接地极长度对其接地阻抗频谱特性的影响研究

首先搭建了三种常见结构接地极的仿真模型，运用CDEGS软件仿真得到了不同电源频率下接地极的接地阻抗；然后通过分析阻抗模和阻抗角的频谱响应曲线，找出了不同结构下长度对接地阻抗的共同影响规律；最后通过实验对该规律进行了验证。研究发现频率较低时，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相同。如果以50 Hz的阻抗模值为基准，可以通过模值倍增时所需要的频率对接地极长度进行检测。研究发现，利用接地阻抗的频率响应特性对接地极长度检测具有一定的可行性，为进一步研究接地极的频率检测技术提供了依据。

杨 琳[1] 冯文艳[2] 陈 缨[1] 曹晓斌[2,3] 张 榆[1]/1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 2. 西南交通大学电气工程学院 3. 四川大学电气信息学院

杨 琳/高级工程师

关键词/Keywords
频谱响应·
CDEGS·
长度·
杆塔诊断·
接地极·

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[1-3]。杆塔接地有其独有的特点[4]，5 kV及以上杆塔采用塔脚多点接地，220 kV及以上杆塔采用四点接地，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[5-6]，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，即均不可见，且均有可能发生细微变化等。因此可以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，因此研究不同频率下接地导体的响应特性具有重要意义。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。并且分析了电源单端注入、中端注入和交叉点注入下接地体阻抗随频率变化的特性。

国家自然科学基金项目（51777175）。

1 三种仿真模型建立

杆塔简单接地极有电源单端注入、中端注入和交叉点注入三种[7]，水平接地导体是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。在此基本参数情况下，选择频率范围为2 Hz～1 MHz进行频率响应特性描述。

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在40～90 m范围内变化，仅改变L

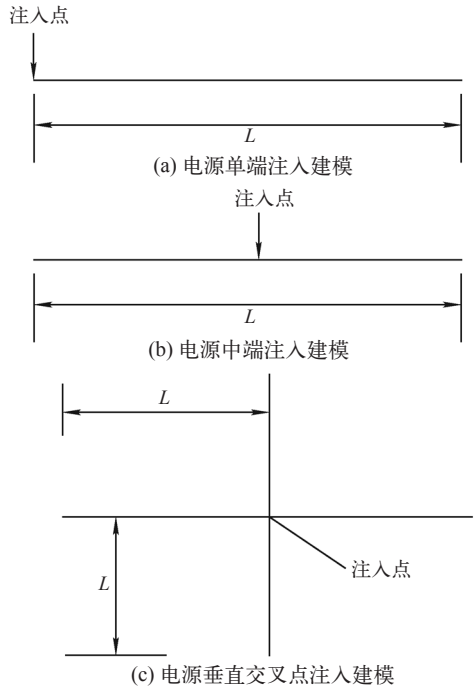
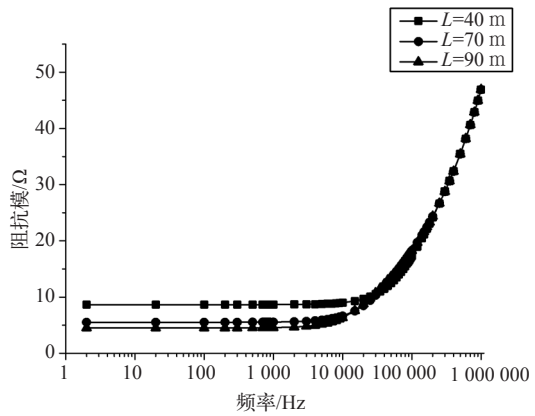
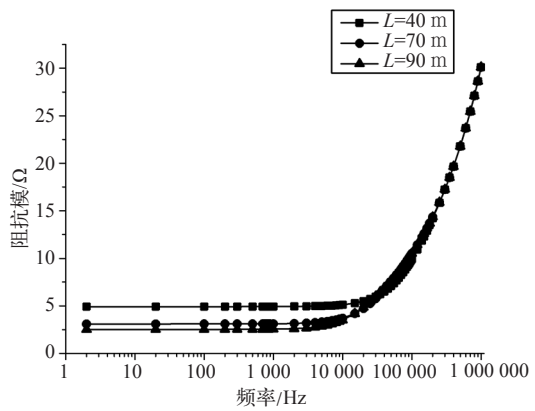


图1　建模示意图

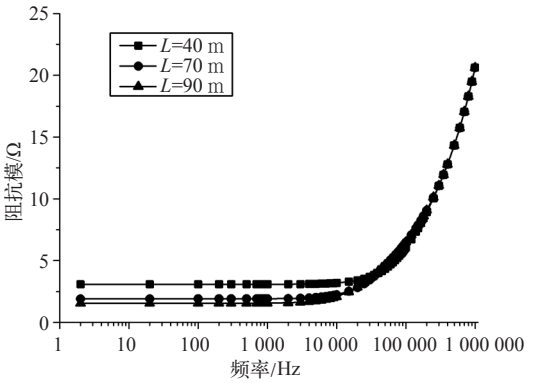
进行仿真。根据仿真数据绘制三种结构下的阻抗模频率响应特性，如图2所示。



（a） 电源单端注入响应



（b） 电源中端注入响应



（c） 电源交叉点注入响应

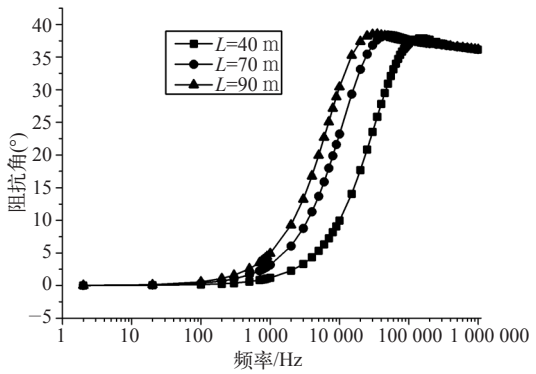
图2　阻抗模频率响应特性

从图2中可以看出，三种状况下的接地导体阻抗模频率响应特性的特点基本相似：阻抗模均为先保持不变，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。

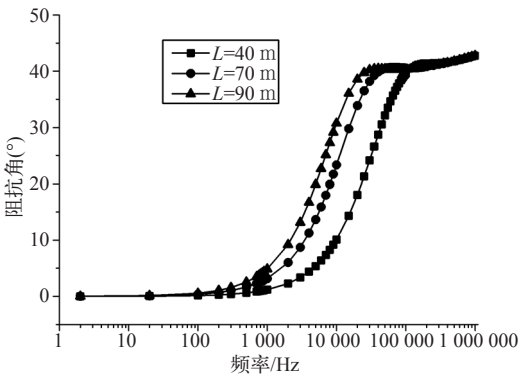
在低频阶段，L越大，相应的阻抗模值越小，因此可以通过低频时阻抗模的大小判断L的变化，进而判断导体是否发生断裂腐蚀。

2.2　长度L对阻抗角频响特性的影响

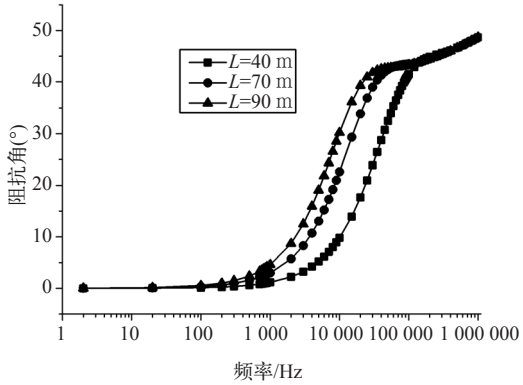
根据仿真数据绘制三种结构下的阻抗角频率响应特性，如图3所示。



（a）单端注入响应



（b）中端注入响应



(c) 交叉点注入响应

图3 阻抗模频率响应特性

从图3中可以看出，三种状况下的接地导体阻抗角频率响应特性的特点为：都是先不变再急速增大，到达平稳点后再平稳变化，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。

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

从仿真数据里可以看出长度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

(单位：Ω)

结构 / 频率	单端注入阻抗模	中端注入阻抗模	交叉点注入阻抗模
50 Hz	8.650 525	4.918 379	3.074 814
100 kHz	17.302 25	9.9184	6.074 185

表2 L=70 m时规律

(单位：Ω)

结构 / 频率	单端注入阻抗模	中端注入阻抗模	交叉点注入阻抗模
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

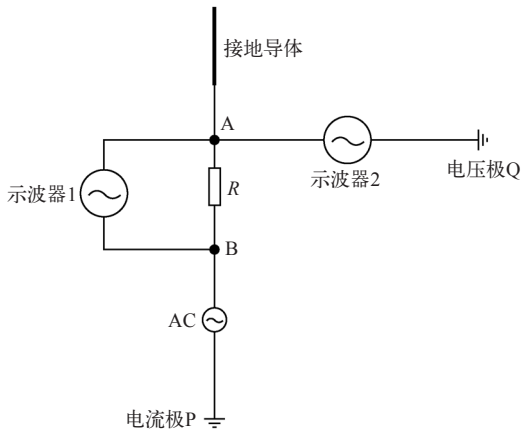
(单位：Ω)

结构 / 频率	单端注入阻抗模	中端注入阻抗模	交叉点注入阻抗模
50 Hz	4.517 106	2.519 435	1.540 8195
25 kHz	9.034 212	5.038 87	3.081 639

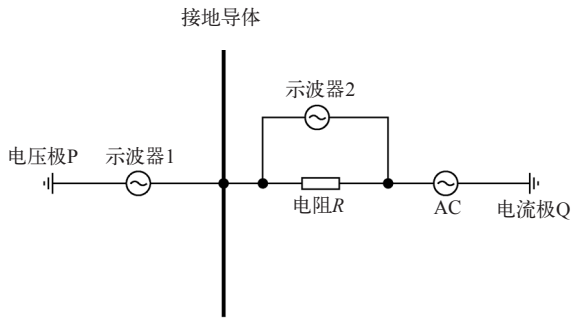
由表1~表3可以看出：L=40 m时，对于三种结构，50 Hz对应的阻抗模值约等于100 kHz对应的阻抗模值的1/2；L=70 m时，对于三种结构，50 Hz对应的阻抗模值约等于35 kHz对应的阻抗模值的1/2；L=90 m时，对于三种结构，50 Hz对应的阻抗模值约等于25 kHz对应的阻抗模值的1/2。所以可以得到当电源注入点到导体端点距离L一定时，结构对阻抗模值倍数变化所对应的频率无影响。即对于一个确定的频率点A（如50 Hz），对应的阻抗模值两倍的频率点B为定点，L越大，B越小，因此可以通过B的变化判断L的变化。

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[8]，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[9]，在图4a中令AQ⊥AP，在图4b中PQ与接地导体垂直。



(a)电源从单端注入原理



(b)电源从中端注入原理

图4 实验原理

本实验采用的接地导体为铁丝，直径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，电源频率在50～350 kHz之间变化，实际接线如图5所示。

图5 实际接线

根据实验数据，存在的规律如表4、表5所示。

表4 L=40 m时规律

（单位：Ω）

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

表5 L=50 m时规律

（单位：Ω）

结构 / 频率	单端注入阻抗模	中端注入阻抗模
5 kHz	10.282	4.412
120 kHz	20.444	9.022

由表4可以看出，L=40 m时，对于两种结构，5 kHz对应的阻抗模值约等于200 kHz对应的阻抗模值的1/2；L=50 m时，对于两种结构，5 kHz对应的阻抗模值约等120 kHz对应的阻抗模值的1/2。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，阻抗模频率响应曲线相似，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。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，其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。并通过实验对上述关系进行了验证。

参 考 文 献

[1] 荆晶．接地网腐蚀状态预测方法[D]．长沙：湖南大学，2016．

[2] 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．

[3] 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．

[4] 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．

[5] 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．

[6] 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．

[7] 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．

[8] 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．

[9] 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．

(收稿日期：2018－09－06)EA