

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513832

基于激励耦合的铝电解槽接地故障诊断方法研究*

尹刚^{1,2}, 钱中友^{1,2}, 颜非亚³, 曹文琦⁴, 朱森^{1,2}

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室 重庆 400044; 2. 重庆大学资源与安全学院 重庆 400044;
3. 贵阳铝镁设计研究院有限公司 贵阳 550081; 4. 阿坝铝厂 阿坝 623001)

摘要: 铝电解槽在复杂的工作环境中运行,受强磁场、电场、热场等多物理场耦合效应影响,容易发生接地故障,严重影响其生产效率和安全性。针对现有检测方法在精准定位与实时诊断方面存在一定局限性,提出一种基于激励耦合的铝电解槽接地故障诊断方法。该方法通过在铝电解系列首端注入幅值为30 V、频率为100 Hz的交流电压信号激励,并结合铝电解槽两端的交流电压与对地电压的动态响应,分析其接地故障特征。研究表明,铝电解槽在正常运行状态下电路表现为容性特征,而在接地故障发生以后,电路特性则由容性转变为阻性。基于这一特性,分别在单点接地故障和多点接地故障情况下设计了多组仿真实验,并引入容阻比作为故障诊断指标。通过对比正常运行与故障状态下的电气特征,提出以下诊断判据:当铝电解槽同时满足以下条件时:槽两端交流电压 u_i 大于阈值 u_{ci} ,槽两端交流电压和槽对地交流电压相位差 $\varphi_i < 10^\circ$ 以及容阻比 $\alpha_i > 10^4$,表明该铝电解槽存在接地故障。通过制作实验原理样机并进行现场实验,验证了该方法能够有效识别铝电解槽的单点接地故障和多点接地故障,并且适用于在线监测与实时诊断。实验结果表明,该方法在提升铝电解槽运行安全性与经济效益方面具有显著优势,为铝电解槽的接地故障诊断提供了高效、可靠的解决方案。

关键词: 铝电解;激励耦合;接地;故障诊断;检测技术

中图分类号: TH181 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 450.40

Research on the grounding fault diagnosis method of aluminum electrolysis cells based on excitation coupling

Yin Gang^{1,2}, Qian Zhongyou^{1,2}, Yan Feiya³, Cao Wenqi⁴, Zhu Miao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. College of Resource and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Guiyang Aluminium Magnesium Design & Research Institute Co., Ltd, Guiyang 550081, China; 4. Aba Aluminium Factory, Aba 623001, China)

Abstract: Aluminum electrolysis cells operate in complex environments influenced by the coupling effects of strong magnetic, electric, and thermal fields, making them prone to grounding faults that significantly affect both production efficiency and safety. Existing detection methods have limitations in precise fault localization and real-time diagnosis. To address these issues, a grounding fault diagnosis method based on excitation coupling is proposed. An alternating voltage signal with an amplitude of 30 V and a frequency of 100 Hz is injected at the front end of the aluminum electrolysis series. The dynamic response of the alternating voltage across the cell and its ground voltage is analyzed to examine the fault characteristics of the grounding system. It is found that, under normal operating conditions, the circuit exhibits capacitive characteristics, whereas, after a grounding fault occurs, the circuit's characteristics transition from capacitive to resistive. A series of simulation experiments for both single-point and multi-point grounding faults are designed, introducing the capacitive-to-resistive ratio as a fault diagnosis indicator. By comparing the electrical characteristics of the system under normal and fault conditions, the following diagnostic criteria are proposed. When the alternating voltage across the cell exceeds a threshold, the phase difference between the alternating voltage across the cell and the ground voltage is less than 10° , and the capacitive-

收稿日期: 2025-03-17 Received Date: 2025-03-17

* 基金项目: 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目 (CSTB2024NSCQ-LZX0166)、重庆英才·创新创业示范团队项目 (cstc2024ycjh-bgzxm0131)、自然科学基金重点横向项目 (H20210777)、科技转化重大项目 (H20201555) 资助

to-resistive ratio exceeds 10^4 , a grounding fault can be confirmed. Experimental prototypes are established, and field evaluate have validated the effectiveness of the method. The proposed method is suitable for online monitoring and real-time diagnosis, offering significant improvements in both safety and economic efficiency in aluminum electrolysis cell operations. The results show that the method provides an efficient and reliable solution for grounding fault diagnosis in aluminum electrolysis cells.

Keywords: aluminum electrolysis; excitation coupling; grounding; fault diagnosis; detection technology

0 引言

铝电解工业采用冰晶石—氧化铝熔盐电解法生产原铝,其工艺系统以氧化铝为原料,以熔融冰晶石(Na_3AlF_6)为电解质介质,阳极与阴极均由碳素材料构成^[1-2]。电解过程在特制铝电解槽内进行,形成具有多变量强耦合、时变非线性特征的复杂工业系统^[3-4]。铝电解槽因长期受强磁场、强电场、高温、多粉尘等环境因素的干扰,导致其漏电故障频发,所造成的直接和间接损失不可估量^[5-6]。铝电解槽漏电故障的发生,不仅会降低铝电解槽的工作效率,造成能源浪费,还可能致使设备损坏,甚至引发人员伤亡事故,进而带来巨大的经济损失。故而,精准诊断铝电解槽的漏电故障,及时确定漏电发生位置并进行检修,对于提升经济效益与社会效益意义重大^[7-8]。

铝电解槽为特殊的非接地直流供电系统,其电流经由母线与铝电解槽构成回路,导电部分悬空且不与地面连接,这一电路原理与伪双极直流输电线路颇为相近^[9]。然而,相较于伪双极直流输电线路的接地故障定位技术,铝电解槽漏电故障检测呈现出更高的复杂性与挑战性。伪双极直流输电线路的接地故障一般为单极接地故障,相关研究主要聚焦于故障定位以及对系统影响的评估^[10]。例如,何山^[11]提出一种分段检测的故障定位系统,通过对每段线路电压和电流的检测,可在单极接地故障发生后迅速定位故障段。管维亚等^[12]通过小波变换模极大值法提取故障电流的初始行波极性差异,从而实现单极接地故障的区段定位。但是,铝电解槽接地故障类型更为复杂,无法直接应用在铝电解系列中,原因^[13-14]在于:

1) 故障影响差异:铝电解槽中的单点接地故障会引起各槽电压重新分布,显著缩短铝电解槽寿命。此外,多点接地故障在铝电解槽中更为常见,而伪双极直流系统中此类故障相对较少。

2) 检测精度要求高:铝电解槽的串联连接方式使得多点接地故障定位难以精确到每个铝电解槽,这给检修工作增加了难度。

3) 无保护装置辅助:铝电解槽的系统结构决定了不会出现双极短路现象,因此与保护装置配合的检测方法在铝电解系列中不具备可行性。

当前,铝电解槽接地故障的主要检测方法包括零点漂移检测法、对地绝缘电阻检测法以及电桥平衡检测法。其中,零点漂移检测法是目前铝厂中应用最广泛的检测方法。当铝电解槽由于绝缘损坏等原因发生接地时,零点发生波动。该方法能够检测铝电解系列的漏电故障,但是不能直接定位到单个槽。确定故障发生以后,需要依赖工作人员的经验逐槽测量,以找出漏电的铝电解槽。在铝电解系列发生多点接地时,零点的位置是多个故障点共同作用的结果,因此无法定位到具体的漏电槽。何亮^[15]提出了一种基于中点接地电路和电压信号变换器的实时检测方案,该方案集成了隔离变压器、整流桥和限流电感线圈等多种组件,能够实现对铝电解槽系列整体对地绝缘状态的实时监控。然而,该方法存在系统成本较高的问题,且在多点接地故障情况下,定位精度仍然受限。在此基础上,谢林^[16]提出了一种无损检测方法,通过测试电阻和相关电路测量,结合欧姆定律计算对地绝缘电阻值,有效避免了传统万用表检测中易受损或误差较大的问题,其同样适用于对铝电解系列整体或部分铝电解槽段绝缘状态的评估。戈广金^[17]提出了一种铝电解系列对地绝缘强度检测法,通过在电解系列和大地之间施加电压,同时对漏电流进行检测,根据电压和漏电流比值计算绝缘强度,该方法需要串联微安级的电流表,对仪器设备检测精度要求高。王铁军等^[18]通过向铝电解系列注入 1 kHz 的交流信号,测量槽电压响应来判断铝电解槽是否发生了接地故障,但是由于信号频率太高,实际测量受噪声干扰严重,实际应用中受限。因此,铝电解槽接地故障急需一种高效、实时以及高精度的检测方法,防止铝电解槽因持续漏电造成人身伤亡及巨大财产损失事故。

激励耦合方法是一种基于交流信号传播特性的电气检测技术,其核心原理是通过注入特定频率和幅值的交流信号,在复杂电气网络中分析信号传播的动态响应变化,进而定位故障点^[19-20]。在电气系统中,交流信号的传播特性主要受电路阻抗的影响。当信号通过电气设备时,设备的阻抗会改变信号的幅值和相位特性。特别是在含有容性和电阻性负载的电路中,容抗和阻抗的不均匀分布会显著影响信号的传播路径。接地故障发生时,局部阻抗发生突变,信号响应的变化会显现为明显的特征,从而为接地故障定位提供依据^[21-23]。鉴于此,将激励耦合方法引入铝电解槽接地故障诊断过程中,旨在探究

铝电解槽在发生单点接地和多点接地条件下的故障特征,建立铝电解槽接地故障多维度联合判据体系,以解决铝电解槽接地故障在线诊断困难的问题。

1 铝电解槽接地故障特征分析

铝电解槽系统是一个典型的大规模串联直流供电系

统,由数百台电解槽通过母线串联组成,每个铝电解槽在正常运行时表现为容性主导的电气特性。以某厂铝电解槽系列为例,共有 296 台铝电解槽通过母线串联,是一个不接地的直流供电系统,如图 1 所示,其中直流电流为 400 kA,每个铝电解槽对地绝缘电阻约为 5 MΩ,整个系列对地电压±600 V,每个槽子压降约为 4.05 V 左右,因此每个槽子电阻约为 $1.01 \times 10^{-5} \Omega$,铝电解槽的对地电容约为 1 nF。

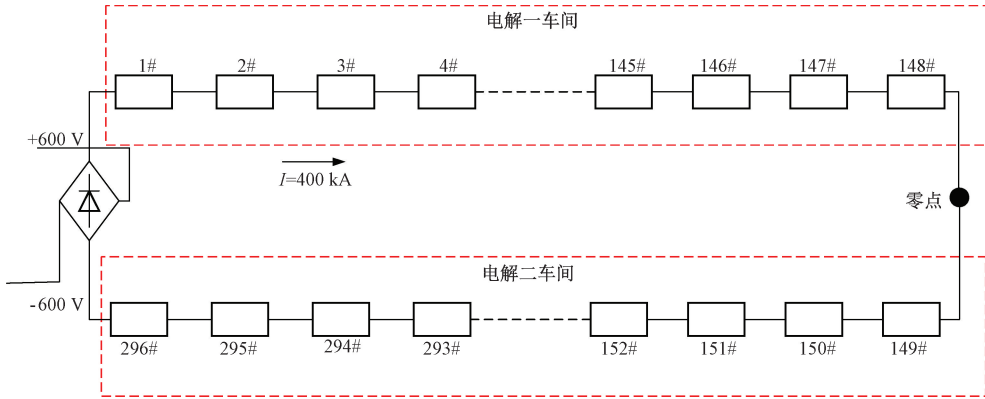


图 1 铝电解槽供电原理

Fig. 1 Diagram of the power supply of the aluminum electrolysis cell

该系统具有大电流(如 400 kA)、高绝缘阻抗(如单槽 5 MΩ)的特性,所以要求诊断方法必须具备高灵敏度和实时性。激励耦合方法在铝电解系列回路的接地故障诊断中的优势在于:首先注入的交流信号幅值较低,不会干扰铝电解系列直流系统运行,信号频率选择在铝电解槽工作频率(直流 0 Hz)之外,不会影响系统的供电稳定性。其次,激励信号频率与幅值可调,适应性强,可以根据系统需求灵活调整频率和幅值,确保信号传播与故障诊断的有效性,同时避免干扰。最后,这是一种非接触性测量方法,激励耦合的响应分析主要通过外部传感器完成,不需要对铝电解槽内部进行直接改造,避免对系统的结构或运行状态造成改变和交流等效电路干扰^[24]。

1.1 铝电解槽阻抗分析

在交流激励下,简化后的单个铝电解槽如图 2 所示。

每个铝电解槽的电路包含:串联电阻 R (铝电解槽本身的电阻);铝电解槽对地电容 C 和铝电解槽对地绝缘电阻 R_g 。对单个铝电解槽,可以将对地电容 C 和绝缘电阻 R_g 视为并联关系,每个铝电解槽对地容抗 X_c 为:

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

其中, $\omega = 2\pi f$, 表示交流信号的角频率。 X_c 表示铝电解槽对地电容对交流信号的反应。

每个铝电解槽的总阻抗 Z_{cell} 可以由串联电阻和容抗并联组成,其总阻抗为:

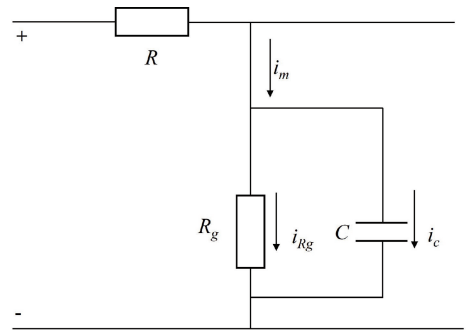


图 2 单个铝电解槽交流等效电路

Fig. 2 AC equivalent circuit diagram of a single aluminum electrolysis cell

$$Z_{cell} = R + Z_{parallel} \quad (2)$$

其中, $Z_{parallel}$ 为对地电容和对地绝缘电阻的并联等效阻抗,得:

$$\frac{1}{Z_{parallel}} = \frac{1}{R_g} + j\omega C \quad (3)$$

化简得:

$$Z_{parallel} = \frac{R_g}{1 + j\omega CR_g} \quad (4)$$

将其代入 Z_{cell} :

$$Z_{cell} = R + \frac{R_g}{1 + j\omega CR_g} \quad (5)$$

铝电解槽在正常运行状态下,其对地绝缘电阻

$R_g \rightarrow \infty$, 此时电路中容抗占主导地位, 电路表现为容性。总阻抗为:

$$Z_{cell} \approx R + X_C, X_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (6)$$

当铝电解槽发生接地故障时, 其对地绝缘电阻 R_g 降低, $R_g \ll X_C$, 此时电阻主导阻抗。总阻抗为:

$$Z_{cell} \approx R + R_g \quad (7)$$

1.2 铝电解槽相位差分析

铝电解槽内部包含电解质溶液, 它与电极材料共同形成电容。当交流电流通过铝电解槽时, 铝电解槽对地的电容性阻抗将限制电流通过, 在此情况下铝电解槽的电流和电压之间会发生相位偏移。如式(5)所示, 在电容性负载中, 电流和电压之间的相位差由容抗 X_C 决定。因此, 在理想的铝电解槽系列电路中, 当交流信号施加在铝电解槽的两端时, 由于该电容性特征导致铝电解槽两端交流电压和槽对地交流电压之间产生 90° 的相位差。

当铝电解槽发生接地时, 通常接地电阻较小, 故障电流的增大导致电压与电流之间的相位差接近 0° , 此时电路特性变成以电阻性为主, 电流和电压几乎是同相。

这种相位差的变化是接地故障的一个重要电气特征, 可以通过测量铝电解槽两端的电压与槽对地电压的相位差来判断铝电解槽是否发生接地故障。

1.3 铝电解槽容阻比分析

容阻比 α 定义为容抗 X_C 与总阻抗 Z_{cell} 的比值, 用于表征电气系统中容性与阻性负载特性的相对关系。在直流供电系统(如铝电解槽系统)中, 容阻比可以反映系统运行状态的主要特性, 是衡量接地故障特性的重要指标。即:

$$\alpha = \frac{X_C}{Z_{cell}} \quad (8)$$

根据式(5), 总阻抗 Z_{cell} 表达式为:

$$Z_{cell} = R + \frac{1}{\frac{1}{X_C} + \frac{1}{R_g}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 得到:

$$\alpha \approx \frac{X_C}{R + \frac{1}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{X_C}}} \quad (10)$$

将式(10)化简得:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{R_g}{X_C + R_g} + \frac{R}{X_C}} \quad (11)$$

由于铝电解槽电阻 R 很小, 可以忽略不计, 而容抗 X_C 很大, 因此可以进一步化简得:

$$\alpha = 1 + \frac{X_C}{R_g} \quad (12)$$

根据式(12)得出, 铝电解槽的绝缘程度越高, 容阻比的取值越趋近于1。

在铝电解槽接地故障情况下, 由于对地绝缘电阻 R_g 会显著降低, 容阻比会逐渐增大。在极端情况下, 例如铝电解槽的漏电电流通过金属流向大地, 此时对地绝缘电阻 R_g 趋向于0, 由于大容抗的存在, 容阻比将会趋向于正无穷大。

综上, 在铝电解槽这一不接地的直流供电系统中, 容阻比为铝电解槽接地故障诊断提供了多层面的支持, 通过对比不同铝电解槽的容阻比变化, 结合交流信号传播特性, 可以准确定位故障槽。一方面容阻比的变化量直接反映了绝缘电阻的下降幅度, 为接地故障严重程度提供重要依据。另一方面基于容阻比的实时监测, 可以捕捉铝电解槽接地故障早期信号, 提升系统可靠性, 从而避免其接地故障的发生。

2 仿真实验

2.1 搭建铝电解系列仿真模型

在为了验证理论分析的正确性, 并获取铝电解槽单点接地以及多点接地故障情况下的故障诊断判据, 采用 Cadence 软件对铝电解系列进行建模, 模拟 10 个铝电解槽串联构成的铝电解系列回路, 通过外加交流电压源输出交流电压信号, 获取各个铝电解槽的电气特征信息, 如图3所示。

为了尽量还原真实铝电解系列运行情况, 其中参数设置为:

$R_1 \sim R_{10}$ ——10 个铝电解槽, 每个铝电解槽的阻值为 $1.01 \times 10^{-5} \Omega$;

$R_{g1} \sim R_{g10}$ ——每个铝电解槽对地绝缘电阻, 单个数值为 $5 \text{ M}\Omega$;

$C_1 \sim C_{10}$ ——每个铝电解槽对地电容, 单个数值为 1 nF ;

C ——耦合电容, 数值为 $1000 \mu\text{F}$;

V_1 ——外加交流电压源, 幅值为 30 V , 频率为 100 Hz 的正弦交流电压。

2.2 正常情况下仿真实验

当所有铝电解槽绝缘状态正常时, 即对地绝缘电阻 $R_{g1} \sim R_{g10}$ 均为 $5 \text{ M}\Omega$ 时, 通过仿真计算得到的铝电解槽接地仿真结果如表1所示。

在正常情况下, 铝电解槽的电路表现出典型的容性主导特性。根据表1的仿真数据可以看出, 槽交流电压沿串联电路逐渐降低, 这种电压的减小趋势表明, 激励信号在铝电解槽串联回路中传播时, 由于阻抗的存在, 信号幅值逐渐衰减。每个铝电解槽两端交流电压和其对地

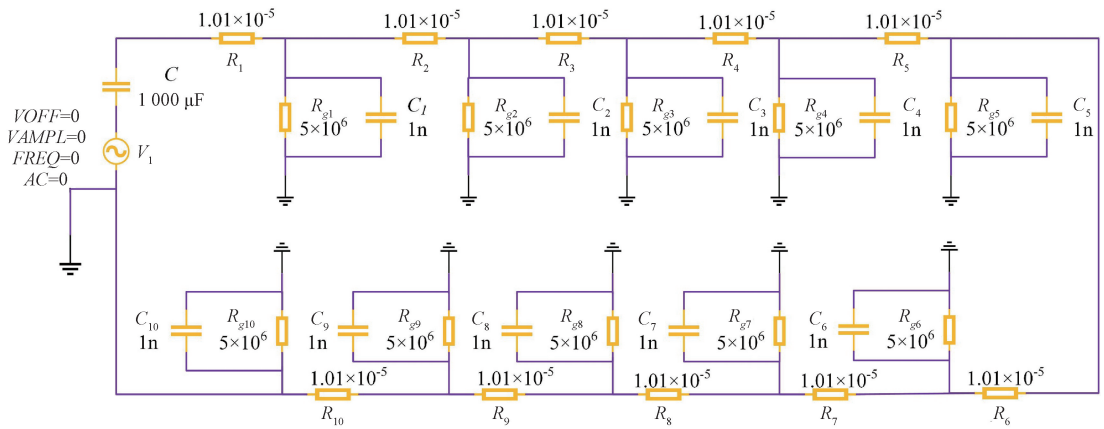


图 3 检测 10 个铝电解槽接地故障位置的仿真图

Fig. 3 Simulation diagram for detecting the grounding fault location of 10 aluminum electrolysis cell

表 1 铝电解槽正常情况下的仿真结果

Table 1 Simulation results of the aluminum electrolysis cell under normal conditions

槽序号	槽交流电压 u/V	相位差 $\varphi/(^\circ)$	容阻比 α
1	$1.898\ 8 \times 10^{-9}$	87.25	1.31
2	$1.708\ 9 \times 10^{-9}$	87.25	1.31
3	$1.519\ 0 \times 10^{-9}$	87.25	1.31
4	$1.329\ 2 \times 10^{-9}$	87.25	1.31
5	$1.139\ 3 \times 10^{-9}$	87.25	1.31
6	$9.494\ 0 \times 10^{-10}$	87.25	1.31
7	$7.595\ 2 \times 10^{-10}$	87.25	1.31
8	$5.696\ 4 \times 10^{-10}$	87.25	1.31
9	$3.797\ 6 \times 10^{-10}$	87.25	1.31
10	$1.189\ 9 \times 10^{-10}$	87.25	1.31

交流电压相位差为 87.25° ,是容性负载的典型特征。在正常的铝电解槽系统工作中,对地电容 C 是主要的阻抗成分,导致电流相位超前电压相位接近 90° 。这表明铝电解槽在正常工作时,其阻抗特性主要由容抗 X_C 决定。同时,各个铝电解槽的容阻比稳定在 1.31,进一步验证了容抗 X_C 在总阻抗中的主导地位,表明系统绝缘性能良好。

这些结果表明,铝电解槽在正常运行时,其阻抗特性主要由对地电容决定,系统表现为容性主导,且电路运行状态稳定。这一特性为铝电解槽接地故障的诊断提供了重要的基准参考。

2.3 单点接地故障仿真实验

假设第 2 号槽发生了接地故障,其他铝电解槽没有绝缘损坏,在图 3 的仿真中,单独将第 2 号槽的对地绝缘电阻设置为 $10\ \Omega$,其他参数设置不变,得到铝电解槽单

点接地故障仿真结果,将正常情况下的槽交流电作为阈值 u_c ,对比接地故障条件下的槽交流电压变化情况,如表 2 所示。

表 2 铝电解槽单点接地故障仿真结果

Table 2 Simulation results of the single-point grounding fault of the aluminum electrolysis cell

槽序号	槽交流电压 u/V	u_c $/V$	相位差 φ $/(^{\circ})$	容阻比 α
1	$2.523\ 8 \times 10^{-6}$	$1.898\ 8 \times 10^{-9}$	87.25	1.31
2	$2.524\ 6 \times 10^{-6}$	$1.708\ 9 \times 10^{-9}$	0.07	1.59×10^5
3	$1.313\ 0 \times 10^{-9}$	$1.519\ 0 \times 10^{-9}$	87.25	1.31
4	$1.111\ 0 \times 10^{-9}$	$1.329\ 2 \times 10^{-9}$	87.25	1.31
5	$9.191\ 0 \times 10^{-10}$	$1.139\ 3 \times 10^{-9}$	87.25	1.31
6	$8.282\ 0 \times 10^{-10}$	$9.494\ 0 \times 10^{-10}$	87.25	1.31
7	$6.060\ 0 \times 10^{-10}$	$7.595\ 2 \times 10^{-10}$	87.25	1.31
8	$5.151\ 0 \times 10^{-10}$	$5.696\ 4 \times 10^{-10}$	87.25	1.31
9	$3.232\ 0 \times 10^{-10}$	$3.797\ 6 \times 10^{-10}$	87.25	1.31
10	$2.121\ 0 \times 10^{-10}$	$1.189\ 9 \times 10^{-10}$	87.25	1.31

基于表 2 的铝电解槽单点接地故障仿真数据,结合正常工况特征参数,可建立多维度联合诊断铝电解槽接地故障判据。第 2 号故障槽呈现显著特征:其交流电压幅值较正常阈值 ($1.708\ 9 \times 10^{-9}$) 骤增 1 478 倍至 $2.524\ 6 \times 10^{-6}\ V$,相位差由容性特征的 87.25° 突变为趋近纯阻性的 0.07° ,容阻比 α 从 1.31 阶跃至 1.59×10^5 ,表明该铝电解槽对地阻抗特性由容抗主导转为电阻主导。故障槽上游(第 1 号槽)因电流分流导致电压幅值异常升高,但相位差与容阻比仍符合正常容性衰减规律,而下游槽(第 3~10 号槽)参数保持稳定。由此提出基于电压幅值突变、相位差极性反转及容阻比阶跃的联合判据体

系,通过多参数耦合分析可精准定位故障槽。该方法利用故障槽阻抗特性突变与传播规律,有效区分邻近槽的干扰信号,其相位差判据与容阻比数量级差异具有强抗噪性,为工程中铝电解槽接地故障的在线监测与诊断提供了应用参考。

2.4 两点接地故障仿真实验

假设第 2、5 号槽同时发生了接地故障,且绝缘破损程度不相同,而其他铝电解槽没有绝缘损坏。在这种情况下,将第 2、5 号槽的对地绝缘电阻分别设置为 10 和 5 Ω,其他参数设置不变,得到铝电解槽两点接地故障仿真结果,如表 3 所示。

表 3 铝电解槽两点接地故障仿真结果

Table 3 Simulation results of the two-point grounding fault of the aluminum electrolysis cell

槽序号	槽交流电压 u/V	u_c $/V$	相位差 φ $/(^{\circ})$	容阻比 α
1	4.1851×10^{-6}	1.8988×10^{-9}	87.25	1.31
2	4.1839×10^{-6}	1.7089×10^{-9}	0.06	1.59×10^5
3	1.9929×10^{-6}	1.5190×10^{-9}	87.25	1.31
4	1.9923×10^{-6}	1.3292×10^{-9}	87.25	1.31
5	1.9912×10^{-6}	1.1393×10^{-9}	0.12	3.18×10^5
6	1.9942×10^{-6}	9.4940×10^{-10}	87.25	1.31
7	1.9950×10^{-6}	7.5952×10^{-10}	87.25	1.31
8	1.9929×10^{-6}	5.6964×10^{-10}	87.25	1.31
9	1.0100×10^{-10}	3.7976×10^{-10}	87.25	1.31
10	6.0600×10^{-11}	1.1899×10^{-10}	87.25	1.31

基于铝电解槽两点接地故障仿真实验结果,其故障特征与单点接地故障诊断判据高度一致,验证了所提方法的普适性与鲁棒性。其中,第 2 号故障槽两端交流电压幅值 $u_2 = 4.1839 \times 10^{-6}$,较正常阈值升高 2 448 倍 ($u_2/u_{c2} \geq 10^3$);第 5 号故障槽两端交流电压幅值约其正常阈值的 1 748 倍,符合电压幅值突变判据;在相位差方面,故障槽相位差趋近于纯阻性 ($\varphi_2 = 0.06^{\circ}, \varphi_5 = 0.12^{\circ}$),与正常槽容性特征 ($\varphi \approx 90^{\circ}$) 形成极值分离;此外,故障槽容阻比异常:故障槽容阻比达 10^5 量级,与绝缘电阻降低程度成反比。

上游非故障槽(如第 1 号槽)因故障电流分流导致电压幅值升高,但其相位差 (87.25°) 与容阻比 (1.31) 仍符合正常容性特征,可避免误判。下游非故障槽的两端交流电压按容性衰减规律分布(如第 10 号槽 $u_{10} = 6.0600 \times 10^{-11}$),且相位差与容阻比保持稳定,表明故障点上游的铝电解槽受影响较大。

2.5 三点及三点以上接地故障仿真实验

假设第 2、5 和第 8 号槽同时发生了接地故障,且绝缘破损程度不相同,而其他铝电解槽没有绝缘损坏。在这种情况下,将第 2、5 和 8 号槽的对地绝缘电阻分别设置为 10、15 和 20 Ω,其他参数设置不变,得到铝电解槽三点接地故障仿真结果,如表 4 所示。

表 4 铝电解槽三点接地故障仿真结果

Table 4 Simulation results of the three-point grounding fault of the aluminum electrolysis cell

槽序号	槽交流电压 u/V	u_c $/V$	相位差 φ $/(^{\circ})$	容阻比 α
1	6.3091×10^{-6}	1.8988×10^{-9}	87.25	1.31
2	6.3077×10^{-6}	1.7089×10^{-9}	0.18	1.59×10^5
3	4.5425×10^{-6}	1.5190×10^{-9}	87.25	1.31
4	4.5416×10^{-6}	1.3292×10^{-9}	87.25	1.31
5	4.5403×10^{-6}	1.1393×10^{-9}	0.05	1.06×10^5
6	5.0470×10^{-7}	9.4940×10^{-10}	87.25	1.31
7	5.0520×10^{-7}	7.5952×10^{-10}	87.25	1.31
8	5.0399×10^{-7}	5.6964×10^{-10}	0.18	7.95×10^4
9	3.0300×10^{-11}	3.7976×10^{-10}	87.25	1.31
10	2.5250×10^{-11}	1.1899×10^{-10}	87.25	1.31

三点接地故障仿真结果与单点、两点故障诊断判据高度一致,表明电压幅值-相位差-容阻比的多维度联合判据体系可有效扩展至复杂多点故障场景。

综上,得到适用于单点接地和多点接地(两点及以上)故障诊断流程如图 4 所示。

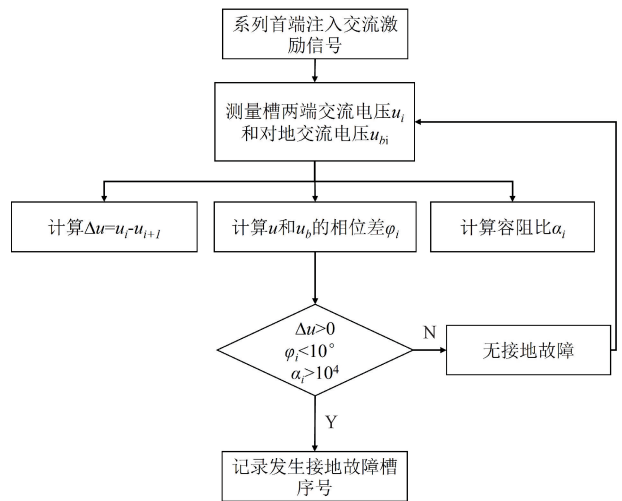


图 4 铝电解槽接地故障判断流程

Fig. 4 Flow chart for judging the grounding fault of aluminum electrolysis cells

在铝电解系列首端交流信号(30 V, 100 Hz)激励下,同步测量每个铝电解槽两端交流电压 u 及槽对地交流电压 u_b ,计算每个铝电解槽两端交流电压差值 Δu 、 u 和 u_b 的相位差以及容阻比 α 。当某个铝电解槽同时满足 $u_i > u_{ci}$ 、 $\varphi_i < 10^\circ$ 以及 $\alpha_i > 10^4$,表明该铝电解槽存在接地故障,并记录接地故障槽序号,报告给相关工作人员。判断流程如图4所示。

该方法通过阻抗特性分离与传播规律分析,可精准定位单点或多点接地故障,且对上下游参数干扰具有鲁棒性,为铝电解槽接地故障的在线诊断提供了应用参考。

3 现场实验验证及讨论

为了验证理论分析及仿真实验的准确性,本研究制作了实验样机,其实物图如图5(a)和(b)所示,分别呈现了铝电解系列漏电监控装置的正面和反面。在实验过程中,选取铝电解系列母线某一位置如图5(c)所示,通过实验样机注入频率为100 Hz,幅值为30 V的交流电压激励信号。在母线的另一端将其接入地网的地线以实现与大地连接,具体连接方式如图5(d)所示。



图5 铝电解系列漏电监控装置及现场实验

Fig. 5 Leakage current monitoring device for aluminum electrolysis series and field experiment

在现场实验过程中,选取了某铝厂处于连续生产运行状态的4台铝电解槽(1001#~1004#槽)作为重点研究对象。实验期间,一方面依托铝电解企业工作人员的日常巡检机制,详细记录接地故障的发生频次;另一方面,运用铝电解系列漏电监控装置进行同步检测,并将2种检测方式的结果进行对照。

经统计,在日常巡检过程中,1001#~1004#这4台铝电解槽共出现接地故障6次,铝电解槽系列漏电监控装

置在每次接地故障发生时,均实现精准检测,能够正确显示发生接地故障的铝电解槽的序号,现场实验结果如表5所示。实验结果与理论分析相吻合,充分验证了激励耦合方法在铝电解槽接地故障检测中的正确性。

表5 铝电解槽接地故障检测现场实验结果

Table 5 Detection results of grounding faults in aluminum electrolytic cells in field experiments

槽号	实际接地故障次数	设备检测次数
1001#	2	2
1002#	2	2
1003#	1	1
1004#	1	1

4 结论

针对当前铝电解槽接地故障检测技术在空间定位精度与时间响应效率方面的技术瓶颈,提出一种基于动态激励耦合原理的接地故障诊断方法。通过在铝电解系列首端位置注入交流信号激励,利用信号在铝电解系列回路中的传递特性,计算槽两端交流电压、槽两端交流电压与槽对地交流电压的相位差,以及铝电解槽的容阻比,进而构建电压幅值-相位差-容阻比的多维度联合判据体系。当铝电解槽同时满足 $u_i > u_{ci}$ 、 $\varphi_i < 10^\circ$ 以及 $\alpha_i > 10^4$,表明该铝电解槽存在接地故障。该诊断方法适用于铝电解槽单点接地和多点接地故障情况,有助于降低车间安全隐患,提升车间安全等级,提高工人检修效率,减少能源浪费,从而提升企业经济效益。

参考文献

- [1] MA L T, QIU ZH SH, TANG Y SH, et al. The recycling of carbon-rich solid wastes from aluminum electrolytic cells: A review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2024, 22(5): 2531-2552.
- [2] ZHOU S, DIOP M A, GAO B L, et al. Enhancing sustainability in aluminum reduction cells through cathode repair optimization and numerical simulations study on current distribution and erosion hole impact [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2024, 10(2): 658-673.
- [3] 尹刚, 朱森, 全鹏程, 等. 基于PID搜索优化的CNN-LSTM-Attention铝电解槽电解温度预测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 324-337.
- YIN G, ZHU M, QUAN P CH, et al. Research on CNN-LSTM-Attention aluminum electrolyzer electrolysis temperature prediction method based on PID search optimization [J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2025, 46(1): 324-337.
- [4] YIN G, LI Y H, YAN F Y, et al. Deep learning for electrolysis process anode effect prediction based on long short-term memory network and stacked denoising autoencoder[J]. Rare Metals, 2024, 43(12): 6370-6471.
- [5] 尹刚, 钱中友, 曹文琦, 等. 基于 Adaboost-PSO-SVM 的铝电解槽健康状态诊断方法研究[J]. 化工学报, 2024, 75(1): 354-365.
- YIN G, QIAN ZH Y, CAO W Q, et al. Health state diagnosis of aluminum electrolytic cells based on Adaboost-PSO-SVM[J]. CIESC Journal, 2024, 75(1): 354-365.
- [6] 尹刚, 向冬梅, 王民, 等. 基于数据驱动的铝电解槽剩余寿命预测方法研究[J]. 稀有金属, 2023, 47(2): 273-280.
- YIN G, XIANG D M, WANG M, et al. Prediction method of remaining life of aluminium reduction cell based on data drive[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(2): 273-280.
- [7] LI J J, GAO T H, JI X Y. Multi-model and multi level aluminum electrolytic fault diagnosis method [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 41(15): 4409-4423.
- [8] 王天成. 降低铝电解槽直流电耗的途径及实践[J]. 轻金属, 2005(10): 34-36.
- WANG T CH. The practices and methods of reducing DC power consumption of large pots [J]. Light Metals, 2005(10): 34-36.
- [9] 王国钰, 范春菊, 李潇. 伪双极接线不同接地方式下直流配电线路故障选极方案[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3570-3579.
- WANG G Y, FANG CH J, LI X, et al. Fault pole selection of DC distribution lines under pseudo-bipolar wiring with different grounding modes[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3570-3579.
- [10] 徐瑞东, 常仲学, 宋国兵, 等. 注入探测信号的直流配电网接地故障识别方法[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4269-4277.
- XU R D, CHANG ZH X, SONG G B, et al. Grounding fault identification method for DC distribution network based on detection signal injection [J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4269-4277.
- [11] 何山. 双端直流配电网故障自愈恢复技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- HE SH. Study on the fault self-recovery strategy in two-terminal DC distribution network[D]. Jinan: Shangdong University, 2019.
- [12] 管维亚, 李国文, 周翔. 低压直流配网故障在线快速检测和定位方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 133-139.
- GUAN W Y, LI G W, ZHOU X. Fast method of fault detection and location of low voltage direct current distribution network [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 133-139.
- [13] 刘义, 何亮. 铝电解系列电解槽绝缘检测系统的研究[J]. 轻金属, 2022(7): 55-58.
- LIU Y, HE L. Study on the insulation detection system of aluminum reduction cells in aluminum potline[J]. Light Metals, 2022(7): 55-58.
- [14] 王振伟, 魏清汉, 王德全. 铝电解车间接地故障检测系统设计实践[J]. 有色冶金节能, 2015, 31(3): 41-44.
- WANG ZH W, WEI Q H, WANG D Q. Practice on system design of grounding fault detection in aluminium electrolytic workshop [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2015, 31(3): 41-44.
- [15] 沈阳铝镁设计研究院. 一种电解槽系列的对地绝缘电阻检测装置及方法: 200610134268X [P]. 2011-04-06.
- Shenyang Aluminum and Magnesium Engineering and Research Institute. A detection device and method for the ground insulation resistance of electrolytic cell series: 200610134268X [P]. 2011-04-06.
- [16] 谢林. 一种电解槽组对地绝缘电阻检测方法和装置: CN201610383962.9 [P]. 2016-11-09.
- XIE L. A detection method and device for the ground insulation resistance of electrolytic cell groups: CN201610383962.9 [P]. 2016-11-09.
- [17] 沈阳铝镁设计研究院. 一种电解槽系列的对地绝缘电阻检测装置及方法: CN200610134268X [P]. 2007-04-18.
- Shenyang Aluminum and Magnesium Engineering and Research Institute. A detection device and method for the ground insulation resistance of electrolytic cell series: CN200610134268X [P]. 2007-04-18.
- [18] 王铁军, 葛贵君, 曲士民. 基于注入交流信号的铝电解槽多点接地故障定位检测方法[J]. 轻金属, 2023(4): 58-62.
- WANG T J, GE G J, QU SH M. Location and detection method of multi-point grounding fault in aluminum reduction cell based on injected AC signal [J]. Light Metals, 2023(4): 58-62.
- [19] 李君, 何敏, 黄守道, 等. 基于相位差的小电阻接地有源配电网接地故障保护算法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(23): 7418-7429.

- LI J, HE M, HUANG SH D, et al. Grounding fault protection algorithm of small resistance earthing active distribution network based on phase difference [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(23): 7418-7429.
- [20] 钟逸涵, 邓丰, 史鸿飞, 等. 基于动态电阻串联的高阻接地故障精确建模[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2046-2059.
- ZHONG Y H, DENG F, SHI H F, et al. Accurate modeling of high impedance fault based on dynamic impedance series connection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2046-2059.
- [21] 孙世政, 秦鸿宇, 何盛港, 等. 基于信号特征分析和多小波变换的机械手滑动觉感知研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 299-307.
- SUN SH ZH, QIN H Y, HE SH G, et al. Research on sliding perception of manipulators based on signal feature analysis and multi wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 299-307.
- [22] 李昊, 符玲, 李红艳, 等. 配网线径自适应的非接触电压测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 79-88.
- LI H, FU L, LI H Y, et al. Research on adaptive non-contact voltage measurement of wire diameter in distribution network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 79-88.
- [23] 李建光, 肖浩, 刘东伟, 等. 用于铝电解电流精确测量的手持式光纤电流传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 39-48.
- LI J G, XIAO H, LIU D W, et al. Research on the handheld fiber-optic current sensor for aluminum electrolysis current measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 39-48.
- [24] 张泽林, 刘希喆. 基于非接触式电压测量的电压监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(5): 229-237.
- ZHANG Z L, LIU X ZH. Voltage monitoring system based on non-vontact voltage measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 229-237.

作者简介



尹刚(通信作者), 分别在1985年和1992年获得重庆大学学士学位和硕士学位, 于2009年获得重庆大学博士学位, 现为重庆大学教授和博士生导师。主要研究方向为工业过程建模、智能优化和深度学习、安全控制技术、人工智能、铝电解冶炼检测与监测技术。

E-mail: yk115@cqu.edu.cn

Yin Gang (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Chongqing University in 1985 and 1992, respectively, and Ph.D. degree from Chongqing University in 2009. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Chongqing University. His main research interests include industrial process modeling, intelligent optimization and deep learning, safety control technology, and artificial intelligence, and aluminum electrolytic smelting detection and monitoring technology.



钱中友, 2022年于安徽工业大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为有色冶金、冶金过程电气控制及故障诊断。

E-mail: 2788754380@qq.com

Qian Zhongyou received his B.Sc. degree from Anhui University of Technology in 2022. He is currently a master student at Chongqing University. His main research interests include non-ferrous metallurgy, electrical control and fault diagnosis.



颜非亚, 1993年于昆明工学院获得学士学位, 现为贵阳铝镁设计研究院有限公司首席科学家和教授级高级工程师。主要研究方向为: 轻金属冶炼。

E-mail: yanfeiya@163.com

Yan Feiya received his B.Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 1993. He is currently the chief scientist and a professor-level senior engineer at Guiyang Aluminum-Magnesium Design and Research Institute Co., Ltd. His main research interest is light metal metallurgy.



曹文琦, 1999年于太原理工大学获得学士学位, 现为重庆博赛集团副总经理和阿坝铝厂高级工程师。主要研究方向为有色金属冶炼。

E-mail: 32400154@qq.com

Cao Wenqi received his B.Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 1999. He is currently the deputy general manager at Chongqing Bosai Group and a senior engineer of Aba Aluminum Factory. His main research interest is the non-ferrous metal metallurgy.



朱淼, 2022年于郑州大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为机器学习、有色冶金与故障诊断。

E-mail: zm2000905@163.com

Zhu Miao received her B.Sc. degree from Zhengzhou University in 2022. She is currently a master student at Chongqing University. Her main research interests include machine learning, non-ferrous metallurgy and fault diagnosis.