

# 水轮发电机定子线棒击穿事故分析及处理

廖慧芬, 易洋洋, 朱 源

(浙江浙能北海水力发电有限公司, 浙江 杭州 310009)

**摘要:** 随着水轮发电机组的长期运行, 发电机定子的故障率也随之增加。绝缘介质在足够强的电场作用下, 局部区域发生放电而没有贯穿施加电压的导体之间, 这种现象称之为局部放电。对于发电机定子而言, 每一次局部放电对绝缘介质都会产生影响, 长期连续的局部放电, 对绝缘部件的累积损坏效应则会使绝缘强度下降甚至击穿, 进而造成发电机定子绕组绝缘故障, 影响发电机正常运行。本文通过实际案例, 分析一起水轮发电机定子线棒击穿事故的原因及处理过程, 并提出整改措施, 为类似事故处理提供一定参考。

**关键词:** 发电机定子; 线棒; 绝缘击穿

中图分类号: TV738

文献标识码: B

文章编号: 1672-5387(2025)05-0082-04

DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2025.05.022

## 0 引言

滩坑水电站装设 3 台 200 MW 水轮发电机组, 外加 1 台 4 MW 的生态小机组, 多年平均发电量 10 亿 kW·h, 年利用 1 705 h。水电站既有发电、调峰、调相及事故备用功能, 又兼顾防洪抗灾的任务, 在区域电网中发挥着不可替代的重要作用。电站发电机与主变压器采用一机一变的连接方式, 通过主变压器将电压等级升至 220 kV, 电站 220 kV 开关站采用正、副双母线接线方式, 通过两条线路将电量送入电网, 实现并网发电。

## 1 事故情况

### 1.1 系统运行方式

电站 220 kV 开关站正、副母线联络运行; 两条并网线路; 1 号机满负荷发电运行, 2 号机、3 号机在热备用, 220 kV 及厂用电系统均为正常运行方式; 1 号主变、2 号主变、3 号主变中性点接地。

事故前 1 号机组电气参数: 有功功率 200.29 MW, 无功功率 44.52 Mvar, 定子电流 8 708.71 A, 定子电压 13.51 kV, 转子电压 310.34 V, 转子电流 1 077.74 A, 调速器导叶开度 75.25%。

### 1.2 事件过程

10 月 11 日上午 09:02:00, 上位机报: 1 号机第一

套定子匝间保护动作; 1 号机第一套保护动作停机; 1 号机第二套定子匝间保护动作; 1 号机第二套保护动作停机; 1 号机断路器分位; 1 号机灭磁开关分闸; 1 号机第二套定子接地保护动作; 1 号机事故停机; 1 号机转速  $> 115\%n_c$ ; 1 号机主配压阀拒动; 1 号机筒形阀事故关闭; 1 号机事故配压阀动作。计算机监控系统报出相关信息的时序详见表 1。

表 1 1 号机事故时计算机监控系统报出相关信息的时序表

时间	信号
9:02:26	1 号机第一套定子匝间保护动作
9:02:26	1 号机第一套保护动作停机
9:02:26	1 号机第二套定子匝间保护动作
9:02:26	1 号机第二套保护动作停机
9:02:27	1 号机断路器分位
9:02:28	1 号机灭磁开关分闸
9:02:30	1 号机第二套定子接地保护动作
9:02:30	1 号机事故停机
9:02:31	1 号机转速 $> 115\%n_c$
9:02:32	1 号机主配压阀拒动
9:02:33	1 号机筒形阀事故关闭
9:02:34	1 号机事故配压阀动作

09:10:00, 现场检查 1 号机灭磁开关转子电流

收稿日期: 2025-02-17

作者简介: 廖慧芬(1996-), 女, 助理工程师, 从事水电站电气设备检修维护及高压试验工作。

表烧毁、转子绝缘为 0 MΩ。

10:15:00,1 号机由“热备用”改“检修”。

10:30:00,经检查确认 1 号机定子两根上层线棒端部有烧黑痕迹。

### 1.3 保护动作结果

1 号发电机定子绕组 B 相端部发生匝间短路,1 号发电机 A、B 套匝间保护均正确动作,1 号机组及主变故障录波器完好录波(见图 1、图 2)。

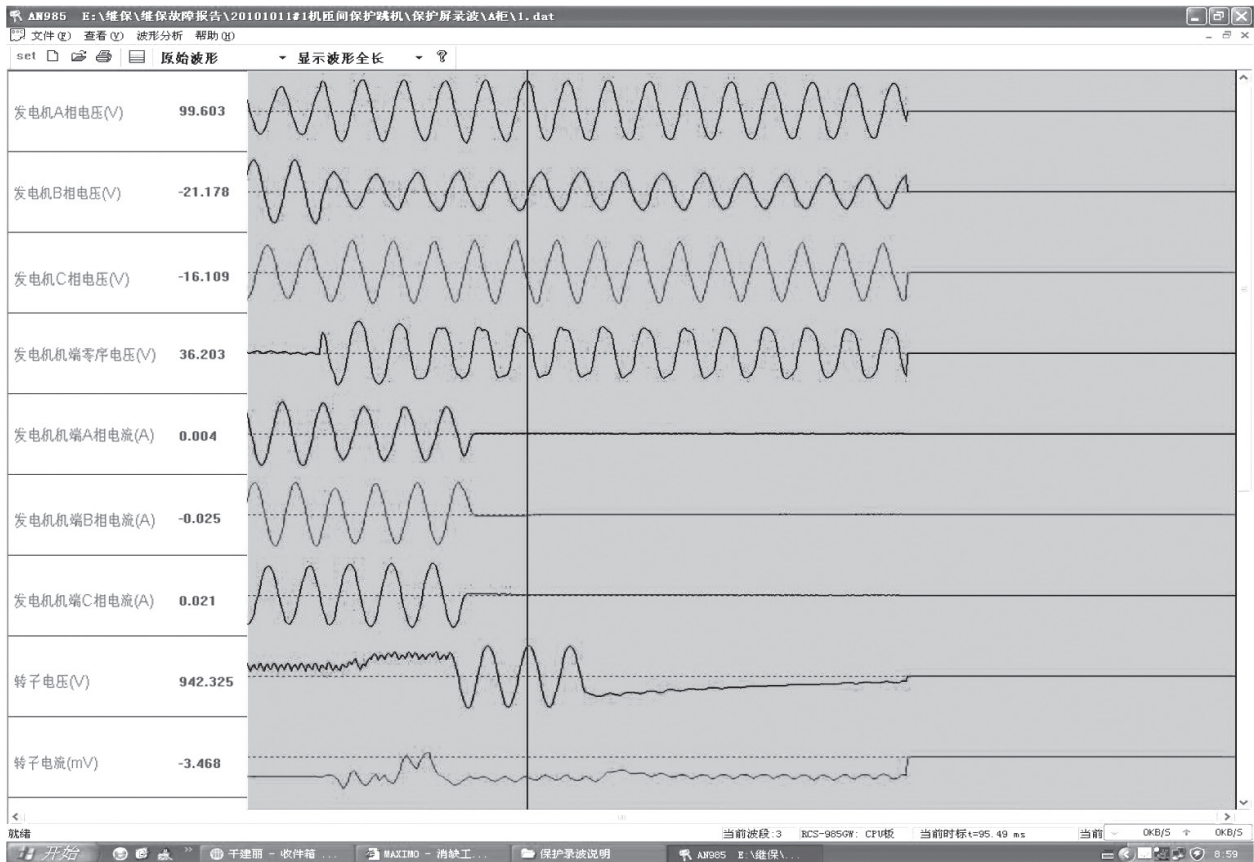


图 1 1 号机故障时保护装置所录波形

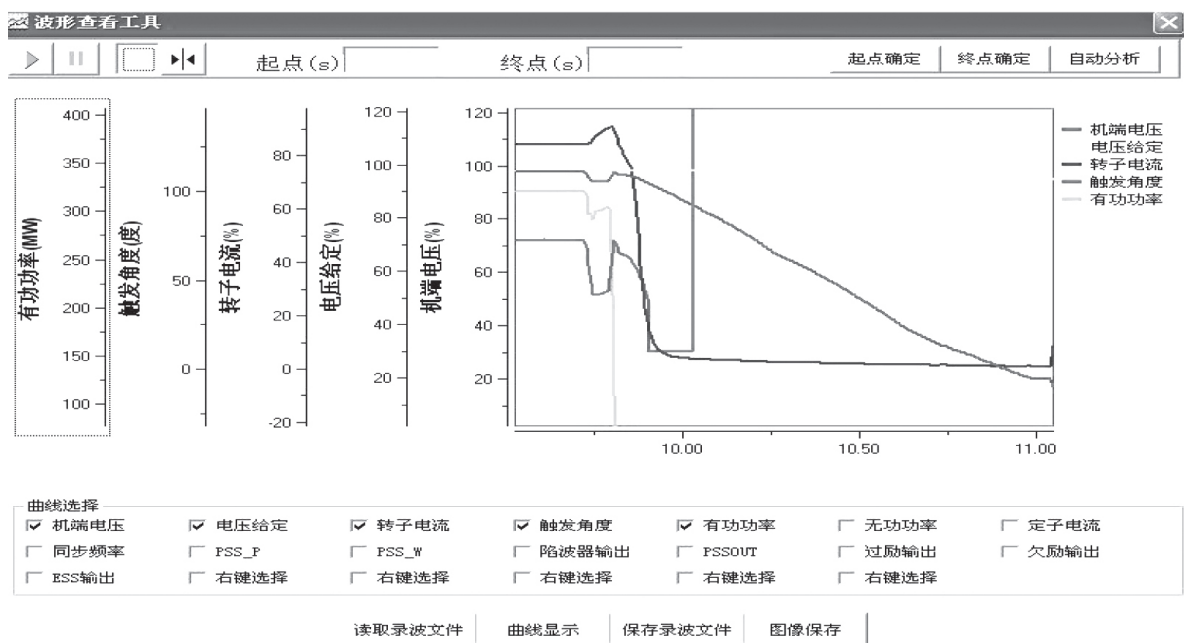


图 2 1 号机励磁系统录波图

## 2 事故处理经过

在事故发生后进行了初步的分析,水轮发电机定子由机座、铁心和线圈等部件组成<sup>[1]</sup>,线棒的主绝缘采用F级环氧粉云母材料,线棒导体都涂有绝缘漆<sup>[2]</sup>,认为事故的直接原因为两线棒的同一部位相对位置的绝缘不良,造成击穿放电。因此提出事故处理过程应重点对线棒绝缘制造缺陷、电晕性腐蚀、线棒之间存留异物等原因进行检查,并提出应对励磁进行全面检查,查清转子接地点并分析转子接地原因。同时联系安排检修人员进场,开始机组落门排水工作,并将机组解体、吊出转子。

仔细查看了定子事故部位,认为定子线棒绝缘不良的原因仍难以确定,应对转子磁极进行试验以明确转子接地点,并提出励磁系统可能存在问题,造成励磁回路过电压,最终导致转子接地。之后技术人员确定定子端部受损和线棒受损情况,并开始线棒更换工作,经统计更换线棒总数为50根,其中241槽至253槽下层线棒共13根,231槽至267槽上层线棒共37根。

转子回路加100 A直流电流后找到21号磁极在引出线处有放电灼伤现象。组织人员对21号磁极进行解体处理,处理完成并经试验后回装。磁极吊装后,进行了转子绝缘电阻、直流电阻(包括接头接触电阻)、交流阻抗、交流耐压试验<sup>[3]</sup>,试验结果合格。

励磁厂家专业人员到现场对励磁回路进行了全面的试验与检查。对转子电流表烧毁,34号、48号两组非线性ZnO灭磁电阻烧坏,转子过电压保护回路的正向可控硅击穿损坏,灭磁开关有拉弧等现象进行了初步原因分析,并提出了初步的处理方案:更换过压保护可控硅以及过压保护板,更换全部非线性ZnO灭磁电阻并增加两组电阻,更换转子电流表,对灭磁开关进行了检查维护。

在全部需更换线棒取出,并对留在槽内的其他全部线棒进行绝缘电阻、直流耐压、交流耐压试验,试验合格后,开始复装更换的线棒。期间对上层线棒、下层线棒均按规定进行各项试验,试验结果符合相关规范要求。

定子修复完成后进行了定子绕组绝缘电阻、直流电阻、直流耐压、起晕试验、交流耐压试验,试验结果符合规范要求,并进行了定子局放试验,定子修复

工作结束,开始机组回装。各质量节点及相应试验均按国家标准和行业标准进行并验收合格<sup>[4]</sup>。机组回装结束,开始机组冲转试验。依次完成机组空转试验,负荷试验,确保机组复役。

## 3 事故原因分析

### 3.1 定子线棒击穿的原因分析

1号机定子击穿线棒为250槽、251槽上层线棒,属于B相不同支路,运行时电位差2000 V左右,事故的直接原因为两线棒的同一部位相对位置的绝缘不良,造成击穿放电。从现场检查情况来看,绝缘不良的可能原因有:线棒绝缘制造缺陷、电晕性腐蚀、线棒之间存留异物造成绝缘磨损等。

### 3.2 励磁回路转子接地原因分析

经过现场检查,转子21号磁极线圈对铁心有明显的放电,另外转子电流表计烧损,励磁系统34号、48号两组非线性ZnO灭磁电阻烧坏,转子过电压保护回路的正向可控硅击穿损坏。

分析认为,由于发电机定子匝间短路,气隙磁场变化在转子绕组中产生高电压。另外,此机组采用的灭磁开关(ABB E3H/E MS2000)弧压偏低,断弧不彻底。在灭磁过程中,定子匝间短路仍存在,造成转子过电压,转子过压保护动作信号发出,过电压保护回路的正向可控硅击穿损坏(可控硅耐压3000 V),引起转子电流表击穿和转子21号磁极接地。

考虑到此次故障尚不是发电机最严重故障灭磁状态,已造成两组ZnO灭磁电阻损坏,分析认为ZnO灭磁电阻容量可能不够,且相互之间特性一致性不好,在灭磁过程中造成两组灭磁电阻烧坏。

与厂家确定转子电流表耐压为2000 V(铭牌与说明书中未标有耐压值),在转子过压过程中,过压达到了3000 V(转子过压保护信号发出),造成电流表击穿。

## 4 整改措施

### 4.1 已采取的措施

#### 4.1.1 定子部分

(1)对单根备用线棒进行相关试验:用2500 V兆欧表摇绝缘电阻不低于5000 M $\Omega$ <sup>[5]</sup>;单根线棒起晕试验,起晕电压不低于1.5  $U_n$ ;交流耐压试验(2.75  $U_n$ +2.5 kV)。试验结果全部合格。

(2)更换1号机受损线棒,共计50根,其中下层

241号~253号共13根,上层231号~267号共37根。

(3)对定子全面检查清扫,特别是定子端部做了全面的清扫。

(4)处理过程中对定子进行整套绝缘试验:受损线棒拔出后,对留在槽内的剩余线棒进行了绝缘电阻、泄漏电流和直流耐压试验( $2.5 U_n$ ),交流耐压试验( $1.6 U_n+2.4 \text{ kV}$ ),试验合格。安装下层线棒,对新下层线棒进行了绝缘电阻试验、交流耐压试验( $2.5 U_n+2.0 \text{ kV}$ )、槽电位测量试验,试验合格。安装上层线棒,同样进行新上层线棒试验,试验合格。定子完成修复后,进行定子整体试验,检测三相直流电阻符合规程要求,定子三相绕组绝缘电阻、吸收比、定子绕组的泄漏电流、直流耐压、起晕试验、交流耐压试验,结果符合相关规范。最后进行了定子局部放电试验,对定子整体绝缘水平进行了进一步的检测。

#### 4.1.2 励磁部分

(1)21号转子磁极修复:在吊出转子后外观检查转子无异常,经加100 A电流后找到21号磁极在引出线处有放电灼伤现象。经厂家现场处理后进行该磁极绕组对铁心绝缘电阻、直流电阻、交流阻抗、交流耐压试验均合格。磁极挂装、连接、包绝缘处理完成后,进行转子整体试验,绝缘电阻、直流电阻(包括接头接触电阻)、交流阻抗、交流耐压试验,结果合格。

(2)经对灭磁开关进行检查、清扫维修后,测得接触电阻 $43.8 \mu\Omega$ ,更换过电压保护可控硅及过压保护板。

(3)更换整套ZnO灭磁电阻,并增加一组容量。确保空载误强励和三相短路故障灭磁状态下能可靠灭磁。并经测量每组氧化锌压敏电阻元件的压敏电压和1/2压敏电压下的泄漏电流值符合规程要求。

(4)转子电流表更换。

(5)在转子磁极检查过程中发现16~17号磁极接头接触电阻偏大,进行了处理后正常。

(6)检查集电环及碳刷架正常。

## 4.2 后续措施

### 4.2.1 定子部分

(1)制定运行时定子端部起晕检查制度,加强运

行中的设备检查。

(2)保留故障线棒,待后续进一步分析。

(3)加强运行机组的温度监视。

(4)有条件情况下增加定子绝缘在线监测系统。

(5)根据1号机处理情况,2号、3号机结合后续大小修参照1号机采取的措施进行相关检查与试验。

### 4.2.2 励磁部分

(1)结合大小修安排1号机灭磁开关技改,初定将ABB E3H/EMS2000开关更换为UR36-82S。

(2)进一步核算ZnO灭磁电阻容量,并根据核算情况再定是否还需增加ZnO灭磁电阻容量。

(3)核对励磁系统辅助回路耐压水平,并根据核对情况进行改造处理。

(4)根据1号机处理情况,2号、3号机结合后续大小修参照1号机采取的措施进行相关检查、试验与技改。

## 5 结语

本次定子线棒击穿事故是由于定子线棒的同一部位相对位置的绝缘不良而导致的,通过该起事故的分析处理,电站需进一步加强对检修过程的管理工作,对检修过程中可能存在缺陷和隐患的地方加强检查,及时发现缺陷加以消除,使设备能正常稳定运行。加强对运行中设备绝缘状况的监测,必要时可进行针对性试验,确保电厂设备安全稳定的运行。

## 参考文献:

- [1] 袁东和. 水轮发电机定子绕组接地故障的分析与检修[J]. 科技信息, 2006(8): 226, 228.
- [2] 黄俊锋, 潘建忠. 飞来峡机组定子线棒绝缘击穿分析及处理[J]. 水电站机电技术, 2005(4): 56-57, 61.
- [3] 国家能源局. 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—2021[S].
- [4] 魏雪友. 水轮发电机定子铁心烧毁事故分析与预防[J]. 水电站机电技术, 2025, 48(1): 24-26.
- [5] 国家能源局. 现场绝缘试验实施导则 绝缘电阻、吸收比和极化指数试验: DL/T 474.1—2018[S].