

发电机励磁系统常见故障原因及处理措施

王子鑫

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘要】：发电机励磁系统承担端电压调节、无功功率分配及运行稳定控制任务，其工作状态直接影响机组并网质量。实际运行中，整流元件损坏、自动调节器异常、转子回路接触不良、检测信号失真及保护逻辑误动等问题较为常见，容易引起励磁电流波动、机端电压偏移甚至失磁停机。依据故障现象建立分层检测流程，对功率回路、控制回路、信号通道及保护单元实施分类诊断，并采用元件更换、参数校准、回路紧固、逻辑优化及定期试验等措施，可提高故障定位准确性，缩短停机处理时间，增强励磁系统运行稳定性。

【关键词】：发电机；励磁系统；故障诊断；处理措施；运行稳定

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.037

引言

励磁电流一旦出现异常，发电机端电压、无功功率及系统稳定状态会迅速发生变化，轻则造成电压波动、功率分配失衡，重则触发失磁保护或机组解列。励磁系统由功率整流、自动调节、信号检测、转子回路及保护控制等部分构成，各环节联系紧密，单一参数偏差可能沿控制链路持续放大。现场故障还存在现象相近、原因交叉、间歇发生等特点，仅凭报警信息或经验判断容易出现误判。准确掌握励磁电压、励磁电流、触发脉冲及保护动作之间的变化规律，能够明确故障所在层级。基于运行数据、回路测试及部件状态实施分类排查，再匹配相应检修措施，是提升励磁系统故障处理效率、减少重复停机的重要技术路径。

1 励磁系统运行结构及故障识别基础

1.1 功率整流单元运行特征

功率整流单元承担交流励磁电源向直流励磁电流转换的核心任务，通常由整流变压器、可控硅桥、均流支路、脉冲触发回路及冷却装置共同构成。运行过程中，可控硅导通角决定直流输出幅值，桥臂电流分配状态直接反映整流元件的一致性与支路健康水平。正常工况下，各桥臂电流偏差应保持在允许范围，输出电压波形连续，纹波系数稳定，器件结温及散热风量符合设计要求。若出现单桥臂电流突降、整流输出脉动增大、熔断器动作或局部温升异常，通常表明可控硅击穿、触发脉冲丢失、均流参数漂移或冷却能力下降。结合智能传感、在线测温及波形特征识别，可提高早期缺陷发现精度。

1.2 自动调节单元控制机理

自动调节单元依据机端电压、无功功率、励磁电流及系统频率等信号形成闭环控制，通过偏差比较、比例积分调节、限制逻辑运算及脉冲生成，实时改变整流桥导通状态。正常运行时，电压调节通道保持机端电压稳定，无功调节通道协调并列机组间负荷分配，过励限制、欠励限制及伏赫限制共同约束励磁输出边界。控制器内部采样周期、滤波参数、增益系数及逻辑

切换条件直接影响动态响应速度。参数设置不当可能造成调节振荡、响应迟缓或限幅提前，信号采集偏差还会引发错误调节^[1]。采用双通道冗余、数字模型校核及自诊断算法，可实现调节器故障隔离、通道无扰切换及控制参数动态修正。

1.3 故障信号判别参数构成

故障信号判别应建立由电气量、控制量、状态量及保护量组成的多维参数体系。电气量包括机端电压、励磁电压、励磁电流、转子电阻及无功功率，可用于判断失磁、过励、转子接地及输出异常；控制量包括给定值、调节偏差、触发角、脉冲宽度及限制器动作状态，可用于定位调节器或触发回路故障；状态量涵盖整流柜温度、风机转速、熔断器状态、通信质量及电源模块电压，可识别器件老化和辅助系统失效；保护量记录报警顺序、动作时标及通道切换信息，可还原故障演变过程。引入趋势分析、参数关联及故障特征库后，可减少单一阈值判断造成的误报，提高故障类型识别及根因定位能力。

2 励磁系统典型异常表现分析

2.1 励磁电流波动异常表现

励磁电流波动通常表现为数值周期性起伏、突升突降或长期偏离稳定区间，变化幅度会直接影响发电机无功输出及转子热状态。轻微波动多伴随调节偏差增大、触发角频繁修正及整流输出纹波上升，持续发展后可能出现转子温度升高、无功功率摆动和机组振动加剧。波动频率较高时，通常反映控制信号抖动、采样噪声放大或触发脉冲不稳定；波动频率较低时，可能同调节参数失配、冷却状态变化或负荷扰动传递有关。数字化监测可将励磁电流趋势、频谱特征、调节指令及温升数据进行关联，识别异常波动的持续时间、重复周期和影响范围，为后续故障分层定位提供准确依据。

2.2 机端电压偏移异常表现

机端电压偏移主要表现为电压持续偏高、偏低、恢复迟缓或负荷变化后出现明显过冲。偏高状态容易导致定子绝缘承受额外电应力，并推动无功输出超出合理区间；偏低状态会削弱

发电机并网稳定性,严重时可能触发欠压、失磁或系统振荡相关保护。电压指令同实际值之间长期存在偏差,通常伴随自动调节器输出饱和、限制环节提前介入或测量通道反馈失真。若偏移仅出现在负荷突变阶段,说明动态调节能力不足;若稳态运行仍无法恢复额定水平,则需关注给定值异常、采样比例偏差及励磁功率不足^[2]。依托在线趋势识别和多源数据比对,可区分暂态扰动、测量误差和持续性硬件故障。

2.3 保护动作失常异常表现

保护动作失常包括拒动、误动、动作延迟及告警顺序异常,直接削弱励磁系统故障隔离和机组安全防护能力。拒动状态下,过励、欠励、转子接地或整流桥异常未能及时切除,故障能量持续积累,可能扩大器件损伤范围。误动状态多表现为励磁参数尚处正常区间,保护却提前发出跳闸或通道切换指令,造成机组非计划降负荷。动作延迟通常同采样刷新速度、逻辑判断时间、继电器响应性能及通信链路拥塞有关。告警时序紊乱则会干扰故障回溯,使原因判断偏离实际演变过程。采用保护定值在线校核、动作时标统一、逻辑仿真及事件顺序记录技术,可提升保护信息的完整性和判别可信度。

3 常见故障形成原因分类诊断

3.1 整流元件损坏成因判断

整流元件损坏通常由电流冲击、散热恶化、触发异常及器件老化共同引起。可控硅长期承受过电流或反向过电压时,内部结区容易发生热击穿,表现为桥臂输出不平衡、熔断器动作及局部温升突增。冷却风道堵塞、风机转速下降、散热器积尘会削弱热量传递,使器件结温持续接近极限值,加快绝缘材料及焊接界面劣化。触发脉冲幅值不足、相位偏移或同步信号失真,会造成元件导通不完整,形成电流集中和附加损耗。诊断过程需比对桥臂电流、器件压降、脉冲波形及温度分布,结合寿命趋势评估区分突发性损坏和渐进性退化。

3.2 调节器控制失灵原因定位

调节器控制失灵多源于采样通道偏差、控制参数漂移、运算模块异常及通道切换失效。电压互感器二次回路接触不良、信号隔离模块性能下降或模数转换精度降低,会使反馈量偏离真实工况,导致调节器持续发出错误励磁指令^[3]。比例、积分及限幅参数设置失衡,容易引起响应迟缓、输出振荡或调节饱和。处理器电源波动、程序数据丢失、通信时延增大,也会破坏控制指令连续性。原因定位应按照输入采样、逻辑运算、输出脉冲及备用通道切换顺序逐级核验,并通过离线仿真和在线数据镜像复现异常过程,缩小故障范围。

3.3 转子回路异常根源查验

转子回路异常主要涉及绕组绝缘下降、接头接触电阻增大、滑环电刷状态恶化及回路接地。转子长期承受热应力、离心力和电磁振动后,绕组绝缘可能出现局部裂纹或层间损伤,

造成泄漏电流上升。引线接头松动、焊点老化及连接面氧化会增大回路电阻,引发局部发热和励磁电流损失。滑环表面烧蚀、电刷压力不均、刷握卡涩会造成接触电弧和电流脉动。查验时需综合开展绝缘电阻、交流阻抗、直流电阻及接地电压测试,并结合红外测温、振动特征和历史趋势数据判断异常位置及发展程度。

4 故障类型对应处理措施构建

4.1 功率回路故障处置方法

功率回路故障处置应依据整流桥输出、电流分配、器件温升及冷却状态实施分级处理。确认可控硅击穿、开路或导通异常后,应隔离故障桥臂,核对型号、耐压等级、额定电流及触发电特性,再完成同参数器件更换,避免元件特性差异引起支路失衡。熔断器动作需同步检查短路点、吸收回路、均压电阻及连接端子,不能仅恢复熔断器投入。针对桥臂电流不均,应校验触发脉冲相位、均流参数和母排接触电阻,并对氧化连接面实施清洁紧固。冷却能力不足时,应清理风道、检修风机、校核风量及温度开关动作值。处理结束后开展静态绝缘、低压触发、空载升压和带负荷试验,利用数字化监测平台连续跟踪纹波、温升及桥臂电流变化,确认功率回路恢复稳定输出。

4.2 控制信号故障修复方法

控制信号故障修复需按照信号采集、隔离转换、逻辑运算和指令输出的传递链逐段核查。采样值偏差应先校验电压互感器、电流互感器二次回路及端子接触状态,再利用标准信号源比对隔离模块和模数转换通道精度,对漂移超限部件实施更换或重新标定^[4]。同步信号紊乱时,应检查频率跟踪、相位锁定和脉冲整形环节,修正相位偏差及脉冲宽度。调节器参数异常需调取历史配置,对比例增益、积分时间、限幅值及切换条件进行一致性校核,禁止未经验证直接修改运行参数。通信链路故障可通过端口检测、报文比对及冗余通道切换恢复数据连续性。修复后应开展阶跃响应、通道切换、负荷扰动及故障模拟试验,并建立参数版本管理和在线自诊断机制,降低重复性信号故障发生概率。

4.3 保护逻辑故障校正方法

保护逻辑故障校正应以定值准确、判据完整、时序一致及出口可靠为核心。误动问题需复核保护输入量、滤波时间、动作阈值及逻辑闭锁条件,排除采样波动、定值边界过窄和多信号竞争引发的错误出口。拒动问题应检查判据组合、延时环节、出口继电器及跳闸回路连续性,确保故障量达到整定条件后能够按时执行。动作顺序异常时,应统一控制器、保护装置及监控系统时钟,修正事件记录时标偏差,恢复故障链条的可追溯性。定值调整须结合发电机容量、允许励磁范围、系统运行方式及设备耐受水平完成计算校核,并经过仿真验证和审批后投入。校正完成后实施过励、欠励、失磁、转子接地及通道切换

试验,核验报警、闭锁、切换和跳闸全过程,利用数字孪生模型持续比对实际动作结果。

5 处理成效检验及稳定管控机制

5.1 励磁参数恢复状态检验

励磁参数恢复状态检验应覆盖稳态精度、动态响应及负荷适应能力。故障处理完成后,需连续核对机端电压、励磁电流、励磁电压、无功功率和触发角变化,确认各项指标恢复至额定范围。负荷升降过程中,应重点观察调节偏差、超调幅度、稳定时间及桥臂电流均衡程度,判断控制链路是否存在迟滞或残余波动。温升、纹波和限制器动作状态需同步纳入趋势分析,防止参数表面恢复而内部缺陷持续存在。依托在线监测平台建立处理前后参数对比曲线,可准确识别性能改善幅度,为设备状态评价和后续检修周期调整提供依据。

5.2 保护动作可靠程度核查

保护动作可靠程度核查应从定值匹配、逻辑判据、动作时序和出口执行四个层面展开。核查过程需对过励、欠励、失磁、转子接地及整流异常等保护项目实施信号注入和逻辑联动试验,确认报警、闭锁、通道切换及跳闸指令符合整定要求^[5]。事件记录时标、采样精度和出口继电器响应时间应同步校验,

避免动作链条中出现延迟、遗漏或顺序错位。试验结果需同仿真数据和历史故障记录进行交叉比对,识别定值边界过窄、逻辑条件缺失及通信延时问题,并形成保护可靠性评价记录。

5.3 检修闭环管理机制建立

检修闭环管理机制应贯通缺陷发现、原因诊断、措施执行、结果验证及资料归档全过程。每项故障需建立唯一编码,完整记录异常参数、报警信息、检查过程、更换部件、试验结果及责任节点,形成可追溯的设备健康档案。重复故障应启动根因复核,分析检修质量、备件性能、运行方式及环境条件之间的关联,避免单纯更换部件后再次发生。数字化平台可依据故障频次、温升趋势和器件寿命生成维护优先级,推动定期检修向状态检修转变。闭环记录还应纳入技术复盘和标准更新,使成熟处置经验转化为检修规程、试验项目及风险预警规则。

6 结语

发电机励磁系统故障具有多环节关联和渐进演化特征,需依据励磁电流、机端电压、触发脉冲及保护信号实施分类诊断。强化功率回路修复、控制参数校准和保护逻辑核验,能够提高故障定位精度。配合在线监测、状态检修及闭环档案管理,可及时识别器件退化,减少故障重复发生,保持励磁调节性能和机组运行稳定性。

参考文献:

- [1] 张鹏林,张勇,刘梅,等.大型发电机励磁系统中电刷—刷握滑动电接触特性的作用机理与运行影响[J].炭素,2025,(4):21-24.
- [2] 汤雪飞.发电机励磁系统的智能化发展路径探究[J].张江科技评论,2025,(9):38-40.
- [3] 安冠豪,许丰,张旭旭.励磁系统对发电机动态稳定性的影响及优化策略研究[J].电子元器件与信息技术,2025,9(9):54-56.
- [4] 付春男.火电厂发电机励磁调节系统故障诊断与优化研究[J].中国机械,2025,(20):72-75.
- [5] 陆青卓.基于云计算的发电机励磁系统故障检测系统设计[J].电气技术与经济,2025,(6):304-306+311.