

分散控制系统电源无扰切换技术研究

李想

中国华电阜新金山煤矸石热电有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i8.21645

[摘要] 分散控制系统为流程工业核心控制设备,供电电压暂降与瞬时中断极易引发控制器复位、联锁保护误动等安全事故。本文阐述DCS交直流一体化供电架构与电源切换扰动机理,分析主流冗余供电切换方案现存弊端,设计直流有源耦合搭配交流同步预判的分层无扰切换策略。经试验测试与工程应用验证,优化方案切换精度与电压稳定性符合国家行业标准,能够有效提升控制系统供电可靠性,可为火电、化工行业DCS供电系统改造提供参考。

[关键词] 分散控制系统; 无扰切换; 冗余电源; 静态转换开关; 同步预判

中图分类号: TP273; TM762 **文献标识码:** A

Research on undisturbed switching technology for power supply in distributed control systems

Xiang Li

China Huadian Fuxin Jinshan Coal Gangue Thermoelectricity Co., Ltd

[Abstract] Distributed Control Systems (DCS) are core control equipment in process industries, and power supply voltage sag and transient interruptions are highly prone to triggering safety accidents such as controller resets and false activations of interlock protection. This paper expounds on the integrated AC/DC power supply architecture of DCS and the mechanism of power switching disturbances, analyzes the existing drawbacks of mainstream redundant power supply switching schemes, and designs a hierarchical bumpless switching strategy combining DC active coupling with AC synchronous pre-judgment. Experimental testing and engineering application verification have shown that the optimized scheme meets national industry standards in terms of switching accuracy and voltage stability, effectively enhancing the reliability of control system power supply. It can provide a reference for the retrofitting of DCS power supply systems in the thermal power and chemical industries.

[Key words] Distributed Control System; bumpless transfer; redundant power supply; static transfer switch; synchronous pre-judgment

引言

火电、化工、冶金等连续性生产行业中,分散控制系统承担数据采集、回路调节、联锁保护与设备监控关键职能,属于工业一级重要负荷,供电稳定性直接关乎装置运行安全。依据现行行业规范,DCS控制单元供电中断时长超出20ms便会出现信号失真、逻辑紊乱等问题,中断时长突破100ms将直接造成控制器硬件复位,引发设备失控、机组非正常停机等事故,不仅造成直接经济损失,还存在介质泄漏、爆炸起火等安全隐患。

目前工业现场普遍采用双路电源冗余模式保障DCS供电,但各类传统切换设备均存在明显短板。机械式切换开关动作延时长,切换过程存在固定供电断点;二极管冗余供电模式运行损耗大,易出现电源不均流与电流倒灌问题;常规静态转换开关缺少相位同步功能,非同步切换易产生高压冲击损伤精密卡件。国内现有研究多聚焦控制器逻辑冗余,针对DCS交直流两级电源无扰

切换的整体性研究较为稀缺,多数现场改造仅单一更换设备,并未形成全方位的供电保障体系。

本文以DCS交流输入与直流机柜供电两级链路为研究对象,从扰动机理、方案缺陷、算法优化、试验验证及工程应用角度开展研究,搭建适配复杂工况的无扰切换技术体系,解决传统方案断电、电压冲击、误切换等共性问题,满足火电机组场景下分散控制系统电源无扰切换要求。

1 DCS供电架构与无扰切换技术机理

1.1 DCS分层冗余供电整体架构

DCS普遍采用分层冗余供电模式,整套系统分为三级供电链路,各级链路均需配置无扰切换单元,任意层级产生的供电扰动都会逐层传递至核心控制硬件,稳定的冗余架构是实现无扰切换的基础。

厂级交流输入层面配备两路物理隔离的交流电源,分别接

入厂区不同供电母线, 搭配独立不间断电源, 电源输出端加装无扰切换装置, 服务于操作员站、服务器等辅助设备。机柜交流配电层面将双路UPS电源接入静态切换开关, 依托专用配电单元完成机柜交流冗余供电。直流转换输出层面通过机柜内置直流电源模块完成电能转换, 借助电力电子耦合器件实现无缝切换, 为控制器、I/O模块及通讯卡件供电。

1.2 电源无扰切换核心定义与评价指标

结合行业标准, DCS电源无扰切换指电源故障、人工倒路、电网波动等工况下, 主备电源切换全程负载无零电位断点, 电压、电流及切换时长均处于设备耐受范围, 控制系统运行逻辑与输出信号保持稳定, 不会出现信号跳变与硬件复位。

结合IEC与国内相关标准, 本文制定适配DCS的切换评价标准。直流24V供电系统切换时长需低于2ms, 输出电压维持在21.6V至26.4V之间, 杜绝反向电流倒灌。交流220V系统相位误差控制在 $\pm 5^\circ$ 以内, 切换延时小于10ms, 电压暂降幅度不超过额定值5%。同时设备需具备良好稳定性, 长期切换无故障, 运行谐波畸变率低于3%, 规避通讯干扰问题。

1.3 无扰切换基础物理机理

电源切换扰动主要分为两类, 也是制约无扰切换实现的核心难点。时间差扰动多见于机械式设备, 主备电源分合闸无法同步, 间隙内负载储能电容难以维持额定电压, 进而形成供电断点。相位差扰动仅存在于交流系统, 主备电源电气参数无法完全匹配, 非同步合闸会产生高额环流, 诱发电压尖峰与冲击电流, 损坏电气设备。

针对两类扰动可制定对应优化策略, 直流侧采用低阻抗电力电子器件并联耦合, 采用先通后断的运行逻辑, 设置电源供电重叠区间消除断点, 并增设均流回路平衡负荷。交流侧搭载高速锁相环, 实时校准电源相位, 待参数达标后执行切换; 以全控型电力电子器件替换机械触点, 缩短设备响应延时, 从硬件层面降低切换扰动。

2 现有DCS电源切换方案对比及缺陷分析

2.1 二极管OR耦合切换

该方案多用于直流机柜供电系统, 通过在直流电源输出端串联肖特基二极管并联至负载, 依托二极管单向导通特性自动隔离故障支路。该方案结构简单、无需电控模块, 采购与运维成本较低, 无源运行模式可靠性较强, 广泛应用于中小型化工、电力控制系统。

长期现场运行数据表明该方案短板显著, 二极管固有导通压降会增加机柜功耗与环境温度, 两路电源电压偏差较大时易出现负荷分配不均, 加速单路电源老化。同时该方案无法实现真正零断点切换, 负载受瞬时冲击易出现电压跌落, 器件老化后反向漏电流增大, 故障状态下易引发电源倒灌事故。

2.2 MOSFET有源并联切换

作为新型直流切换技术, 该方案以低导通电阻MOS管替代二极管, 搭配采样控制芯片动态调节器件状态, 可主动均衡电源负荷, 快速切除故障支路。相较于二极管方案, 其导通损耗极低,

集成多重保护功能, 切换时长可控制在1ms以内, 是现阶段直流侧无扰切换的最优方案。

该方案普及阻力主要来源于应用成本与环境适应性, 配套控制回路结构复杂, 对现场电磁干扰较为敏感, 低温工况下器件参数易发生漂移, 造成电压小幅波动, 且设备采购成本偏高, 大范围普及难度较大。

2.3 机械式ATS双电源切换开关

机械式切换开关主要用于厂级交流输入链路, 依靠电磁结构驱动机械触点完成分合闸, 内置失压检测程序, 适配大功率供电回路, 具备绝缘性能好、承载电流大、运维便捷等优势, 常应用于UPS前端市电冗余切换。

该设备并不适配DCS精密负载供电, 机械触点动作延时最高可达150ms, 切换断点无法消除; 分合闸产生的电弧会持续磨损触点, 易引发接触不良故障。最为关键的是设备无相位检测功能, 非同步电源直接合闸会产生高强度冲击电流, 极易烧毁电源模块与控制卡件。

2.4 传统STS静态转换开关

静态转换开关以双向晶闸管为核心器件, 依据电压阈值判定电源故障并完成切换。设备无机械运动结构, 不存在电弧磨损问题, 切换速度远优于机械式开关, 是目前DCS机柜交流供电的主流设备。

常规静态开关仅以电压幅值作为切换判据, 缺少锁相同步单元, 电源相位偏差过大时切换会产生高压尖峰。同时设备无防抖预判逻辑, 电网瞬时闪变、电磁干扰产生的虚假故障信号, 极易触发误切换, 频繁扰动会大幅缩短控制器与电源设备使用寿命。

2.5 现场切换扰动典型故障溯源

结合多行业DCS电源故障台账统计, 交流电源切换相位不同步是首要故障诱因, 占故障总数的42%; 机械式开关供电断点过长引发的设备复位问题占比31%; 直流电源不均流、二极管损耗异常占比18%; 电磁干扰诱发的逻辑误判占比9%。

某300MW火电机组曾因机械式ATS切换延时过长, 电网电压跌落时切换耗时82ms, 直接导致全厂控制器复位, 机组被迫紧急停机, 造成巨额经济损失, 该事故直观体现了优化无扰切换技术、淘汰落后切换设备的必要性。

3 基于多参量同步预判的改进型无扰切换控制策略

3.1 直流侧MOS有源耦合优化拓扑

本文在直流电源输出支路增设MOSFET开关与电气参数采集单元, 搭建全新有源耦合拓扑。设备稳态运行时, 控制系统依托闭环算法调节MOS管导通阻抗, 均衡两路电源输出负荷, 规避单路电源过载老化问题。系统增设故障预判机制, 实时监测支路电压与输出电流, 提前判定故障隐患并加深备用支路导通深度, 构建供电重叠区间。

确认支路故障后, 系统快速闭锁故障侧开关, 全程无供电零点, 整体切换时长可压缩至0.8ms。拓扑额外增设独立防倒灌回路, 实时监测反向电流并及时闭锁异常支路, 彻底解决直流电源倒灌难题, 提升直流侧供电稳定性。

3.2 交流侧同步预判快切控制算法

为弥补传统静态开关的技术缺陷,本文引入高速锁相环,同步采集主备电源电压、频率、相位三类核心参数,建立多参量联合切换机制,仅所有参数处于安全阈值内方可执行合闸操作。

系统设定标准化同步窗口,相位、频率、电压偏差均满足限定条件时判定为安全区间。人为主动倒路工况下,系统等待同步窗口生成后完成合闸;电源短路、失压等紧急工况下,启动储能缓冲单元维持负载电压,并快速追踪备用电源相位,短时间内完成同步切换。同时增设信号防抖机制,过滤电磁干扰与电网闪变带来的虚假故障信号,从算法层面杜绝设备误切换。

3.3 交直流分层联动协同逻辑

原有供电系统交直流切换单元相互独立,时序错位易诱发电压扰动。本文增设联动控制单元,打通两级设备数据通道,实现动作协同。交流侧预判切换动作后,提前向直流侧发送预警信号,直流侧临时上调稳压裕度,抵消切换带来的小幅电压波动。直流侧出现故障时,联动单元同步上传报警与溯源数据,降低运维故障排查难度。

4 试验平台搭建与性能测试验证

4.1 模拟测试平台搭建

为验证优化方案性能,搭建全工况模拟试验平台,硬件涵盖可编程变频电源、智能静态切换装置、直流电源模块、改进型耦合电路板及全套DCS控制负载,配套示波器、电能质量分析仪完成数据采集。试验模拟电源失压、人工倒路、非同步切换三类高频工况,对照测试三类主流供电方案的运行性能。

4.2 测试结果与数据分析

直流侧对照试验结果显示,传统二极管方案切换耗时3.7ms且电压跌落严重,普通MOS并联方案性能小幅提升,而本文优化方案切换时长仅0.8ms,负载电压始终维持在安全区间,切换性能优势明显。交流非同步工况测试中,普通静态开关合闸冲击问题突出,优化算法可自动等待最佳同步时机,将电压波动控制在3%以内,无高压尖峰脉冲。千次连续切换试验中,优化方案全程无故障,器件温升稳定,相较于传统方案可靠性大幅提升,各项指标均优于国标要求。

5 工业现场成套优化实施措施

5.1 供电架构分层冗余优化

厂级交流输入层面淘汰机械式切换开关,采用带同步预判功能的智能静态开关,依据设备满负荷功率1.5倍选型UPS电源,保障充足后备供电时长,并选用独立母线接入市电,实现电源物理隔离。机柜配电层面实行单柜双电源独立配置模式,禁止多机柜共用冗余电源,分离控制卡件与普通I/O模块供电回路。在供电母线前端加装大容量缓冲电容,弱化切换过程中的微小电压波动。

5.2 设备选型与施工管控要点

直流耦合单元优先选用一体化MOS并联模块,淘汰老旧二极管供电模式;交流静态开关必须内置锁相同步与波形存储模块,

切换延时不得超出10ms。现场施工严格遵循电气规范,交直流线缆分开敷设并保持安全间距,所有供电回路配置独立断路器,增设电压在线监测功能,故障信号直接接入DCS监控画面,实现全天候风险预警。

5.3 在线定期切换测试运维规范

针对备用器件隐性老化问题,制定季度标准化在线测试流程。试验前排查电源回路报警与负载状态,全程安排专人监护;远程完成主备电源轮换并记录波形数据,核验切换指标;测试结束后核查控制器运行状态并归档数据。针对测试中出现的参数超标、虚假报警等问题,从相位校准、器件老化、线路接触多角度排查隐患,完成闭环整改。

6 结论与展望

6.1 研究结论

DCS电源切换扰动分为供电断点扰动与电压冲击扰动两类,传统二极管、机械式开关、普通静态开关均存在固有缺陷,无法满足高精度无扰供电需求,是控制系统失稳、保护误动的主要诱因。本文提出的分层协同切换策略,可将直流切换时长控制在1ms以内,交流相位误差低于 5° ,电压波动不超过额定值3%,适配各类复杂工业工况。结合架构优化、设备选型、常态化测试三类配套措施,能够从根源上消除切换扰动,全面提升DCS供电安全裕度。

6.2 技术展望

后续无扰切换技术可从三个方向升级优化,依托边缘计算搭建电源故障预警模型,实现由被动切换向主动预判转型;优化新能源厂区多能源供电切换算法,适配光伏、储能混合供电场景;研发一体化集成冗余电源设备,整合多项功能,简化现场施工与运维流程,进一步推动DCS供电系统智能化升级。

【参考文献】

- [1]全国电力行业标准委员会.GB/T 36293-2018火力发电厂分散控制系统技术条件[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [2]孙长生,朱北恒,孙维本.火电厂热工系统可靠性配置与事故预控[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [3]国家能源局.DL/T 5455-2012火力发电厂热工电源及气源设计技术规程[S].北京:中国电力出版社,2012.
- [4]李蒙,立洪源,董伟.模块无扰冗余切换技术在DCS中的实现[J].自动化仪表,2025,46(12):78-83.
- [5]王晓寰,张纯江.分布式发电系统无缝切换控制策略[J].电工技术学报,2012,27(2):113-119.
- [6]钟诚,魏来,严千贵.考虑非计划孤岛的分布式电源无缝切换控制策略[J].电工技术学报,2017,32(9):124-131.
- [7]刘燕,秦清林.火电厂DCS双路电源冗余切换故障分析与改造[J].浙江电力,2025,44(11):89-94.

作者简介:

李想(1985—),男,汉族,辽宁阜新人,大学本科,研究方向为电力系统热工自动化、电气自动化维护与研究。