接地网导体发生断裂后对其所在区域地面磁场所产生的影响,在“断裂点”附近设置多条观测线进行对比.断裂故障设置如图1(b)所示,设置4条观测线分别为 $y=10$ m、 $y=20$ m、 $y=30$ m、和 $y=40$ m, x 取值范围均为 $x=(-80, 80)$.同一条观测线上相



(a) 接地网故障位置及观测线设置



(b) 相邻观测点间距取10 m时正常和故障地表磁场分布



(c) 相邻观测点间距取1 m时正常和故障地表磁场分布

图2 接地网故障位置设置及对应磁场分布

邻两观测点间距离为1 m,图3给出了4条观测线的地表磁场计算结果.

由图3可见,发生导体断裂位置及其附近区域的地表磁场在 x 和 y 两个方向均出现异常.对比图3中相同

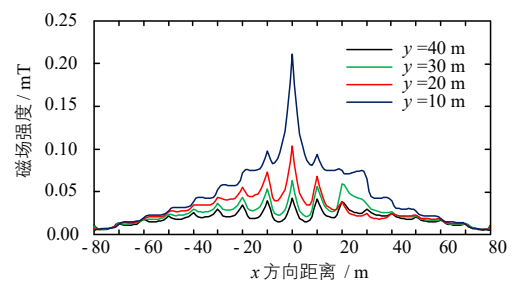


图3 接地网断裂故障时不同水平位置磁场分布

观测线上 O 点两侧的磁场分布,以及不同观测线上相同 x 坐标值处的磁场分布可见:

“ x 方向”对比: $y=20$ m 观测线上, $A_1 \sim B_1$ 区间及其附近位置的地表磁场较该观测线上对称区域($(-20.2, 20) \sim (-20, 20)$)的地表磁场有明显的降低; $y=10$ m, $y=30$ m 和 $y=40$ m 三条观测线上 $x=(20, 20.2)$ 区域较其对称区域 $x=(-20.2, -20)$ 的磁场有不同程度的“提升”,“提升”强度由高到低为: $y=30$ m $>$ $y=10$ m $>$ $y=40$ m.

“ y 方向”对比:相同 x 坐标值对应的不同观测线上地表磁场强度由高到低的整体分布趋势为: $y=10$ m $>$ $y=20$ m $>$ $y=30$ m $>$ $y=40$ m, 且距 O 点越近,此规律体现越明显. 与其他位置不同的是, $x=(20, 20.2)$ 区域各观测线上地表磁场强度由高到低分布为: $y=10$ m $>$ $y=30$ m $>$ $y=20$ m \approx $y=40$ m.

引起上述现象的原因是:在本文计算模型中正方形接地网埋设于均匀土壤中,且激励电流从坐标原点注入,正常的人地电流及地表磁场的分布均应呈对称性(以 O 点为对称中心). 发生局部导体断裂后接地网内的散流不再具有“对称性”,根据式(1)不难发现电流的变化将直接引起地表磁场分布的改变. 由于断裂发生于 x 方向的导体,则其“辐射点”所在导体的散流作用必然被削弱,即本应从“断裂点”流经的全部电流及从“辐射点”流经的部分电流被“分流”至附近的 x 方向导体. 与“断裂点”越近的平行导体获得的“分流”越多. 因此, $y=10$ m 和 $y=30$ m 两条观测线上 $x=(20, 20.2)$ 区域的地表磁场较二者的对称位置 $x=(-20.2, -20)$ 区域“提升”较明显, $y=40$ m 观测线上相同位置的地表磁场“提升”相对较弱. 此外,对比发现 $y=30$ m 观测线地表磁场的“提升”高于 $y=10$ m 观测线,这说明虽然二者与“断裂点”等距离,但前者获得的“分流”要高于后者. 这是由于接地网散流存在“屏蔽效应”且越接近 O 点“屏蔽效应”越严重^[14],致使 $y=10$ m 和 $y=30$ m 两条观测线上的 $x=(20, 20.2)$ 这两个区域获得的“分流”并不均衡.

由上述分析可知,依据电流与磁场间的大小及方向关系,通过获取接地网地表磁场分布特性不仅能对接地网故障区域进行定位,同时可对其故障类型进行“预判”.

2.3 不同故障程度仿真分析

为考察接地网不同程度的故障对地表磁场所产生的影响,并实现对观测点测量灵敏度的定量化反映,本节对接地网的腐蚀程度和断裂程度进行差异性设置. 除故障设置外,其他工况参数均与 2.2 节相同.

在 2.2 节所给接地网模型中,设置 $C_1(0, 20)$ 至 $D_1(10, 20)$ 段导体腐蚀后其半径分别变为原来的 $1/2$ 、 $1/4$ 和 $1/8$,以 $y=20$ m, $x=(-80, 80)$ 为观测线,相邻两观测点距离为 1 m,图 4(a)给出了观测线上正常情况及 3 种腐

蚀状态下地表磁场分布. 另外,分别设置 $A_2(0, 20)$ 至 $B_2(0.1, 20)$ 处存在 0.1 m 的断点和 $y=20$ m 所对应导体整体缺失两种情况,观测线及观测点设置同上,图 4(b)给出了观测线上正常及两种故障状态下地表磁场分布情况.

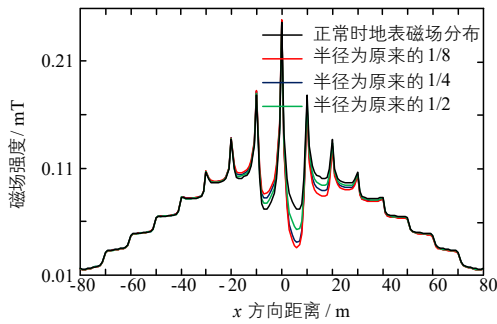
定义 $\delta_1 = \frac{\text{腐蚀时磁场强度}}{\text{无故障时磁场强度}} \times 100\%$,以参数 δ_1 的

变化反映接地网发生腐蚀时磁场测量的灵敏度,图 5(a)给出了不同腐蚀程度与 δ_1 的关系. 定义 $\delta_2 = \frac{\text{断裂时辐射点的磁场强度}}{\text{无故障时辐射点的磁场强度}} \times 100\%$,以参数 δ_2 的变化反映接地网发生断裂时磁场测量的灵敏度,图 5(b)给出了不同断裂长度与 δ_2 的关系.

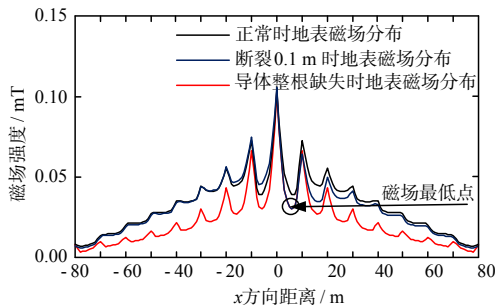
由图 4(a)可知,当 $C_1 \sim D_1$ 段导体半径分别腐蚀至正常值的 $1/2$ 、 $1/4$ 和 $1/8$ 时,对应位置($0 < x < 10$)的地面磁场分别降低至正常值的 73% 、 49% 和 41% ,可见随着该段导体腐蚀程度的增加,其地表磁场呈非线性降低. 同时,该观测线上 $C_1 \sim D_1$ 段右侧($10 < x < 50$)导体的地面磁场亦随着该段导体的腐蚀而降低,不同的是降低程度明显低于 $0 < x < 10$ 区域,且距 $C_1 \sim D_1$ 越远降低幅度越弱. 值得注意的是, $C_1 \sim D_1$ 段左侧($-30 < x < 0$)导体的地面磁场随着 $C_1 \sim D_1$ 段导体腐蚀程度的加剧而非线性“提升”,且距 $C_1 \sim D_1$ 越近“提升”越明显. 这说明随着 $C_1 \sim D_1$ 导体腐蚀度的加剧, $y=20$ m 观测线上该段导体及其右侧($x > 10$)导体的“散流”作用均被削弱,而其左侧($x < 0$)导体的“散流”作用均得到加强,且距离 $C_1 \sim D_1$ 越远“散流”作用被削弱和被加强的效果越不明显. 当 $x > 50$ 和 $x < -30$ 时,导体的“散流”性能几乎不再受 $C_1 \sim D_1$ 导体腐蚀的影响.

由图 4(b)可见,缺失整根导体后 $y=20$ m 观测线上的地表磁场较正常情况的地表磁场整体有明显的降低. 由于缺失整根导体可视为最严重的“导体断裂”,此时的地表磁场应为最低值. 对比发现,当 $A_2 \sim B_2$ 存在 0.1 m 导体断裂时,其对应的地表磁场降低至最低值. 这说明,接地网一旦发生导体断裂,即使是断裂长度很小,其对应位置的地表磁场亦降至最低值. 同时, $A_2 \sim B_2$ 右侧区域地表磁场出现不同程度的降低,其左侧区域地表磁场出现不同程度的提升. 与 $A_2 \sim B_2$ 距离越远,磁场降低和提升的幅度越弱. 因此,若测量获知某条观测线上的地表磁场存在异常,可通过与其正常时和导体整根缺失时两种情况下的地表磁场分布仿真值对比,实现对接地网故障较为准确的诊断.

由图 5 可见,不同腐蚀程度和断裂长度对应的参数 δ_1 与 δ_2 的变化有显著区别. 由图 5(a)可知, δ_1 随着接地网导体腐蚀程度的增加而不断衰减,二者在所给计算区间内近似呈线性关系. 由图 5(b)可知,当接地网导体

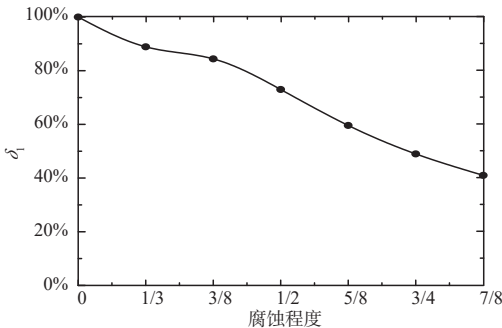
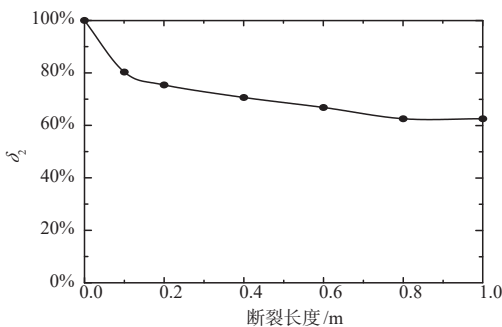


(a) 不同腐蚀半径时地表磁场分布



(b) 不同断裂长度时地表磁场分布

图4 不同故障情况时接地网地表磁场分布

(a) δ_1 与接地网腐蚀程度关系(b) δ_2 与接地网断裂长度关系图5 δ_1, δ_2 与故障程度关系

发生短距离断裂时 δ_2 将出现“陡降”,随着断裂长度增大 δ_2 继续降低但降低速率减缓, δ_2 与断裂长度在所给计算区间内整体呈较强的非线性关系。

值得说明的是,计算发现不同的接地网故障位置及不同的故障组合所引起的“散流变化”是有区别的,这必然引起地表磁场分布的差异化。接地网可能存在的故障情况多且复杂,本文无法逐一探讨故以上文两例举例分析,对于工程中存在的其他故障将对具体问题针对性计算和分析。

综上所述,与腐蚀和断裂导体处于同一“散流路径”的导体的散流作用将被限制,因此与腐蚀和断裂导体处于不同“散流路径”的导体将承担更多的分流,其散流作用将被加强。被“限制”和“加强”的程度,均随着与故障导体距离的增大而非线性减弱。同时导体散流强度的变化,必然引起对应位置地表磁场的改变,依据地表磁场的分布特性可准确反映接地网导体的状态。另外,发生腐蚀后导体半径减小而散流能力降低,发生断裂后导体将失去散流能力,故此导体腐蚀引起“限流”,导体断裂引起“断流”,虽然二者对应的地表磁场都降低,但降低程度和降低的表现形式均不同,这为二者的区分提供了理论依据。

3 故障特征分析

3.1 故障特征值

为了对接地网故障程度有更为明确的划分,本文定义故障特征值作为性能参数对其进行反映。以接地网地表磁场强度变化作为故障特征信息,结合曼哈顿距离函数对故障特征进行分析^[15]。曼哈顿距离用来标明两个点在标准坐标系上的绝对轴距总和。由于该算法仅做加减法运算,不仅能消除欧氏距离计算过程中因开平方取近似值带来的误差,而且能降低计算机整体工作量提高工作效率。

利用曼哈顿距离函数定义腐蚀特征值 M_f ,表示腐蚀导体段对应的地表磁场强度变化的累积效果:

$$M_f = \sum_{i=0}^n |Y_i - F_i| \quad (2)$$

式中: Y_i 表示无故障接地网中 i 点地表磁场强度, F_i 表示发生腐蚀后接地网腐蚀区域内 i 点地表磁场强度, n 为故障区域的取值点数。

定义断裂特征值 M_d 表示断裂点对应的地表磁场强度变化:

$$M_d = |W_i - D_i| \quad (3)$$

$$M'_d = |W'_i - D'_i| \quad (4)$$

式中: W_i 表示无故障接地网中 i 点地表磁场强度, D_i 表示接地网断裂区域内 i 点地表磁场强度。

因接地网断裂处地表磁场会降至最低值,故采用辐射点断裂特征值 M'_d 对断裂程度进行描述。式(4)中, W'_i 表示无故障接地网中 i 点左侧辐射点 i' 的地表磁场强度, M'_d 表示接地网断裂区域内 i 点左侧辐射点 i' 的地

表磁场强度.

利用上述方法分别对 2.3 节设置的两种故障所对应的 M_f 和 M_d' 进行计算,其他工况参数设置同 2.2 节,结果如表 1~表 2 所示:

表 1 腐蚀特征值(mT)

腐蚀程度	1/3	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
M_f (mT)	0.0028	0.0039	0.0067	0.0101	0.0165	0.0313

表 2 故障特征值(mT)

断裂程度/m	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
M_d' (mT)	0.0079	0.0083	0.0086	0.0089	0.0096	0.0096

腐蚀特征值与腐蚀程度及断裂特征值与断裂程度的关系如图 6 所示. 由图 6 可知,随着腐蚀程度和断裂长度的增加, M_f 和 M_d' 体现了不同程度的非线性增长. 不同的是, M_f 在计算范围内始终随着腐蚀度的增加而增大,且增大的“陡度”越来越大. M_d' 在计算范围内随着断裂长度的增加呈“分段式”增长:当断裂长度在 0.8 m 以内, M_d' 随断裂长度的增加大致呈两种“陡度”的线性增长,其中断裂长度在 0.3 m~0.5 m 时 M_d' 的增长陡度与其他区间相比明显较低;当断裂长度为 0.8 m~

1.0 m 时 M_d' 不再随断裂长度增加而改变.

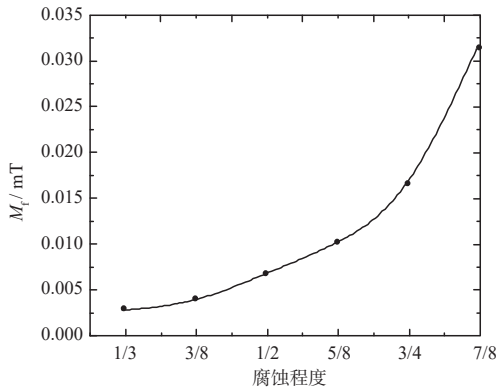
需要注意的是, M_f 和 M_d' 同时受到入地电流幅值和频率的影响,因此需在确定入地电流幅值和频率的前提下,预先对可能存在的 M_f 和 M_d' 进行计算,然后将实测接地网地表磁场后计算获取的 M_f 和 M_d' 与预算值进行对比,从而实现对接地网腐蚀和断裂程度的量化描述.

3.2 故障特征的放大

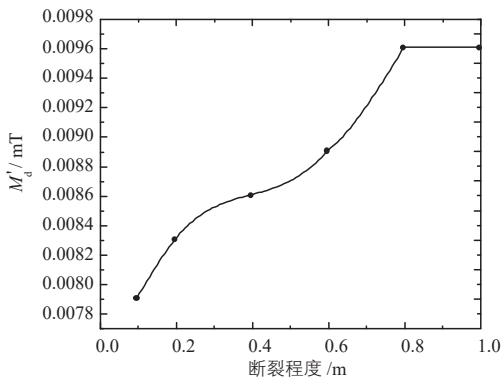
考虑到地表磁场的测量精度会影响后续故障特征值的计算准确性,进而影响接地网故障诊断的有效性,有必要采取一定方法对地表磁场的测量进行合理的放大. 以 2.3 节中设置的接地网腐蚀和断裂两种故障为计算模型,考察入地电流幅值和频率对 M_f 和 M_d' 的影响,并据此选取合适的放大量.

3.2.1 电流幅值的影响

根据式(1)~(4),地表磁场随激励电流增大而增强,进而引起 M_f 和 M_d' 参数的增大,实现特征值的放大效果. 根据实际工程情况,本文考察电流幅值对 M_f 和 M_d' 的影响时,电流幅值取值范围为 5 A~50 A. 接地网腐蚀和断裂情况下的 M_f 和 M_d' 与入地电流幅值关系如图 7(a)所示.

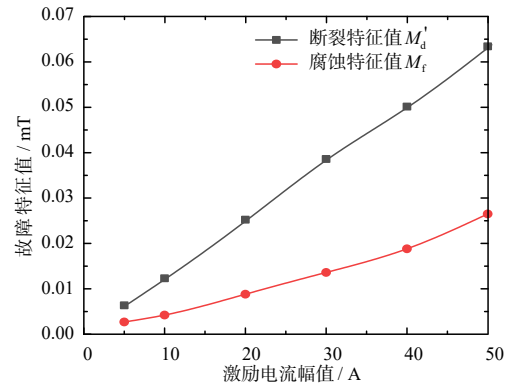


(a) M_f 与腐蚀程度关系

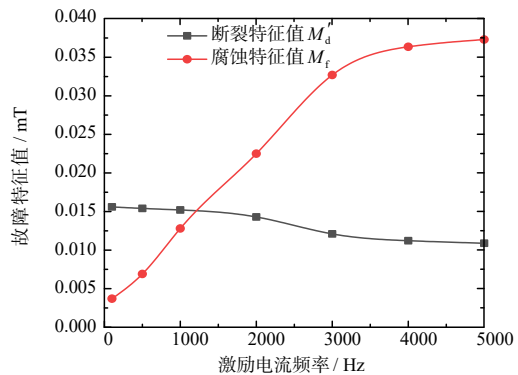


(b) M_d' 与断裂长度关系

图 6 M_f 和 M_d' 与故障程度关系



(a) 故障特征值 M_f 和 M_d' 与激励电流幅值的关系



(b) 故障特征值 M_f 和 M_d' 与激励电流频率的关系

图 7 故障特征值 M_f 和 M_d' 与激励电流幅值和频率的关系

由图7(a)可见, M_f 和 M_d' 在给定电流范围内均随电流幅值增大而增大,但二者的增长趋势有较大差别. M_f 和 M_d' 随电流幅值增大分别近似成 4.6×10^{-4} mT/A 和 1.3×10^{-3} mT/A 规律增长. 故障特征值的放大有利于接地网故障进行更为清晰和全面的诊断,因此激励电流幅值的选取需综合考虑磁场测量精度、对故障特征值的放大效果、接地网面积以及电流发生器的设计及制作成本等因素. 针对本文计算工况,选取激励电流幅值为 10 A~15 A 较为合理.

3.2.2 电流频率的影响

接地体阻抗与电流频率密切相关,这主要是由于:导体中电流的集肤效应和导体感抗均随入地电流频率增大而增强(增大)^[16],同时土壤极化效应使得土壤电阻率随电流频率增大而降低^[17]. 基于此,在对接地网入住高频电流的情况进行模拟计算时,本文采用文献[18,19]所给的修正公式对接地网物性参数进行修正.

$$\rho_f' = \frac{e^{(3.36 + \frac{3.06}{f} - 0.026 \ln f)}}{27.65} \times 100 \quad (5)$$

式中, ρ_f' 为修正后的土壤电阻率($\Omega \cdot m$), f 为电流频率(Hz).

为考察激励电流频率对 M_f 和 M_d' 的影响,本文计算了电流频率取值为 100 Hz~5000 Hz 时腐蚀和断裂的特征值 M_f 和 M_d' ,计算结果如图7(b)所示.

由图7(b)可知,随着激励电流频率的增大, M_f 和 M_d' 呈现不同的变化趋势. 当 $100 \text{ Hz} < f < 3000 \text{ Hz}$ 时 M_f 随电流频率增加而近似线性增大, $f > 3000 \text{ Hz}$ 后其增速开始减缓,当 $f > 4000 \text{ Hz}$ 后 M_f 增速进一步减缓而渐趋稳定. M_d' 随电流频率增大而降低,且其降低“陡度”整体相对较小,仅在 $1000 \text{ Hz} < f < 3000 \text{ Hz}$ 时略有增加,但整体明显低于 M_f 的增长“陡度”. 当 $f > 4000 \text{ Hz}$ 后 M_d' 的变化亦渐趋稳定.

上述现象产生的主要原因是:电流频率越高集肤效应越强,电荷更多集中于导体表面,因此表面积越大单位长度导体内通过的电荷越多. 腐蚀后导体半径变小引起表面积减小导致单位长度导体电荷数减少,因此电流频率越高由半径差异引起的电流差越大,致使 M_f 随频率增大而增大. 另外,导体感抗随电流频率增大而变大,从导体内流过的电流整体降低. 导体感抗增大后的“降流”效果使得地网正常状态下的散流能力与导体断裂后的“断流”状态之间的差距减小,且电流频率越高该差距越小,即 M_d' 随频率增大而降低. 又由于上述参数特性随电流频率产生的变化均为非线性,并不会随电流频率的增加而持续不断的改变,终会趋于“饱和”状态,当 $f > 4000 \text{ Hz}$ 后, M_f 和 M_d' 的变化均渐趋稳定.

综上所述,电流幅值和频率的改变均会引起接地网地表磁场的变化,进而改变故障特征值 M_f 和 M_d' 的大

小. 本文对接地网故障的分析是以某特定条件下的电流参数所得到的 M_f 和 M_d' 为“参考标准”,若入地电流幅值和频率改变则该“参考标准”亦将改变,如果不考虑干扰信号的影响则对测量精度并无影响,但实际上磁场信号强度增强则越有利于排除其他信号的干扰,能够在一定程度上提高测量准确性. 综合考虑 M_f 和 M_d' 对激励电流频率变化所体现的变化特点、电流发生器成本以及排除地网敷设区域内其他电气设备的工频磁场对测量造成的干扰等因素,针对本文计算工况,激励电流频率选取 100 Hz~2000 Hz 之间可满足工程要求.

4 试验验证

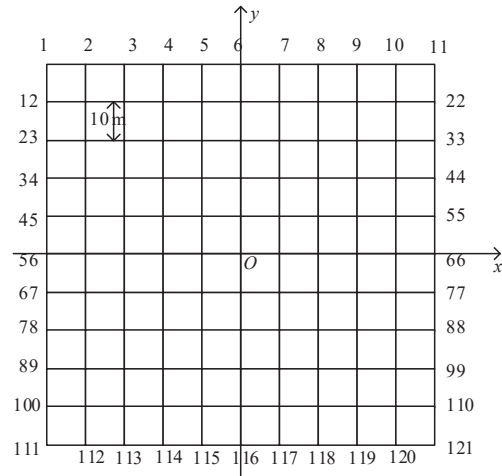
为验证本文所提接地网故障诊断的原理及方法的可行性,在某变电站进行了现场试验. 变电站接地网面积为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,埋地深度为 0.8 m,导体材料是 $60 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的镀锌扁钢,电阻率为 $1.78 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$,相对磁导率为 636. 通过现场测量及反演计算,站内土壤可等效为水平双层结构:上层土壤厚度 2 m 电阻率为 $92.5 \Omega \cdot m$,下层土壤电阻率为 $250 \Omega \cdot m$. 接地网模型如图8(a)所示.

由式(5)计算可得上下两层土壤电阻率的修正值分别为 $78.625 \Omega \cdot m$ 和 $212.5 \Omega \cdot m$. 首先仿真获取完好接地网的地表磁场分布,然后在中心点处施加幅值 10 A 频率 2000 Hz 的高频电流,利用高精度数字磁通门计测量地表磁场强度. 接地网的周边节点及网内各段导体交点设置为观测点,观测点编号规则如图8(a)所示. 图8(b)给出了接地网 121 个观测点地表磁场强度无故障模拟值与实际测量值之差的绝对值. 对本文试验接地网进行不同故障情况的模拟计算发现,若计算值与实际值相差超过 0.003 mT 则实测值属非正常状态,该位置可能存在故障,需对其进一步分析.

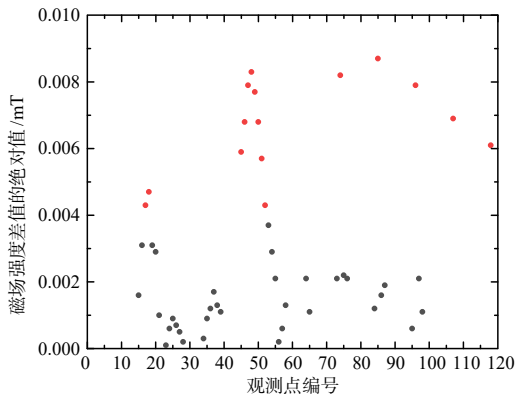
由图8(b)可知,地表磁场测量值明显偏低的观测点编号为 17、18、45~52、74、85、96、107、118,所分布的区域主要有三个:(0,40)至(10,40),(-30,20)至(-20,20)和(20,-20)至(20,-10),如图8(c)所示.

为考察这三个区域的接地网状况,分别设置 $y=20 \text{ m}$ 、 $y=40 \text{ m}$ 和 $x=20 \text{ m}$ 三条观测线,对三条观测线地表磁场的计算值和测量值进行对比. 为了降低工作量提高测量效率,设置相邻两观测点间距离为 10 m,对比结果如图9所示.

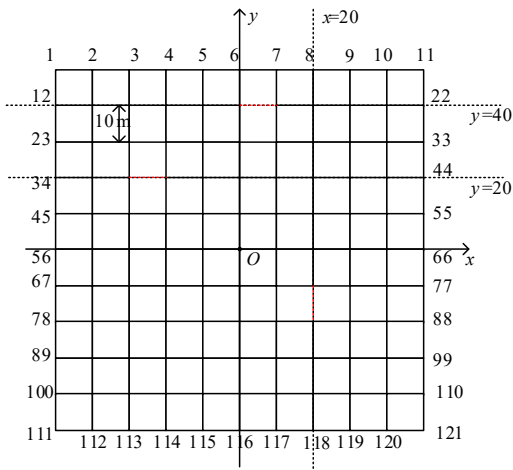
由图9可知, $y=20 \text{ m}$ 和 $x=20 \text{ m}$ 两条观测线上的地表磁场测量值与完好状态的计算值相比,均存在较大程度的降低,且波及范围相对较大. $y=40 \text{ m}$ 观测线上的地表磁场测量值与计算值相比有所降低,但降低的幅度和波及范围均相对较小. 根据前文的介绍,可初步诊断 $y=20 \text{ m}$ 和 $x=20 \text{ m}$ 两条观测线对应的接地体存在断



(a) 变电站接地网模型



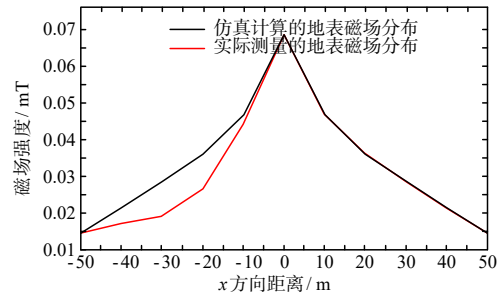
(b) 各导体交点磁场强度差值



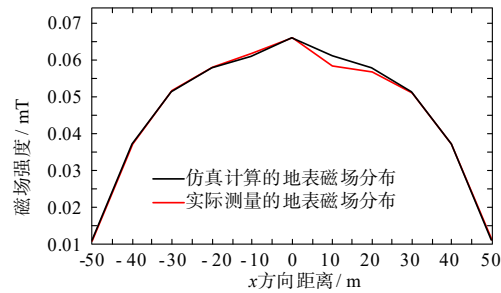
(c) 接地网故障预测区域

图8 试验接地网模型及其故障预测

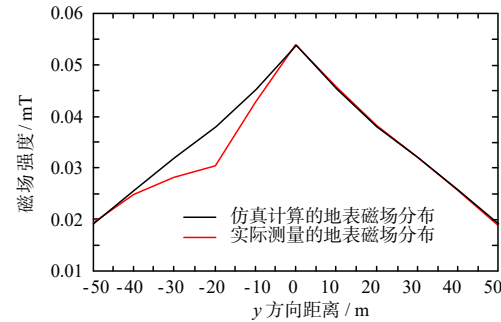
裂故障, $y=40$ m 观测线对应的接地体存在腐蚀故障. 由于试验中设置的观测点间距为 10 m, 为了避免开挖较长的地面距离采用前文介绍的特征值方法实现对故障



(a) $y=20$ m 观测线地表磁场分布



(b) $y=40$ m 观测线地表磁场分布



(c) $x=20$ m 观测线地表磁场分布

图9 三条观测线地表磁场实测和仿真分布结果

点的准确诊断.

表3~表5所示分别为观测线 $y=20$ m 和 $x=20$ m 故障区域断裂特征值 M_d' 的计算结果以及观测线 $y=40$ m 故障区域腐蚀特征值 M_r 的计算结果.

表3 断裂特征值(mT)

断裂程度(m)	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
M_d' (mT)	0.00875	0.00907	0.00936	0.00959	0.00987	0.01013

表4 断裂特征值(mT)

断裂程度(m)	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
M_d' (mT)	0.01002	0.01024	0.01046	0.01059	0.01072	0.0111

根据现场实测结果可得, $y=20$ m 和 $x=20$ m 两条观测线上故障区域的断裂特征值 M_d' 分别为 0.00948 mT 和

表5 腐蚀特征值(mT)

腐蚀程度	1/3	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
M_f (mT)	0.0037	0.0059	0.0082	0.0157	0.0212	0.0352

0.01033 mT,与表3和表4对照可推测二者的断裂长度应分别为0.4 m~0.6 m和0.2 m~0.4 m.在 $y=40$ m观测线上故障区域的腐蚀特征值为0.0121 mT,与表5对照可推测其对应的腐蚀程度为导体等值半径的1/2~5/8之间.

根据上述诊断结果分别对相应位置的接地网开挖,发现 $y=20$ m观测线上存在约0.53 m的断裂; $x=20$ m观测线上存在约0.26 m的断裂; $y=40$ m观测线上存在约2 m长的腐蚀区域,剩余导体等值半径约为正常值的一半.由此可见,实际情况与诊断结果相吻合,证明本文诊断方法的有效性.值得注意的是,根据最终结果可见接地网的故障仅是偶然发生而并非普遍存在,故敷设区域的土壤整体环境存在问题的可能性不大.断裂故障可能是接地网初期的施工存在虚焊或者漏焊,随运行时间的延长而发展形成.腐蚀位置可能是接地网施工初期防腐涂层有遗漏或者偶然沾有腐蚀性液体所致.

为了验证本文方法的普适性,理论上应选择不同的变电站进行现场测量和故障诊断,受客观条件限制本文作者无法找到其他变电站进行试验测量,因此本文以文献[20]中现场测量数据为参考进行对比分析.文献[20]中在 $x=8$ m和 $x=16$ m两个区域的磁场强度较正常情况均出现了较小幅度的降低,初步推测可能存在腐蚀故障.根据文献所给工况参数采用本文上述方法可计算获得此二区域的腐蚀特征值参考标准分别为表6和表7,由现场数据计算得二者的腐蚀特征值分别为0.036924 mT和0.0114723 mT,对照表6和表7二者的腐蚀程度应分别约为1/4和略小于1/5,这与文献[20]所提供的现场测量数据基本一致.

表6 腐蚀特征值(mT)

腐蚀程度	1/5	1/4	1/3	1/2	3/4	7/8
M_f (mT)	0.0236	0.0368	0.0501	0.0726	0.0866	0.1122

表7 腐蚀特征值(mT)

腐蚀程度	1/5	1/4	1/3	1/2	3/4	7/8
M_f (mT)	0.0123	0.0268	0.0396	0.0521	0.0723	0.9887

5 结论

本文以磁参数为参考量对变电站接地网故障进行了研究,得出以下结论:

(1)接地网出现故障后导体散流能力下降,导致对应区域的地表磁场有不同程度的降低,不同故障对应的磁场降低幅度和波及范围有较明显区别.

(2)接地网地表磁场分布可作为地网故障类型和

区域的预判依据,本文所定义的故障特征值可显著提高故障诊断准确性.

(3)激励电流幅值与频率均可对地表磁场产生明显影响,进而影响故障特征值.

参考文献

- [1] 张波,何金良,曾嵘.电力系统接地技术现状及展望[J].高电压技术,2015,41(8):2569-2582.
ZHANG Bo, HE Jin-liang, ZENG Rong. Current status and prospect of power system grounding technology[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(8): 2569-2582. (in Chinese)
- [2] 罗先觉,王森,牛涛.接地网腐蚀诊断的可信度分析[J].中国电机工程学报,2010,30(07):98-103.
LUO Xian-jue, WANG Sen, NIU Tao. Reliability analysis of grounding grid corrosion diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(07): 98-103. (in Chinese)
- [3] 许磊,李琳.基于电网络理论的变电站接地网腐蚀及断点诊断方法[J].电工技术学报,2012,27(10):270-276.
XU Lei, LI Lin. Corrosion and breakpoint diagnosis method of substation grounding grid based on electric network theory[J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2012, 27(10): 270-276. (in Chinese)
- [4] 冯南战,李志忠,李亨特,等.高压变电站接地网的腐蚀防护与监测技术研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2018,30(03):331-338.
FENG Nan-zhan, LI Zhi-zhong, LI Heng-te, et al. Research progress on corrosion protection and monitoring technology of grounding grid in high voltage substation[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(03): 331-338. (in Chinese)
- [5] 罗光鸿,李文杰,董学帆,等.变电站接地网腐蚀诊断方法探讨[J].电工技术,2018(21):14-16.
LUO Guang-hong, LI Wen-jie, DONG Xue-fan, et al. Discussion on corrosion diagnosis method of substation grounding grid[J]. Electrical Technology, 2018(21): 14-16. (in Chinese)
- [6] ZHANG Bo, ZHAO Zhi-bin, CUI Xiang. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using electromagnetic method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 473-476.
- [7] 刘洋,崔翔,卢铁兵.变电站接地网的断点诊断方法[J].电网技术,2008,32(2):21-25.
LIU Yang, CUI Xiang, LU Tie-bing. Breakpoint diagnosis method of substation grounding grid[J]. Power Grid Technology, 2008, 32(2): 21-25. (in Chinese)

- [8] DAWALIBI F P. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors Part 2-Ground conductor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(4): 112-119.
- [9] 刘洋, 崔翔, 赵志斌. 应用阻抗变换技术的变电站接地网检测系统激励源的设计与应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 18-23.
LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhi-bin. Design and application of excitation source of substation grounding grid detection system using impedance transformation technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 18-23. (in Chinese)
- [10] 刘健, 王树奇, 李志忠, 等. 基于网络拓扑分层约简的接地网腐蚀故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 122-128.
LIU Jian, WANG Shu-qi, LI Zhi-zhong, et al. Fault diagnosis of grounding grid corrosion based on network topology hierarchical reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 122-128. (in Chinese)
- [11] 冯涛. 有限长螺线管场分布特性分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [12] 陈钺, 刘发科. 库仑定律与毕奥-萨伐尔定律[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2005, (03): 34-36.
CHEN Yue, LIU Fa-ke. Coulomb's law and Biotsavart law[J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology(Natural Science Edition), 2005, (03): 34-36. (in Chinese)
- [13] 刘洋, 崔翔, 赵志斌, 等. 变电站接地网腐蚀诊断磁场检测系统的设计与应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(01): 176-182.
LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhi-bin, et al. Design and application of magnetic field detection system for corrosion diagnosis of grounding grid in substation[J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2009, 24(01): 176-182. (in Chinese)
- [14] 袁涛, 唐妍, 司马文霞, 等. 短导体对水平接地极冲击特性的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(01): 177-185.
YUAN Tao, TANG Yan, SIMA Wen-xia, et al. Influence of short conductor on impact characteristics of horizontal grounding electrode[J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2015, 30(01): 177-185. (in Chinese)
- [15] MISAKI S, TANAKA K L. City shapes that maximize the number of walking-only trips based on Manhattan distance[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2020, 14(5): 1-19.
- [16] XIE Fei, WANG Ze-qi, WANG Dan, et al. Galvanic corrosion behaviour and mechanism of skin effect heat tracing pipes[J]. Corrosion Engineering Science and Technology, 2020, 55(1): 8-17.
- [17] 荆永明. 雷电冲击下地电位升对智能组件电源端口电磁传导干扰研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [18] MINET J, LAMBOT S, DELAIDE G, et al. A generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination[J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(4): 1063-1072.
- [19] 张蓬鹤. 基于接地系统频域特性的接地网缺陷诊断研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [20] 康云鹏. 基于磁感应强度的变电站接地网腐蚀诊断研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.

作者简介



于建立 男, 1983年4月出生于吉林省通化市. 现为潍坊学院副教授、硕士生导师. 获省级科技进步奖1项. 在国内外发表学术论文10余篇.

E-mail: yu-jianli@foxmail.com