

# 基于径向基函数拟合的多频杆塔 接地电阻测量方法

褚文超

(乌兰察布供电分公司, 内蒙古 乌兰察布 012000)

**摘要:**输电线路杆塔作为电力系统正常运行的必要设备,其接地电阻的精准检测对整个电力系统的安全稳定运行尤为重要,尤其在防雷性能的判断等方面。因此,提出一种基于径向基函数拟合的多频杆塔接地电阻测量方法。该方法能够在不断开杆塔接地引线的前提下,采用多频电流作为激励,测量不同频率的输入电流得到接地电阻值,基于这些数据采用径向基函数神经网络拟合,实现杆塔接地电阻的准确测量。同时,通过多个杆塔接地电阻实测证明了该方法的准确性、可靠性,且所提方法操作简单,很大程度上方便了检测人员现场的测量,具有较强的实际意义。

**关键词:**杆塔;接地电阻;径向基函数

**中图分类号:**TM75 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25410

## Multi-frequency Tower Grounding Resistance Measurement Based on Radial Basis Function Fitting

CHU Wenchao

(Ulanqab Power Supply Branch, Ulanqab 012000, Nei Mongol, China)

**Abstract:** Transmission line tower as the normal operation of the power system of the necessary equipment, its grounding resistance accurate detection for the safe and stable operation of the entire power system is particularly important, especially in the judgment of lightning protection performance and other aspects. Thus, a multi-frequency tower grounding resistance measurement method was proposed based on radial basis function (RBF) fitting. The method was able to use multi-frequency current as an excitation under the premise of not disconnecting the tower grounding lead, measure the grounding resistance value obtained from the input current of different frequencies, and then use radial basis function neural network fitting based on these data to realize the accurate measurement of the tower grounding resistance. At the same time, the accuracy and reliability of the method was proved through the measurement of grounding resistance of multiple towers, and the proposed method is simple to operate, which largely facilitates the measurement of inspectors on the spot, and has strong practical significance.

**Key words:** tower; grounding resistance; radial basis function (RBF)

输电线路作为电网与用户之间的连接线,在保证电能安全及高效的输送到各地中发挥重要作用<sup>[1]</sup>。在恶劣天气条件下,输电线路杆塔作为输电线路中的核心部件极易受到雷电的侵扰,并发生跳闸故障<sup>[2]</sup>,严重影响电能传输。在输电线路运行中,为预防雷电等侵害,准确实时地进行接地电阻测量,并保证杆塔接地阻抗数值符合相关的规范要求并且一直处于合格状态,是减少雷击跳闸的有效手段<sup>[3-4]</sup>。

目前常用的杆塔引下线接地电阻测量方法<sup>[5]</sup>

主要有三极法<sup>[6-7]</sup>、钳表法<sup>[8-9]</sup>、电位降法<sup>[10-11]</sup>、异频法<sup>[12-13]</sup>和大电流法<sup>[14-15]</sup>。三极法准确度高但需要断开接地引线,而且每次测量需要使用到几十米的导线,工作效率低,工作量大;钳表法虽不需要放置辅助极,但在测量具有多引下线时需解开其他引下线,大大增加了测量工作量;电位降法测量时需多次反复测量,并绘制相应的电位变换曲线,操作量大;异频法采用非工频的信号测量接地电阻,能够基本消除测量信号中工频干扰的影响;大电流法通过向待测接地体中注入 30 A 以上的测

试电流以提高信噪比,减少噪声在信号中的比重,从而提高结果的准确性,但大电流需要一定长度、宽度的引线和一定容量的电源,条件较难实现。

为解决以上测量方法中的不足,针对接地电阻在实际测量中操作困难且准确率不高的问题,提出一种基于径向基网络拟合的多频杆塔接地电阻测量方法。径向基网络以其在非线性拟合方面的卓越表现而闻名,尤其在处理复杂系统中的信号分析方面发挥了重要作用。多频杆塔接地电阻测量的信号往往包含多种频率成分,径向基网络能够准确地捕捉这些复杂的频率特征,且对杆塔周围可能存在的各种干扰因素(如电磁干扰和设备运行引起的噪声干扰),具有较强的鲁棒性能。

采用径向基网络的拟合方法,不解除杆塔接地引线的前提下,用多频电流作为激励源,测量不同频率下的输入电流以获得接地电阻值。在搭建硬件实验平台的基础上,对多个杆塔进行了实地测量实验。与传统的三极法、钳表法、电位降法相比,所提出方法表现出相对误差最小的特征,验证了其有效性和准确性。

## 1 新型接地电阻智能检测系统

### 1.1 系统构成

本文提出的多频免解线杆塔接地电阻测量系统组成如图1所示。首先通过激励模块发出多频可调的电流信号注入杆塔接地引线中,信号采集模块采集所得电压电流信号依次经过放大模块、滤波模块以及交直流转换模块上传到带有本文算法的上位机进行处理,计算出待测杆塔接地电阻的准确值。

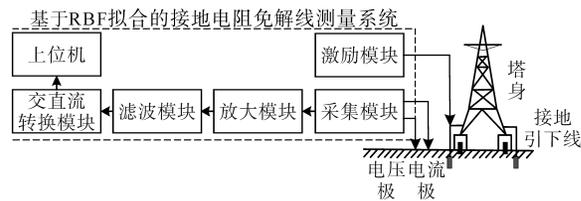


图1 多频免解线杆塔接地电阻测量系统  
Fig.1 Multi-frequency non-disconnection tower grounding resistance measurement system

### 1.2 多频接地电阻测量原理

一般情况下,杆塔电容效应不明显,因此可以将有限长的杆塔接地体阻抗等效为 $Z, Z = R + jX = R + j\omega L$ 。若测量时注入直流或工频信号,此时的电感分量较小,测量得到的结果近似等于被

测杆塔与周围邻近杆塔的并联值。但当采用高频率激励注入时,避雷线的感抗增大,测量信号的分流减小,实现了不断开接地引线测量杆塔接地电阻。通过合理、严密的分析,可以确定一个测量电流的注入频率区间,在此区间内测量到的接地阻抗可以在可接收的误差范围内近似替代杆塔的接地电阻值。杆塔接地体与邻近杆塔间构成的回路等效物理模型如图2所示。等效电路图中 $R_L$ 和 $L$ 分别为邻近杆塔之间避雷线的等效电阻与等效电感, $R_{Tn}$ 为标号为 $n$ 杆塔的塔身电阻, $R_n, L_n$ 分别为标号为 $n$ 杆塔接地体的等效电阻和等效电感; $R_x, L_x$ 为待测杆塔的接地电阻和电感。

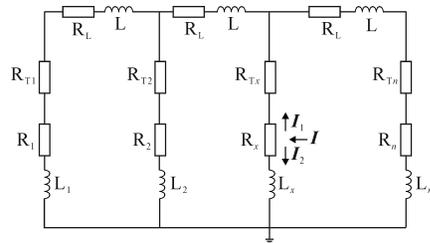


图2 杆塔接地电阻测量等效电路图

Fig.2 Tower grounding resistance measurement equivalent circuit diagram

图2中,往待测杆塔接地电阻 $R_x$ 注入测量电流 $I = I_1 + I_2, I_1$ 通过杆塔自身、避雷线与邻近杆塔组成回路, $I_2$ 经过接地体和大地流回测量电流极。杆塔的接地电阻阻值一般在 $4 \sim 10 \Omega$ 之间,杆塔间避雷线和杆塔塔身的电阻由钢材组成,电阻率较小,阻值都低于 $0.5 \Omega$ ,所以 $R_L, R_{Tn}$ 可忽略不计。此时等效电路可以简化为图3所示电路。

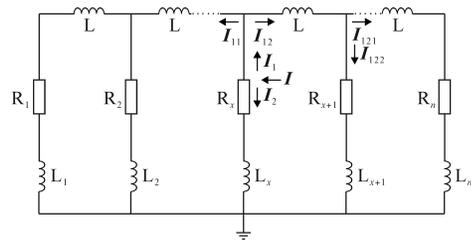


图3 杆塔接地电阻测量简化等效电路 I

Fig.3 Tower grounding resistance measurement equivalent circuit diagram I

由图3分析可知,可以由下式近似计算 $I_1, I_2$ :

$$\begin{cases} I_1 \approx \frac{\sqrt{R_x^2 + (\omega L_x)^2}}{\sqrt{R_x^2 + (\omega L_x)^2} + \frac{1}{2} \sqrt{R_{x+1}^2 + (\omega L + \omega L_{x+1})^2}} I \\ I_2 \approx \frac{\frac{1}{2} \sqrt{R_{x+1}^2 + (\omega L + \omega L_{x+1})^2}}{\sqrt{R_x^2 + (\omega L_x)^2} + \frac{1}{2} \sqrt{R_{x+1}^2 + (\omega L + \omega L_{x+1})^2}} I \end{cases} \quad (1)$$

为了对电路进行定量分析,图3电路中各参数根据《工业与民用电力装置的接地设计规范GBJ65-83》取典型值:杆塔间平均距离取350 m,杆塔接地体电阻设定为5 Ω,接地体电感设定为20 μH,避雷线电感L设定为2.51 μH,当I是高频信号时(取f=3 kHz),代入式(1),可以近似得到:

$$\begin{cases} I_1 \approx I/8 \\ I_2 \approx 7I/8 \end{cases} \quad (2)$$

基于以上分流运算规律,可以依次近似计算得到 $I_{11} = I/16, I_{12} = I/16, I_{121} = I/169, I_{122} = I/169$ ,由此可见,当激励电流I不大时,与待测杆塔邻近的杆塔分流会越来越小,接近于零,由此可以认为此时杆塔接地电阻测量只与待测杆塔相邻两座杆塔有关,图3等效电路可进一步简化为图4等效电路。

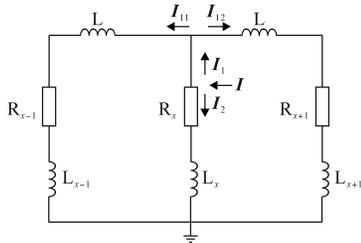


图4 杆塔接地电阻测量简化等效电路II  
Fig.4 Tower grounding resistance measurement equivalent circuit diagram II

$$|Z'(\omega)| = \frac{L_{eq}(2\omega^2 L_x^2 + R_x^2)[R_x^2 + \omega^2(L_{eq} + L_x)^2] - \omega L_{eq}(\omega^3 L_x^2 + R_x^2 \omega^2)(L_{eq} + L_x)^2}{[R_x^2 + \omega^2(L_{eq} + L_x)^2]^2 \sqrt{\frac{\omega^2 L_x^2 + R_x^2}{R_x^2 + \omega^2(L_{eq} + L_x)^2}}} \quad (4)$$

在断开引下线时测量接地阻抗值为

$$|Z_x| = U/I_1 \quad (5)$$

设激励电流的分流系数为 $k = I_1/I$ ,代入式(3)中化简得:

$$|Z| = \frac{U}{I} = \frac{kU}{I_1} = k|Z_x| \quad (6)$$

则不断开接地引线接地电阻测量值Z与准确接地电阻值 $R_x$ 的误差为

$$\begin{aligned} \Delta &= |Z| - R_x = k|Z_x| - R_x \\ &= k\sqrt{R_x^2 + (\omega L_x)^2} - R_x \end{aligned} \quad (7)$$

误差为零的必要条件为

$$\begin{cases} k = \frac{\omega L_{eq}}{\sqrt{R_x^2 + \omega^2(L_{eq}^2 + 2L_{eq}L_x + L_x^2)}} \approx 1 \\ \omega L_x \approx 0 \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入阻抗求导式(4)简化得:

当采用高频电流作为激励时, $jL$ 与 $R_{x+1} + jL_{x+1}$ 相比, $L_{x+1}$ 度量单位为μH, $L$ 度量单位为H,因此可以忽略 $R_{x+1} + jL_{x+1}$ ,测量电路进一步简化为图5。图中 $L_{eq}$ 为待测杆塔两相邻杆塔的等效电感。

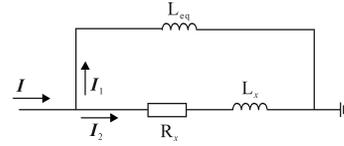


图5 杆塔接地电阻测量简化等效电路III  
Fig.5 Tower grounding resistance measurement equivalent circuit diagram III

图5中,注入电流I有两个分流回路,如 $I_1$ 和 $I_2$ 方向所示,其中 $I_1$ 通过临近杆塔与被测杆塔之间的避雷线及自身形成回路,而 $I_2$ 流经接地引线至接地体中散流,最后由电流极流出形成测量回路。此时接地阻抗测量值为

$$|Z| = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{\omega^4 L_{eq}^2 L_x^2 + R_x^2 \omega^2 L_{eq}^2}{R_x^2 + \omega^2(L_{eq}^2 + 2L_{eq}L_x + L_x^2)}} \quad (3)$$

通过式(3)求出的接地电阻阻抗值由于电感的存在,恒大于待测杆塔接地电阻的准确值,此时可以通过求出阻抗Z的极小值,来近似待测杆塔的接地电阻。遂对式(3)进行求导,求导结果如下式所示:

$$|Z'(\omega)| = \frac{R_x \omega^2 L_{eq}^3 - R_x \omega^2 L_{eq}^3}{\omega^3 L_{eq}^3} \quad (9)$$

由于实际情况下的分流系数 $k < 1$ ,且 $L_x \neq 0$ ,因此只能尽量接近 $|Z'(\omega)| = 0$ ,即 $|Z'(f)| = 0$ 。实际测量时,获得的是离散阻抗值 $Z(f)$ ,所以需求出接地阻抗导数值 $Z'(f)$ 。

函数求导的定义公式为

$$|Z'(f)| = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{|Z(f + \Delta f)| - |Z(f)|}{\Delta f} \quad (10)$$

取 $\Delta f = 0.01f$ ,式(10)简化为

$$|Z'(f)| = \frac{|Z(f + \Delta f)| - |Z(f)|}{\Delta f} \quad (11)$$

此时可以通过测量注入电流频率为f和f + Δf时的阻抗值,即可求出当激励频率为f时的阻抗导数值 $Z'(f)$ 。

依据建立的杆塔接地电阻简化等效测量模型,确定测量信号频率范围。注入信号频率需

满足:

$$\begin{cases} 2\pi f L_x / R_x \rightarrow 0 \\ R_x / 2\pi f L_{eq} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (12)$$

设注入频率下限值确定函数 $f_1$ 为

$$f_1 = \frac{2\pi f L_x}{R_x} - \frac{R_x}{2\pi f L_{eq}} \quad (13)$$

注入频率上限值确定函数 $f_2$ 为

$$f_2 = \frac{R_x + 2\pi f L_x}{2\pi f L_{eq}} \quad (14)$$

绘制出 $f_1, f_2$ 随频率 $f$ 变化的曲线,根据曲线关系便可确定注入频率的上、下限值。

由于此时得到的接地阻抗导数值是有误差的离散值,考虑到在多频接地电阻测量中需要输入多个不同频率的信号,所以面临着一个复杂信号的拟合问题。传统的线性拟合方法无法很好地应对信号中的多频成分,因此需要一种更为灵活和强大的拟合方法。

径向基网络的独特之处在于其能够高效地拟合非线性信号,尤其是在面对多频信号时表现得更为出色。在接地电阻测量中,不同频率的信号可能具有不同的振幅和相位,径向基网络能够更准确地捕捉这些频率特征。因此,选择基于径向基网络的拟合方法,可以更好地适应多频接地电阻测量的复杂信号特性。这一方法的引入提供了一种有效而全面的手段,以确保在实际测量中更准确地捕捉和分析多频信号的信息。

### 1.3 径向基函数拟合方法

径向基函数是用于高维插值和局部逼近的一种神经网络,径向基函数在模型训练时,只需要修正少量的权值和阈值,所以比一般的神经网络的训练速度要快。

本文采用正规化径向基函数(RBF)神经网络对杆塔接地阻抗导数的曲线进行拟合。RBF神经网络的结构如图6所示。其网络输入层具有 $i$ 个节点,隐藏层具有 $n$ 个节点,最后输出层具有 $m$ 个输出节点。在Python上搭建径向基函数神经网络模型训练,网络输入层节点数设置为数据维度,隐藏层的节点数设置为样本数,输出层的节点数设置为1,调整权值的步长设置为0.01,训练迭代次数为1 000,采用Guass函数作为隐藏层节点的激活函数,确定模型的权值参数:

$$\varphi(r) = \exp[-r^2 / (2\sigma^2)] \quad (15)$$

其中  $r = |X - X^p|$

式中: $X$ 为样本数据点; $X^p$ 为样本数据点的中心; $r$ 为样本数据点 $X$ 与中心 $X^p$ 的距离; $\sigma$ 为基函数的扩展常数或宽度,可根据数据中心的散布而确定。

为了避免每个径向基函数太尖或太平,一种选择方法是将所有径向基函数的扩展常数设为

$$\sigma = d_{\max} / \sqrt{2P} \quad (16)$$

式中: $d_{\max}$ 为样本之间的最大距离。

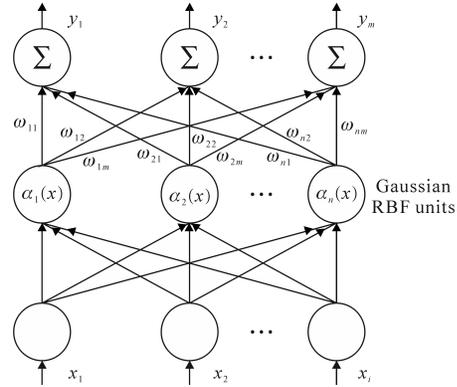


图6 RBF网络结构

Fig.6 RBF network structure

采用径向基函数神经网络模型时,隐藏层节点数量即样本的数量,基函数的数据中心即为样本本身,由此仅需要考虑扩展常数和输出节点的权值。输出层的权值常采用最小均方(least mean square, LMS)算法,LMS算法的输入向量为RBF模型隐藏层节点的输出向量,其权值的调整公式为

$$\Delta W_k = \eta(d_k - W_k^T \Phi) \Phi \quad (17)$$

式中: $W_k$ 为权值矩阵; $\Delta W_k$ 为对应调整的权值矩阵; $\eta$ 为调整权值的步长; $d_k$ 为径向基模型输出与理想输出之间的差值矩阵; $\Phi$ 为基函数矩阵。

## 2 实验讨论

在多条线路的多个杆塔上进行接地电阻实测,现场多频接地电阻测量设备操作简单,免解线,无需增加辅助极,一次性测量5个接地电阻值全程仅需不到5 min,极大节约了时间成本和人力成本,测量数据能实时保存及打印,很大程度上方便了检测人员现场的测量。现场设备连接如图7所示。

现以其中一个基杆塔的测量结果为例进行说明,根据测量得到的数据计算并绘制的阻抗导数曲线如图8所示。

基于测量得到的数据,采用径向基网络拟合法对函数进行拟合,令 $|Z'(f)| = 0$ 得到函数极值

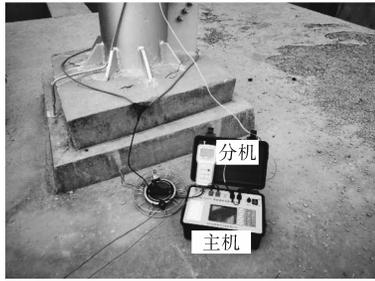


图7 仪器连接

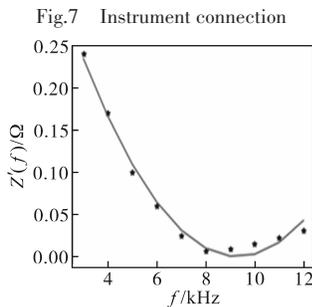


Fig.7 Instrument connection

图8 接地电阻阻抗导数曲线RBF拟合结果

Fig.8 Grounding resistance impedance derivative curve RBF fitting results

点 $f_0 = 9.01$  kHz,最后调整注入电流频率为此频率测得杆塔接地电阻阻抗值 $|Z| = 1.18 \Omega$ 。采用三极法断开引下线的情况下测量该杆塔接地电阻得到的准确值为 $R = 1.72 \Omega$ 。

计算钳表法、电位降法、最小二乘拟合法和本文方法与三极法的相对误差,进行误差分析,计算所得结果如表1所示。将其绘成曲线以便能够更加直观地观察对比结果,如图9所示。

表1 实测杆塔接地电阻测量结果相对误差对比

Tab.1 Relative error comparison of measured tower grounding resistance measurement results

杆塔名称	测量方法与三极法的相对误差/%			
	钳表法	电位降法	最小二乘拟合法	本文方法
1号杆塔	22.1	69.2	15.1	5.2
2号杆塔	42.9	108.4	10.1	4.2
3号杆塔	31.9	57.7	6.4	2.5
4号杆塔	27.5	80.1	10.8	6.4

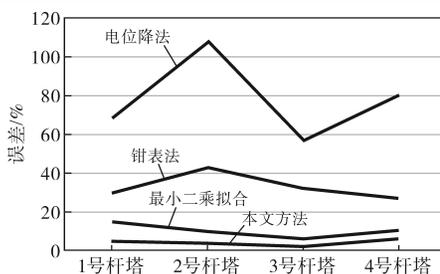


图9 杆塔接地电阻相对误差曲线

Fig.9 Tower grounding resistance relative error curves

通过对比误差可以发现,电位降法所得结果与三极法相差最大,钳表法结果比电位降法更接

近三极法,而采用本文基于RBF拟合的测量方法误差最小,最接近三极法断开引下线所测得到的接地电阻阻值,且误差在实际测量允许范围之内,而拟合方法采用最小二乘法所得结果优于钳表法和电位降法,但比RBF的拟合效果差,这一结果证明了RBF拟合效果相较传统方法的优越性。

进一步与机器学习方法比较,更全面地评估基于径向基网络方法的性能。选取多层感知机(multilayer perceptron, MLP)、随机森林(random forest)和支持向量机(support vector machine, SVM)作为对比,进行了随机曲线的拟合实验,结果如图10所示。

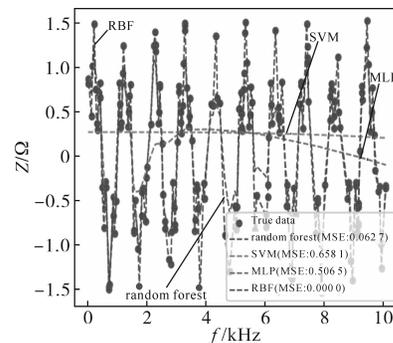


图10 神经网络拟合随机曲线结果

Fig.10 Neural network fitting random curves results

从图10中可以清楚看到RBF具有优异的拟合能力。判断以上几种机器学习拟合方法在接地电阻测量中的实际效果,对接地电阻测量结果进行误差分析计算,结果如表2所示。

表2 多种机器学习方法测量接地电阻值相对误差对比

Tab.2 Comparison of relative errors in measuring ground resistance values by machine learning methods

杆塔名称	相对误差/%			
	随机森林	支持向量机	多层感知机	本文方法
1号杆塔	10.3	13.4	16.3	5.2
2号杆塔	9.2	17.8	15.7	4.2
3号杆塔	8.6	11.2	11.5	2.5
4号杆塔	13.9	20.3	18.5	6.4

从表2可以发现,几种机器学习的方法均取得了不错的结果,其中采用随机森林拟合在1号、2号杆塔上的实验误差比最小二乘拟合法所得误差小,而采用支持向量机与多层感知机作曲线拟合,虽有一定效果但误差仍较大,故不适用于拟合阻抗导数曲线。采用本文RBF拟合的误差在4座实验杆塔上所得结果均比其他神经网络拟合方法更优异,说明了本文提出方法的高精度与可靠性。

### 3 结论

基于径向基函数拟合的多频杆塔接地电阻测量方法在电力系统领域展现出良好的潜力。通过采用该方法,能够在不断开杆塔接地引线的前提下,更准确地获取杆塔接地电阻的多频信息,有效地提高了测量的精度和可靠性。尤其是径向基网络可以准确地捕捉接地电阻测量中不同频率的信号的复杂特性并进行精准拟合。通过实测案例及与其他方法的对比实验,可以看出这种基于径向基函数的方法能够更好地适应复杂多变的电磁环境,这也可为电力系统的安全稳定运行提供更有力的支持。

#### 参考文献

- [1] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等.新型配电系统形态特征与技术展望[J].高电压技术,2021,47(9):3021-3035.  
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [2] 巢亚锋,王峰,李豫湘,等.架空输电线路避雷器保护失效原因分析及建议[J].电瓷避雷器,2022(3):81-88.  
CHAO Yafeng, WANG Feng, LI Yuxiang, et al. Analysis and suggestions on MOA protection failure of overhead transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3):81-88.
- [3] 张明旭,王军,闫敏,等.接地电阻值对输电杆塔防雷影响的研究[J].粘接,2021,46(4):150-153,173.  
ZHANG Mingxu, WANG Jun, YAN Min, et al. Research on influence of grounding resistance on lightning protection of transmission tower[J]. Adhesion, 2021, 46(4):150-153, 173.
- [4] 杨秋玉,郑小刚.考虑火花效应的杆塔接地体冲击接地电阻仿真计算[J].电瓷避雷器,2022(5):86-91,100.  
YANG Qiuyu, ZHENG Xiaogang. Simulation on calculation of impulse grounding resistance of tower grounding electrode considering spark effect[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5):86-91, 100.
- [5] 张宇,王兰炜,胡哲.地电阻率观测中两种电极接地电阻测量方法及其对比研究[J].地震学报,2022,44(6):1049-1060.  
ZHANG Yu, WANG Lanyu, HU Zhe. Comparative study on two kinds of electrode grounding resistance measurement methods in geo-resistivity observation[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(6):1049-1060.
- [6] 邓夙,方定展,田相鹏,等.基于钳表法的杆塔接地电阻测量系统设计[J].电子制作,2023,31(1):19-21.  
DENG Su, FANG Dingzhan, TIAN Xiangpeng, et al. Design of power demand response mechanism for high proportion of photovoltaic prosumer[J]. Electronics Practice, 2023, 31(1):19-21.
- [7] 张博成,胡志坚,张凯军.避雷线分流对杆塔接地电阻测量的影响[J].电力建设,2016,37(4):70-75.  
ZHANG Bocheng, HU Zhijian, ZHANG Kaijun. Influence of ground wire shunting on tower grounding resistance measurement [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4):70-75.
- [8] 刘玮,聂葳,陈智,等.利用架空线路测量接地装置接地电阻的误差研究[J].高压电器,2012,48(8):45-49,55.  
LIU Wei, NIE Wei, CHEN Zhi, et al. Error sources of grounding grid resistance measurement using overhead ground line[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8):45-49, 55.
- [9] 杜洋,李龙江,段炼红.输电线路杆塔接地阻抗测量方法探讨[J].电测与仪表,2009,46(S2):84-87.  
DU Yang, LI Longhong, DUAN Lianhong. The discussion of grounding impedance measurement method of grounding devices of transmission tower[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(S2):84-87.
- [10] 秦天,刘浔,涂春华,等.基于CDEGS的多电流极法测量变电站接地电阻研究[J].电瓷避雷器,2020(6):136-143.  
QIN Tian, LIU Xun, TU Chunhua, et al. Research on measurement of the substation grounding resistance by multi-current electrodes based on CDEGS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6):136-143.
- [11] 申巍,樊镒铖,王森,等.分层土壤短距离放线下接地电阻测试方法研究[J].智慧电力,2022,50(12):13-18,93.  
SHEN Wei, FAN Yicheng, WANG Sen, et al. Measuring method of grounding resistance under short distance laying-out in layered soil[J]. Smart Power, 2022, 50(12):13-18, 93.
- [12] 许灵洁,陈骁,刘勇,等.异频测量法在电流互感器现场检测中的应用[J].变压器,2021,58(3):70-75.  
XU Lingjie, CHEN Xiao, LIU Yong, et al. Application of different frequency measurement method in field measurement of current transformer[J]. Transformer, 2021, 58(3):70-75.
- [13] 汤亮亮.新型电力系统接地关键技术及展望[J].电瓷避雷器,2023(1):1-10.  
TANG Liangliang. Key technologies review and prospect of grounding in new type power system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1):1-10.
- [14] 行鸿彦,何贵先,徐伟,等.混合遗传算法在接地电阻测量中的应用[J].电子测量与仪器学报,2016,30(9):1389-1396.  
XING Hongyan, HE Guixian, XU Wei, et al. Application of hybrid genetic algorithm in ground resistance measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9):1389-1396.
- [15] 张占龙,许晓,刘成,等.一种多频扫描式杆塔接地电阻的测量方法[J].中国电机工程学报,2015,35(19):5078-5086.  
ZHANG Zhanlong, XU Xiao, LIU Cheng, et al. A multi-frequency sweeping method of measuring tower grounding resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19):5078-5086.

收稿日期:2023-10-09

修改稿日期:2023-10-31