

电气工程视角下机电系统安全控制研究

徐鹏 210221198406107712

摘要：本文从电气工程视角系统分析机电系统的主要电气风险（供配电、EMC、协同冲突），提出多层次电气防护架构、智能监控预警、容错冗余与运维与标准化等长效保障策略，为提升机电系统安全控制能力提供技术路线与实施建议。

关键词：电气安全;电磁兼容;供配电防护;智能监控;容错冗余;接地与保护;运维管理;标准化与规范;预测性维护

一、引言

机电系统的安全运行是现代工业高质量发展的基础前提，其安全控制涵盖电气安全、机械安全、功能安全等多个维度，其中电气工程相关的安全隐患是引发系统故障的主要诱因之一。因此，从电气工程视角深入研究机电系统安全控制的技术逻辑与实现路径，构建全方位、多层次的安全控制体系，对提升机电系统运行安全性与可靠性具有重要的理论与实践意义。

二、机电系统安全控制的核心风险因素

（一）电气系统本身的安全隐患

电气系统的自身缺陷是机电系统安全风险的核心来源。在供配电环节，电压波动、三相不平衡、过载短路等问题可能导致电气设备烧毁、绝缘击穿，甚至引发火灾；电线电缆选型不当、敷设不规范会造成线路发热、漏电风险，尤其在高温、潮湿环境下，绝缘层老化速度加快，安全隐患更为突出。在控制回路环节，继电器、接触器等电气元件的触点烧蚀、线圈故障会导致控制逻辑失效，引发设备误动作；PLC、变频器等核心控制设备的程序漏洞、参数配置错误，可能导致系统控制紊乱，影响设备安全运行。

（二）电磁干扰引发的安全风险

电磁干扰是机电系统电气安全的重要威胁，工业现场的变频器、电焊机、高频加热设备等会产生强电磁辐射，形成复杂的电磁环境。电磁干扰会导致电气控制信号失真、检测数据偏差，引发控制逻辑误判，使设备出现无故停机、动作异常等现象；严重时还会击穿敏感电子元件，损坏控制模块与传感设备，造成系统功能瘫痪。同时，电磁干扰可能影响接地系统的稳定性，降低漏电保护装置的动作可靠性，间接放大其他安全风险。

（三）电气与机械协同的安全冲突

机电系统的安全控制需要电气与机械系统的协同配合，二者的协同不当会引发安全冲突。在动力传输环节，电机驱动系统与机械传动机构的参数不匹配，可能导致过载运行，引发电机烧毁或机械结构损坏；电气制动系统与机械制动装置的动作不同步，会导致设备制动失效，增加惯性冲击引发的安全风险。在安全保护环节，电气安全装置与机械防护装置的联动逻辑设计不合理，可能导致保护功能失效，无法在紧急情况下快速切断危险源。

三、电气工程视角下机电系统安全控制架构与关键策略

（一）构建多层次电气安全防护架构

电气安全防护是机电系统安全控制的基础，需构建“源头防控-过程阻断-应急处置”的多层次防护体系。在源头防控层面，优化供配电系统设计，合理选择变压器、断路器、熔断器等电气设备，确保其额定容量与系统负载匹配；采用漏电保护器、过流继电器、过压保护器等保护元件，实现对过载、短路、漏电等故障的快速响应。在过程阻断层面，强化电气设备的绝缘防护，选用耐老化、耐高温、防腐蚀的绝缘材料，对关键电气回路进行密封处理；规范电线电缆的敷设方式，避免线路受压、受拉或与尖锐部件摩擦，减少绝缘层破损风险。在应急处置层面，设置紧急停机按钮、故障隔离开关等应急装置，确保在突发安全事件时能够快速切断电源；完善接地与接零保护系统，采用重复接地、等电位连接等技术，降低漏电时的触电风险。

（二）基于智能监控的安全风险预警

依托电气工程技术构建智能监控系统，实现安全风险的实时监测与提前预警。在数据采集环节，部署电压传感器、电流传感器、温度传感器、漏电传感器等高精度检测设备，实时采集供配电系统、控制回路、电机设备的运行参数，包括电压电流值、设备温度、绝缘电阻、漏电流等，全面捕捉电气系统的异常信号。在数据处理环节，利用 PLC、工业计算机等控制设备对监测数据进行实时分析，通过设定安全阈值、趋势分析、异常识别算法，判断电气系统的运行状态，及时发现潜在安全风险。

（三）容错控制与冗余设计策略

通过电气系统的容错控制与冗余设计，提升机电系统的安全冗余能力，避免单一故障导致系统崩溃。在控制回路设计中，采用双 PLC 冗余控制、热备冗余等架构，当主控制单元出现故障时，备用单元能够快速切换投入运行，保障控制逻辑的连续性；对关键控制信号采用双回路传输设计，减少信号传输故障的影响。在动力驱动环节，采用双电机冗余驱动、电机过载保护与机械过载保护双重配置，确保在单一驱动单元失效时，系统仍能维持基本运行或安全停机。在软件层面，开发容错控制算法，当检测到电气元件故障或信号异常时，自动调整控制策略，规避故障部件，通过其他功能模块的协同工作保障系统安全；在程序设计中加入故障自诊断功能，能够自动识别控制逻辑错误、传感器故障等问题，并给出故障定位提示。

四、机电系统安全控制的长效保障机制

(一) 完善电气安全设计规范

建立基于电气工程标准的安全设计规范体系，将安全控制要求贯穿机电系统设计全过程。严格遵循 IEC、GB 等相关电气安全标准，明确电气设备选型、供配电系统设计、控制回路布局、接地接零保护等环节的安全要求；在设计阶段开展安全风险评估，采用故障模式与影响分析（FMEA）等方法，提前识别潜在安全隐患并优化设计方案。加强设计评审工作，组织电气工程师、安全专家对设计方案进行全面审查，重点关注电气安全防护、电磁兼容、冗余设计等关键内容，确保设计方案的科学性与安全性。

(二) 强化运维管理与人员培训

规范电气系统的运维管理流程，提升安全控制的持续性。制定定期维护计划，定期对电气设备进行绝缘测试、接地电阻检测、元件状态检查，及时更换老化、损坏的电气元件；建立设备运维档案，记录维护时间、维护内容、检测数据等信息，实现全生命周期管理。加强操作人员与运维人员的专业培训，内容涵盖电气安全知识、设备操作规范、故障排查技巧、应急处置流程等，提升人员的安全意识与专业技能；严格执行作业许可制度，对带电作业、高空作业等危险作业进行严格审批，确保作业过程安全。

(三) 推动技术创新与标准升级

跟踪电气工程与安全控制领域的技术发展趋势，积极引入先进技术提升安全控制水平。推广应用智能型电气保护设备、无线传感监测技术、工业互联网安全监控平台等，实现安全控制的数字化、智能化升级；探索人工智能、大数据分析等技术在安全风险预测中的应用，通过挖掘历史运行数据，构建安全风险预测模型，实现从“被动防护”向“主动预警”转型。

五、结论

从电气工程视角来看，机电系统的安全控制是一项涉及电气防护、智能监控、容错设计、运维管理等多维度的系统工程，其核心在于通过科学的电气技术应用，实现对各类安全风险的精准防控。未来，随着电气工程技术与智能化技术的深度融合，机电系统安全控制将朝着精准化、智能化、全生命周期化的方向发展。通过持续的技术创新与管理优化，进一步完善安全控制体系，强化电气系统与机械系统的协同安全，将为机电系统的安全稳定运行提供更有力的保障，推动现代工业向更安全、高效、可持续的方向发展。

参考文献

[1]韩雪涛.电气控制线路[M].化学工业出版社:201910:392.

[2]单体强,齐杏林,高敏.基于微光机电技术的引信电子安全系统控制方法[J].探测与控制学报,2016,38(04):27-32.

[3]石晓俊,范云勇,王洋.水力式升船机电气控制系统安全防护设计[J].中国水运(下半月),2012,12(08):99-100+102.