

输电杆塔接地网精细拓扑结构检测技术开发

严子卓¹,李文波^{2*},罗强³,刘宇彬⁴,邹谨成²

(1.湖南省湘电试验研究院有限公司,湖南长沙410004;2.国网湖南省电力有限公司电力科学研究院,湖南长沙410007;3.国网湖南省电力有限公司永州供电分公司,湖南永州410118;4.国网湖南省电力有限公司经济技术研究院,湖南长沙410118)

摘要:在输电杆塔接地网质监和验收过程中,必须保证接地线的埋深、走向及埋长等数据的准确性,确保输电杆塔接地网施工符合设计要求。文中基于接地网与周围介质在导电性、导磁性、密度等物理特性上的差异,利用电磁感应、电位检测等先进测量技术,研究了一种输电杆塔接地网拓扑结构检测精准测量技术,能在不破坏地表的情况下,准确测量接地网的埋长和埋深。应用结果表明,该技术能有效地检测输电杆塔接地网的拓扑结构,不仅节约了时间和成本,而且确保了施工过程中接地网的完整性和性能。测量结果的准确性为质监和验收提供了可靠的依据,大大提升了验收效率和质量。

关键词:输电杆塔;接地网;电磁感应;电位检测;拓扑结构

中图分类号:TM 862 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)05-0052-05

0 引言

输电线路作为电网的主要传输通道,一旦发生故障,将导致整个电力系统瘫痪。架空输电线路是最常见的输电通道,其输电杆塔接地网的敷设质量直接关系到接地网的防雷效果,对输电线路的运行可靠性至关重要。由于接地工程属于隐蔽建筑,监督管理存在不到位的情况,导致实际施工常常不能严格按照设计要求进行,接地体的长度、埋深及焊接和回填土不符合要求的问题较为普遍,这些缺陷使得大量杆塔接地电阻超出标准。如果现场施工质量不达标,可能存在严重的安全隐患^[1-3]。因此,在接地网的质量监控和验收过程中,必须严格检查是否按照设计要求进行施工。

传统接地线检测方法采用人工开挖进行检验,该方法不仅耗时耗力,效率低下,同时无法做到较大面积范围的检测,地线末端位置的精度也难以保证。针对传统检测方法的不足,保障接地线施工质量符合埋深、走向及埋长的设计要求,同时无需通过人工开挖检验,亟需研发一种能对接地网进行无损检测的技术^[4-5]。

为了解决传统接地线人工开挖带来的问题,提高接地线检测的效率和精度,国内外学者对无损检测技术进行了大量相关研究。李文涛等利用探地雷达对变电站的接地网进行成像检测,通过探地雷达的反射回波对接地扁铁精确定位和腐蚀反馈,能有效开展工作,为后期评估和改造提供有力支撑^[6];Yu等利用电磁感应法对接地网故障进行定位成像分析,通过对比无断层和有断层情况下的地下等效电阻率的分布特征,并进行了有限元模拟,验证了方法的有效性^[7];赵广茂利用地震波透射成像原理对路基进行无损检测,得到路基本体中岩土弹力学参数的分布图像,有效反应路基周围介质强度信息,为路基的维护与加固提供有效帮助,对路基检测具有指导意义^[8]。以上研究通过探地雷达法、电磁感应法和地震波法等无损检测方法,对接地网的检测具有指导意义,但同时还存在一定缺点和局限性。

探地雷达法检测精度低、信号识别难度大,对检测人员经验要求高,且设备笨重,造价昂贵,仅适合在平地检测,在山区等崎岖路面难以开展。电磁感应法在检测过程中易受到目标管线附近其它管线电磁场的影响,且土壤也会吸收部分信号能量,使探测变得困难,接收探测距离缩短,降低检测精度。地震波法检测金属线,比较容易受地下介质因素的干扰,对密集区域的检测精

收稿日期:2025-06-13

作者简介:严子卓(1999),男,硕士,助理工程师,从事金属专业的检测、结构安全受力计算,主要研究电力金属结构检测与计算。

度也较差^[9-11]。

高压输电线路杆塔的接地网,通常是由多条接地线在杆塔下面组成错综复杂的环形网。常规的地下探测方法在检测接地网的过程中,存在接地线信号相互干扰的问题,且检测接地线的末端存在一定困难,这些问题都会给高压输电线路杆塔接地网不开挖检测技术的研究和开发带来困难^[12-14]。文中综合运用电磁感应法加电位检测法,通过研究该方法的发射频率、信号形式,验证不同方法的现场检测效果,实现了对输电杆塔接地网拓扑结构的精细检测,对提高线路接地网质监验收的效率和验收质量具有重要意义。

1 接地网拓扑结构检测原理

1.1 接地网的基本探测

给输电杆塔接地网施加一个主动源和一个交变的电磁场(一次场),通过一次场激发接地网产生感应电流,在接地体周围形成二次电磁场,然后通过发射机发射不同的频率和功率,直到接收机获得最合适的发射频率和发射功率,再转化为有用的信号,形成对接地网的探测,如图1所示。通过这种方式可以初步探测输电杆塔接地网的拓扑结构,但是对于精准埋深、接地网射线长度的精准测量仍需结合其他方法。

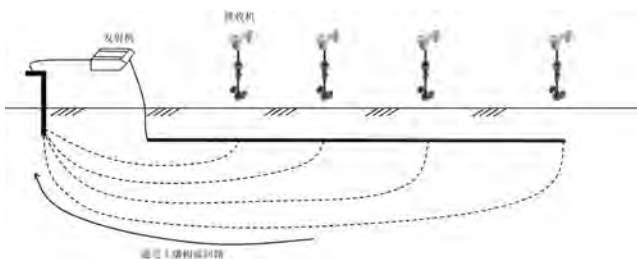


图1 接地网拓扑结构探测图

1.2 接地网埋深的测量

依据电磁感应定律,接收天线上产生感应电动势 U 的公式为:

$$\varphi = NBS = N\mu H_p S \quad (1)$$

$$u = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[N\mu \frac{u_0 I_0 \sin(\omega t)}{2\pi r} S \right] = -\mu NS \frac{u_0 I_0}{2\pi r} \omega \cos(\omega t) \quad (2)$$

式中: φ 、 N 、 B 、 S 分别是通过线圈的磁通量、线圈匝数、磁感应强度、线圈面积; μ 、 u_0 、 H_p 分别是磁芯的磁导率、真空磁导率、磁场强度; I 、 r 分别是磁力线电流强度、距离导线的距离。

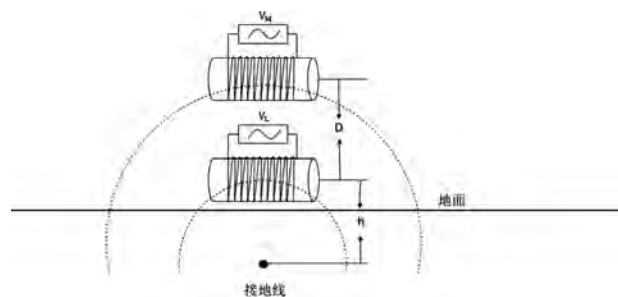


图2 双天线法探测接地网的埋深

如图2所示,假设位于待测的接地体正上方的两个水平天线之间的距离是 D , U_H 和 U_L 分别是顶端和底部天线产生的感应电动势,根据式(2),就可以得到:

$$U_H = -\frac{d\varphi}{dt} = -N_H \mu_H S_H \frac{u_0 I_0}{2\pi(h+D)} \omega \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$U_L = -\frac{d\varphi}{dt} = -N_L \mu_L S_L \frac{u_0 I_0}{2\pi h} \omega \cos(\omega t) \quad (4)$$

采用完全相同的两个水平天线,两者具有相同的磁芯、线圈匝数、横截面积,则有 $N_H = N_L$ 、 $\mu_H = \mu_L$ 、 $S_H = S_L$,将式(3)、(4)两式相除可得:

$$\frac{U_H}{U_L} = \frac{h}{h+D} \quad (5)$$

$$h = \frac{U_H}{U_L - U_H} D \quad (6)$$

通过式(6)可以得出,只要能够测量两个不同位置点的磁场强度,就可以计算出待测地下金属管线距离地面的深度。

1.3 接地网射线末端的精准定位

在接地网通入电压信号后,在接地网和大地形成回路电流,电流通过接地网向大地泄流,此时,接地网的射线周边形成了一个微弱电场,通过电位检测仪,可以实现对该电场的检测,电位检测仪如图3所示。将电位检测仪的两个探针插入大地,可以实现对两个探针点之间的电位检测。在接地网射线末端,延射线走向方向,电场分布如图4所示,射线末端往外延伸,电场强度逐渐降低,射线末端向内,电场强度快速降低,当电位检测仪的一支探针在射线末端,另一支探针在射线延伸方向时,电场强度最高。沿射线走向的垂直方向,当两个探针均匀处于接地线的两侧时,由于两个探针的电位相同,此时,电位检测仪检测的电场强度最低,如图5所示。因此,通过检测射线末端的电场分布,可以准确判断接地网射线末端,检测误差小于0.5 m,从而实现对接地网射线长度的准确测量。



图3 电位检测装置操作示意图

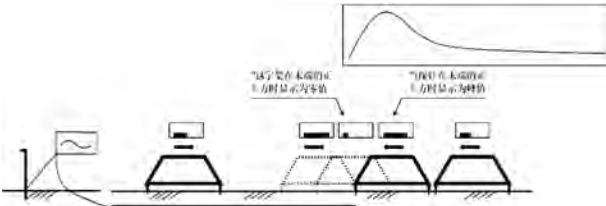


图4 射线末端检测示意图(沿射线延伸方向)

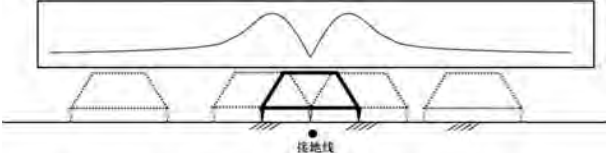
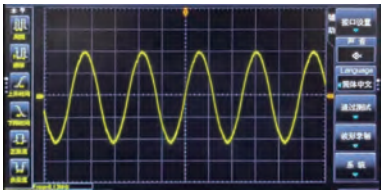


图5 射线末端检测示意图(垂直射线方向)

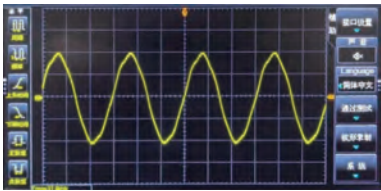
通过上述方法的结合使用,可以实现对输电杆塔接地网精细拓扑结构的检测,包括射线埋深、埋长等精准信息。

2 现场试验

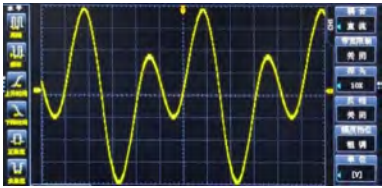
在某500 kV线路输电杆塔现场进行检测,并进行开挖,对比测量误差。采用自研仪器设备,接地网设计型号:GD-12F,设计射线为:8×56 m,设计8根射线,长度为56 m,埋深为0.6 m。现场给接地网分别通入4种频率的电压信号:8 kHz、33 kHz、398 Hz+796 Hz复合频率、8 192 Hz+8 Hz复合频率信号,其中,前两个单频信号用于检测接地网脱拓扑结构及埋深,后两个复合频率信号用于定位射线末端。4个频率信号如图6所示。



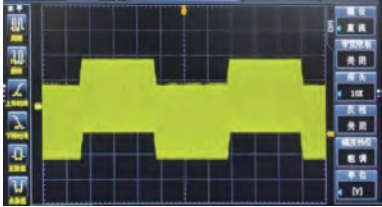
a) 8 192 Hz 输出信号



b) 32 768 Hz 输出信号



c) 398 Hz+796 Hz 输出信号



d) 8 192 Hz+8 Hz 输出信号

图6 接地网注入信号波形

对接地网射线根数进行检测,在对接地网施加信号后,通过接收机检测接地网电磁信号,并采用电位检测法测量接地网射线末端,现场测量操作如图7所示,不同频率信号检测结果为:实际敷设射线为5根,与设计不符,且射线长度均没有达到设计要求。如表1所示。

表1 某500 kV线路3号塔接地网检测

射线编号	1	2	3	4	5
射线设计长度/m	56	56	56	56	56
射线实际开挖长度/m	29.3	39.4	48.4	36	30
8 kHz信号测量射线长度偏差	-2	-2.5	-2.7	-2.6	-1.8
33 kHz信号测量射线长度偏差	-1.5	-1.8	-1.9	-1.6	-1.3
398 Hz+796 Hz信号测量射线长度偏差	+0.3	-0.35	-0.4	-0.5	-0.5
8 192 Hz+8 Hz信号测量射线长度偏差	1.2	1.3	-1.35	-1.1	-1.5



图7 现场接地网射线末端定位及长度测量

1) 在接地网射线走向探测方面,采用8 kHz、33 kHz两种信号探测的结果类似,两种信号均能较好实现对接地网射线的识别及探测,均能较快发现接地网射线信号。

2) 对每根射线长度进行测量(对射线末端进行精准定位),采用不同测试方法测量的结果如表1所示。测试结果表明:在射线末端定位(射线长度测量)方面,采用电位检测法检测时,接地网注入信号为

398 Hz+796 Hz,对射线末端定位的准确度最高,误差在0.5 m以内;接地网注入信号为8 192 Hz+8 Hz时,射线末端定位准确度次之,误差可以控制在1~1.5 m。而不采用电位检测法,直接向接地网注入8 kHz或者33 kHz单频信号,采用接收机进行检测,检测误差在1.5~3 m左右,相对误差较大。

现场对比表明,在射线末端定位测量方面,398 Hz+796 Hz信号检测方案的检测效果更好。理论上,对于高阻漏电故障点探测,8 192 Hz+8 Hz方波的探测效果优势明显,探测到的最大故障电阻可以高达2 MΩ;而对于对地电阻比较小的情况,398 Hz+796 Hz方案使得读数更加稳定。输电杆塔接地线采用裸埋的敷设方式,对地没有绝缘层,采用398 Hz+796 Hz信号探测方案更为合适。

3 检测案例

1) 对某条500 kV线路的三基铁塔的接地网进行抽查,现场分别通过不开挖检测和开挖见证,检测情况如表2所示。

表2 某500 kV线路接地网检测情况

序号	杆塔号	接地网 型号	设计 根数	射线设计 长度/m	实测射线长度/m							
					A	B	C	D	E	F	G	H
1	B110	GD-9F	8	40	26	30	33	30	/	/	/	/
2	B111	GD-8F	4	47	28	22	20	30	/	/	/	/
3	A114	GD-9F	8	40	36	35	20	30	20	33	33	40

(1) B110号塔接地网设计型号为GD-9F,设计要
求为8根40 m射线,埋深不低于600 mm。实际B110
号塔接地网射线为4根,射线长度分别为26 m、30 m、
33 m、30 m,埋深为500 mm。

(2) B111号塔接地网设计型号为GD-8F,设计要
求为4根47 m射线,埋深不低于600 mm。实际B111
号塔接地网射线为4根,射线长度分别为28 m、22 m、
20 m、30 m,埋深为500 mm。

(3) A114号塔接地网设计型号为GD-9F,设计要
求为8根40 m射线,埋深不低于600 mm。实际A114
号塔接地网射线为8根,射线长度分别为36 m、35 m、
20 m、30 m、20 m、33 m、33 m、40 m,埋深为500 mm。

该500 kV线路三基塔的接地网参数(根数、埋深
和长度)均不符合设计要求的情况。

2) 对另一条500 kV线路的三基铁塔的接地网进

行现场检测,分别通过不开挖检测和开挖见证,检测
情况如表3所示。

表3 某500 kV线路接地网检测情况

序号	杆塔号	接地网 型号	设计 根数	射线设计 长度/m	实测射线长度/m							
					A	B	C	D	E	F	G	H
1	A27	GD-10F	8	45	60	48	46	35	55	60	/	/
2	A49	GD-10F	8	45	32	33	33	31	30	36	29	30
3	A69	GD-6F	4	23	11	21	24	2	/	/	/	/

(1) A27号塔接地网设计型号为GD-10F,设计要
求为8根45 m射线,埋深不低于600 mm。实际A27
号塔接地网射线为6根,射线长度分别为60 m、48 m、
43 m、35 m、55 m、60 m,接地网埋深为400~600 mm
不等。

(2) A49号塔接地网设计型号为GD-10F,设计要
求为8根45 m射线,埋深不低于600 mm。实际A49
号塔接地网射线为8根,射线长度分别为32 m、33 m、
33 m、31 m、30 m、36 m、29 m、30 m,埋深为300~600 mm
不等。

(3) A69号塔接地网设计型号为GD-6F,设计要
求为4根23 m射线,埋深不低于600 mm。实际A69号塔
接地网射线为4根,其中3根射线长度分别为11 m、
21 m、24 m,另1根射线接入邻近铁塔接地网,埋深为
270~600 mm不等。

该500 kV线路三基塔的接地网参数(根数、埋深
和长度)不符合设计要求。

4 结语

综合电磁感应、电位检测等方法形成的输电杆塔
接地网精细拓扑结构检测技术,实现了输电杆塔接地
网射线分布、走向、埋长、埋深等信息的不开挖检测。
实际案例表明,接地网不开挖检测技术的检测精度
高、效率高,可以准确测量接地网的埋长和埋深,对提
高输电线路接地网质监验收效率及验收质量具有重要
意义。

参考文献:

- [1] 汪新秀,蒋正龙,毛文奇.湖南省220 kV及以上变电站接地
网安全性评价[J].湖南电力,2006(05):24-27.
- [2] 王东,骆建龙,杨灿.特高压换流站接地网施工控制方法[J].
湖南电力,2015,35(03):53-55.

- [3] 罗旭恒,蔡志文,曾光辉,等.基于共模功率的交直流混合配电网单极接地故障识别方法[J].广东电力,2023,36(02):66-75.
- [4] 岳一石,周年光,邹妍晖,等.酒一湖线对湖南电网变压器的直流偏磁影响研究[J].湖南电力,2016,36(03):5-8.
- [5] 李华,朱一民,陈琳,等.小电阻接地系统单相接地故障特征分析[J].广东电力,2022,35(12):56-65.
- [6] 陈文涛,周利兵,李山,等.基于探地雷达对变电站接地网的成像检测技术[J].电瓷避雷器,2018(03):54-59.
- [7] Yu C,Fu Z,Hou X, et al.Break-Point Diagnosis of Grounding Grids Using Transient Electromagnetic Apparent Resistivity Imaging[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(06):2485-2491.
- [8] 赵广茂.纵横地震波成像在路基无损检测中的应用研究[J].铁道工程学报,2016,33(10):25-28,60.
- [9] 杨兴华.柘溪水电厂接地网降阻改造[J].湖南电力,2011,31(03):60-62.
- [10] 曹小龙.电力设备接地引下线导通测试方法的探讨[J].湖南电力,2010,30(04):40-42,48.
- [11] 周挺,周卫华,黄福勇,等.导通性测量在线路工作中的应用[J].湖南电力,2008(05):11-13.
- [12] 王成,王峰,王宜强,等.输电线路杆塔接地电阻的测量方法分析[J].湖南电力,2012,32(02):39-42.
- [13] 谷相宏,张程,卫志农,等.基于状态空间分析的整流侧极母线接地故障清除方案评估[J].广东电力,2022,35(10):109-116.
- [14] 杨兴华.柘溪水电厂接地网降阻改造[J].湖南电力,2011,31(03):60-62.

(上接第 51 页)

参考文献:

- [1] 赵江河,陈新,林涛,等.基于智能电网的配电自动化建设[J].电力系统自动化,2012,36(18):33-36.
- [2] 王良.智能配电自动化应用实践的几点探讨[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):12-16.
- [3] 陈雪琨,王科龙,高原.基于物理模拟的配电自动化仿真试验系统研究与实现[J].自动化与仪器仪表,2024(05):127-131.
- [4] 刘健,张小庆,赵树仁,等.配电自动化故障处理性能主站注入测试法[J].电力系统自动化,2012,36(18):67-71.
- [5] 刘健,赵树仁,张小庆.中国配电自动化的进展及若干建议[J].电力系统自动化,2012,36(19):6-10.
- [6] 姜炜超,沈冰,李昀,等.基于 5G 的含分布式电源智能分布式馈线自动化实现方法[J].供用电,2021,38(10):57-63.
- [7] GUAN S,FAN W,LEI H, et al.Realization of simulation test method for feeder automation of power distribution automation system[C]//International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, November 26-29, 2015, Changsha, China: 2710-2714.
- [8] 吴栋蓑,杨涛,黄晓明,等.虚实结合的馈线自动化系统测试平台设计[J].电力系统保护与控制,2018,46(19):137-143.
- [9] 凌万水,刘东,陈新,等.馈线自动化算法可靠性的量化评价方法及其应用[J].电力系统自动化,2012,36(07):71-75.
- [10] 关石磊,邓宏芬,刘岚,等.馈线自动化功能仿真测试实现[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(12):91-96.
- [11] 陈冉,陆建,沈冰,等.馈线自动化系统的集成测试方案分析[J].电力系统自动化,2016,40(20):121-125.
- [12] 马啸宇,陈卓,杨超,等.基于 RTLAB 虚实结合的馈线自动化测试[J].电子科技,2024,37(05):25-31.
- [13] 刘健,张志华,吴水兰,等.一二次融合的配电网故障处理[J].电力系统保护与控制,2019,47(20):1-6.