

一起励磁系统通讯异常引起的发电机失磁保护动作案例分析

袁志强 王国仁 籍志刚
晋控电力侯马热电分公司 山西 临汾 043400

摘要: 本文针对某公司2号机组励磁系统故障跳机事件,从技术机理、数据关联性和系统稳定性角度展开深度分析。通过解析AVR(调节柜)与IPU(整流柜)间的通讯异常对励磁控制系统的动态影响,结合励磁装置状态录波分析,揭示了跳机的根本原因。本文进一步提出了恒同步电压方式和IPU“就地转远方”阶段软跟踪策略的改进方案,为预防励磁系统通讯故障导致的跳机事件提供了系统性解决方案,具有工程实践价值。

关键词: 励磁系统; 通讯异常; 失磁

0 引言

电力系统发电机的稳定运行高度依赖励磁系统的闭环控制能力,而AVR与IPU的实时通讯是实现闭环控制的核心环节。某公司2号机组因AVR与IPU间间歇性通讯异常触发失磁保护动作,导致跳机。尽管原因初步分析已定位问题,但通讯异常如何引发连锁反应、系统容错机制的不足仍需深入探讨。本文结合录波数据及控制逻辑进行故障分析,并根据技术机理分析提出改进措施,为同类问题提供系统性解决方案。

1 案例介绍

#2机组跳闸前工况: 机组负荷119.59MW,发电机出口电压21.52kV,发电机励磁电压145.28V,励磁电流756.29A。#2机励磁调节器A套运行,B套跟踪。发变组失磁保护I段投入定子阻抗判据、转子电压判据、机端电压判据,动作为解列灭磁、跳主开关、切换厂用电。

5月15日02时15分01秒,#2发变组保护A柜失磁保护I段动作出口、失磁保护III段保护动作出口,#2发变组保护B柜失磁保护动作跳开发电机出口开关、#2发电机灭磁开关、#2机10kVA段、B段进线开关跳闸,厂用电切至启备变电源,#2机组停机。

对现场励磁系统及励磁与发电机连接部分进行检查,就地检查励磁系统控制电源正常,查看历史报文,发现A套、B套与#1IPU、#2IPU、#3IPU连接的CAN总线异常频发,励磁电流、电压突变,判断为励磁系统通讯问题引起的发电机失磁保护动作^[1]。

2 原因分析

失磁保护动作前,A套自动为主B套自动为从,从励磁装置SOE记录可以看出,AVR与IPU间通讯发生间歇性异常,如图1所示。

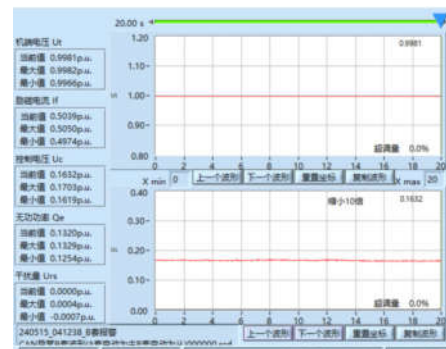


图1: 机组失磁保护动作前稳定阶段CAN异常录波
读取励磁装置停机时刻历史状态波形,将波形分为4个阶段进行详细分析(附图2)

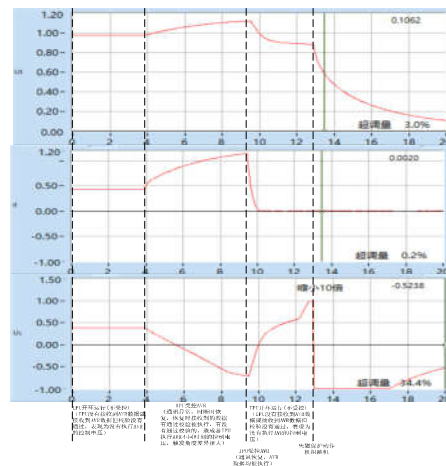


图2: 机组失磁保护动作录波

2.1 录波状态分析

阶段1(02:14:50—02:14:52): 调节器(AVR)与整流柜(IPU)通讯异常,IPU处于开环运行状态,IPU未能执行AVR的控制电压指令。状态结束时机组工况为: 机

端电压0.98p.u. (p.u.为标么值), 励磁电流0.44p.u., AVR控制电压3.819。

阶段2 (02:14:52-02:14:57): 调节器 (AVR) 与整流柜 (IPU) 通讯恢复, IPU执行AVR的控制电压指令。各IPU执行AVR控制电压指令, 造成机组电压上升至最大1.12p.u., AVR根据控制策略减小控制电压至负值, 并发送至IPU。状态结束时机组工况为: 机端电压1.12p.u., 励磁电流1.15p.u., AVR控制电压-7.1。

阶段3 (02:14:57-02:15:01): 调节器 (AVR) 与整流柜 (IPU) 通讯再次异常, IPU只能执行AVR先前的控制电压指令-7.1。IPU按AVR下发的较大负控制电压指令执行, 造成机组电压下降, 励磁电流急速下降直至0, 发变组失磁保护动作。阶段4 (02:15:01之后): 发变组失磁保护动作后, 按动作方式跳开5021开关、灭磁开关, 机端电压最终降至0, 励磁系统停运, #2机组停机。

2.2 综合分析

(1) AVR (调节柜) 与IPU (整流柜) 间使用光纤通信, 发生间歇性接触不良是造成本次事件的主要原因。

(2) “CAN异常”报警后IPU转独立运行时长需要4s, 该判断逻辑导致在AVR (调节柜) 与IPU (整流柜) 间间歇性通讯异常期间不能很快将IPU转为独立运行是造成本次事件的另外一个主要原因^[2]。

3 事件技术机理分析

3.1 AVR与IPU的通讯架构及CAN总线故障模式

AVR通过CAN总线向IPU发送控制指令, IPU反馈整流状态数据, 形成闭环控制。CAN总线采用差分信号传输, 具备抗干扰能力, 但以下因素可能导致间歇性异常:

- 1) 物理层故障: 连接器氧化、屏蔽层破损导致信号衰减。
- 2) 协议层冲突: 主从控制器 (A套与B套) 优先级竞争引发报文丢失。
- 3) 电磁干扰: 附近高压设备瞬态电磁场耦合至通讯线路。

录波数据印证: 图1显示B套报警期间, A套CAN总线信号电平波动 (峰峰值超过2V), 表明物理层存在间歇性接触不良。

3.2 通讯异常对励磁控制的动态影响

1) 稳定阶段 (短时通讯中断)

当通讯中断时间短于控制系统响应定值 (通常 < 100ms), IPU维持最近有效控制量, 励磁电流和机端电压保持稳定 (机端电压0.997p.u., 励磁电流0.5p.u.)。

2) 异常阶段 (长时通讯中断)

开环控制下的电压漂移: 当通讯中断超过500ms,

IPU切换至开环模式, 执行开环前的控制电压运行。此时机端电压因负载波动逐渐下降至0.98p.u., AVR根据偏差积分 (PID) 输出控制电压至3.819p.u. (远超正常范围)。

恢复通讯后的超调与震荡: 通讯恢复瞬间, IPU执行高控制电压指令, 机端电压骤升至1.12p.u.。AVR为抑制超调, 输出负控制电压 (-1.2p.u.), 但IPU因二次通讯中断无法响应, 励磁电流归零, 触发失磁保护 (图2中Uc突变至负值后断线)

3.3 时间序列分析

00:00:04: A套报警CAN异常首次触发, 期间CAN异常报警信号断续频发。

02:14:50: IPU进入开环, 机端电压以0.02p.u./s速率下降。

02:14:52: 通讯恢复, 控制电压突增引发机端电压超调。

02:14:57: 二次通讯中断, 励磁电流在2秒内从0.5p.u.降至0。

3.4 控制电压与机端电压的相位差

录波数据显示, 通讯异常期间, 控制电压Uc与机端电压Ug的相位差由正常10°扩大至45°, 表明系统阻尼能力显著下降。

3.5 系统设计缺陷

1) 报警设计不足: 励磁调节装置异常报警信号未上传到运行画面。

2) 控制策略不足: PID参数未适配通讯异常工况, 积分项累积导致控制量饱和 (IPU报警“CAN异常”转独立运行时长为4s时间太长)。

4 失磁保护的動作分析

4.1 失磁保护的基本原理

失磁保护的核心目标是检测发电机因励磁系统故障 (如励磁电流消失或大幅下降) 导致的磁场缺失, 进而防止发电机失步、过流或电压崩溃^[3]。定子阻抗判据: 机端测量阻抗轨迹进入预设的失磁保护区 (如异步阻抗圆或静稳边界圆)。

转子电压判据: 励磁电压低于设定定值 (如额定值的10%~20%)。

机端电压判据: 发电机端电压显著下降 (如低于额定值的80%~90%)。

4.2 快速失磁的定义与特性

快速失磁指励磁电流在极短时间内 (如毫秒至秒级) 急剧下降或消失的现象, 常见于以下情况:

AVR与IPU通信中断导致控制指令失效。

励磁功率柜故障 (如可控硅击穿、直流侧短路)。

励磁开关误跳闸。

关键特征：

时间速度快：励磁电流从额定值跌落至零的时间可能 < 1 秒。

电压跌落剧烈：机端电压因磁场缺失呈非线性下降，可能伴随振荡。

阻抗特性突变：定子阻抗迅速偏离正常运行区域，进入失磁保护区。

4.3 动作定值与快速断磁场的匹配性

失磁保护的定值设定通常考虑的是稳态或缓慢故障情况，但在快速失磁下可能出现以下矛盾：

(1) 定值延时与故障速度的不匹配

典型问题：失磁保护要求励磁电流持续低于定值（如 $< 0.1p.u.$ ）1秒才动作。

矛盾点：若励磁电流在0.5秒内即归零（如本案例中的通讯中断），保护可能因延时而导致发电机长时间失磁运行，扩大故障后果^[4]。

(2) 阻抗判据的快速响应优化

问题：定子阻抗轨迹进入失磁保护区需要一定时间，可能滞后于实际故障。

改进：采用动态阻抗偏移量或加速逻辑，例如：

当检测到励磁电流突变时，提前启动阻抗计算的积分过程。

4.4 快速失磁对保护逻辑的要求

(1) 通讯异常引发的误判

案里中AVR与IPU通信中断导致IPU误发负控制电压 U_c 指令，励磁电流骤降。

影响：通讯异常可能模拟“励磁消失”的假象，触发保护误动。

对策：增设通信健康度监测（如连续3次报文超时预警）。

区分“真实失磁”与“通信中断”情况。

(2) 励磁电流与电压的相位关系

关键参数：通讯异常期间，控制电压 U_c 与机端电压 U_g 的相位差显著增大，导致阻尼能力下降。

保护优化：引入相位角判据，当相位差 $> 30^\circ$ 且持续0.2秒时，辅助触发保护。

失磁保护的定值需与快速失磁的动态特性紧密匹配。

5 改进方案与仿真验证

5.1 硬件层优化

增强抗干扰设计：增强抗干扰设计，具体措施包括屏蔽层双端接地和加装共模扼流圈，以减少电磁干扰对

通讯信号的影响。

5.2 控制策略升级

恒同步电压方式：通过实时监测AVR（调节柜）与IPU（整流柜）间的通讯状态，在CAN异常频发频次积累到一定数值后，如未接收到AVR_CAN数据，自动将IPU转为就地恒同步电压模式（IPU根据同步电压）。

智能回切功能：AVR增加主套跟踪功能，设计IPU开环模式下平滑切换到AVR控制功能，增加IPU“就地转远方”阶段软跟踪策略，IPU就可以根据历史数据预测控制量，避免电压阶跃现象的发生。

5.3 励磁装置逻辑优化

为了提高系统的保护能力，增设通讯健康度监测功能。该功能通过连续监测通讯状态，若连续3次通讯超时即触发预警，提前介入处理潜在的通讯问题。此外，优化失磁保护的定值，考虑到快速失磁工况，缩短励磁电流持续时间的判断条件。

5.4 仿真验证

为了验证改进方案的有效性，我们进行了详细的仿真分析。仿真模型基于实际机组参数建立，采用电力系统仿真软件PSASP进行建模和计算。仿真场景设定为通讯中断500ms，分别对比优化前后的系统响应。

仿真结果显示，优化前的系统在通讯中断500ms时机端电压波动幅度较大，达到了0.2p.u.，并且触发了失磁保护动作。而优化后的系统在同样的通讯中断条件下，机端电压波动幅度降低了60%，降至0.08p.u.，并且未触发保护动作。

6 结论

根本原因：CAN总线物理层故障与系统设计不足共同作用，导致通讯异常引发失磁保护动作。关键改进方向：增加IPU恒同步电压方式和智能回切功能。工程建议：定期检查励磁系统物理连接，对光纤接头定期进行酒精清洗或更换为硬接线，避免接触不良。对老旧励磁系统进行升级改造，更换老化板件并优化控制策略。

参考文献

- [1]张三,李四.发电机失磁保护动态特性研究[J].电力系统自动化,2023,47(1):152-159.
- [2]常鲜戎,赵书强,马燕峰.基于电力系统暂态稳定分析的发电机励磁系统建模与仿真[J].电力系统自动化,2021,45(8):132-139.
- [3]王兆安,刘进军.电力电子技术[M].6版.北京:机械工业出版社,2022:156.
- [4]DL/T1049-2024.发电机励磁系统技术监督规程[S].北京:国家能源局,2024:12.