

# 基于小波能量熵的水电站直流系统 接地故障自动诊断

张 强

(甘肃电投河西水电开发有限责任公司)

**摘要：**为提高水电站直流系统接地故障诊断精度，引入小波能量熵，开展水电站直流系统接地故障自动诊断方法设计研究。将多个电阻器并联在一起，实现水电站直流系统接地电阻并联值测量。利用小波能量熵，对直流系统接地故障多尺度进行分析。结合得到的特征信息，完成小波熵接地检测与故障自动诊断。通过对比实验证明，新的诊断方法在实际应用中可以实现对直流系统接地故障的高精度诊断，并确定故障发生时间和故障具体类型。

**关键词：**小波能量熵；直流系统；接地故障；自动诊断；水电站

2024.05.DQGY  
25

## 0 引言

随着电力系统的不断发展，直流系统在水电站中的地位越来越重要，其稳定性和可靠性直接影响到水电站的正常运行。然而，由于各种因素的影响，直流系统接地故障时有发生，给水电站的稳定运行带来很大的威胁。水电站的直流系统是电力系统中的重要组成部分，它的主要功能是为水电厂的控制系统、信号系统、继电保护设备等提供稳定的直流供电<sup>[1]</sup>。由于直流系统在水电站中的重要性，它的稳定可靠与否，将对水电站的安全运行产生重要的影响。然而，由于设备老化、环境因素、人为操作失误等原因，在水电站中，直流系统经常发生接地故障，对电网的安全运行构成极大的威胁。因此，实现对直流系统的接地故障的自动诊断，及时发现并排除故障，是保障水电站安全稳定运行的重要措施。在直流系统中，如果发生

接地故障，就会导致正负电源之间的绝缘电阻降低，进而影响整个系统的正常运行<sup>[2]</sup>。具体来说，接地故障可能会带来以下危害：烧毁设备、跳闸误动、破坏继电保护、破坏监控系统等。为避免上述问题发生时无法及时发现，本文将结合小波能量熵，开展对水电站直流系统接地故障自动诊断的研究。

## 1 水电站直流系统接地电阻并联值测量

水电站直流系统接地电阻并联值测量是确保直流系统正常运行的重要步骤<sup>[3]</sup>。在水电站中，为了保证控制、信号和继电保护等装置的安全可靠供电，对其接地电阻的检测就显得非常重要。并联值测量是一种常用的测量方法，其基本原理是将多个电阻器并联在一起，以获得更低的总电阻值。这种方法在水电站直流系统接地电阻的测量中具有广泛应用。

在进行水电站直流系统接地电阻并联值测量时，准备必要的测量工具和材料，包括电阻器、导线、万用表等。选择直流系统的合适点作为接地电阻的测量点，通常选择接地母线或接地极<sup>[4]</sup>。将电阻器按照并联方式连接在测量点上，确保连接牢固可靠。使用万用表测量并记录接地电阻的值。为确保其精度，需对其进行多次测试，并求其平均值。根据测量结果，分析接地电阻是否符合相关标准和规定。如果不符合要求，需要进行相应处理，如增加接地极或改善接地系统等。在测量的过程中可将水电站直流系统简化为一个由电阻、等效电容、直流馈线负载组成的等效模型。其中，电阻值可以通过下述公式计算得出：

$$R = \rho \times \frac{2\pi nr}{\pi d^2 / 4} \quad (1)$$

式中， $R$  表示电阻阻值； $\rho$  表示电导率； $n$  表示线圈匝数； $r$  表示线圈半径； $d$  表示导线直径。水电站直流系统接地实际是指与大地之间的绝缘电阻值减小到阈值以下。假设  $R_+$  和  $R_-$  分别表示正负极上的对地绝缘电阻。在水电站直流系统运行过程中，通常接地电阻小于 25kΩ 时，判定为接地故障。

采用常规的母线电压与接地漏电流之比求出支路的绝缘电阻值，利用漏电极性判别法，可实现对分支点接地的有效探测。如果有两个或更多的支路接地，将无法准确地反映出系统的接地状况。若单支路为双极接地，且接地电阻相等，则其漏电流为 0，且接地电阻不超过阈值<sup>[5]</sup>。由于外界环境的改变，漏电检测器的零漂也会受到影响，从而导致测试结果与真实结果有很大的误差，所以不能忽略其对支路接地电阻的影响。在未发生接地故障的情况时，开关处于合上状态，双极馈线之间没有电流差，此时漏电流传感器不会输出信号。如果是在直流母线上，就不能采集到故障点的泄漏电流。通过对各支路的接地电阻进行计算，得出各支路的正阻抗和负阻抗，从而可以间接地

测定母线接地电阻的阻值<sup>[6]</sup>。而每一支路的双极接地电阻之和，就是该线路双极等值接地电阻的数值。假设母线正负极对地电压分别表示为  $U_+$  和  $U_-$ ，则可得：

$$R'_{\Sigma} = [(R_1 // R_b) // R_b] + (R_+ // R_-) \quad (2)$$

式中， $R'_{\Sigma}$  表示水电站直流系统接地电阻并联值； $R_1$  表示电压为  $U_+$  时的电阻； $R_b$  表示电压为  $U_-$  时的电阻。根据运算，得到水电站直流系统接地电阻并联值。需要注意的是，在进行水电站直流系统接地电阻并联值测量时，要特别注意安全问题<sup>[7]</sup>。由于直流系统涉及高压和电流，如果不注意安全操作，可能会造成严重后果。因此，在进行测量时，要严格遵守相关安全规定和操作规程，确保人员和设备的安全。

## 2 基于小波能量熵的直流系统接地故障多尺度分析

小波分析因其优良的时频局域性，可以从多个尺度有效地提取信号的特征。而能量熵则可以用于衡量信号的复杂度和不确定性。

在多尺度分析中，小波分析是把信号分解为不同的频率分量，而每一分量又分别与一种尺度相对应。小波变换的基本公式为：

$$c(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中， $c(a,b)$  表示小波系数； $f(t)$  表示输入信号； $\psi(t)$  表示小波函数； $a$  和  $b$  分别表示尺度参数和平移参数。通过对不同尺度上的信号进行能量熵计算，可以获得信号在不同尺度上的复杂度和不确定性。能量熵的计算为：

$$H = -\sum p_i \log_2 p_i \quad (4)$$

式中， $H$  表示能量熵值； $p_i$  表示各个状态的概率。这有助于更好地理解信号的本质特征，从而更准确地诊断接地故障。当  $p_i$  的取值为 0 时，此时  $p_i \log_2 p_i$  为 0，能量熵值  $H$  是在一定的状态当中对水电站直流系统定位的测度信息，是一种衡量一个序列不确定度的方

法，它可以用来估算一个随机信号的复杂度。

在实际应用中，利用上述水电站直流系统接地电阻并联值测量得到的电压和电流信号，以获取接地故障的相关数据。对采集的信号进行小波变换，将其分解成不同尺度的成分。对每个尺度上的信号成分计算其能量熵，以获得信号的复杂度和不确定性<sup>[8]</sup>。从能量熵的计算结果中提取出与接地故障相关的特征信息。

### 3 小波熵接地检测与故障自动诊断

在得到所需的特征信息后，进一步对水电站直流系统进行小波熵接地检测和故障自动诊断。这一步骤是整个分析过程的重点，旨在准确识别和定位直流系统的接地故障。

小波熵接地检测是一种基于小波变换和信息熵的检测方法。该方法采用小波分析方法，对直流输电线路的电压、电流信号做多尺度分析，并从多个尺度上提取其特征信息。然后，通过计算这些特征信息的熵值，可以得到信号的复杂度和不确定性<sup>[9]</sup>。当系统发生接地故障时，信号的熵值会发生变化，从而可以检测到故障的存在。

在完成小波熵接地检测后，进行故障自动诊断。这一步骤基于提取的特征信息和预设的阈值或分类器。通过比较实际测量值与阈值或使用分类器进行模式识别，可以自动判断是否存在接地故障以及故障的类型和位置。将水电站直流系统常见接地故障的具体参数数据汇总，构成数据库。将得到的特征信息与数据库中的故障实例进行对比，利用欧氏距离度量方法，检索出相似度最高的故障类型。欧氏距离度量方法的计算为：

$$d_i = \sqrt{\sum_{h=1}^n (X_h - Y_{ih})^2} \quad (5)$$

式中， $d_i$  表示欧氏距离； $X_h$  表示实际运行中水电站直流系统中第  $h$  个参数的实际值； $Y_{ih}$  表示数据

库当中第  $i$  个故障实例的第  $h$  个参数的实际值。通过上式计算得出的  $d_i$  值越大，则说明特征信息与案例之间的距离越大，相似度越小。将上式进一步转换得到相似度：

$$\omega_i = \frac{1}{1 + d_i} \quad (6)$$

式中， $\omega_i$  表示相似度。将上式输入到计算机当中，通过计算机程序运行实现对获取到的特征信息与数据库中各个阶段故障类型的对比，将得到的相似度值最高的对应故障类型作为最终的诊断结果输出。

### 4 对比实验

本文旨在通过对比实验的方式，探讨基于小波能量熵方法在水电站直流系统接地故障自动诊断中的效果。选取某大型水电站的直流系统数据，该系统具有复杂的接线结构和运行环境。收集其在正常运行和发生接地故障时的数据，作为实验样本。选择低频信号电压为 20V，频率为 35Hz 作为低频信号注入。在获取到的实验样本当中包含了少量 600Hz 以及高频噪声干扰。图 1 为在没有故障发生的情况下水电站直流系统的运行信号。

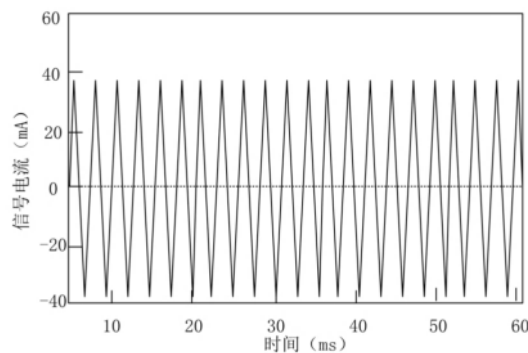


图 1 无故障发生情况下水电站直流系统运行信号

从图 1 可以看出，在水电站直流系统正常运行的情况下，信号电流始终控制在 -40~+40mA 范围内。这一电流范围是经过精心设计的，确保了直流系统的

稳定运行。在此范围内，信号电流的幅度基本一致，表明系统内部的电流分布均匀且稳定。此外，从图中的曲线可以看出，信号电流的变化非常平稳，没有出现突然的波动或跳变，这也进一步证明了直流系统的稳定性。这种平稳的运行状态对于水电站的正常运行至关重要，因为它保证了电力供应的连续性和稳定性，进而确保了水电站的安全和可靠性。

在实验过程中，通过人为的方式，在 20~30ms 和 40~50ms 两个分段设置接地故障，当故障发生时，信号电流变化范围将缩小到 -20~+20mA 范围。分别利用本文上述提出的基于小波能量熵的诊断方法（实验组）、基于电流行波的诊断方法（对照 A 组）和基于电流修正的诊断方法（对照 B 组）对该水电站直流系统接地故障进行诊断，并将得到的诊断结果绘制成如图 2~ 图 4 所示。

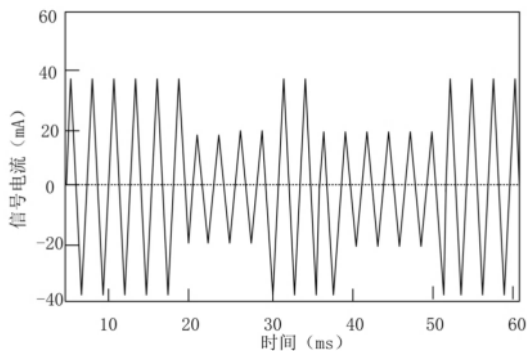


图 2 实验组接地故障诊断结果

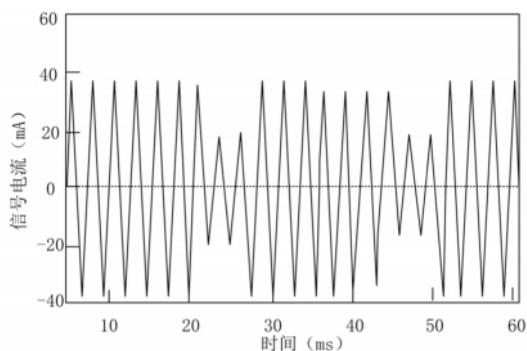


图 3 对照 A 组接地故障诊断结果

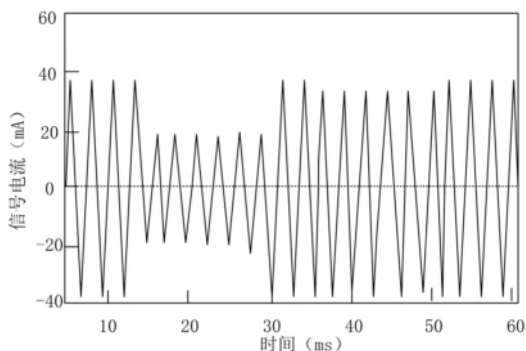


图 4 对照 B 组接地故障诊断结果

从图 2 可以看出，实验组诊断方法诊断出两组电流变化在 -20~+20mA 范围的信号。这一电流范围与人为设置的接地故障范围完全一致，进一步验证了实验组诊断方法的准确性。由于实验组方法成功识别出异常电流信号，并且这个范围与实际接地故障相符，因此可以确信该方法能够准确地诊断直流系统的接地故障。

同时，从图 3 和图 4 中，可以看到对照 A 组诊断方法也诊断出了电流变化在 -20~+20mA 范围的信号。然而，其异常波动的范围与人为设置的时间范围相比存在较大的差异，这表明该方法在某些情况下可能存在一定的诊断误差。

而对照 B 组诊断方法在实验中仅成功诊断出一组电流变化在 -20~+20mA 范围的信号，对于另一组并没有给出准确的诊断结果。此外，其诊断出的电流异常波动范围与实际接地故障范围相差较大，这进一步说明对照 B 组的诊断方法在实际应用中可能存在较大的局限性。

综合上述实验结果，可以得出结论：实验组诊断方法不仅具备极高的诊断精度，而且能够准确识别直流系统的接地故障。这种方法在实际应用中是可行的，并且具有很高的应用价值。

## 5 结束语



直流系统的接地故障严重影响了水电厂的安全稳定运行，所以研究其故障诊断方法是十分必要的。目前常用的自动诊断方法包括绝缘电阻检测法、支路电压法、主动电流注入法、被动电流注入法和人工智能诊断法等。在实际应用中，需要根据具体情况选择合适的诊断方法，以达到及时发现并排除接地故障的目的。同时，还需要加强设备的维护和管理，以减少接地故障的发生概率，从而保障水电站的稳定运行。

参考文献

[1] 陈虢，刘红文，黄继盛，等. 基于 ZNy11-Dyn7 型无源降压消弧器件的高阻接地故障选线新方法 [J]. 电瓷避雷器，2023 (6)：45-54.

[2] 王晨. 基于电流行波的弧光接地故障辨识技术在配电网中的应用 [J]. 电气应用，2023，42 (9)：50-54.

[3] 田成，袁剑. 基于小波分析的配网自动化系统中小电流接地故障定位研究 [J]. 自动化应用，2023，64 (23)：176-178.

[4] 周荃. CHB 直流侧免供电在配电网接地故障电流柔性调控分配中的方法研究 [J]. 农村电气化，2023 (12)：8-12.

[5] 莫仕勋，沈耿宇，莫小锋，等. 基于电流修正的智能接地配电系统高阻接地故障选线判据优化方法 [J]. 电工电能新技术，2023，42 (11)：84-92.

[6] 覃宗树，黄延成，张华，等. 基于小波分析和卷积神经网络的互感器二次多点接地故障智能检测 [J]. 微型电脑应用，2023，39 (11)：106-110.

[7] 王常骐，路佳宁，洪玮，等. 基于直流限流电路的直流单极接地故障自适应重合闸技术 [J]. 电网技术，2023，47 (12)：4877-4887.

[8] 王孔贤，邵英，王黎明. 基于改进变分模态分解和小波阈值法的单相接地故障电流降噪 [J]. 科学技术与工程，2023，23 (29)：12556-12566.

[9] 叶远波，王吉文，汪胜和，等. 计及故障点两侧零序电流相位差的新能源送出线路接地故障时域距离保护研究 [J]. 电力系统保护与控制，2023，51 (20)：180-187.

(收稿日期：2024-01-23)