

110kV 输电线路参数工程实测异常诊断全生命周期管理

毛学锋 王晓

国网湖南省超高压变电公司，湖南长沙，410000；

摘要：本文以 110kV 输电线路（ZXJL/GIA-300/40 导线，14.123km）参数异常为研究对象，通过建立“测试-诊断-治理-预防”四维技术体系，系统性解决零序电容缺失（实测 $0.152\mu\text{F}$ /理论 $0.741\mu\text{F}$ ）、阻抗角偏差（正序 56° vs 零序 35° ）及 C 相绝缘缺陷问题。创新性提出基于频域反射法（FDR）的接地网断裂定位技术，误差 $<0.5\text{m}$ ；构建土壤电化学腐蚀动力学模型，量化湿度 70% 环境下接地体年腐蚀率 $>3.2\%$ ；开发“异频复测+零序 CT 校正+RTV 防污闪”综合治理方案。工程应用表明：改造后零序电容恢复率 368%，距离保护范围缩水风险降低 92%，为输电线路隐蔽性故障诊断建立标准化流程。

关键词：零序电容异常；接地网断裂；频域反射法；电压不平衡度；异频测量

DOI: 10.69979/3060-8767.25.11.016

1 引言

1.1 问题背景与行业痛点

据国家电网 2020-2023 年故障统计，110kV 线路因参数失真导致的保护误动占比达 37.6%，其中接地系统缺陷为主要诱因（68%）。典型案例包括：

湖南某 110kV 线路：零序电容缺失 62% 引发距离保护拒动，故障切除延迟 480ms，烧毁主变 1 台（损失 ≈ 360 万元）。

湖北某双回线路：阻抗角偏差 28° 导致跨线误动，停电范围扩大至 3 座变电站。

本文研究对象（线路长度 14.123km，导线 ZXJL/GIA-300/40）在标准环境（ 23°C ，湿度 70%）下呈现典型复合故障：零序电容缺失 79.5%（ $0.152\mu\text{F}$ vs $0.741\mu\text{F}$ ）、C 相感应电压失衡 28.6%（ 18V vs 均值 22V ）、零序阻抗角异常降低至 35° （正常 $>60^\circ$ ）。

1.2 技术突破与创新价值

针对传统诊断三大瓶颈：

瓶颈	本文解决方案	创新价值
断裂点定位模糊	FDR 法实现亚米级精度	定位误差 $<0.5\text{m}$
腐蚀进程不可量化	建立湿度-温度-腐蚀速率动力学模型	预测误差 $<5\%$
治理措施碎片化	提出“检测-修复-防护-校核”四步法	全生命周期管理

2 输电线路参数测量技术演进与标准体系

2.1 测量方法发展历程

2.1.1 工频测量法（1980s-2000s）

原理：直接施加 50Hz 测试电压

缺陷：受系统感应电压干扰，误差 15%-25%

典型案例：2005 年广东某 220kV 线路因干扰导致零序阻抗误测 32%，引发保护误动

2.1.2 异频测量法（2010 至今）

测试流程：

1. 信号源生成 45Hz/55Hz 正弦电流（幅值 0.2A - 5A 可调）

2. 同步采集三相电压/电流信号

3. 数字滤波分离工频干扰（阻带衰减 $>60\text{dB}$ ）

4. 计算工频参数： $Z_{50} = (Z_{45} + Z_{55}) / 2$

核心设备：

变频电源：输出精度 $\pm 0.1\%$

高精度采集卡：24 位 ADC，采样率 200kSPS

GPS 同步单元：时标误差 $<1\mu\text{s}$

3 案例线路全参数测试与异常诊断

3.1 测试环境与基础数据

3.1.1 环境参数

温度： 23°C （导线温度修正系数 $K_t=1.02$ ）

湿度：70%（空气介电常数修正 $\epsilon_r=1.08$ ）

土壤电阻率： $52\Omega\cdot m$ （温纳四极法实测）

3.2 多维度异常诊断分析

3.2.1 接地网断裂证据链

直接证据：零序电容缺失率 $\eta=(0.741-0.152)/0.741\times 100\%=79.5\%$ （>5%阈值）

入射波速： $v=1.8\times 10^8m/s$ （土壤介电常数 $\epsilon_r=12$ ）

反射点距离： $S=v\times \Delta t/2=1.8\times 10^8\times 356ns/2=32.04m$

腐蚀验证：开挖发现镀锌扁钢截面损失 65%（图 3），腐蚀产物成分为 $FeOOH$ （占比 72%）

3.2.2 阻抗角矛盾机理

建立电磁-阻性耦合模型：

正序感抗增量： $\Delta X_1=2\pi f\cdot M$ （ $f=50Hz$, $M=0.18mH$ ）

计算得 $\Delta X_1=2.83\Omega$ （占总感抗 30.4%）

零序电阻增量： $\Delta R_0=\rho\cdot L/(\pi\cdot r^2)$ （ $\rho=52\Omega\cdot m$, $L=32m$, $r=8mm\rightarrow 5.2mm$ ）

计算得 $\Delta R_0=6.24\Omega$ （占总电阻 70.0%）

等效盐密计算：

超过 III 级污区限值 $0.08mg/cm^2$

4 故障机理深度解析与风险量化

4.1 接地网腐蚀动力学模型

4.1.1 腐蚀速率方程

计算得 $\delta=1.68mm$ （扁钢厚度损失率 65.2%）

4.1.2 湿度影响曲线

湿度	60%	70%	80%
腐蚀率	0.25mm/年	0.34mm/年	0.48mm/年

4.2 系统性风险量化模型

4.2.1 保护失效风险

距离保护范围缩水：

理论范围： $L=0.85\cdot U/(K\cdot Z_1)$ （ $K=1.2$ ）

实测范围： $L=0.85\cdot U/(K\cdot Z_0\cdot K_0)$ （ $K_0=Z_0/Z_1=1.66$ ）

缩水率= 25.3%

雷击闪络概率：

计算得 $P=0.48$ （较正常值 0.32 上升 50%）

4.2.2 经济损失模型

年损失=停运损失+网损增加+设备折旧

= $1.8次/年\times 8小时\times 10万kW\times 1.2元/kWh+3.2万$

$kWh\times 0.8元/kWh+200万元\times 5\%$

= $172.8万元+2.56万元+10万元$

= $185.36万元$

5 综合治理技术与工程应用

5.1 接地网断裂治理

5.1.1 断裂点修复工艺

工序	技术参数	质量要求
开挖尺寸	$1.5m\times 1.5m\times 2.0m$	接地体完全暴露
腐蚀体更换	镀锌钢绞线 GJ-70	截面 $\geq 70mm^2$
焊接工艺	放热焊接，熔接温度 $2500^{\circ}C$	电阻 $<0.01\Omega$
防腐处理	环氧煤沥青涂层三布五油	厚度 $\geq 0.8mm$

5.1.2 防腐新材料应用

导电防腐涂层：

基础层：锌铝合金喷涂（厚度 $80\mu m$ ）

中间层：聚苯胺导电聚合物（厚度 $50\mu m$ ）

面层：氟碳树脂（厚度 $30\mu m$ ）

阴极保护：

牺牲阳极：镁合金 AZ63（布置密度 2 块/基塔）

保护电位： $1.05V$

5.2 绝缘缺陷治理

5.2.1 带电水冲洗技术

参数	设定值	依据标准
水电阻率	$>100k\Omega\cdot cm$	DL/T626-2015
水压	$0.5-0.8MPa$	污秽等级 III 级
喷射角度	$45^{\circ}-60^{\circ}$	避免伞裙损伤
冲洗顺序	由下至上，逐层旋转	覆盖率 $>95\%$

5.2.2 RTV 防污闪涂料施工

喷涂工艺：

表面处理：喷砂至 2.5 级

底涂：PRTV-II 型（厚度 $0.1mm$ ）

面涂：PRTV-II 型（厚度 $0.2mm$ ）

性能验证：

项目	施工前	施工后
憎水性 HC 级	HC6	HC1
最大耐受电压	72kV	98kV

5.3 保护系统协同校正

5.3.1 零序CT接线优化

错误方式：CT安装于负荷侧（分流损失>15%）

正确方式：CT紧靠中性点引出线（分流损失<2%）

5.3.2 距离保护定值重算

校正后定值：

$$Z_{set} = 0.85 \times 110 \text{ kV} / (\sqrt{3} \times 1.2 \times I) \times K$$

其中：K=0.294

6 结论

1. 诊断技术创新：

FDR法实现接地网断裂点亚米级定位（误差<0.5m）

建立“电容缺失率-阻抗角-电压失衡度”三维故障判据，
诊断准确率92.7%

2. 治理工程成效：

修复后线路年故障停运率降至0.2次/百公里（下降88.9%）避免年度经济损失185.36万元

参考文献

- [1] 国家能源局. DL/T1664-2016 电力接地装置腐蚀防护技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] 倪华豪. 高压输电线路参数测量误差分析与校正[J]. 电世界, 2007, 48(9): 12-16.
- [3] 钱芃羽. 异频法在长距离线路参数测试中的应用[J]. 河南科技, 2017(10): 45-48.

作者简介：毛学锋(1967-02)男，汉，湖南怀化人，本科，高级工程师，高级技师，研究方向：电力工程。