

# 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0.152μF/理论0.741μF）、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<0.5m；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/GI A-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%（0.152μF vs 0.741μF）、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°）。

### 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<0.5m
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>60dB）

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±0.1%

高精度采集卡：24位ADC，采样率200kSPS

GPS同步单元：时标误差<1μs

## 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Kt=1.02）

湿度：70%（空气介电常数修正εr=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:  $v = 1.8 \times 10^8 m/s$  (土壤介电常数  $\epsilon_r = 12$ )

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

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

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

$kWh \times 0.8 \text{ 元}/kWh + 200 \text{ 万元} \times 5\%$

= $172.8 \text{ 万元} + 2.56 \text{ 万元} + 10 \text{ 万元}$

= $185.36 \text{ 万元}$

## 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:  $1.05V$

### 5.2C 相绝缘缺陷治理

#### 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] 钱苑羽. 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。