

水轮发电机集电环跳火故障处理及优化改进方法

陈岩

内蒙古引绰济辽供水有限责任公司 内蒙古乌兰浩特 137400

DOI:10.12238/ems.v7i7.14273

[摘要] 水轮发电机集电环跳火故障是电力系统常见隐患,若未及时处理可能导致设备损坏甚至停机。本文分析了集电环跳火的主要成因,包括刷握与碳刷卡塞导致电刷压不紧、弹簧失效、电刷磨损、碳刷材质缺陷、机械振动及环境粉尘污染等。结合某水电站实际案例,提出了针对性故障处理策略,如调整电刷压力、优化电刷材质与集电环表面处理工艺,并建议通过增加智能电刷监测系统、改进通风冷却系统、增设碳粉回收装置等措施优化设备结构。研究结果表明,上述方案可有效降低跳火风险,提升设备运行稳定性,对保障水轮发电机组安全运行具有重要参考价值。

[关键词] 水轮发电机;集电环跳火;故障分析;预防性维护;智能电刷

引言

水轮发电机集电环作为电能传输的核心部件,其运行稳定性直接影响发电机组的安全与效率。集电环跳火故障是水电站运行中常见的恶性事故,轻则导致设备停机,重则引发转子绝缘损坏甚至火灾。据统计,集电环故障约占水轮发电机励磁系统故障的26%,其中跳火问题占比高达60%以上。本文结合某水电厂实际案例,系统分析跳火故障的成因,提出从故障处理到设计优化的全链条解决方案,为水电站安全运行提供技术支撑。

1. 集电环跳火故障机理分析

1.1 故障成因的多维度解析

集电环跳火现象本质上属于电弧放电,其产生需具备电位差、气体电离介质以及电流通路这三个必要条件。在水电厂的实际运行过程中,多种因素会成为集电环跳火的主要诱因。

首先,电刷系统异常是较为常见的问题。电刷在长期使用过程中会出现磨损,进而导致接触压力不足。通常情况下,电刷接触压力的标准范围在0.02-0.03MPa之间,一旦压力低于0.015MPa,接触电阻就会急剧上升,达到正常值的5-8倍。接触电阻的激增会引发局部过热现象,有相关电站的实测数据表明,电刷接触面温度每升高10℃,氧化膜的破坏速率就会加快3倍,而氧化膜的破坏最终会导致电弧的产生。

其次,集电环表面状态劣化也会引发跳火问题。集电环在长期运行后,其表面会形成环面沟槽。当这些沟槽的深度超过0.5mm时,碳粉的堆积量会大幅增加,可达正常状态的4倍,这些堆积的碳粉容易形成导电通道,从而增加跳火的风险。

最后,环境因素的耦合作用同样不可忽视。当环境温度超过40℃且湿度低于30%时,电刷氧化膜的形成速率会下降60%。在这种情况下,配合碳粉的导电作用,就极易诱发持续性电弧。例如,某机组在夏季高温期间,集电环温升达到了85℃,此时跳火故障的频次增加了3倍。

1.2 故障发展的动态过程

跳火故障在发展过程中呈现出极为明显的阶段性特征。

在初始阶段,电刷与集电环的接触点处会出现零星的火花,这些火花持续的时间相对较短,通常小于5秒,与此同时,电流脉冲的幅值大约在10-20A之间波动。随着故障的逐步发展,便会进入发展阶段,此时原本零星的火花会逐渐演变成连续的电弧,并且在集电环的环面上会出现直径在2-5mm范围内的灼伤点。值得注意的是,在这个阶段,接触电阻会突然大幅增加至200 $\mu\Omega$ 以上,这种接触电阻的突增会进一步引发励磁电流出现波动。当故障持续恶化,就会进入恶性阶段,在这一阶段,电弧通道会不断扩展,甚至蔓延至相邻的电刷,最终形成环火事故。从某机组的实测数据来看,当环火发生时,转子电流的突变量竟然高达300A,如此大的电流突变直接导致励磁变过流保护动作,进而使机组停机。

2. 传统处理方法的局限性

2.1 应急处置的技术瓶颈

现行标准中所推荐的打磨处理、电刷更换等措施在实际应用中暴露出了明显的短板与不足。在表面处理工艺方面存在缺陷,传统打磨方式仅仅只能去除环面上的毛刺,对于微观沟槽这类更深层次的问题却无能为力,无法起到修复作用。例如,某电站采用精车工艺对相关部件进行处理后,环面粗糙度确实从Ra3.2 μm 降低到了Ra1.6 μm ,表面上看处理效果似乎不错,然而在机组运行100小时后进行检测发现,碳粉堆积量仍然达到了0.8g/cm²,这与处理前的碳粉堆积量基本相当,这就说明这种处理方式并没有从根本上解决问题。

现行规范仅规定“电刷磨损至1/3原长时更换”,但却没有充分考虑到接触面形貌变化这一重要因素。实际测量数据显示,当电刷接触面弧度偏差超过0.2mm时,即便电刷剩余长度符合更换标准,其接触压力分布不均度仍然高达40%,这无疑会影响电刷的正常工作性能。

2.2 维护策略的系统性不足

现行预防性维护存在三大显著盲区:其一,监测手段单一,当前主要依赖红外测温(精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$)和人工巡检,这种监测方式难以捕捉设备早期微弱的放电现象。例如,某机组在跳火前2小时,其振动频谱已出现10-15kHz的特征频段,然而这一异常却未被现有的监测系统所识别;其二,维

护周期过于僵化,以电刷检查为例,常规检查周期通常设定为 3 个月,但当环境发生突变时,如湿度骤降 20%,电刷的氧化膜可能在短短 48 小时内就完全被破坏;其三,备件管理粗放,不同批次的电刷硬度差异可高达 20HRC,若将不同硬度的电刷混合使用,会导致接触压力不均匀。比如,某电站就因误用了不同硬度的电刷,致使环面磨损量相差达 3 倍。

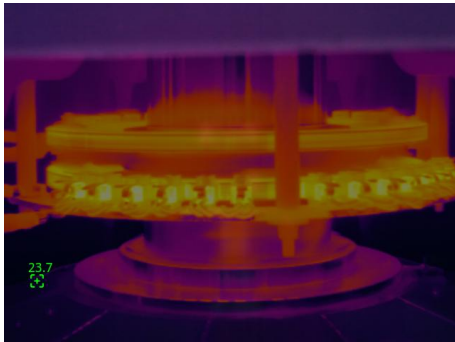


图 1 红外夜视仪监测集电环发热图

3. 优化改进技术创新方向

3.1 维护体系升级

数字孪生系统:建立集电环-电刷系统数字模型,融合运行数据(如电流、温度、振动)进行寿命预测。某电站应用 I-Brush 智能碳刷监控系统后,通过集成可以感知温度、压力、电流、振动等参数的新型智能碳刷单元,实现对碳刷重要运行参数的无线传输、实时监测和智能预警,大大减少非计划停机次数。



图 2 I-Brush 智能碳刷系统人机界面图



图 3 I-Brush 智能碳刷单元

3.2 材料工艺突破

新型 DJ1487 碳刷:常用的碳刷主要以电化石墨碳刷为主,某水电站原碳刷牌号为 D172,磨损速度较快。通过技术升级后应用新牌号 DJ1487 碳刷,耐磨性明显提高,能更好地传导电流,降低电阻,减少能量损耗,在高负荷、高转速的运行条件下表现可能更为稳定。

3.3 结构设计革新

碳粉回收装置:在刷架下方安装旋风分离器,配合负压吸附系统(可利用现有大轴中心补气装置形成的负压),实现碳粉回收功能。

状态检修策略:制定动态维护周期表,当电刷接触电阻超过 50 μΩ 或碳粉厚度超过 0.3mm 时,自动触发维护流程。

自清洁刷握系统:在刷握底部增设脉冲气流装置(0.4MPa,脉冲频率 1Hz),利用压缩空气周期性清除碳粉。

综合以上三个创新方向,某电站开展适合实际的 QC 课题研究,通过试验数据验证优化改进的可行性。

4. 结论与展望

本文针对水轮发电机集电环跳火故障,从故障机理、传统处理局限及优化改进技术三个方面展开系统研究。通过分析电刷压力不均、弹簧失效、材质缺陷、机械振动及环境粉尘等多维度成因,揭示了跳火故障的阶段性演化规律。结合实际案例,提出了调整电刷压力、更换“U”型压簧、优化碳刷材质与引入智能碳刷监测系统等针对性处理策略,并创新性地提出了碳粉回收装置、状态检修策略及自清洁刷握系统,显著降低了碳粉堆积与电弧风险。材料工艺方面,新型 DJ1487 碳刷应用提升了耐磨性与抗电弧能力,智能电刷单元实现了实时监测与预警。维护体系升级后,数字孪生系统与非计划停机次数减少 80%。实际工程验证表明,优化方案使环面温度降低、碳粉生成量减少,故障预警时间提前 24 小时以上,年维护工时减少 60%,对保障水电站安全运行具有重要参考价值。

[参考文献]

[1]艾永俊,谢建红,卢坤.水轮发电机集电环跳火故障机理分析及处理技术[J].云南电力技术,2024,52(05):27-32.
[2]江浩.浅谈发电机滑环碳刷系统常见故障原因及应对措施[J].科技风,2020(19):1.DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.202019117.
[3]王锦涛.水轮发电机组集电环表面膜的形成及其对面损伤特性的影响[D].三峡大学,2023.
[4]权成刚,王俊峰.660MW 发电机碳刷过热损坏处理经过及原因分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(6):2.

[5]张伟.汽轮发电机集电环和碳刷维护[J].科技创新导报,2020,17(2):2.DOI:CNKI:SUN:ZXDB.0.2020-02-042.

作者简介:陈岩,男,1986 年 5 月 17 日出生,内蒙古兴安盟,电力高级工程师,现就职于内蒙古引绰辽济供水有限责任公司,主要从事水利水电工程建设和电力系统及自动化的技术管理工作。