接地极长度对其接地阻抗频谱特性的影响研究

杨 琳[1]，张 榆[1]，冯文艳[3]，曹晓斌[2,3]，陈 缨[1]

（1.国网四川省电力公司电力科学研究院，四川 成都 610041；2.四川大学电气信息学院，四川 成都 610065；
3.西南交通大学电气工程学院，四川 成都 610031）

摘要：杆塔接地性能决定输电线路的耐雷水平，腐蚀导致接地极断裂，长度减少。为了研究频率响应法在接地极长度诊断中的可行性，研究接地极长度对其接地阻抗频谱特性的影响。搭建三种常见结构接地极的仿真模型，运用CDEGS软件仿真得到不同电源频率下接地极的接地阻抗；通过分析阻抗模和阻抗角的频谱响应曲线，找出不同结构下长度对接地阻抗的共同影响规律；通过实验对该规律进行验证。频率较低时，接地极长度对阻抗模值有较大的影响；频率升高后，不同长度接地极的阻抗模值逐渐相同，而阻抗角有较大的差异；随着频率进一步升高，不同长度接地极接地阻抗的模值与阻抗角都相同。提出如果以50 Hz的阻抗模值为基准，可通过模值倍增时所需要的频率对接地极长度进行检测。

关键词：频谱响应；CDEGS；阻抗；杆塔诊断；接地极

Study on the influence of grounding electrode length on its ground impedance spectrum characteristics

YANG Lin[1], , ZHANG Yu[1], FENG Wenyan[3], CAO Xiaobin[2,3], CHEN Ying[1]

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The grounding resistance of the tower determines the lightning withstand level of the transmission line, the corrosion will lead to the breakage of the grounding electrode and the decrease in the length. In order to study the feasibility of frequency response method in the diagnosis of grounding electrode length, the influence of the length of grounding electrode on the spectrum characteristics of grounding impedance is studied. Tthree simulation models of common structural grounding electrodes are built. The grounding impedance of the grounding electrode is simulated under different power frequency by using CDEGS software. By analyzing the frequency response curves of impedance mode and impedance angle, the common influence rule of length to ground impedance under different structures is found. The experiment is used to verify the law. The length of the grounding electrode has a great influence on the impedance modulus when the frequency is low; when the frequency increases, the impedance modulus of the grounding electrodes with different lengths is gradually the same, and the impedance angle is quite different; However, as the frequency increases further, the grounding impedance of the grounding electrode with different lengths is the same as that of the impedance angle. If the impedance modulus of 50 Hz is used as the benchmark, the frequency needed to dock the electrode length can be detected by multiplying the module value.

Key words: spectral response; CDEGS; impedance; tower diagnosis; electrode

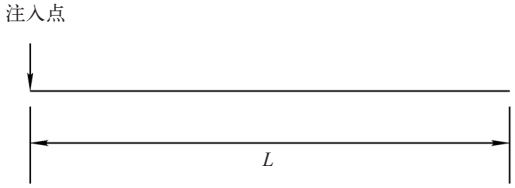
国家自然科学基金资助项目（51777175）

0 引言

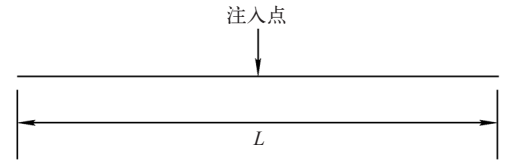
接地装置的状态检测是发现接地装置安全隐患、保证接地安全运行的必要手段，至今已经提出了各种测量接地导体状态的诊断方法[1-5]。杆塔接地有其独有的特点[6-7]，5 kV及以上杆塔采用塔脚多点接地，220 kV及以上采用四点接地，且其所处位置偏僻。杆塔接地极呈放射性，长期腐蚀之后导致杆塔接地极变短变细，对于超特高压直流输电系统这种现象更是明显，所以很有必要为杆塔接地找出一种独有的腐蚀检测方法。频率响应法是变压器绕组变形最主要的检测方法[8-9]，变压器绕组变形检测与接地装置状态检测具有一些相同点：均不可见，均有可能发生细微变化等，因此想到通过改变注入电源频率找出接地导体阻抗曲线的变化，进而找出一种诊断的新方法。现在杆塔对不同频率的电流响应还没有学者研究过，研究不同频率下接地导体的响应特性具有重要意义。笔者基于CDEGS软件包建立了三种不同电源接入接地导体模型，模拟多频电流对接地体阻抗的影响。分析电源单端注入、中端注入和交叉点注入下接地体阻抗随频率变化的特性。

1 三种仿真模型建立

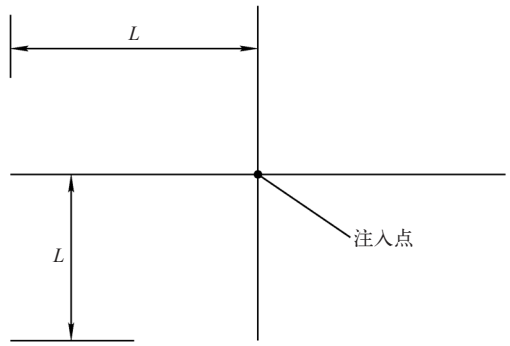
杆塔简单接地极有电源单端、中端和交叉点注入三种[10-11]，水平接地导体是接地装置中一种比较典型的接地装置，电源接地体模型如图1所示。采取的导体材料为圆钢，根据工程实际设置埋深d=0.6 m，导体半径r=0.005 m，导体相对电阻率为17，相对磁导率为1，土壤电阻率ρ=200 Ω·m，并且在单端注入20 A的工频电流源信号。在此基本参数情况下，选择频率范围为2 Hz～1×10^6 MHz进行频响特性描绘。



（a）电源单端注入建模图



（b）电源中端注入建模图



（c）电源垂直交叉点注入建模图

图1 建模示意图

Fig. 1 Modeling sketch map

2 长度L对接地频响特性的影响分析

2.1 长度L对阻抗模频响特性的影响

L从40 m到90 m变化。仅改变L进行仿真。根据仿真数据，绘制三种结构下的阻抗模频响特性图，如图2所示。

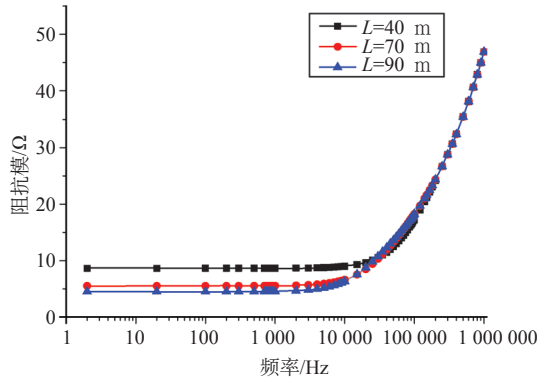
从图2中可以看出，三种状况下的接地导体阻抗模频响特性特点基本相似：阻抗模均是先保持不变，然后开始迅速增大。因此不同结构下的接地导体阻抗模频谱曲线趋势相似。

在低频阶段，L越大，相应的阻抗模值越小，因此可以通过低频时阻抗模的大小判断L的变化，进而判断导体是否发生断裂腐蚀。

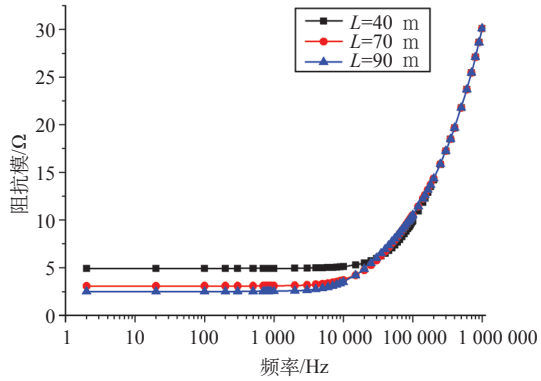
2.2 长度L对阻抗角频响特性的影响

根据仿真数据，绘制三种结构下的阻抗角频响特性图，如图3所示。

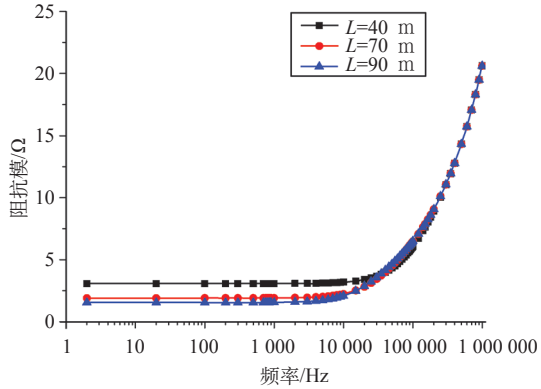
从图3中可以看出，三种状况下的接地导体阻抗角频响特性特点为：都是先不变再急速增大到达平稳点再平稳变化，并且当L越大时，到达平稳变化点的频率越低。因此可以借助到达平稳变化点的频率判断L的变化，进而判断导体是否发生断裂腐蚀。



（a）电源单端注入响应图



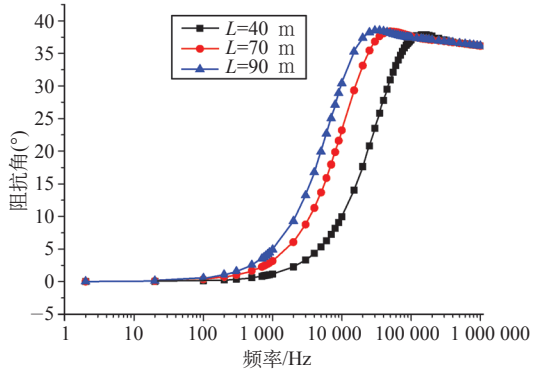
（b）电源中端注入响应图



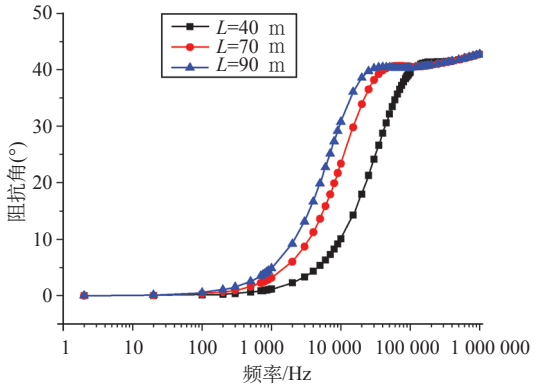
（c）电源交叉点注入响应图

图2　阻抗模频响特性图

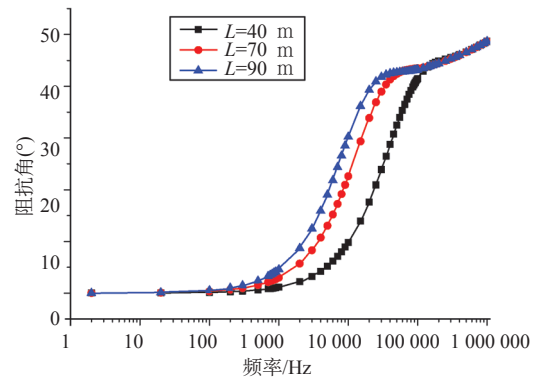
Fig. 2　Characteristic diagram of impedance mode frequency response



（a）单端注入响应图



（b）中端注入响应图



（c）交叉点注入响应图

图3　阻抗角频响特性图

Fig. 3　Characteristic diagram of impedance angle frequency response

曲线到达汇合点后，中心点注入以及垂直交叉接地方式的阻抗角曲线末端为上扬状态，而单端注入为下落状态。结构不同，阻抗角频响特性曲线趋势不同。

3　仿真数据规律分析

从仿真数据中可以看出长度L、结构之间的频率响应有一定的关系，如表1～表3所示。

表1　L=40 m时规律表

Tab. 1　L=40 m rule table

频率 \ 结构	单端注入阻抗模/Ω	中端注入阻抗模/Ω	交叉点注入阻抗模/Ω
50 Hz	8.650 525	4.918 379	3.074 814
100 kHz	17.302 25	9.918 4	6.074 185

表2 L=70 m时规律表

Tab.2 L=70 m rule table

结构 / 频率	单端注入阻抗模/Ω	中端注入阻抗模/Ω	交叉点注入阻抗模/Ω
50 Hz	5.519 75	3.095 25	1.905 573 5
35 kHz	11.039 5	6.190 507	6.074 185

表3 L=90 m时规律表

Tab. 3 L=90 m rule table

结构 / 频率	单端注入阻抗模/Ω	中端注入阻抗模/Ω	交叉点注入阻抗模/Ω
50 Hz	4.517 106	2.519 435	1.540 819 5
25 kHz	9.034 212	5.038 87	3.081 639

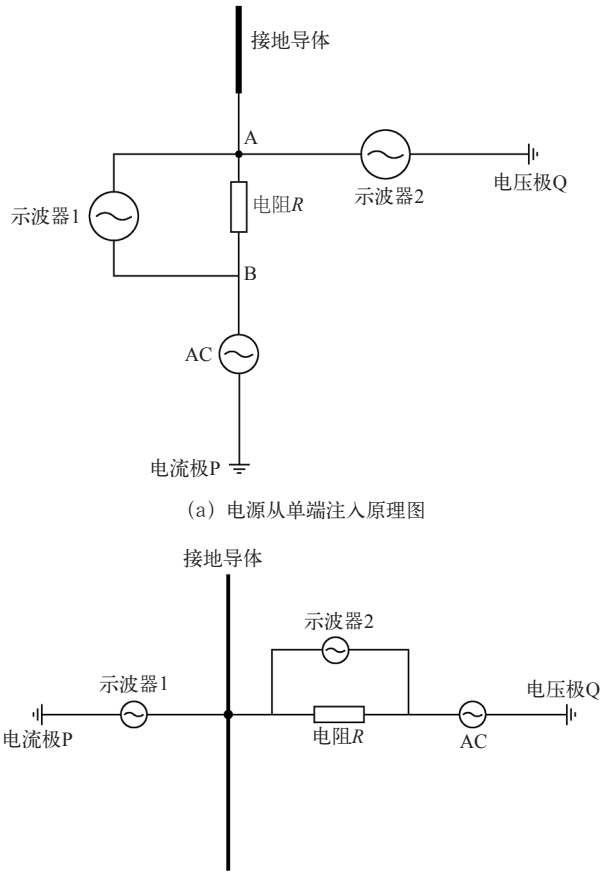
由表1～表3可以看出，L=40 m时，对于三种结构，50 Hz对应的阻抗模值约等于100 kHz对于的阻抗模值的一半；L=70 m时，对于三种结构，50 Hz对应的阻抗模值约等于35 kHz对于的阻抗模值的一半；L=90 m时，对于三种结构，50 Hz对应的阻抗模值约等于25 kHz对于的阻抗模值的一半；所以可以得到当电源注入点到导体端点距离L一定时，结构对阻抗模值倍数变化所对应的频率无影响。即对于一个确定的频率点A，例如50 Hz，对应的阻抗模值两倍的频率点B为定点，L越大，B越小，因此可以通过B的变化判断L的变化。

4 实验

测量接地阻抗原理接线图如图4所示，因为三极法测接地电阻方法简单，而且稳定性高，目前在现场广泛使用[12]，所以本实验测量接地电阻采用的是三极法，为了使互感影响最小[13]，在图4a中让AQ⊥AP，在图4b中PQ与接地导体垂直。

本实验采用的接地导体为铁丝，其直径为4 mm，埋于深度为0.5 m的土壤里。电阻R=5 Ω，信号发生器发出有效值为20 A的正弦波，电源频率从50 Hz到350 kHz变化，实际接线图如图5所示。

根据实验数据，发现也存在着如表4、表5所示的关系。



(a) 电源从单端注入原理图

(b) 电源从中端注入原理图

图4 实验原理图

Fig. 4 Experimental schematic diagram

图5 实际接线图

Fig. 5 Actual wiring diagram

表4 L=40 m时规律表

Tab. 4 L=40 m rule table

结构 / 频率	单端注入阻抗模/Ω	中端注入阻抗模/Ω
5 kHz	11.853	5.427
200 kHz	23.843	10.52

表5 L=50 m时规律表

Tab. 5 L=50m rule table

频率 \ 结构	单端注入 阻抗模/Ω	中端注入 阻抗模/Ω
5 kHz	10.282	4.412
12 kHz	20.444	9.022

由表4、表5可以看出，L=40 m时，对于电源从单端注入和电源从中端注入，5 kHz对应的阻抗模值约等于200 kHz对于的阻抗模值的一半；L=50 m时，对于两种结构，5 kHz对应的阻抗模值约等120 kHz对于的阻抗模值的一半；与仿真数据呈现的规律一样，即对于一个确定的频率点A，只要满足从注入点到导体端点距离均为L，A点对应阻抗模值相同倍数的频率点B是一个定点，与结构无关。L越大，B越小。

5 结束语

在三种不同结构的导体接地情况下，阻抗模频响曲线相似：均是在低频段保持不变，然后随着频率增大而迅速增大；在低频阶段，注入点到导体端点的距离L越大，相应的阻抗模值越小，因此可以通过低频时阻抗模的大小判断L的变化，进而判断导体是否发生断裂腐蚀。

在三种接地情况下，阻抗角频响曲线特点为：在低频段不变，随着频率增大急速增大，但与阻抗模不同的是，随着频率的进一步增大，阻抗角到达平稳点后再缓慢变化。发现L越大，到达平稳变化点所需的频率越低；因此可以利用到达平稳变化点的频率判断L的变化，进而判断导体是否发生断裂腐蚀。

通过分析仿真数据发现，当L一定时，结构对阻抗模值倍数变化所对应的频率无影响。即对于一个确定的频率点A，A点对应的阻抗模值相同倍数的频率点B为定点，L越大，B值越小，因此可以通过倍数关系判断L的变化。通过实验对上述关系进行了验证。

参考文献

[1] 王林，程凤鸣，宋雅楠，等．某500 kV变电站地网腐蚀及改造措施研究[J]．电瓷避雷器，2016(3)：148-151，159．
WANG Lin，CHENG Feng ming，SONG Yanan，et al．A 500 kV substation frouding grid corrosion and reforming measures[J]．Insulators and Surge Arrester，2016(3)：148-151，159．

[2] 荆晶．接地网腐蚀状态预测方法[D]．长沙：湖南大学，2016．
JING Jing．Corrosion state prediction methods for grounding grids[D]．Changsha：Hunan University，2016．

[3] 刘渝根，谢丽娜，尚龙龙，等．基于二进制遗传算法的地网断裂导体诊断[J]．高压电器，2015，51(1)：6-12，17．
LIU Yugen，XIE Lina，SHANG Longlong，et al．diagnosis of old grounding Conductor breakage grid based on binary genetic algorithm [J]．High Voltage Apparatus，2015，51 (1)：6-12，17．

[4] 王丰华，王劭菁，刘亚东，等．采用地表电位和磁感应强度进行变电站接地网故障诊断的效果对比[J]．高电压技术，2016，42(7)：2281-2289．
WANG Fenghua，WANG Shaoqing，LIU Yadong，et al．Comparison of substation grounding grids fault diagnosis results using surface potential and magnetic induction intensity[J]．High Voltage Engineering，2016，42(7)：2281-2289．

[5] 钱国超，马御棠，刘渝根，等．遗传算法在接地网腐蚀故障诊断中的应用研究[J]．电瓷避雷器，2014(2)：52-59，65．
QIAN Guochao，MA Yutang，LIU Yugen，et al．Research on the application of genetic algorithm in fault diagnosis Iusulators and surge of grounding grid corrosion[J]．Arrester，2014(2)：52-59，65．

[6] 彭向阳，李振，李志峰，等．杆塔接地电阻对同塔多回线路防雷性能的影响[J]．高电压技术，2011，37(12)：3113-3119．

PENG Xiangyang，LI Zhen，LI Zhifeng，et al．Influence of tower grounding resistance on the lightning protection performance of transmission lines with multi-circuits on the same tower[J]．High Voltage Engineering，2011，37 (12)：3113-3119．

[7] 徐松，冯兵，何铁祥．输电杆塔镀锌接地引下线腐蚀分析[J]．电瓷避雷器，2014(4)：121-126．
XU Song，FENG Bing，HE Tiexiang．Investigation of corrosion of the galvanized grounding lead of transmission tower[J]．Insulators and Surge Arrester，2014 (4)：121-126．

[8] 许渊．变压器绕组频率响应特征及诊断技术的研究[D]．北京：中国电力科学研究院，2009．
XU Yuan．Research on the technology of winding frequency response characteristics and diagnosis for power transformer[D]．Beijing：China Electric Power Research Institute，2009．

[9] 邹林，廖一帆，罗兵，等．基于有限元法探究电力变压器绕组变形频率响应的仿真研究[J]．电力自动化设备，2017，37(1)：204-211．
ZHOU Lin，LIAO Yifan，LUO Bing，et al．Simulation research on frequency response to winding deformation of power transformer based on finite element method [J]．Electric Power Automation Equipment，2017，37 (1)：204-211．

[10] 李伟，向常圆，文习山，等．特高压输电线路杆塔雷电流分布的仿真[J]．高电压技术，2016，42(8)：2642-2650．
LI Wei，XIANG Changyuan，WEN Xishan，et al．Simulation of lightning current distribution in tower of uitra-high Voltage transmission line[J]．High Voltage Engineering，2016，42 (8)：2642-2650．

[11] 张敏，曹晓斌，李瑞芳，等．输电线路杆塔接地极冲击接地电阻特性分析[J]．电瓷避雷器，2012(4)：5-9．
ZHANG Min，CAO Xiaobin，LI Ruifang，et al．Analysis on impulse grounding resistance characteristics of transmjssion line tower grounding electrode ground[J]．Insulators and surge Arrester，2012 (4)：5-9．

[12] 朱彬，司马文霞，袁涛，等．基于地中电场分布的针刺式接地装置结构参数优化[J]．电网技术，2015，39(10)：2907-2914．
ZHU Bin，SIMA Wenxia，YUAN Tao，et al．Structure parameter optimization of grounding device with needle-shaped conductors based on electric field distribution in soil[J]．Power Grid Technology，2015，39 (10)：2907-2914．

[13] 孙跃，夏晨阳，戴欣．感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化[J]．中国电机工程学报，2010，30(33)：44-50．
SUN Yue，XIA Chenyang，DAI Xin．Analysis and optimization of mutual inductance for inductively coupled power transfer system [J]．Proceedings of the Chinese Electrical Engineering，2010，30 (33)：44-50．

作者简介

杨 琳

杨琳（1983－），男，博士，高级工程师，主要研究方向为输变设备运维技术以及过电压与接地技术等。

(收稿日期：2018－09－06)EA