

发电机励磁系统异常运行分析及处理策略研究

王晓华

贵州乌江水电开发有限责任公司大龙分公司 贵州 铜仁 554000

【摘要】：同步发电机有刷励磁系统是机组安全稳定运行的核心，运行状态直接影响机端电压与无功功率调节。结合实际电厂运行案例，分析其核心部件构成与工作机理，梳理电刷-滑环回路故障等常见异常及递进表征，从设备本体缺陷、运行工况匹配、外部环境影响及维护检修缺失四个维度剖析成因，提出分级应急处理、日常运维、标准化检修及长效防控的综合策略。科学运维管理与隐患治理可降低异常发生率，为发电机组长周期安全经济运行提供可靠支撑。

【关键词】：发电机；有刷励磁系统；异常运行；成因分析；防控策略

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.010

引言

同步发电机励磁系统是机组能量转换与运行调控的关键，承担建立转子旋转磁场、维持机端电压稳定、调节无功功率的核心功能，运行可靠性关乎整个电力系统安全稳定。有刷励磁系统结构简单、成本较低，在各类同步发电机中应用广泛，受部件磨损、工况波动、环境影响及运维水平等因素制约，易出现电刷冒火、滑环烧蚀等异常，处理不及时会升级为环火、设备烧损等严重故障，导致机组紧急解列，造成重大经济损失。研究其异常运行规律、剖析成因并制定针对性防控措施，对提升机组运行可靠性、减少故障停机时间具有重要工程实践意义。

1 发电机励磁系统基本组成与工作原理

1.1 励磁系统核心部件构成

同步发电机有刷励磁系统以滑环、电刷、刷握、恒压弹簧、绝缘隔板及同轴冷却风机为核心构成，滑环与机组转轴刚性固定，传导励磁电流从静止部件至旋转励磁绕组，表面运行中形成的氧化膜兼具限流与润滑作用，能降低滑动磨损与电刷抖动噪声^[1]。电刷主要材质为天然石墨与电化石墨，电阻系数决定适配工况，同一滑环回路不可混用不同型号、不同厂家批次产品，防止接触电阻离散引发均流失衡。恒压弹簧为电刷提供稳定接触压力，压力值需匹配电刷性能，且同极各弹簧压力保持一致。冷却风机多采用同轴离心结构，抽吸滑环室热量与刷末粉尘，经专用风道排至厂外，维持滑环与电刷接触面洁净及温度稳定，是有刷励磁回路可靠运行的关键辅助部件。

1.2 励磁系统运行工作机制

有刷励磁系统由静止侧励磁电源输出直流电流，经刷架、电刷与滑环滑动接触，将励磁功率持续送入发电机转子励磁绕组，建立恒定旋转磁场，实现机端电压建立与无功功率调节。正常运行时，滑环表面氧化膜保障接触电阻稳定，恒压弹簧维持电刷与滑环贴合压力，冷却风机持续带走摩擦热量与碳粉，各并联电刷按接触电阻均衡分配励磁电流，使滑环温度、电刷电流与振动参数处于设计区间。电刷压力、接触面状态、回路

电阻或机组振动发生偏离，电流分配失衡会触发局部过热、火花等异常，未及时干预将逐步劣化，引发环火、烧损等严重故障，威胁机组安全稳定运行（见图1）。

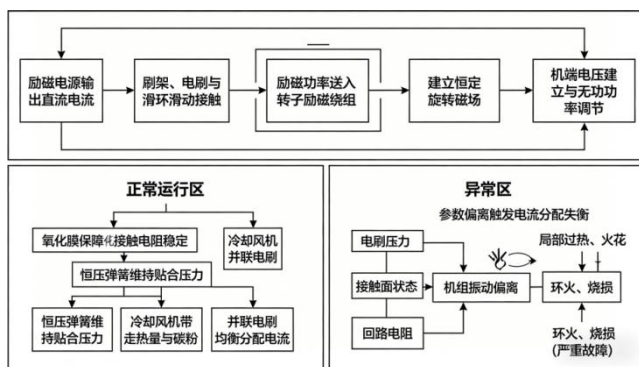


图1 励磁系统运行工作机制

2 发电机励磁系统异常运行类型与典型现象

2.1 励磁系统常见异常类型

有刷励磁系统异常以电刷-滑环回路故障为主，涵盖电刷冒火、过热、碎裂、卡涩、刷辫烧断、均流严重失衡，滑环表面烧蚀、脏污、氧化膜破坏，恒压弹簧压力失效、绝缘隔板碳化击穿，冷却风机风量不足、滤网堵塞导致散热恶化，以及轴系振动引发的电刷共振、接触断续等类型。电气回路异常包括励磁电流异常波动、无功出力不稳、转子一点/两点接地报警等，电刷局部冒火是最早期、最普遍的异常形态，处理不当会快速升级为环火事故。

2.2 异常运行典型表征

异常运行具有清晰递进式表征，初期电刷与滑环接触面出现点状、线状微弱火花，伴随轻微振动，红外测温可发现单块电刷温度接近80℃阈值。中期火花扩大为面状飞溅，电刷在刷握内颤动加剧，接触面呈花边状磨损，刷辫与引线接头发热变色，绝缘套出现焦黄痕迹，同极各电刷电流偏差可达数倍，均流度严重超标^[2]。后期形成贯通性环火，滑环表面出现电灼伤麻点与沟槽，刷握、绝缘隔板烧熔碳化，励磁回路绝缘急剧下降，触发转子接地保护动作，伴随机组振动增大、无功大幅波

动,某电厂#5机组曾在负极滑环出现严重环火后,短时间内相继触发转子一点接地、两点接地信号,最终被迫紧急解列停机,设备损坏范围广、修复周期长。

3 发电机励磁系统异常运行成因分析

3.1 设备本体缺陷引发异常

本体缺陷是异常根源性诱因,决定励磁系统运行的基础可靠性。电刷作为电流传导核心接触部件,材质混合不均、电阻系数离散性大,或压制过程中密度存在偏差,会导致与滑环的接触电阻极不稳定,引发局部电流集中。恒压弹簧长期运行易出现弹性衰减、压力分布不均,或因粉尘卡滞无法正常伸缩,破坏电刷与滑环的贴合紧密性,造成接触不良。滑环加工精度不足,圆度超标、表面粗糙度不符标准,或安装时存在轴向偏斜,会使电刷与滑环的接触间隙呈周期性变化,加剧磨损与接触不稳定。绝缘隔板材质劣化、爬电距离不足,在厂房粉尘堆积与潮湿环境双重作用下,易发生沿面放电,进一步恶化绝缘性能。某电厂#3机组因碳刷本身结构与质量缺陷、弹簧压力不均,叠加表面脏污,初期仅出现轻微打火,短时间内便快速扩展为大面积烧损,导电板、环氧隔板与滑环均出现不同程度损伤,直接暴露设备本体质量与部件匹配性缺陷对励磁系统的致命影响(见图2)。

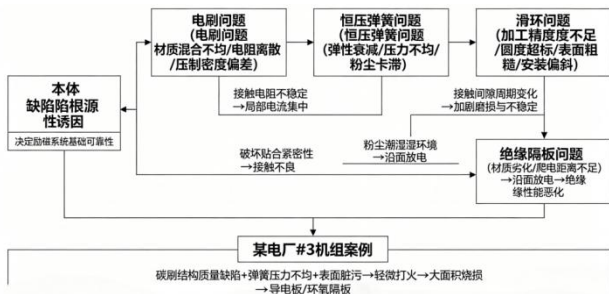


图2 设备本体缺陷引发异常

3.2 运行参数与工况匹配不当

运行参数与机组工况的匹配合理性,影响励磁系统运行稳定性,匹配不当会显著加剧异常发生概率。励磁电流、无功出力与机组负荷需保持动态平衡,机组处于高无功运行工况时,励磁电流随之增大,超出电刷设计电流密度阈值,会直接接触发碳刷负温度特性,形成恶性循环。碳刷温度升至80—100℃时,接触电阻降至最低,导致电流进一步集中,温度持续攀升,超过150℃后,接触电阻急剧增大,形成“过热—过流—更过热”的连锁反应,加速电刷损坏。机组轴系振动通过转轴传递至滑环,使滑环与电刷相对位置发生瞬时变化,改变接触电阻,造成各并联电刷间电流频繁重分配,严重时引发电刷与刷握共振,导致碳刷断股、电刷碎裂。某电厂多起实际事故数据显示,高负荷、高励磁电流工况下,电刷均流恶化速度较正常工况显著加快,局部过热与冒火概率成倍增加,印证运行参数与工况

匹配不当是励磁系统异常升级的重要推手。

3.3 外部环境及辅助系统影响

外部环境条件与辅助系统运行状态,降低励磁系统运行裕度,是异常发生的重要外部诱因。发电机厂房长期处于高温高湿环境,空气中水汽与粉尘大量附着于滑环与电刷表面,会增大接触电阻,引发局部放电现象,加速接触面氧化膜破坏。粉尘堆积会堵塞电刷与刷握间隙,导致电刷卡涩,进一步恶化运行状态。冷却风机作为励磁系统关键辅助部件,出现电机故障、叶片损坏,或滤网长期未清理导致堵塞、风道不畅,会使滑环室摩擦热量与电刷磨损产生的刷末无法及时排出,导致接触面温度快速上升,造成氧化膜异常脱落或过度增厚,破坏接触稳定性^[3]。某电厂夏季高温时段,机房环境温度持续维持在35—40℃,期间连续发生2台机组滑环碳刷环火事故,导致刷辫大量烧断、刷握熔蚀,设备损坏严重,证实高温环境与散热辅助系统失效会大幅降低励磁系统安全阈值,使轻微隐患快速演变为重大故障。

3.4 维护检修不到位导致异常

维护检修不到位是励磁系统异常发生与扩大的关键人为因素,诸多隐患源于运维流程不规范、巡检不到位。电刷更换过程中,新电刷未按标准工艺研磨出与滑环匹配的圆弧面,或单次同极更换数量超过3块,会导致初始接触面积不足,接触电阻过大,引发局部过热。日常运维中,未定期用专用工具检测恒压弹簧压力,未及时更换弹性衰减、压力超标或卡滞的弹簧,会造成同极各电刷压力不均,引发均流失衡与接触不良。未按周期用红外测温仪测量电刷温度、用钳形电流表检测均流度,无法在电刷温度达到80℃预警点时及时干预,会导致负温度效应恶性循环失控。滑环与刷架表面清扫不及时、粉尘清理不彻底,刷握卡涩未及时处理,引线接头紧固不到位等,都会埋下安全隐患。

4 发电机励磁系统异常处理与防控策略

4.1 异常运行应急处理措施

针对励磁系统异常运行,需制定分级应急处理措施,快速遏制故障发展,避免损失扩大。发现电刷冒火、过热等早期异常,运维人员立即赶赴现场,用红外测温仪定位过热电刷,用钳形电流表检测各电刷电流分布,明确过流、过热具体部位。检查异常电刷在刷握内的抽动灵活性,清除刷握内粉尘与异物,更换压力失效的恒压弹簧,确保电刷与滑环贴合紧密^[4]。均流偏差较大的电刷回路,通过微调恒压弹簧压力实现电流均衡分配,同步用洁净白布轻轻擦拭滑环表面,去除粉尘与氧化杂质,恢复接触面良好状态。处理期间,适度降低发电机无功出力,减小励磁电流密度,从源头遏制火花扩展。火花快速发展为局部环火趋势,立即降低机组有功负荷,加大冷却风机风量强化散热,上述措施仍无改善,果断申请机组解列停机,避

免烧损范围扩大至滑环、刷握及绝缘部件（见图3）。

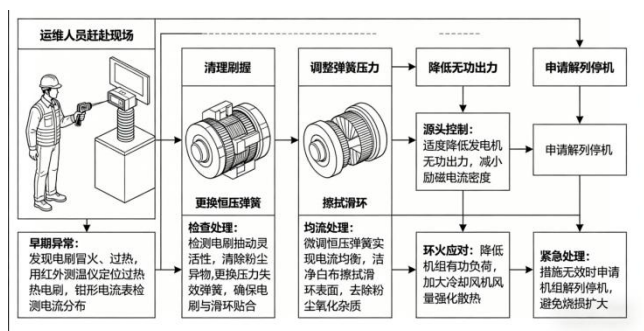


图3 异常运行应急处理措施

4.2 日常运行维护优化策略

优化日常运行维护策略，是防范励磁系统异常的关键，需聚焦关键参数与设备状态，实现精细化运维。日常巡检中，运维人员重点检查滑环—电刷接触面有无火花，电刷是否振动、卡涩，刷辫是否完整无破损，引线接头有无发热变色。监测冷却风机运行状态，检查风量是否正常、滤网是否清洁，确认转动部件与固定部件无碰磨，避免机械摩擦引发异常。定期用红外测温仪监测电刷与滑环温度，单块电刷温度达到80℃，立即调整并联电刷压力分配，均衡各电刷电流，阻断负温度效应恶性循环。每周用钳形电流表检测同极各电刷电流，确保分配均匀，及时处理偏差超标情况。定期检查恒压弹簧安装位置是否牢靠、电刷尾部绝缘垫是否完好，防止弹簧分流导致烧损。建立完善维护台账，记录电刷磨损量、弹簧压力值、均流数据与温度变化趋势，通过数据对比分析，实现异常早发现、早处置，将故障隐患遏制在萌芽阶段。

4.3 设备检修与隐患治理方案

设备检修与隐患治理是消除励磁系统本体缺陷、提升运行可靠性的核心手段，需严格执行标准化检修工艺，全面排查各类隐患^[5]。电刷更换环节，严格控制单极单次更换数量不超过3块，新电刷需通过专用工具研磨，使接触面与滑环圆弧面完全匹配，研磨磨合后用洁净白布擦拭表面，去除残留硬粒，防止磨损滑环表面。全面检测所有恒压弹簧压力值，更换弹性衰

参考文献:

[1] 刘超.发电机励磁系统改造及调试研究[J].电气技术与经济,2025,(11):178-181.
 [2] 王逸雪.燃气轮机励磁系统灭磁开关故障原因分析与处理[J].机电信息,2025,(22):68-71.
 [3] 夏永洪,周琳,王名名,等.混合励磁发电机谐波无刷励磁系统设计研究[J].电机与控制学报,2023,27(06):73-84.
 [4] 黄辉宇.三次谐波无刷混合励磁同步发电机设计研究[D].南昌大学,2023.
 [5] 裘迪林,王宗云,陈芬球.带副绕组无刷励磁水轮发电机系统的研发与应用[J].小水电,2022,(06):43-46.

减、压力超标或卡滞的弹簧，确保同极各弹簧压力一致，保障电刷接触稳定性。检修滑环表面，用专用打磨工具处理轻微烧蚀痕迹，修复表面粗糙度与圆度，恢复合格氧化膜。清理绝缘隔板表面粉尘，修补碳化缺陷，恢复规定爬电距离，防止沿面放电。彻底清扫冷却风机、风道与滤网，校验风机风量，确保满足滑环室散热要求。紧固刷架与引线接头，消除接触不良隐患。结合机组等级检修，开展轴系振动测试与治理，调整转轴同心度，降低振动对励磁回路的传递影响，全面消除设备本体与安装过程中存在的各类缺陷。

4.4 长效安全防控保障措施

构建长效安全防控保障体系，是实现励磁系统长期安全稳定运行的根本支撑，需从制度、人员、技术、管理等多方面形成闭环管控。完善励磁系统运维规程，明确电刷选型、更换、研磨、压力检测与均流监测的具体技术标准，推行同厂家、同批次电刷集中采购与专用管理，杜绝不同型号电刷混用带来的隐患。加强运维人员专项培训，重点培训碳刷负温度特性、均流调整方法、火花分级判定标准与应急处置流程，提升运维人员的专业操作与应急处置能力。建立智能化状态监测机制，整合电刷温度、电流分布、轴系振动与火花图像等数据，通过数据分析实现异常智能预警，提前预判故障趋势。将励磁回路维护纳入机组检修重点项目，制定详细的检修计划、验收标准与回访制度，形成“检修—验收—回访”的闭环管理。

结语

发电机有刷励磁系统的异常运行是设备本体、运行工况、外部环境及人为运维等多因素共同作用的结果，异常发展具有明显的递进性，早期干预是遏制故障升级的关键。系统梳理励磁系统的组成与工作原理，明确各类典型的典型表征与成因，提出的应急处理、日常运维、设备检修及长效防控相结合的综合策略，可有效解决电刷—滑环回路故障等核心问题。实践证明，严格落实标准化运维与隐患闭环治理，能显著降低异常发生率。未来需进一步完善智能化监测体系，提升异常预警的精准度，持续优化防控策略，为发电机励磁系统长期安全稳定运行提供更坚实的保障。