

文章编号: 2096-1618(2025)03-0286-08

接地网故障下的频率特性研究

陈思学¹, 邹杰², 戴丽平¹, 郭在华², 刘欣雨¹, 吴翔辉²

(1. 中国石油安全环保技术研究院, 辽宁 大连 116000; 2. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:为解决当前接地网故障的诊断过程中,需要采取停工、断电以及人工挖掘等耗时耗力的方式,提出一种创新性的检测方案。仿真分析不同接地网布局方式下接地导体的频率响应特性,探讨不同电流注入方式对频率响应曲线的影响。随后,进一步仿真了接地网存在腐蚀或断裂时导体上方地表电位分布的情况,得出利用地表电位节点电压的接地网故障状态判断方法。结果表明:不同的接地方式具有相似的频率特性,当接地体半径发生变化时,接地阻抗会出现明显差异;利用地表节点电位值可以准确判断接地网的故障状态,能够区分断点和腐蚀情况,并定位断点位置和腐蚀范围;曼哈顿距离函数可以量化腐蚀和断裂的特征,提高对故障特征的辨识能力。

关键词:接地网;频率;接地阻抗;节点电位

中图分类号:TM862

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.005

0 引言

接地网在建筑、通信和电力等多个领域起着重要的作用。当地面设备遭受雷击或系统故障,会产生高故障电压,进而影响电气和电子设备的正常运行,给社会财产和群众安全造成巨大的影响和威胁^[1-3]。由于钢材强度和硬度高且成本比铜低,中国接地网选用的接地材料大部分是钢材,但是其导电率、耐腐蚀性和抗氧化性差^[4-5]。因此,接地网容易受外界条件因素干扰导致发生腐蚀或者断裂,从而导致接地网性能下降进而引发电力系统故障,影响电网的正常供电^[6-9]。

刚波等^[10]研究大电流法下检测电流的频率和引线布线方法对检测结果的影响,有效解决大地网干扰电流的问题,但存在工作量大和施工难度高的问题。施会等^[11]利用接地网的电压和磁感应特性可诊断变电站接地网故障并识别故障类型;张树亮等^[12]使用诊断地表电磁感应密度的方法分析大型接地网地表面的磁场分布,然后根据磁场分布特征和规律快速确定接地网导体的断点故障及部位。然而,实际情况中变电站周围的磁场环境十分复杂,难以准确诊断。罗光鸿等^[13]利用电网络理论结合混合遗传算法成功诊断出腐蚀导体段,但该方法将电阻视为纯电阻,没有考虑导体间的自感和互感。张文龙等^[14]利用接地网存在腐蚀和断裂时的地表电位分布并结合欧式理论,对缺陷特征进行数值化分析,实现缺陷信息放大。Li等^[15]研究注入电流波形、注入位置、土壤电阻率、接地导体和接地网结构对地电位差和安全电流阈值的影响,从而减少地电位差对人身安全的威胁。

实际情况中,以上研究存在一定的局限性。本文考虑实际地网模型的变化特征,提出一种频率特性量化放大接地网故障下,地表电位节点电压测量诊断的方法。这种方法更适用于地网故障的判断和定位。

1 不同接地方式频率响应特性

1.1 接地网模型建立

基于暂态微分形式的麦克斯韦方程为基础,加入位移电流和土壤泄露电流,建立模型^[16-17]。

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{J} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{J} = \gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3)$$

式中, \vec{E} (V/m) 为电场强度, \vec{D} (C/m²) 为位移电流, J (A/m²) 为电流密度, γ 为介电电导率。式(3)中右边第一项为介质漏电流密度,第二项为位移电流密度。根据方程的介电性质:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4)$$

其中, ϵ 是相对介电常数,与场的电场电势之间的关系:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (5)$$

将式(3)、(4)、(5)带入式(2)得到:

$$(\gamma + \epsilon \frac{\partial}{\partial t}) \nabla^2 \varphi = 0 \quad (6)$$

不同介质界面的边界:

$$\begin{cases} \varphi_1(t) = \varphi_2(t) \\ \epsilon_1 \frac{\partial}{\partial n} \varphi_1(t) = \epsilon_2 \frac{\partial}{\partial n} \varphi_2(t) \end{cases} \quad (7)$$

采用格林电场函数与电路理论中的基尔霍夫电流定律相结合的方法,建立接地网等效电路模型^[18]。假

收稿日期:2023-12-08

基金项目:四川省科技重点研发资助项目(2022YFG0234)

通信作者:邹杰. E-mail:1094648444@qq.com

设接地网有 n 个支路和 m 个节点。对于口字形模型,将电流注入接地网,如图1所示,其中 c 为导体的末端节点, d 为导体的中心节点。

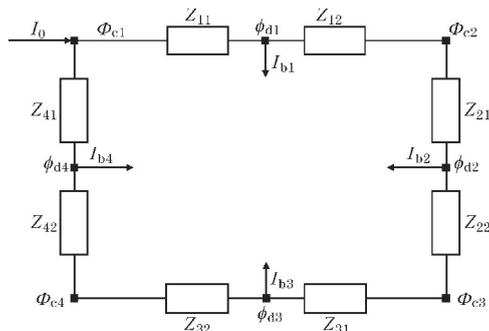


图1 接地网等效电路模型

接地网电流在沿导线流动时消散到地面上。假设导体的漏电流从导体的中心节点流入地,轴向阻抗是终端阻抗的两倍。电流耗散会导致所有导体表面的电压发生变化^[19]。根据基尔霍夫电流定律,终端节点和中心节点的电压方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} + \mathbf{R}^{-1} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi}_d \\ \boldsymbol{\varphi}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $\boldsymbol{\varphi}_d = [\varphi_{d1}, \varphi_{d2}, \dots, \varphi_{dn}]^T$, φ_{di} 是导体 i ($i=1, 2, \dots, n$) 的中心电势; \mathbf{R} 是一个 $n \times n$ 矩阵,即自阻抗和对地互阻抗; \mathbf{B} 为对角非零矩阵,即导体中心节点自身导纳; \mathbf{C} 是对称矩阵,即中心节点和终端节点之间的互导纳,如果节点连接,则对应的矩阵元素为零; \mathbf{E} 是一个 $m \times m$ 矩阵,即导体终端节点的自身阻抗; $\boldsymbol{\varphi}_c = [\varphi_{c1}, \varphi_{c2}, \dots, \varphi_{cn}]^T$, φ_{ci} 是节点 i 的电势; $\mathbf{I}_0 = [I_0, 0, \dots, 0]^T$ 为注入电流,图中 $\mathbf{I} = [I_1, I_2, \dots, I_n]^T$, I_i 为导体的漏电流。根据点电流源的格林函数,泄漏电流与中心电位的关系可以表示为

$$\mathbf{I} = \mathbf{R}^{-1} \boldsymbol{\varphi}_{di} \quad (9)$$

接地网的地表电位主要受到导体上各点的泄漏电流的影响^[20]。因此,可以通过计算中心节点的所有泄漏电流,来确定地表上任意位置 Q 的电位。假设 Q 的坐标为 (x, y, z) ,那么可以将所有泄漏电流的电位相加,以获得 Q 在地表上的电位。

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (10)$$

式中, ρ 为导体电阻率, L 为导体长度, S 为导体横截面。当导体电阻率 ρ 及长度 L 确定时,导体横截面的变化会造成电阻 R 的变化,即当接地网存在断点或腐蚀时,该位置处的导体横截面积减小,电流分布就会发生改变,进而影响接地网各点的电位分布。

1.2 不同点电流注入

水平接地导体是接地中一种典型的类型,接地极电流注入方式通常有3种类型:单端注入、中端注入和交叉点注入^[21]。为研究3种接地体模型的接地阻抗

特性,搭建不同注入方式的模型,如图2所示,埋深为0.8 m,半径9 mm、导体长度40 m,土壤电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$,注入电流为20 A。

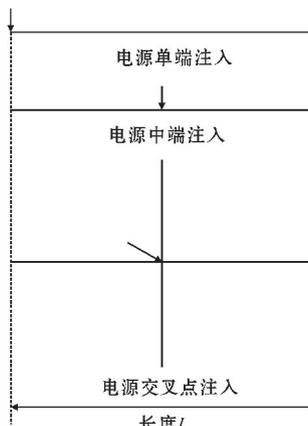


图2 不同电流注入点示意图

1.3 接地结构对频率特性的影响

1.3.1 接地结构对频率特性的影响

当电流通过接地导体时,会出现趋肤效应,并与穿透深度密切相关。在稳定电场作用下,接地导体的穿透深度远小于土壤的穿透深度^[22]。因此,考虑接地导体的趋肤效应是必要的,因为它会影响漏电流的分布。导线自身的阻抗可以根据以下公式计算:

$$Z = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\mu f \rho}{2\pi}} \quad (11)$$

式中, μ 为土壤渗透率, r 和 ρ 分别为半径和土壤电阻率, f 为频率。

在接地网中,观察到轴向电流沿接地导体流动,产生接地导体之间的互感^[23]。简化计算,将接地导线划分为等长的微截面。假设每个微截面都是一个线性电流源,则互感电阻:

$$M = l\rho \left(\ln \frac{2l}{d} - 1 \right) f \quad (12)$$

式中, l 为导体长度, d 为导体间距, f 为频率, ρ 为土壤电阻率。

根据仿真数据,绘制不同注入方式下阻抗频率特性见图3。

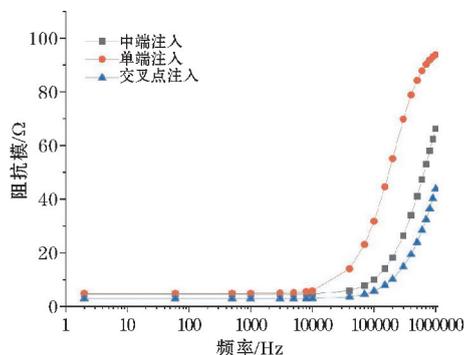


图3 $r=9 \text{ mm}$ 时不同接地方式阻抗模频率特性图

从图3可看出,在横轴相同时,阻抗模由大到小依次为单端注入,中端注入,交叉点注入。在10 kHz以后,阻抗模均呈指数上升。这是由于随着频率升高,导体内需要考虑电磁波传播过程,高频时波在传播时会遇到更大的阻抗;此外,还会发生趋肤效应导致高频电流的有效导体截面较小,导致散流能力下降,阻抗模值上升。

1.3.2 接地体半径对频率特性的影响

为探究半径不同时接地阻抗的特性且不考虑电磁波过程,将注入电流频率范围缩小至2 Hz~20 kHz,分别令 $r=0.009$ m和0.04 m,模拟其半径改变时的变化,观察频率阻抗特性。

由图4可知,对于相同接地方式,不同半径情况下,阻抗模的频率特性曲线总体呈上升趋势,且两者差值逐渐减小。这是由于随着频率升高,电流逐渐集中在导体的表面层,而不是均匀地分布在整个导体截面上。半径较小的导体表面层所占的比例相对较大,导致表面层的电流密度更高,从而导致更大的阻抗,因此半径较小的导体其阻抗模值会更大。当半径小的导体电流密度达到一定程度,阻抗上升程度减少,因此半径大的导体阻抗模会逐渐逼近半径小的导体。

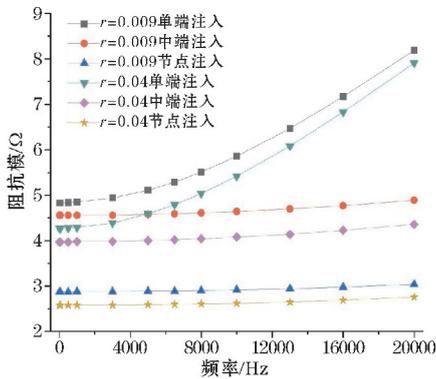


图4 不同半径3种接地方式下阻抗模特性图

2 地表电位节点电压诊断方法

2.1 实际接地网模型建立

变电站接地网大多是由金属导体焊接而成,为网状形状^[24-25],为进一步研究接地网存在故障时地表电位的特征变化。假设网孔数为6×6,导体长度10 m,埋深 $h=0.8$ m,采用50 mm×5 mm的扁钢,电阻率 $1.7 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 。采用交叉点注入方式从中心点24注入幅值为5 A的频率为60 Hz的激励电流^[26]。

接地网仿真计算模型如图5所示。现假设该接地网在 $Y=20$ 处导体 $X=0 \sim 60$ m存在以下故障:

(1)导体段(14.4,14.6)处出现0.2 m的断点。

(2)导体(20,30)区域内的导体段发生腐蚀其半径由9 mm变为4.5 mm。

(3)导体段(46.5,46.6)存在0.1 m的断点。

42	43	44	45	46	47	48
35	36	37	38	39	40	41
28	29	30	31	32	33	34
21	22	23	24	25	26	27
14	15	16	17	18	19	20
7	8	9	10	11	12	13
0	1	2	3	4	5	6

图5 接地网仿真计算模型

图6为 $Y=20$ m处正常状态接地网与故障接地网地表电位分布对比图。可知,故障状态下点A、B、C所处的区间内较正常状态下的地表电位出现明显跌落。这是由于接地网规模较大且导体分布密集,断裂时导体上的电流流入土壤,腐蚀时导体横截面积减小都可以等效为导体电阻增加,进而影响该位置处的漏电流性能,导致泄漏电流减小,从而降低了地表电位。断点区间A、C处的电位降低趋势明显更陡峭,腐蚀区间点B处的电位降低较为平缓。因此可利用地表电位变化信息来判断故障所处导体段位置。

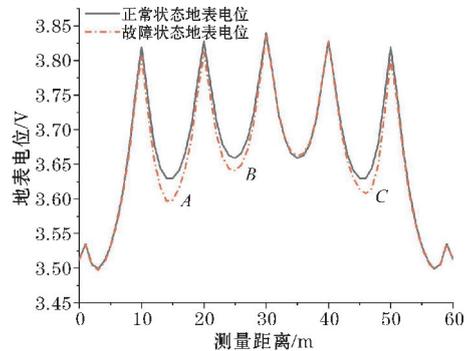


图6 地表电位分布对比图

2.2 故障特征细化

对 $Y=20$ m, $X=(0,60)$ 的腐蚀状态作出以下假设:(1)对 $X=(10,20)$ 导体段的半径由9 mm腐蚀至4.5 mm;(2)对 $X=(40,50)$ 导体段的半径由9 mm腐蚀至3 mm。

对 $Y=20$ m, $X=(0,60)$ 的断裂状态作出以下假设:(1)对 $X=(40,50)$ 导体段在(42.1,42.2)存在0.1 m的断点。(2)对 $X=(40,50)$ 导体段在(48.7,48.9)存在0.2 m的断点。

对以上假设条件的故障导体段地表电位仿真结果如图7、8所示。

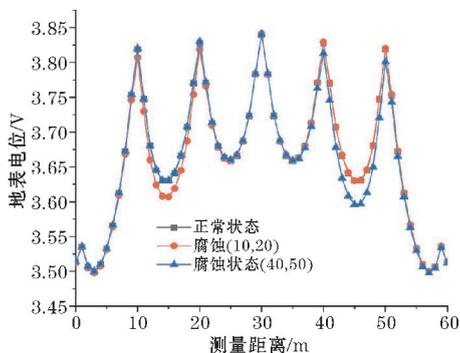


图 7 腐蚀故障细化图

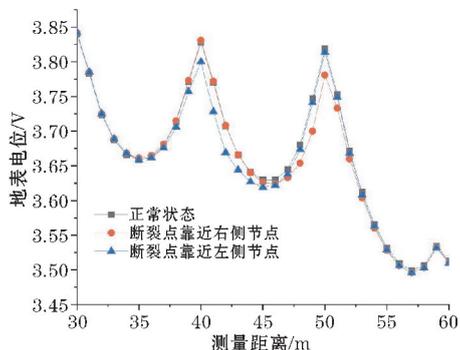


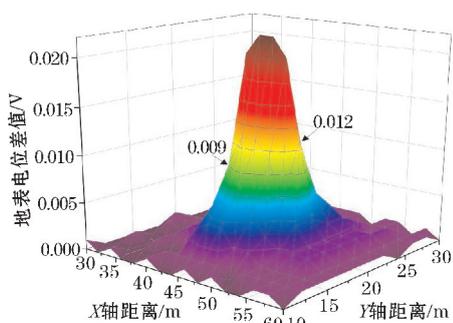
图 8 断裂故障细化图

由图 7、8 可知,随着腐蚀程度或断裂长度的增加,地表电位的降落幅度也会增加。此外,可以发现在腐蚀或断裂情况下,两侧节点的地表电位都有明显下降。而在断裂情况下,断裂点靠近哪一侧,该侧的地表电位节点电压降低更加明显。通过观察地表电位节点电压的大小变化,可以评估导体断裂或腐蚀的程度,并获得更详细的故障节点信息。

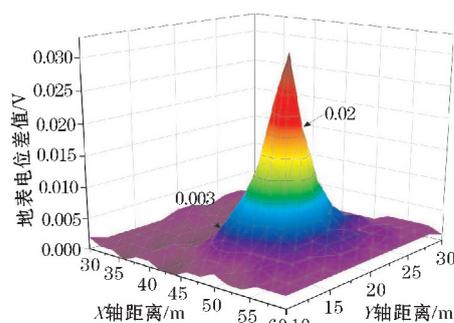
2.3 故障下范围内地表电位变化

对某一段导体进行腐蚀或者断裂,探究其周围的地表电位变化情况。图 9(a)、(b)分别为 $X=30 \sim 60, Y=10 \sim 30$ 导体段 $Y=20, X=40 \sim 50$ 腐蚀及断裂状态,图 9(c)、(d)分别为 $X=30 \sim 50, Y=0 \sim 30$ 导体段 $X=40, Y=10 \sim 20$ 腐蚀及断裂状态,然后作正常状态地表电位值和故障状态地表电位值的差值,并标出故障状态下的最近的地表电位节点电压值。

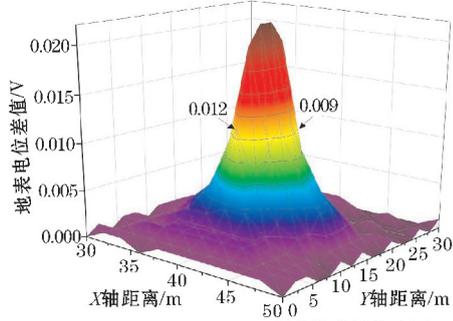
根据图 9 可知:差值可以反映出电位的变化情况,故障出现的范围内,故障状态的地表电位与正常状态下的地表电位有明显变化,其中断裂情况下节点两端的电位差值落差更大。图 9(a)中,故障为对导体段进行了 1/2 的腐蚀,节点两边的电压值分别为 0.009 V 和 0.012 V。图 9(b)中,故障为 (46.5, 46.6) 断裂 0.1 m,节点两边的电压值为 0.003 V 和 0.02 V。在图 9(c)中,故障为对导体段进行了 1/2 的腐蚀,节点两边的电压值为 0.012 V 和 0.009 V,可以观察到图 9(a)、(c)中两者的差值相等,说明导体的腐蚀程度相同且地网有对称性质。图 9(d)中,故障为 (17.5, 17.6) 断裂 0.1 m,节点两边的电压值为 0.016 V 和 0.034 V。可以发现范围内的两端节点差值在腐蚀状态下其差距不大,较为平缓;断裂状态下两端节点电压值明显不同,较为陡峭,且符合小节 2.2 中断裂点靠近的一侧,则该侧的地表电位节点电压降低更加明显的结论。通过这些数据可以分析出故障导体的位置以及故障的类型,进一步验证了节点判断的可行性。



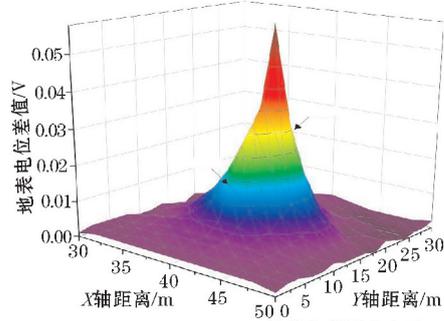
(a) $X=30 \sim 60, Y=10 \sim 30$ 导体段腐蚀状态图



(b) $X=30 \sim 60, Y=10 \sim 30$ 导体段断裂状态图



(c) $X=30 \sim 50, Y=0 \sim 30$ 导体段腐蚀状态图



(d) $X=30 \sim 50, Y=0 \sim 30$ 导体段断裂状态图

图 9 故障下范围内地表电位差值图

3 节点故障特征的量化与放大

3.1 节点故障特征的量化

故障特征是指随着接地网缺陷变化的性能参数。其中,采用接地网导体上方地表电位节点电压变化作为故障的特征信息。可以使用曼哈顿距离表示节点之间的距离。曼哈顿距离常用于网格状结构中,表示两点在水平或垂直方向上的距离之和,具有误差小,效率高的优点^[27-28]。

根据曼哈顿距离函数的函数特征定义腐蚀特征值 M_f ,表示导体段腐蚀状态时对应的地表电位两端节点处变化的累积效果:

$$M_f = |Y_l - F_l| + |Y_r - F_r| \quad (13)$$

式中: Y_l 、 Y_r 表示无故障接地网中腐蚀断左右端的地表电位节点电压值, F_l 、 F_r 表示发生腐蚀后接地网腐蚀断左右端的地表电位节点电压值。

定义断裂特征值 M_d 表示导体段断裂时对应的断裂点最近端点的地表电位节点电压变化:

$$M_d = |W_d - D_d| \quad (14)$$

式中, D_d 为接地网故障时断裂点最近端点处的地表电位节点电压值, W_d 为接地网完好时该点处的地表电位节点电压值。

针对假设的两种故障即腐蚀和断裂,应用式(13)、(14)计算出故障下的 M_f 和 M_d ,计算结果见图 10、11。

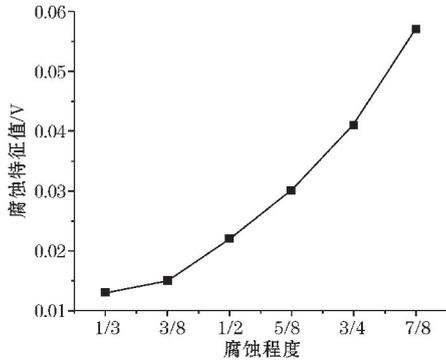


图 10 腐蚀状态下特征值变化曲线

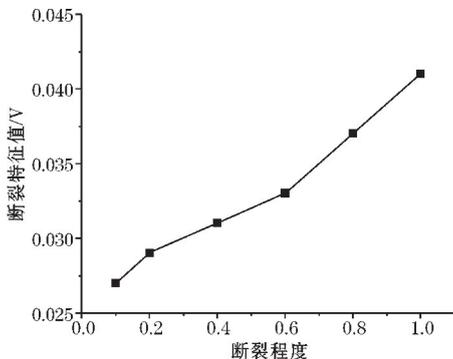


图 11 断裂状态下断裂特征值变化曲线

通过图 10 和图 11 可以发现,随着接地网状态的不同变化,其对应的故障特征值随之变化,实现了对接地网故障特征的定量化。腐蚀和断裂程度与其相对应的腐蚀特征值和断裂特征值呈正相关关系,即随着故障特征值的增大地表电位节点电压值也会增大,意味着可以通过改变频率特性从而提升故障的可视化程度,能有效地增强故障诊断效果。

3.2 激励电流频率的影响

当高频电流作用于导体时,趋肤效应会产生影响。在直流和低频情况下,电流在导线截面上的分布不均匀性不太显著,不会对电阻和电感的数值产生很大的影响。但是在高频情况下,电流分布的不均匀性显著增加,趋肤效应会导致电流主要集中在导体表面附近^[29-30]。因此,在高频情况下,需要特别考虑趋肤效应对电阻和电感的影响。当接地体注入高频电流时,相比于工频和低频情况,接地导体在土壤中出现趋肤效应,导致接地导体的接地阻抗中感性分量明显增大。因此,在高频情况下,计算得到的接地阻抗值会增加,接地体的相角也会增大^[31]。这就意味着在计算接地体腐蚀时,冲击接地阻抗和接地电感必须考虑高频效应对其的影响。频率范围1 Hz ~ 8 kHz时两者差值较明显,所以研究频率范围1 Hz ~ 8 kHz。

由图 12 和图 13 可知,随着激励电流频率的增加,断裂特征值和腐蚀特征值逐渐上升。在高频电流下,

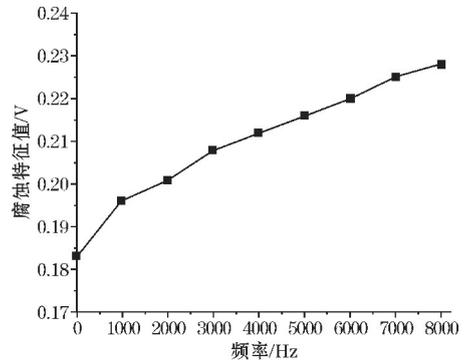


图 12 腐蚀特征值与电流频率变化曲线

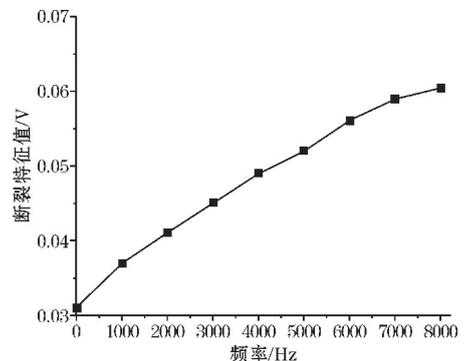


图 13 断裂特征值与电流频率变化曲线

导体的自感和互感效应会发挥作用。随着频率的不断升高,断裂特征值和腐蚀特征值的增长趋势会逐渐减缓,正是由于高频电流对导体自感和互感效应的影响,当接地网导体出现故障时,电流会泄流到土壤中。由于土壤和导体的频率特性不同,频率的增加会增加故障部位的电位降落,从而放大了故障信息。

4 利用变化特性进行故障检测

4.1 诊断方法流程

基于以上特征变化,可以发现,当导体段发生故障或者腐蚀具有以下特征,其可以作为诊断接地网故障的方法。

(1)断点较腐蚀的电位降落趋势明显更大,腐蚀区间内电位降落较为平缓。

(2)腐蚀与断裂情况下两侧节点均有下降,故障程度越高下降越明显,断裂情况下断裂点往哪一侧靠近,则那一侧节点电位降低更加明显。

(3)可以适当放大电流频率和电压或改变注入方式,从而实现了故障信息的放大。

(4)导体腐蚀程度相同,但是导体分别呈纵向和横向,说明二者之间呈对称关系,且断裂情况下节点两端的电位差值落差更大

故障判断流程如图 14 所示。

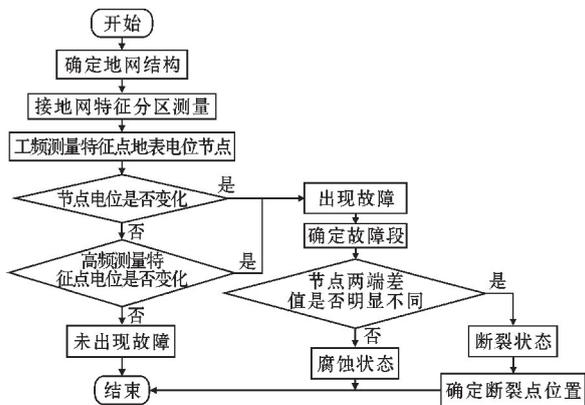


图 14 故障判断流程

4.2 诊断反演

根据地网的对称特性,可以将地网分为 4 个模块,并利用节点测量法对节点电压进行逐点测量。可以选取图 5 中节点 24、26、18、20、10、12、5、7 进行测量。当地网出现故障时,两端节点的电压差值会发生变化。通过测量电位差值是否有明显变化,可以确定是否出现故障。然后可以测量该端点相邻的其他端点,从而

确定故障段的位置。对于腐蚀情况,两端的电位差值相差不大,变化较为平缓。而在断裂情况下,两端的电位差值会有较大的变化,并且断裂点更接近电位差值较低的一端。通过观察电位差值变化,可以确定故障段和故障点的位置。

根据其对称性最大简化测量节点的个数后,测量的电位差值如图 15 所示,且根据流程图可以判断出节点(10,50)和(40,20)附近存在故障。然后根据两个节点继续细化,得到图 16,由图 16 可以得出具体的故障导体段,即导体段(10-20,50)以及(40,10-20)出现了明显的故障,可以排除故障点附近其他导体段。根据判断流程,可以得出导体段(10-20,50)两端节点电位差值未出现明显变化,所以判断其为腐蚀状态,导体段(40,10-20)两端节点电位差值出现明显变化,所以判断其为断裂状态,且断裂点靠近差值大的一段。以上结论,符合初始假设。

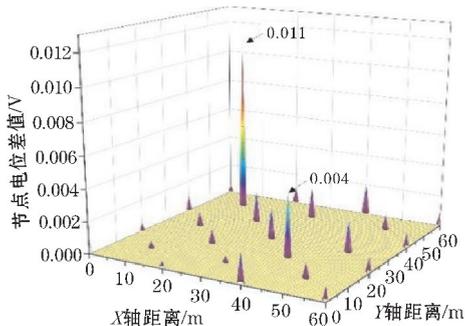


图 15 地表电位节点电压图

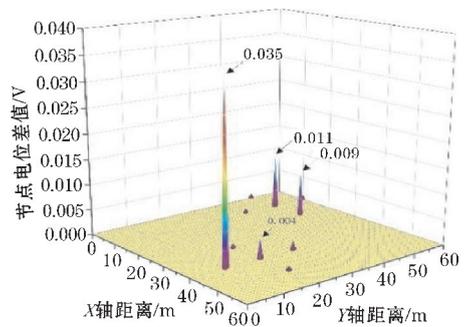


图 16 地表电位节点电压诊断图

5 结论

使用相关理论建立接地网的仿真模型,对存在故障的接地网地表电位分布规律进行分析,并对基于地表电位节点电压诊断方法进行研究,得出以下结论:

(1)不同方式注入电流时,半径的变化会导致导体对地的容性效应和导体本身的自感发生变化。导致随着频率的增加,导体的自感也会增大,因此半径较小的导体其阻抗模值会更大。

(2)接地网故障和腐蚀状态下,地表电位会出现不同程度的减小。断裂和腐蚀的程度越大,下降的越明显,且断裂状态下,断点附近最近的地表节点电位下降程度更加明显,这可以准确地区分断点和腐蚀。

(3)引入曼哈顿距离函数,得到腐蚀和断裂状态特征值并考虑了相应情况下导体的频率特性,更直观地了解接地网的故障情况。随着故障程度的增加,地表电位节点电压的降落也会增加,两者特征值也会相应地增加。通过增大注入电流频率能实现故障信息放大,进一步增强接地网故障的诊断效果。

(4)利用地表电位节点电压检测故障流程图,对接地网故障的假设条件进行反演,诊断该方法的可行性,结果表明该方法能有效检测并区分腐蚀和断裂。

参考文献:

- [1] 傅景龙,赵周杰. 气象台站计算机信息系统雷电防护技术[J]. 数字技术与应用,2021,39(11):79-81.
- [2] 杨波,柴露,李静,等. 变电站接地网冲击性能参数的分析与研究[J]. 红水河,2021,40(5):58-62.
- [3] 覃彬全,郭在华,陈佳祺,等. 埋地金属导体对接地系统电阻测试影响试验分析[J]. 气象科技,2021,49(4):662-670.
- [4] 陈建军. 变电站接地网参数计算与分析[D]. 北京:华北电力大学,2011.
- [5] 刘路昕,霍磊,吴鸿昇,等. 电力系统接地网腐蚀因素及防控措施[J]. 建设监理,2023(4):61-63.
- [6] 苏水荻. 基于电网络理论的接地网故障定位与诊断方法研究[D]. 吉林:吉林大学,2021.
- [7] 寄玉玉. 变电站接地网腐蚀状态的电化学测量方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
- [8] Zhang, Cheng Liao, Yuxiang Gao, et al. Research Advances of Soil Corrosion of Grounding Grids [J]. MICROMACHINES,2021,12(5):513.
- [9] Qi L, Cui X, Zhao Z B, et al. Grounding performance analysis of the substation grounding grids by finite element method in frequency domain [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4):1181-1184.
- [10] 刚波,张新军. 大地网接地电阻测试中异频法技术探讨[J]. 科技风,2018(23):138.
- [11] 施会,王丰华,胡徐铭,等. 变电站接地网电磁诊断法的试验研究[J]. 电测与仪表,2018,55(16):6-12.
- [12] 张树亮,刘东亮,徐洪福,等. 基于磁场分布特性的接地网腐蚀断点检测方法研究[J]. 电瓷避雷器,2021(1):51-55.
- [13] 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.
- [14] 张文龙,鲁志伟,苏侃,等. 基于 CDEGS 的变电站接地网缺陷诊断研究[J]. 电瓷避雷器,2020(6):22-28.
- [15] Li, Chun Wen, Xishan Guo, et al. Hazard evaluation of ground potential difference within grounding grid on personal safety under impulse current[J]. Iet Science Measurement & Technology, 2021, 15(6):544-550.
- [16] Penghe Zhang, JunJia He, Dan Zhang, et al. A fault diagnosis method for substation grounding grid based on the Square-wave frequency domain model[J]. Metrology and Measurement systems, 2012, 19(1):63-71.
- [17] 李雷. 接地参数计算与接地网频率响应特性下的研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2010.
- [18] 胡宇,毛敏,周宇飞. 复杂地形下水电站接地系统及其布置安全性研究[J]. 陕西水利,2022(6):154-158.
- [19] 旦乙画. 水平分层土壤中腐蚀接地网接地参数计算方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.
- [20] 阿银椿. 基于磁谐振的接地网断点检测技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.
- [21] 杨琳,张榆,冯文艳,等. 接地极长度对其接地阻抗频率特性的影响研究[J]. 电气应用,2019,38(8):20-25.
- [22] Wang S J, Si W R, Gao K, et al. A New Method of Grounding Grid Fault Diagnosis Based on Grounding Conductor Soundness [C]. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, 2018:1-4.
- [23] 邢挺,卜建英,刘丽洲. 高原电气化铁路接地网故障诊断与定位研究[J]. 电工技术,2022(18):188-190.
- [24] Lee KyeongHwan, Zhang Naiqian, Kuhn William B, et al. A frequency-response permittivity sensor for simultaneous measurement of multiple soil properties: Part I. The frequency-response method [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(6):2315-2326.

- [25] 祝健杨,辛明勇,徐长宝,等. 电力设备接地网地表磁感应强度的影响因素仿真分析[J]. 自动化与仪器仪表,2022(9):84-88.
- [26] 周碧雪. 非均匀等离子体中电磁波传播特性的仿真及实验研究[D]. 南京:江苏大学,2020.
- [27] Lu Y, Lin X, Hao S, Research on fault detection method of grounding grids based on surface potential distribution [C]. 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Xi'an, China, 2016:1-5.
- [28] 于建立,吴传斌,冷赫,等. 基于磁场分布特性的接地网故障诊断研究[J]. 电子学报,2022,50(3):598-607.
- [29] 王荣印. 输电线路杆塔典型接地材料散流特性研究[D]. 济南:山东理工大学,2018.
- [30] 董贯雷,高鹏,李宋林,等. 接地网形式对近水源区杆塔接地网外延降阻影响[J]. 电瓷避雷器,2023(1):106-115.
- [31] 梁皓澜,刘波,潘茜雯,等. 基于测量高频接地电感的输电线路杆塔接地体腐蚀检测[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版),2019,29(3):8-11.

Frequency Characteristics Study under Grounding Grid Faults

CHEN Sixue¹, ZOU Jie², DAI Liping¹, GUO Zaihua², LIU Xinyu¹, WU Xianghui²

(1. China Petroleum Safety and Environmental Protection Technology Research Institute, Dalian 116000, China; 2. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Engineering, Chengdu 610225, China)

Abstract: In addressing the time-consuming and labor-intensive diagnostic process for current grounding grid faults, we propose an innovative detection approach. The frequency response characteristics of grounding conductors are simulated and analyzed under various grounding grid layouts, investigating the influence of different current injection methods on the frequency response curve. Subsequently, the simulation explores the distribution of surface potential above conductors in the presence of corrosion or breakage in the grounding grid. A fault diagnosis method for grounding grid states is developed using the voltage of surface potential nodes. The results indicate that: Different grounding methods exhibit similar frequency characteristics, with noticeable differences in grounding impedance when the grounding body radius changes. The use of surface potential values enables accurate determination of the grounding grid's fault state, distinguishing between breakage and corrosion, and providing localization of breakage points and corrosion extents. The Manhattan distance function can quantify the characteristics of corrosion and breakage, enhancing the ability to identify fault features.

Keywords: grounding grid; frequency; ground impedance; nodal potential