# 火电厂发电机励磁系统常见故障分析与处理措施

孙 川
中国华电科工集团有限公司，北京 100000

[摘要]励磁系统完成机端电压调节、无功分配以及系统稳定支持等工作。随着运行年限的增长，调节器板卡老化、整流桥晶闸管劣化、滑环碳粉堆积和电压互感器回路异常等故障时有发生，轻者引起励磁参数波动，重者造成失磁或者转子接地保护导致机组非停。根据静止自励励磁系统的结构特点，把常见的故障分为起励建压异常、调节和整流单元故障、失磁和转子接地、过电压过电流、保护误动五类，分析成因机理和演化路径，结合行业典型案例，从运行干预、检修策略、预防性监测三个方面给出处置措施，突出 PT 慢熔判别逻辑完善、脉冲回路布线优化、碳粉油污周期性治理的工程效果，为火电机组励磁系统运维提供参考。

[关键词]火电厂；励磁系统；失磁保护；整流桥故障
DOI：10.33142/hst.v9i9.20645　　中图分类号：TM331　　文献标识码：A

# Common Fault Analysis and Treatment Measures for Excitation System of Power Plant Generator

SUN Chuan
China Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing, 100000, China

**Abstract:** The excitation system completes tasks such as terminal voltage regulation, reactive power distribution, and system stability support. With the increase of operating years, faults such as aging of regulator boards, deterioration of rectifier bridge thyristors, accumulation of carbon powder in slip rings, and abnormal voltage transformer circuits occur from time to time. Mild cases can cause fluctuations in excitation parameters, while severe cases can cause demagnetization or rotor grounding protection, resulting in non-stop operation of the unit. Based on the structural characteristics of static self-excited excitation systems, common faults are classified into five categories: abnormal excitation and voltage building, faults in regulating and rectifying units, demagnetization and rotor grounding, overvoltage and overcurrent, and protection misoperation. The cause mechanism and evolution path are analyzed, and combined with typical industry cases, disposal measures are proposed from three aspects: operation intervention, maintenance strategy, and preventive monitoring. The engineering effects of PT slow melting discrimination logic improvement, pulse circuit wiring optimization, and periodic treatment of carbon powder oil pollution are highlighted, providing reference for the operation and maintenance of excitation systems in thermal power units.

**Keywords:** thermal power plants; excitation system; demagnetization protection; rectification bridge fault

## 引言

励磁系统调节转子直流电流使机端电压保持不变，参加电网无功平衡和阻尼振荡抑制。火电机组一般采用静止自励方式，励磁变压器、可控硅整流桥和自动电压调节器是其功率和控制的主干线路。但是任何一个环节的劣化都会引起连锁反应，调节器内部板卡老化会造成励磁电压突降而触发失磁保护，PT 二次回路慢熔会造成调节器采样失真，误强励或者误减磁，整流桥晶闸管击穿会造成励磁输出失衡甚至整流柜烧损。以上故障的共性就是初期征兆隐蔽、发展迅速，运维人员如果缺少针对性的判别依据，就会错过干预的窗口。从故障机理入手梳理典型模式，结合现场可操作的处理手段提出预防措施，对降低励磁系统非停风险有直接的作用。

## 1 火电厂发电机励磁系统的组成与工作原理

火电厂发电机励磁系统以机端为电源起始点，经过励磁变压器降压后送入三相全控整流桥，由自动电压调节器（AVR）根据机端电压、定子电流和无功功率的实时采样值来调节晶闸管的触发角，输出可控直流电流通过滑环和

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

碳刷送到转子绕组。AVR 一般使用双通道冗余配置，当运行通道出现故障的时候会自动无扰切换到备用通道上。除了恒电压主调节功能之外，系统还设置了低励限制、过励限制、V/Hz 限制以及电力系统稳定器（PSS）等辅助环节，防止励磁电流越限，抑制低频振荡。灭磁回路和转子过电压保护一起完成故障工况下能量的释放以及绝缘的保护。从功率传递路径上看，励磁变压器高压侧接到发电机出口，低压侧通过交流母线分配到各个功率柜，整流后的直流经过灭磁开关和滑环进入转子[1]。由此结构决定了励磁系统故障的波及范围，整流回路出现异常会反馈到励磁变压器甚至机端电压上，转子侧接地故障主要影响励磁回路自身的绝缘安全。

## 2 火电厂发电机励磁系统常见故障及原因分析

### 2.1 发电机起励失败与电压建立异常

起励失败主要是由于初始阳极电压不能建立。发电机停机时间过长或者检修过程中消除转子剩磁之后，残压过低造成触发脉冲打开晶闸管时电流不能维持导通，整流桥不能有效地输出。这时如果初励电源有故障或者起励回路接触不良，建压过程就中止了。专利文献记载的判据是自起励时刻起 10s 内机端电压没有达到 0.08 倍额定电压，就判定起励失败并停止励磁输出。另外，同步变压器回路断线或者相位不正常也会造成触发脉冲和阳极电压失步，即机端电压处于较低水平并且调节无效。

### 2.2 励磁调节器及整流装置故障

调节器故障大多是由板卡老化、电源模块老化或者采样回路异常引起的。在某火电机组的故障案例中，由于环境温度和运行年限双重因素影响，使得励磁调节器内部元件性能逐渐下降，造成励磁电压、电流突然降低，发变组失磁保护动作跳闸。整流装置主要的功率器件是晶闸管，它有桥臂短路、不导通、脉冲丢失和误触发这几种故障。对三相全控整流桥仿真和现场波形进行对比，得出桥臂短路、脉冲丢失、提前导通等故障时励磁变压器副边电流波形存在较大差别，可以用来判定故障类型。脉冲电缆布线不合理时，相邻线芯间感应干扰会在晶闸管反向阻断期间产生误触发脉冲，造成漏电流持续增大，最终导致热失效而击穿[2]。一起同步调相机励磁系统事故溯源分析表明，脉冲输出线共用走线槽造成感应电压高达数千伏，门极长期受到干扰脉冲的冲击而损坏，最终引起相间短路。快熔熔断、整流桥超温报警常常是晶闸管老化前兆的信号。

## 3 火电厂发电机励磁系统典型故障分析

### 3.1 发电机失磁故障分析

失磁故障的直接表现就是励磁电流异常下降或者消失，发电机进入异步运行状态。从励磁系统角度来说，原因可以分为三类，分别是调节器通道故障造成励磁输出中断、PT 回路异常引起调节器误判机端电压而减磁、励磁电源回路断线。需要指出的是，PT 高压侧熔断器的慢熔状态是隐蔽的，当熔丝阻值缓慢增大时，调节器采样电压偏低，自动增大励磁以维持电压，如果这时运行人员手动切换通道或者减磁，叠加效应会使机组进入进相深度，引发失磁保护动作。部分厂家调节器的 PT 断线判据只对完全断线进行设计，对于慢熔工况没有有效的识别能力。对于某水电厂试运期间 PT 二次侧失压造成失磁保护拒动的情况，分析得出失磁保护和励磁调节器 PT 回路独立性不够是造成保护拒动的主要原因，改进措施为把调节器和保护用 PT 二次回路完全分开配置。另外，在进相运行试验中如果低励限制曲线和失磁保护阻抗圆配合不当，当励磁电流下降到限制动作区的时候，测量阻抗已经进入了失磁保护动作圆，造成限制还没有闭锁而保护先跳闸。

### 3.2 发电机转子接地故障分析

转子一点接地本身不会造成直接的危害，但是如果不及时处理，发展成转子两点接地以后就会引起转子磁场畸变、机组剧烈振动甚至转子本体烧损。接地点主要集中在滑环、碳刷处，碳粉在绝缘支架上堆积，受潮后形成导电通路，转子接地碳刷接触不良会造成注入式保护回路异常报警。生物质电厂转子接地跳机后，对转子进行抽转子检查可知，故障发生在励端绕组，残留物分析、绝缘性能测试都显示是由于长期运行中绝缘劣化积累所导致[3]。上海某燃机电厂两起转子接地保护报警的排查结果表明，1～3 赫兹低频方波注入式保护频繁报警的原因是接地碳刷接触不良，碳刷弹簧压力不够，造成注入信号回路阻抗间歇性增大，保护装置误判为接地电阻下降。另外，转子绕组端部积灰和油污一起会使绝缘电阻下降趋势加快。某百万千瓦机组因为碳粉油污堆积造成转子绕组绝缘下降并触发接地保护报警的案例中，解体检查发现碳刷电流严重不平衡，部分碳刷几乎不承载电流，集电环温度异常升高，清理后绝缘恢复。

### 3.3 励磁系统过电压与过电流故障分析

过电压主要是灭磁过程和强励退出时产生的。转子绕组有大电感特性，灭磁开关分断时磁场能量经氧化锌非线性电阻泄放，阀片老化或者回路接触不良造成能量泄放不畅，就会产生危及转子绝缘的过电压。过电流大多是由强励限制失效或者调节器误输出引起的，PT 采样异常偏低时，AVR 不断增大励磁以抬高电压，如果过励限制定值漂移或者没有及时介入，励磁电流就会超过允许范围。整


Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

流桥臂短路也会造成交流侧电流畸变和直流侧输出异常，严重时会造成快熔烧毁、整流柜退出。过励限制应先于过励保护动作，限制后励磁电流必须保持在保护定值以下并留有余量，否则暂态过冲仍会触及保护阈值。

### 3.4 励磁系统保护动作及机组跳闸故障分析

保护动作类故障具有复杂性，故障源头可以不在励磁系统之内，但是通过励磁回路表现出来。一起线路瓷瓶坠落造成接地故障的案例里，机端三相电压相位偏移传到励磁变压器同步信号侧，引起调节器脉冲故障而停止工作，励磁系统没有调节能力之后，转子过压保护和失磁保护相继动作，最终导致机组跳闸。由此可以看出，励磁系统保护配置要和发变组保护在时序上相协调，如果励磁调节器在系统扰动时就先退出，那么保护动作的连锁反应是不可避免的。调节器通道切换逻辑是否可靠，脉冲故障判据是否合理，都会直接影响到机组在受到外界干扰时能否保持稳定运行。表 1 给出典型的故障判别要点和处置方向。

表 1 火电厂励磁系统典型故障判别与处置要点

| 故障类型 | 主要成因 | 关键判别特征 | 核心处置方向 |
|---|---|---|---|
| 起励失败 | 剩磁不足、初励电源故障 | 10s 内机端电压低于 0.08 倍额定值 | 检查初励回路，确认残压水平 |
| 调节器故障 | 板卡老化、电源劣化 | 励磁电压电流突降，通道告警 | 通道切换，板卡更换 |
| 整流桥故障 | 晶闸管击穿、脉冲干扰 | 桥臂电流异常，快熔熔断 | 隔离故障桥，检查脉冲布线 |
| 失磁 | 调节器失效、PT 慢熔误判 | 励磁电流趋零，无功进相 | 核查 PT 回路，闭锁误减磁 |
| 转子接地 | 碳粉油污堆积、绝缘劣化 | 接地电阻下降，保护报警 | 清扫滑环，注入式保护校验 |
| 保护误动跳机 | 外部扰动传导、逻辑配合失当 | 脉冲故障与保护动作时序关联 | 优化判据，协调保护定值 |

## 4 火电厂发电机励磁系统故障处理与预防措施

### 4.1 起励异常及励磁调节故障处理

起励失败后首先要检查机端残压水平，残压很低时要检查初励电源回路和起励接触器触点的状态，残压正常但建压停滞时要检查同步变压器回路和触发脉冲回路。根据起励控制逻辑，当机端电压上升到小于 0.006 倍额定值的时候就应立即投入初励电源，防止整流桥全导通状态无效延长造成起励时间过长。调节器故障处理坚持先切换再排查的原则，确定备用通道工作正常之后，对故障通道的电源板、采样板、CPU 板逐级检查，依靠自诊断信息找到失效的板卡并予以更换。对于 UNITROL6800 这样的双通道调节器，在实际使用中会发现存在的隐患有，通道切换时出现跟踪误差超标造成切换失败的情况，解决措施应该包含对切换前跟踪偏差定期检测以及在切换逻辑里对延时参数进行复核。PT 慢熔问题要从逻辑上进行解决，把负序电压和电压变化率一起加入到 PT 断线判据里，并且定期用慢熔模拟装置来检验 AVR 的识别水平。

### 4.2 转子接地及失磁故障处理

转子一点接地报警发出后，立即检查滑环表面碳粉堆积情况和接地碳刷接触压力，用干燥压缩空气清扫绝缘支架，测量转子绕组绝缘电阻来判断是否具备继续运行条件。如果接地电阻一直下降，就要申请停机，防止出现两点接地。对于注入式保护频繁报警但是实际绝缘正常的工况，应该先检查接地碳刷和滑环的接触情况，而不是直接判定转子绕组故障；碳刷压力不够或者刷握卡涩都会造成注入信号回路阻抗异常，从而引起保护误判。失磁故障的处置关键在于区分真失磁和误判，即检查调节器励磁输出指令和实际励磁电流是否一致，如果指令正常而反馈消失，是功率回路断线或者碳刷接触问题；如果指令本身有误，就要从 PT 采样和调节器运算环节找原因。对因进相过深而触发失磁保护的工况，要重新检查低励限制曲线和失磁保护阻抗圆的配合情况，保证限制线在保护圆之前动作。

### 4.3 励磁功率单元与保护回路检修

整流桥检修主要做晶闸管特性和脉冲回路的检查工作，逐个测量晶闸管的正向阻断电压和反向阻断电压，特性偏移的晶闸管要更换掉，防止由于桥臂参数不对称而造成环流。脉冲回路检修要跳出只查通断的常规思路，采用每两芯一组屏蔽的脉冲电缆，使触发脉冲和返回电源在同一屏蔽层内成对布线，从物理上切断共模干扰耦合路径；脉冲线不得与主回路线、同步信号线共用走线槽。快熔更换时要核对额定电流和 $I^2t$ 特性，不能用额定值偏大的熔断器代替。灭磁回路检修时，对氧化锌电阻阀片做泄漏电流检测，性能变坏的整组更换。运行超过十五年的整流柜，应把晶闸管压装力和散热器接触热阻一起列入评价范围，压装力衰减造成的结温升高属于晶闸管早期失效的隐性诱因。保护回路校验要包含调节器和发变组保护之间信号传递部分，保证失磁保护、转子接地保护和励磁故障信号时序配合符合反措要求。

### 4.4 励磁系统运行监测与预防性维护

运行监测要涵盖电气量和非电气量两个方面。电气量上注意励磁电压和电流的稳态差值，无功功率的周期性波动以及调节器通道间的跟踪误差等异常情况都会出现在故障报警之前。非电气量中滑环室温度、碳刷磨损速率、碳粉沉积速度属于转子回路健康状况的敏感指标，需要定期进行检查并设置趋势告警阈值。碳刷电流分布的定期测量有明显的预警作用，单只碳刷电流偏离均值超过 30%

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

就说明接触压力或者刷握配合存在问题，持续偏差会导致个别碳刷过热碎裂，碎片引发滑环短路的风险大大增加。预防性维护周期应同机组检修计划相衔接，C 级检修时调节器板卡接插件紧固及电源模块性能检测，A 级检修时对整流桥晶闸管全部特性进行复测，对转子绕组实施交流阻抗和绝缘电阻全面检测。运行超过十年的励磁系统，对板卡、晶闸管的寿命管理应该由原来的故障后更换转变为基于状态的主动更换。

## 5 结语

火电厂励磁系统故障谱系具有明显的链式特征，起励环节的残压不足、整流环节的晶闸管劣化是渐进性的失效，有比较充分的预警窗口；调节器板卡突然故障、PT 慢熔引起的保护误动则是隐蔽性较强的故障，对运维响应的及时性要求较高。就处置策略的有效性而言，仅仅依靠故障之后的设备更换已经不能涵盖所有的风险，PT 断线判据的完善、脉冲回路布线的规范、碳粉油污的周期性治理等都是低成本且明显减少非停概率的工程措施。励磁系统可靠性的关键在于调节精度、功率输出和保护协调这三个方面的配合情况，任何一个方面存在缺陷都会使前期的运维投入失去作用。

[参考文献]

[1]靳阿妮.大型火电机组励磁系统故障分析研究[J].环境技术,2025,43(5):128-131.

[2]庞宏强.PT 失压导致发电机失磁分析及预防[J].电工技术,2024(1):109-111.

[3]汪伟.某生物质电厂发电机转子接地故障分析及处理[J].防爆电机,2025,60(1):75-78.

作者简介：孙川（1989—），男，宁夏中宁人，工程师，三峡大学电子信息工程毕业，现就职于中国华电科工集团有限公司，从事火电厂集控运行工作。


Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.