

基于回路电阻法的高压电缆接地系统带电检测技术及其应用

卢雨欣¹, 尹林², 胡京¹, 黄昆¹, 周龙武¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西南昌 330096; 2. 国网江西省电力有限公司, 江西南昌 330077)

摘要: 铅封腐蚀等接地系统缺陷是导致高压电缆附件故障的主要问题之一, 而目前针对该类缺陷的带电检测手段较少, 传统的回路电阻检测方法需要停运被测线路, 存在检测耗时长、工作效率低等问题。文中提出了一种适用于在运高压电缆的接地系统带电检测技术, 利用电磁感应, 在高压电缆接地系统中耦合注入异频电压、电流信号, 并构建接地系统回路状态方程, 计算高压电缆接地回路电阻, 有效检测铅封腐蚀等缺陷, 实现接地系统运行状态的有效评估; 通过开展高压电缆单端接地和交叉互联接地回路电阻现场试验, 检测发现接头存在铅封腐蚀缺陷, 并通过消缺验证检测结果, 证明了该技术的检测有效性和现场实用性。

关键词: 铅封; 高压电缆; 回路电阻; 带电检测; 电磁感应

中图分类号: TM 75 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-348X(2025)03-0008-05

0 引言

截至 2024 年底, 国网江西省电力有限公司 110 (66) kV 及以上电压等级在运电缆长度已达 1 462.9 km, 且近 5 年年均增长率超 10%, 高压电缆已成为江西省内乃至全国输电网的主要组成部分, 其可靠运行对于电力系统稳定性至关重要。

相较于架空输电线路, 高压电缆接地系统结构更为复杂, 接地系统连通状态更是时刻影响着高压电缆线路的运行可靠性。铅封腐蚀、接地箱接触不良等缺陷会抬升接地系统局部电位, 严重时甚至产生悬浮电位, 进而引起局部放电导致主绝缘劣化, 最终发展为绝缘击穿故障^[1-3]。然而, 目前对于高压电缆接地系统状态检测技术的研究相对较少, 缺乏对在运高压电缆接地系统状态评估的带电检测手段。特别是对于运行十年以上的老旧电缆线路, 在搪铅工艺不佳和运行环境恶劣的双重因素作用下, 铅封腐蚀等接地系统缺陷已成为困扰高压电缆安全运行的一大难题。

高压电缆接地系统的连通状态可以通过接地回路电阻检测、红外温度检测、X 射线成像检测等手段检测^[3-10], 其中接地回路电阻检测是目前最有效的测试方法。然而, 现有测试方法需要激励电流源输出两种不同的频率, 而且这两种频率需要一定的频率间隔, 对激励电流源频率范围要求高; 使用双频耦合法测试时, 一旦频率间隔较小, 电流传感器的测试误差会超过两种频率下信号之差, 导致测试结果准确性不高。两种测试频率下的损耗不同, 导致双频法的测试误差较大。文中提出了一种适用于在运高压电缆的接地系统带电检测技术, 利用电磁感应, 在高压电缆接地系统中耦合注入异频(非工频)电压、电流信号, 并构建接地系统回路状态方程, 计算高压电缆接地回路电阻, 实现铅封缺陷检测和接地系统运行状态评估。

1 回路电阻检测技术

1.1 传统回路电阻检测

在高压电缆线路正常运行时, 两个中间接头之间

收稿日期: 2025-04-29

基金项目: 江西省重点研发计划项目(耐热型 110 kV 高压聚丙烯绝缘电力电缆制备技术及应用研究, S20252311)。

作者简介: 卢雨欣(1994), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力设备绝缘状态检测。

的接地线、铜壳、铅封和铝护套构成一个完整的电气连接回路,这个回路之间的电阻可以作为电缆系统连接情况的表征。其试验原理如图1所示,利用直流双臂电桥原理,在两个被测接头的接地线之间施加直流电流 I ,再测试由该电流所引起的电压降 U ,由测量公式 $R_x=U/I$ 计算回路电阻 R_x 。然而,传统的检测方法需断开测试相的接地点,且需要线路停运,导致检测耗时长、效率低。

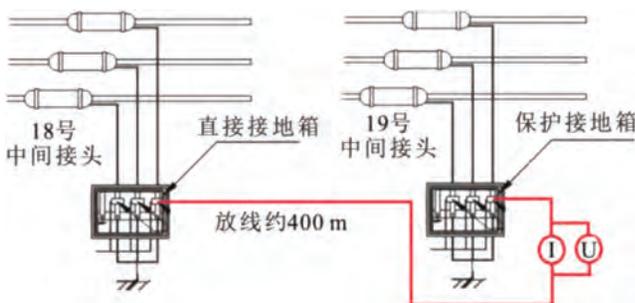


图1 传统回路电阻检测示意图

1.2 回路电阻带电检测技术原理

采用异频耦合注入电缆金属屏蔽感应信号,测试获取感应电压、电流参数,并运用电磁感应和欧姆定律,计算获取电缆金属屏蔽电阻,双回路或单回路电缆金属屏蔽电阻异频法测试原理为^[11]:

$$\begin{cases} Z_{\omega_1} = R + X_{\omega_1} \\ Z_{\omega_2} = R + X_{\omega_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_1 和 ω_2 为互不相等的角频率; Z_{ω_1} 和 Z_{ω_2} 分别为角频率 ω_1 和 ω_2 下的回路阻抗; R 为回路电阻; X_{ω_1} 和 X_{ω_2} 分别为角频率 ω_1 和 ω_2 下的回路感抗。

利用两个互感器对回路中耦合激励电流,第一电流互感器将激励电流耦合到接地回路中,第二电流互感器将激励电流耦合到参考回路中,通过读取接地回路和参考回路中的电流信号有效值及其相位差,联立方程组求解各相电阻,具体如下。

对A、B、C三相进行逐相测试,测试A相时回路总阻抗如图2所示。

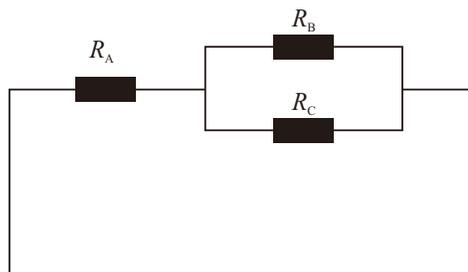


图2 A相回路总阻抗示意图

A相时回路总阻抗 Z_A 可以通过式(2)计算:

$$Z_A = (R_A + j\omega L_A) + \frac{(R_B + j\omega L_B)(R_C + j\omega L_C)}{(R_B + j\omega L_B) + (R_C + j\omega L_C)} \quad (2)$$

用阻抗形式可将回路总阻抗 Z_A 表示为:

$$Z_A = A_1 + jB_1 = \frac{I_{0A} R_0}{I_A} \quad (3)$$

其中

$$B_1 = A_1 \tan \theta_A \quad (4)$$

式中: Z_A 表示A相阻抗; A_1 表示A相阻抗的实部; B_1 表示A相阻抗的虚部; ω 表示角频率; R_A 、 R_B 、 R_C 分别表示A、B、C相电阻; L_A 、 L_B 、 L_C 分别为A、B、C相电感; I_{0A} 为测试A相时参考回路电流; R_0 为参考回路电阻; I_A 为测得的A相电流有效值; θ_A 为 I_{0A} 和 I_A 之间的相位差。

同理,测试B相时回路总阻抗

$$Z_B = A_2 + jB_2 = \frac{I_{0B} R_0}{I_B} \quad (5)$$

$$B_2 = A_2 \tan \theta_B \quad (6)$$

式中: Z_B 表示B相阻抗; A_2 表示B相阻抗的实部; B_2 表示B相阻抗的虚部; I_{0B} 表示测试B相时参考回路电流; I_B 表示测得的B相电流有效值; θ_B 表示 I_{0B} 和 I_B 之间的相位差。

同理,测试C相时回路总阻抗

$$Z_C = A_3 + jB_3 = \frac{I_{0C} R_0}{I_C} \quad (7)$$

$$B_3 = A_3 \tan \theta_C \quad (8)$$

式中: Z_C 表示C相阻抗; A_3 表示C相阻抗的实部; B_3 表示C相阻抗的虚部; I_{0C} 表示测试C相时参考回路电流; I_C 表示测得的C相电流有效值; θ_C 表示 I_{0C} 和 I_C 之间的相位差。

根据公式(3)~(8)建立方程组,通过测得的数据求解各相电阻。

1.3 设备集成

带电状态下,将一种频率(非工频)的电流信号通过耦合的方式,同时注入到参考回路和交叉互互联接地回路金属套中,同步采集参考回路和接地回路中的电流信号及其相位差,采用数字滤波的方式,消除金属护套工频感应干扰,依次测试A、B、C相,通过联立方程组求解回路电阻。所研发装置的原理图如图3所示。

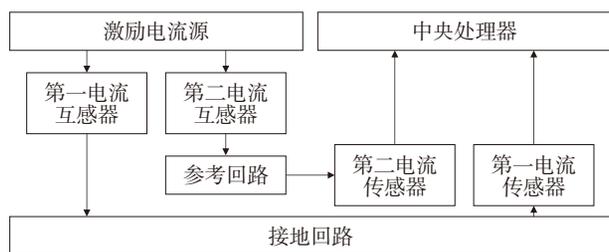


图3 交叉互联接地回路电阻带电检测模块工作原理图

第一电流互感器将激励电流耦合到接地回路中，第二电流互感器将激励电流耦合到参考回路中。第一电流传感器测量接地回路中的电流信号并传输给中央处理器，第二电流传感器测量参考回路中的电流信号并传输给中央处理器。中央处理器同步采集接地回路和参考回路中的电流信号，并对信号进行滤波处理，读取接地回路和参考回路中的电流信号有效值及其相位差，之后根据联立的方程组求解各相电阻。

根据上述工作原理图研制的高压电缆接地回路电阻带电检测装置如图4所示。



图4 高压电缆接地回路电阻带电检测装置

所研发装置的工作参数如下：

- 1) 交叉互联段电缆接地回路电阻测量：
 - 测量范围为10 mΩ~5 Ω,其分辨力应小于1 mΩ。
 - 检测装置最大允许误差为±10%。
- 2) 单端段电缆接地回路电阻：
 - 测量范围为5 mΩ~5 Ω,其分辨力应小于1 mΩ。
 - 检测装置最大允许误差为±2%。
- 3) 其他参数
 - 运行功率:约10 W
 - 外形尺寸:355 mm×320 mm×145 mm
 - 重量:约6 kg(主机)。

2 应用分析

2.1 检测判据

由于高压电缆接地系统较为复杂,存在单端接地

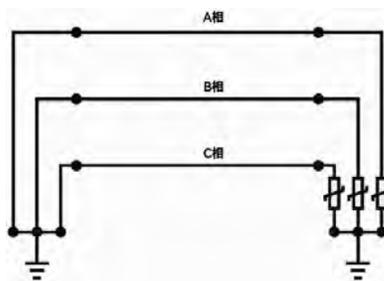
和交叉互联接地等多种接地形式,可能存在铅封腐蚀、接地锈蚀、接触不良等多种缺陷,需结合接地回路电阻、接地电流、保护接地点对地电压、电缆运行电流等多种参数,综合判断接地系统运行状态,具体判据如表1所示。

表1 高压电缆接地系统运行状态检测判据

电压、电流判据	电阻判据	判断	建议
满足下面全部条件: 1) 接地电流绝对值<50 A 2) 接地电流与负荷比值<20% 3) 单相接地电流最大值/最小值<3	单端接地:电阻≤80 mΩ 交叉互联:电阻≤300 mΩ	正常	按正常周期运行
满足下面任何一项条件时: 1) 50 A≤接地电流绝对值≤100 A 2) 20%≤接地电流与负荷比值≤50% 3) 3≤单相接地电流最大值/最小值≤5	单端接地:80 mΩ<电阻≤200 mΩ 交叉互联:300 mΩ<电阻≤600 mΩ	注意	应加强监测,适当缩短检测周期
满足下面任何一项条件时: 1) 接地电流绝对值>100 A 2) 接地电流与负荷比值>50% 3) 单相接地电流最大值/最小值>5 4) 保护接地点对地电压>50 V	单端接地:电阻>200 mΩ 交叉互联:电阻>600 mΩ	缺陷	应停电检查

2.2 现场案例1

使用研制的交叉互联接地回路电阻带电检测装置,对某110 kV线路1号接头-9号塔2组接地箱段进行测试,其等效示意图和实地测试照片如图5所示。



(a) 测试示意图



(b) 实际传感器安装示意图

图5 现场测试情况

检测结果如表2所示。

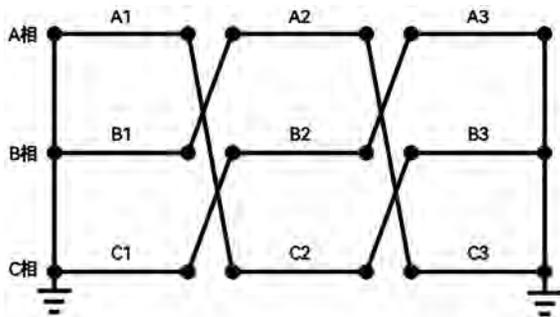
表2 测试结果

保护接地点对地电压检测数据			
检测位置	A相(V)	B相(V)	C相(V)
9号终端	1.80	1.00	1.40
接地电流检测数据			
检测位置	A相(A)	B相(A)	C相(A)
9号终端	0	0	0
运行电流检测数据			
检测位置	A相(A)	B相(A)	C相(A)
9号终端	71	70	70
接地回路电阻检测数据			
电缆段	A相(mΩ)	B相(mΩ)	C相(mΩ)
1号-9号	9.6	9.3	9.5

由检测结果可知,三相保护接地箱对地电压值均满足标准要求(≤ 50 V),三相接地电流值也均为0,说明该电缆段不存在多点接地缺陷;三相接地回路电阻值分别为9.6 mΩ、9.3 mΩ、9.5 mΩ,均小于标准要求的80 mΩ,由此可知,该电缆段接地系统运行状态良好。

2.3 现场案例2

使用研制的接地回路电阻带电检测装置,对某110 kV线路13号塔-14号塔4组接地箱进行测试,其等效示意图和实地测试照片如图6所示。



(a)测试示意图



(b)实际传感器安装示意图

图6 现场测试情况

检测结果如表3所示。

表3 测试结果

保护接地点对地电压检测数据			
检测位置	A相(V)	B相(V)	C相(V)
1号接头	9.6	9.3	9.7
2号接头	10.5	8.6	12.0
接地电流检测数据			
检测位置	A相(A)	B相(A)	C相(A)
13号终端	0	10.80	6.70
1号接头	1.60	11.20	9.60
2号接头	10.90	11.60	1.80
14号终端	8.00	0	11.42
运行电流检测数据			
检测位置	A相(A)	B相(A)	C相(A)
13号终端	159	174	157
接地回路电阻检测数据			
检测位置	A1-C2-B3(mΩ)	B1-A2-C3(mΩ)	C1-B2-A3(mΩ)
13终端	$>3\ 000.0$	122.5	118.5

由检测数据可知,13号塔-14号塔交叉互联段支路A1-C2-B3电阻异常,大于3000 mΩ。13号塔A相、14号塔B相接地电流存在明显异常,均为0。经开箱检查,确认1号和2号交叉互联箱内接地线连接良好,未见异常,初步判定13号塔A相处封铅不良、14号塔B相处封铅连接不良或接地螺丝未拧紧氧化。停电后进一步检查,发现13号塔A相处铅封不良以及14号塔B相处封铅连接不良,铅封腐蚀情况如图7所示。消缺后,该线路回路电阻值恢复正常,验证了本技术对铅封缺陷检测的有效性。



图7 封铅不良缺陷照片

3 结语

文中研究了一种适用于运行高压电缆的接地回路电阻带电检测技术,利用电磁感应,在高压电缆接地系统中耦合注入异频电压、电流信号,并构建接地系统回路状态方程计算高压电缆接地回路电阻。通过现场测试案例,验证了本技术的检测有效性和现场

实用性,为铅封腐蚀、接地锈蚀等缺陷检测和接地系统连接状态评估提供了可靠、高效的技术手段。

参考文献:

[1] 袁燕岭,周灏,董杰,等.高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J].高电压技术,2015,41(4):1194-1203.
 [2] 曹俊平,王少华,任广振,等.高压电缆附件铅封涡流探伤方法试验验证及应用[J].高电压技术,2018,44(11):3720-3726.
 [3] 周长城,赵海军,任萍.高压电缆附件铅封工艺的改进[J].东北电力技术,2021,42(2):23-26,29.
 [4] 贾建军,王哲,肖益维,等.高压电缆封铅涡流检测对比试块的设计与验证[J].中国金属通报,2022(7):228-230.
 [5] 付文光,寇正,杨军.高压电缆封铅涡流检测对比试块的设

计与验证[J].无损检测,2021,43(11):68-71.
 [6] 邵晨凡,寿绍安.带电检测技术在电缆设备缺陷发现中的应用[J].电力设备管理,2021(8):47-48.
 [7] 杨金海,刘雪峰,余磊.高压电缆铅封裂纹缺陷检测方法研究[J].大众用电,2021,36(8):41-42.
 [8] 蒲英俊,刘广兴,李正利,等.涡流检测高压电缆附件铅封缺陷的试验研究[J].山东电力技术,2020,47(2):56-60,69.
 [9] 李红发,程绍兵,夏敏,等.一种超温警示螺栓预警温度和最佳安装位置的确定方法[J].电子测试,2022(15):105-107,117.
 [10] 肖微,朱文滔,詹清华,等.一起110 kV电缆GIS终端发热原因分析及处理措施[C].//2011年全国电力电缆安装与运行经验交流会论文集.青岛:中国电力企业联合会,2011:77-81.
 [11] 卞蓓蕾,曹京荣,刘鹏.中低压电力电缆金属屏蔽接续状态带电测试技术[J].电力工程技术,2022,41(6):134-139.

(上接第4页)

3) 提升组合电器带电检测工作质效。一是在运设备严格按周期开展特高频和超声波局放检测;二是结合组合电器故障集中爆发与前期的特点,差异化缩短隐患设备带电检测周期,及早发现设备潜伏性缺陷;三是严格落实带电检测仪器入网检测制度,且对特高频和超声波局放检测仪器开展年度校验,确保局放检测仪器性能满足要求。

6 结语

文中采用“电-电联合”时差定位法成功诊断了一起110 kV GIS 隔离开关局部放电隐患,并经工业 CT 检测及解剖检查,验证该隔离开关绝缘拉杆内部存在孔隙缺陷,充分体现了“带电检测/在线监测发现问题—电工材料技术分析验证”机制的有效性,为 GIS 现场带电检测

异常信号诊断分析及后续隐患整改治理提供经验。

参考文献:

[1] 李晓磊,张甲辉,李林,等.一起110 kV GIS 绝缘子局部放电检测案例分析[J].山东电力高等专科学校学报,2024,27(2):1-4.
 [2] 廖新征,王红梅,丁登伟,等.基于特高频时频分析的 GIS 盆式绝缘子缺陷分析[J].高压电器,2019,55(1):47-53.
 [3] 徐洋,刘卫东,高文胜.GIS 绝缘子内部缝隙的局部放电特性和机理研究[J].高压电器,2020,56(7):116-122.
 [4] 马飞越,王沛,王博.GIS 母线支撑绝缘子气隙放电综合诊断与分析[J].高压电器,2018,54(11):147-152.
 [5] 何宁辉,李秀广,周秀,等.GIS 固体绝缘不同类型气隙缺陷的放电特征[J].高电压技术,2021,47(6):2073-2083.
 [6] 国家电网有限公司.气体绝缘金属封闭开关设备局放带电测试技术现场应用导则第2部分:特高频法:Q/GDW11059.2—2018[S].北京:中国电力出版社,2020.