

基于行波传输理论的电网接地线状态监测方法研究

文 / 许 波 国网河南省电力公司桐柏县供电公司
 孙 晶 国网河南省电力公司桐柏县供电公司
 黄发正 国网河南省电力公司桐柏县供电公司
 朱崇源 国网河南省电力公司桐柏县供电公司

摘要：为了消除当电网检修时接地线依靠人工作业，存在易发生误报或漏报而发生误操作事故的现象，本文提出利用行波传输理论对电网进行接地线状态监测的方法。验证了该方法可以实时、准确的监测出接地线挂接、拆卸状态，并且对干扰的抵抗能力强，为电网检修安全提供了有效的技术支持，降低了误操作事故的发生。

关键词：行波传输理论；电网；接地线状态

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.078

引言

电力行业不断发展的同时，电力行业发展也使得电网越来越大，电网结构越来越复杂，传统的依靠人工监测的方式已经无法满足需求，开发一种不需要严重依赖于人工且可以实时准确监测接地线状态的方法在电力安全领域至关重要。

一、电网检修接地线状态监测现状

现有人工接地线状态监测模式存在明显弊端，主要表现为如下：

(1) 人为失误风险大：接地线的装设、拆除状态依靠人工判断，作业人员受疲劳、疏忽等因素影响，容易误判，比如未确认接地线是否全部接触即汇报、误将未拆除接地线报为已拆除等，导致调度人员下达错误指令。(2) 信息传递慢，易出错：现场信息通过电话汇报来传达，有信息传递缓慢的状况，特别是在偏远地区或者通信信号差的地方，这种情况会更明显。

二、电力线路参数计算及传输模型建立

(一) 传统线路参数计算的局限性

线路参数（正序阻抗、零序阻抗、电容、电感等等）都是构建线路传输模型的关键基础信息，其计算准确度直接关系到行波传递特性剖析及接地线所处状况判断的结果正确性，传统的线路参数理论计算方法侧重于以理想化线路条件作为前提，缺少考虑现场环境因素（诸如温度、湿气、风速、覆冰等）以及工程实际情况要素（包含导线排列模式、分裂导线组成构造、地线参数等）的影响情况，在针对导线电阻实施计算时，传统方法仅仅选用导线材料自身的标准电阻数值，未考虑到现场真实环境下，温度上升会导致电阻变大，从而使得线路波阻抗的特性有所改变^[2]。

(二) 计及现场环境因素的线路参数计算方法

1. 基础参数输入

根据实际需要检修的线路，输入不同的线路类型，架空线路和电缆线路。输入不同导线的型号，比如，不同的导线直径和不同的导线材质。判断线路是否是分裂导线，如果线路是分裂导线，需要输入分裂的数目和子导线之间的距离。输入地线的型号和地线的直径。输入

导线与地线位置坐标，方便计算导线之间的几何均距。

2. 现场环境因素修正

温度修正：基于现场实时温度的导线直流电阻修正方法及其随温度变化的计算公式：

$$R_t = R_{20} \times [1 + \alpha(t - 20)]$$

R_t 是温度 t 的导线的直流电阻 (Ω/km)， R_{20} 是 20°C 时导线的标准直流电阻 (Ω/km)， α 是导线材料的温度系数 ($^\circ\text{C}^{-1}$)， t 是现场实时温度 ($^\circ\text{C}$)。

覆冰修正：线路覆冰时需考量其对导线外径及线路电容、电感的影响，覆冰后导线等效外径的计算公式为：

$$D_{\text{eq}} = D + 2\delta$$

其中： D_{eq} 为覆冰后导线的等效外径，单位为毫米。 D 为导线实际外径，单位为毫米， δ 为覆冰厚度，单位为毫米。

3. 线路参数计算

导线等效半径计算：单导线的等效半径即为其导线半径；分裂导线的等效半径则通过特定公式计算：

$$r_{\text{eq}} = \sqrt[n]{r \cdot d_{12} \cdot d_{13} \cdot \dots \cdot d_{1n}}$$

其中： r_{eq} 为分裂导线的等效半径 (mm)， n 为分裂数， r 为单根子导线的半径 (mm)， $d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n}$ 为第 1 根子导线与其他子导线间距 (mm)。

工频参数计算：根据修正后的基础参数及现场环境因素，计算线路的正序阻抗 Z_1 、零序阻抗 Z_0 以及正序电容 C_1 和零序电容 C_0 ，其中，正序阻抗的计算公式如下：

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1$$

零序阻抗计算公式为：

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0$$

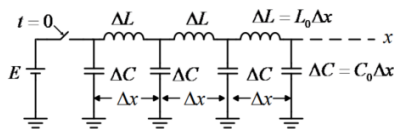
其中 R_1, R_0 分别为正序、零序电阻 (Ω/km)， L_1, L_0 分别为正序、零序电感 (mH/km)， ω 为工频角频率 ($\omega = 2\pi f$, $f = 50\text{Hz}$)^[3]。

三、基于行波传输理论的接地线状态监测方法

(一) 行波传输基本理论

1. 行波的波阻抗

实际输电线路是多导线，但在分析行波的传播特性时，一般先分析单根无损线路的行波传输特性（忽略线路的电阻与电导），如下图：



在单根无损线路中，电压波 $u(x, t)$ 和电流波 $i(x, t)$ 在沿着线路传播，在任何给定的时间 t ，线路中任一点 x 处电压波与电流波的比值称为波阻抗 Z ，计算方式为：

$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ 改写为： Z 等于根号下 L_0 与 C_0 的比值

其中 L_0 为单位长度线路的电感 (H/m)， C_0 为单位长度线路的电容 (F/m)。

2. 行波的波速

行波在无损线中的传播速度 v 仅仅和线的绝缘介质的相对介电常数 ϵ_r 及相对导磁系数 μ_r 有关系，其计算式为：

$$v = 1 / \sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r} = c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$$

其中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ (真空导磁系数) $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ (真空介电常数) $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ (真空中的光速)

3. 行波的折反射特性

当行波在传输过程中碰到波阻抗突变点的时候就会产生折射和反射情况，如果把接地线挂接到线路，就相当于进行线路短接操作，遇到线路故障点也是如此，此时，线路1的波阻抗被设为 Z_1 ，线路2的波阻抗则设为 Z_2 ，并把入射电压波标记成 U_e ，那么折射出来的电压波 U_r 以及反射出来的电压波 U_b 的计算公式如下：

$$U_r = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_e$$

$$U_b = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_e$$

接地线挂接时线路被短接，在短接点处波阻抗 $Z_2 \approx 0$ ，代入上述公式可得：折射电压波 $U_r \approx 0$ 、反射电压波 $U_b \approx -U_e$ ，即行波在短

接点处发生全反射，反射波与入射波极性相反，该特性为通过行波判断接地线状态的根本依据^[4]。

(二) 接地线状态监测原理

接地线挂接实际就是将检修线路进行短接，使线路在挂接地线处产生波阻抗的突变 (由线路波阻抗 Z 变到接近于 0)；当拆除接地线后，线路波阻抗恢复，无突变点，只需要检测线路中是否存在由于短接产生的行波折反射特征，就可以判断出接地线的安装或拆卸状态。

基于双端行波法的接地线状态监测原理：

在待检测线路的 A 端与 B 端安装行波信号注入装置与行波接收装置，在线路处于未挂接接地线状态，即正常情况下，由 A 端注入特征行波信号并沿线路传至 B 端，B 端接收装置所接收到的行波信号是经折射产生的波，由于线路两侧的波阻抗一致，故此处不会出现明显的反射波；同时 A 端接收装置接收到的反射波主要是由线路自身的小波阻抗 (导线的接头等) 产生的，行波信号幅度较小；当在线路中间位置有接地线挂接时，在接地线处会全反射，将注入的特征行波反射回线路注入端，如 A 端注入的信号则会在短接点发生反射，反射波将会沿着原来的路径返回到 A 端，并且该信号几乎不会有行波传播到线路的另一个端 (B 端)，此时 A 端接收装置会接收到一个幅值比较大的反射波信号，并且这个反射波信号与入射波的极性相反。

(三) 行波波头提取方法

1. 小波母函数选择

小波母函数的选取会对行波波头提取结果产生影响，选取不同形态的小波函数会对行波进行不同的处理，因此需要对行波的暂态与突变等特征，以及选择哪种小波母函数 (Haar 小波、Meyer 小波、Morlet 小波、db 系列小波等) 进行处理进行分析。对比表如表 1。

表 1 不同小波母函数处理行波信号的效果对比

小波母函数	消失距	正交性	紧支区间	抗干扰能力	波头提取精度	计算复杂度	适用性评分 (1-10)
Haar 小波	1	是	有限	较弱	较低	低	6
Meyer 小波	无限	是	无限	较强	较高	中	7
Morlet 小波	2	否	有限	强	高	中	8
db4 小波	4	是	有限	强	高	低	9
db5 小波	5	是	有限	强	高	中	8
coif4 小波	4	是	有限	较强	较高	中	7

由表 1 可知，db4 小波有中等消失距 (4)，有较好的正交性，有较小的紧支持区间，抗干扰能力强，能很好地提取到波头，并且计算复杂度比较低，能够满足行波波头实时、准确提取的需求。本文采用 db4 小波作为行波波头提取的小波母函数^[5]。

2. 小波变换模极大值提取流程

db4 小波的行波波头提取流程：

信号预处理：对接收装置所收集到的行波原始信号做预处理，先消除工频分量 (用 50Hz 陷波滤波器)、再削减高频噪声 (采用低通滤波器)，从而得到预处理之后的行波信号 $s(t)$ ，

模极大值检测：计算各尺度下小波系数的模值 $|Wf(j, k)|$ ，检测模极大值点。小波变换模极大值点对应信号的奇异点，而行波波头到达时刻即是信号的奇异点时刻；

(四) 接地线状态判断逻辑

基于双端行波接收信号特征与波头提取结果构建接地线状态判别逻辑，步骤如下：

基准信号采集：接地线未接时，向线路 A 端注入特征行波信号，采集 A、B 端接收装置信号作为基准信号 (SA0(t), SB0(t))，获得基准信号的波头到达时间和幅度 (A 端 tA0, B 端 tB0, A 端 AA0, B 端 AB0)。

实时信号采集与对比：检修时，在 A 端定时注入特

征行波信号,实时采集A、B端信号($S_A(t)$, $S_B(t)$)并记录其实时波头到达时间(t_A , t_B)及实时信号幅值(A_A , A_B)^[6]。

状态判断条件:

接地线挂接判断:满足① $A_A \geq 1.5 \times A_{A0}$;② $A_B \leq 0.3 \times A_{B0}$;③ t_A

接地线拆除判断: $S_A(t)$ 与 $S_{A0}(t)$ 的相似度、 $S_B(t)$ 与 $S_{B0}(t)$ 相似度(相关系数计算,阈值=0.85)均 >0.85 ,接地线拆除。

异常状态判断:不满足上述条件且信号幅度或波头时间波动较大($A_A 0.5 \times A_{A0} - 1.5 \times A_{A0}$, A_B 无明显变化),则为异常。

四、监测装置与平台研发

(一) 监测装置硬件设计

1. 行波信号注入单元

行波信号注入单元:该功能为产生并向线路中注入行波信号,需保证注入信号具有频带宽、稳定、抗干扰的特点。本装置采用脉冲信号为特征行波信号,具体电路设计如下:

信号发生器:高速数字信号处理器(DSP,型号TMS320F28335)为核心,产生窄脉冲信号(脉冲宽度5-10us,脉冲幅值5-10V)

功率放大模块:由于行波信号经过长距离线路上的传播会逐渐衰减,所以需要功率放大模块(利用了运算放大器OPA548)把脉冲信号的电压幅度放大到50-100V左右,使得信号能在线路上传播;

耦合模块:采用电容耦合的形式,将经过放大的行波信号送入线路,以避免注入单元与高压线路直接接触,保证装置的安全,选取耐高压的陶瓷电容(耐压值10kV,容量0.1uF)。

2. 行波信号接收单元

行波信号接收单元负责采集线路中的行波信号,需具备高采样率、高灵敏度及低噪声的特性:

传感器:使用罗氏线圈电流传感器(带宽10kHz-10MHz)、电容分压器电压传感器(分压比1000:1,带宽1kHz-20MHz)采集线路的行波电流和电压信号;

信号调理模块:对接收到的微弱信号进行调理,包括信号放大(选择仪表放大器AD620,放大倍数100~1000倍)、滤波(采用带通滤波器,通带频率范围为10kHz~5MHz)以及电平转换(将接收到的电信号电平转换成0~3.3V,匹配数据采集模块)。

3. 数据处理单元

数据处理单元作为监测装置的核心,负责实现行波波头提取与接地线状态判断等功能:

核心处理器:采用ARMCortex-A8处理器(型号S5PV210),主频1GHz,有很强的数据处理能力,可以实时进行小波变换、模极大值检测等算法处理;

存储模块:配512MBDDR3内存,4GBNANDFlash存储芯片,存采集来的原数据,基准数据和处理结果;

时钟模块:选用精度高、可提供精确的RTC实时时钟(DS3231)作为数据采集与波头时间计算的时间基准。

(二) 监测平台软件设计

1. 数据采集层

数据采集层实现与现场监测装置的通信,接收实时监测数据:

多装置接入:支持同时接入多个监测装置,支持接入1-100台装置进行轮询。

数据解析:对接收到的原始数据(行波信号数据、状态判断、装置工作状态等)进行解析,转化为平台可识别的结构化数据(JSON格式);

数据缓存:使用Redis缓存数据库来临时存放实时采集的数据,提高数据访问速度,防止数据库经常读写。

2. 数据处理层

数据处理层对采集数据进行深度处理,为业务逻辑层提供支撑:

数据存储:把结构化数据放到MySQL数据库里,实时数据表(储存最新的监测数据),历史数据表(存留之前的监测数据,保留一年),报警数据表(留存异常报警消息)。

数据分析:对历史数据进行统计分析,如:接地线挂接时长统计,异常报警次数统计,装置故障率统计等,并生成日报、周报和月报;

波头提取算法集成:把前文所提出的基于db4小波的波头提取算法融合到数据处理层,针对收集到的行波原始数据执行离线波头提取,用来检验实际波头提取效果的准确性。

结语

综上所述,利用行波传输理论的电网接地线状态监测办法在实际使用当中很有好处,成效也很不错,在实际的电网运行时,它可以抵挡外界干扰,马上精确地给出接地线状况,既增强了检修的安全系数,削减了发生错误动作的意外事故,又加强了检修速度,采用这种办法,就能改良检修步骤,缩减人力费用开支,让电网运作变得更稳固牢靠。

参考文献

- [1] 唐璜.配网接地线智能识别及管控技术研析[J].电力设备管理,2025,(14):32-34.
 - [2] 王晓卫,魏春燕,王毅钊,等.基于护层接地线电流和分段TKE0的电缆早期故障检测方法[J].电力系统保护与控制,2025,(13):47-58.
 - [3] 刘洁红.新型户外开关箱和电缆分接箱电缆终端接地线便捷装置设计[J].电力设备管理,2025,(12):297-299.
 - [4] 何剑军,林裕新,刘敬诚.基于状态感知的智能电网接地线监测和自供电无线传感器研究[J].电子器件,2024,47(06):1589-1594.
 - [5] 范雪峰,张成杨,张少辉,等.用于电网检修的智能接地线管理系统设计与实现[J].自动化与仪器仪表,2024,(11):213-217+226.
 - [6] 王长江,钱程,夏时哲,等.可调角度高压线路接地线夹终端智能管控系统设计[J].电子设计工程,2021,29(22):6-9+14.
- 作者简介:许波,1975年8月,男,河南省桐柏县,本科,工程师,研究方向:变电检修。