

机电一体化技术在配电柜安全防护系统中的应用

索惠芳

山西焦化集团有限公司 山西 临汾 041606

山西德力信电子科技有限公司 山西 临汾 041606

摘要: 本文系统阐述了机电一体化技术的基本内涵及其在配电柜安全防护系统中的关键作用,深入分析了基于机电一体化技术构建的配电柜安全防护系统的总体架构、核心功能模块(包括环境监测、电气参数监测、门禁与操作安全控制、故障诊断与预警、远程监控与数据管理等)及其关键技术实现方式。同时,结合具体应用案例,探讨了该技术在提升配电柜运行安全性、可靠性及运维效率方面的显著成效,并对其未来发展趋势进行了展望。研究表明,机电一体化技术的应用不仅能够实现配电柜安全防护的自动化、智能化和网络化,还能有效预防电气火灾、设备故障及人身安全事故,具有重要的工程应用价值和广阔的推广前景。

关键词: 机电一体化; 配电柜; 安全防护系统; 智能监测; 故障预警; 远程监控

引言

配电柜是电力系统中接收、分配电能,控制、保护、计量和监测电路的关键设备,广泛应用于各类用电场所。但长期运行中,它易因多种因素引发电气火灾等严重事故,配电系统故障引发的火灾占比高,造成巨大损失。传统安全防护依赖被动式保护元件和人工巡检,存在局限性,被动元件无法事前预警,人工巡检周期长、效率低,在无人值守处隐患更突出。21世纪,新兴信息技术与传统工业技术融合,催生新范式。机电一体化技术凭借“机-电-信”融合优势,能构建集感知、分析、决策、执行于一体的智能闭环系统。将其应用于配电柜安全防护,可全方位、全天候、全要素感知运行状态,实现智能分析与主动干预,把防护模式从“事后处理”转为“事前预防”和“事中控制”。研究其应用对提升电力安全、保障生命财产、推动电力数字化转型意义重大。

1 机电一体化技术概述

机电一体化并非简单的机械与电子技术的叠加,而是一种系统工程思想,旨在通过多学科知识的交叉融合,设计和制造出性能更优、功能更强、可靠性更高的新一代产品和系统。其核心在于“一体化”,即在系统设计之初就将机械本体、动力与驱动、传感检测、信息处理与控制等要素作为一个有机整体进行综合考虑和协同优化。一个典型的机电一体化系统通常包含以下几个基本组成部分:(1)机械本体:系统的物理载体和执行机构,如柜体结构、门锁机构、散热风扇、自动灭火装置的喷头等。(2)传感器与检测装置:系统的“感官”,用于实时采集环境和设备的各种物理量信息,如温度、湿度、烟雾浓度、电流、电压、局部放电、门状态、水浸等。(3)控

制器:系统的“大脑”,通常由微控制器(MCU)、可编程逻辑控制器(PLC)或嵌入式系统构成,负责接收传感器数据,运行控制算法,并发出控制指令^[1]。(4)执行机构:系统的“四肢”,根据控制器的指令完成具体的物理动作,如驱动电机、电磁阀、继电器、声光报警器等。(5)信息接口与通信模块:实现系统内部各模块之间以及系统与外部(如监控中心、移动终端)的数据交换,常用技术包括RS485、CAN总线、Wi-Fi、4G/5G、LoRa等。机电一体化技术的核心优势在于其能够实现系统的智能化、自动化和网络化。通过嵌入式软件和智能算法,系统可以自主完成复杂的逻辑判断和决策;通过执行机构,系统可以自动完成预定的操作任务;通过通信网络,系统可以融入更大的信息生态系统,实现远程监控和协同管理。这些特性恰好契合了现代配电柜安全防护系统对高可靠性、高智能性和高集成度的需求。

2 基于机电一体化的配电柜安全防护系统架构

基于机电一体化理念设计的配电柜安全防护系统,其总体架构可分为感知层、控制层和应用层三个层次,形成一个“感知-决策-执行-反馈”的闭环控制体系。

2.1 感知层

感知层是整个系统的数据源头,由部署在配电柜内部及周边的各类传感器构成,负责对可能影响安全的关键参数进行实时、精确的采集。(1)环境参数传感器:包括温度传感器(监测母排、电缆接头等关键点温度)、湿度传感器(防止凝露导致绝缘下降)、烟雾传感器(火灾早期预警)、水浸传感器(防止柜体进水)等。(2)电气参数传感器:包括电流互感器(CT)、电压互感器(PT),用于实时监测各回路的电流、电压、功率、功率因数等,是

判断过载、短路、三相不平衡等故障的基础^[2]。(3) 状态监测传感器：如门磁开关（监测柜门非法开启）、红外对射或摄像头（监测小动物或异物侵入）、局部放电传感器（监测绝缘劣化早期征兆）等。(4) 视频/图像传感器：高清摄像头可用于远程可视化巡检，记录操作过程，辅助故障诊断。

2.2 控制层

控制层是系统的核心，通常由一个嵌入式主控制器（如ARM Cortex-M系列微控制器或工业级PLC）构成。其主要功能包括：(1) 数据采集与预处理：通过A/D转换、数字滤波等技术，对感知层传来的原始信号进行处理，提取有效信息。(2) 智能分析与决策：运行预设的专家规则库或机器学习模型，对处理后的数据进行综合分析。例如，当温度持续异常升高且伴随电流增大时，系统可判断为过载风险；当检测到烟雾且温度骤升时，可判定为火灾发生。(3) 逻辑控制与联动：根据分析结果，自动触发相应的安全防护措施^[3]。例如，发出声光报警、自动切断故障回路电源、启动柜内散热风扇、打开自动灭火装置（如气溶胶）等。(4) 数据存储与通信：将历史数据、报警事件、操作日志等存储在本地Flash或SD卡中，并通过通信模块将关键信息上传至应用层。

2.3 应用层

应用层为用户提供交互界面和高级管理功能，通常部署在远程监控中心的服务器或云平台上。(1) 人机交互界面（HMI）：提供图形化的监控大屏，实时显示所有联网配电柜的状态、参数、报警信息等。(2) 远程监控与管理：授权用户可通过Web端或移动App随时随地查看配电柜状态，进行远程分合闸操作（需严格权限管理），接收报警推送。(3) 数据分析与诊断：利用大数据技术对海量历史运行数据进行挖掘，实现设备健康状态评估、故障趋势预测、能效分析等高级功能。(4) 运维管理：生成巡检工单、维修记录，优化运维策略，实现从被动维修到预测性维护的转变。

3 核心功能模块及关键技术实现

3.1 环境与电气安全智能监测

这是系统的基础功能。通过高精度、高可靠性的传感器网络，实现对柜内微环境的全面感知。关键技术在于多源信息融合。单一传感器的信息往往具有片面性，容易产生误报。例如，仅靠温度传感器无法区分是正常负载发热还是绝缘故障发热。系统通过融合温度、电流、局部放电等多个维度的数据，构建多参数关联模型，可以大大提高故障识别的准确率。例如，采用模糊逻辑或神经网络算法，对不同传感器数据的权重进行动态调整，从

而做出更可靠的综合判断。

3.2 门禁与操作安全联锁控制

为防止非授权人员误操作或恶意破坏，系统集成智能门禁功能。用户需通过刷卡、指纹或密码验证后方可开启柜门。更重要的是，系统实现了操作安全联锁。例如，在柜门开启状态下，系统会自动锁定所有断路器的操作手柄，使其无法进行分合闸操作，从根本上杜绝了带电操作的风险。这一功能的实现依赖于精密的机械联锁机构（如电磁锁、机械挡块）与电子控制逻辑的紧密结合，是机电一体化的典型体现。

3.3 故障诊断与分级预警

系统不仅能检测故障，更能对故障进行初步诊断和分级。预警级别通常分为三级：一级预警（提示）：如环境温度湿度轻微超标、某回路负载率持续偏高。系统仅在后台记录并推送提示信息，提醒运维人员关注^[4]。二级预警（警告）：如温度异常升高、出现轻微局部放电。系统触发声光报警，并向指定人员发送短信/APP推送，要求尽快处理。三级预警（告警/动作）：如检测到明火、严重短路。系统立即启动最高级别响应，自动切断上级电源，启动灭火装置，并向所有相关人员及监控中心发送紧急告警。这种分级预警机制避免了“狼来了”效应，确保了报警信息的有效性和及时性。

3.4 远程监控与数据管理

借助4G/5G或以太网等通信技术，配电柜不再是信息孤岛。所有运行数据和状态信息均可实时上传至云端。这不仅方便了集中监控，更为大数据分析奠定了基础。通过对历史数据的深度学习，可以建立设备的“数字孪生”模型，精准预测其剩余寿命和潜在故障点，从而实现预测性维护，大幅降低非计划停机时间。

4 应用案例分析

某大型焦化厂作为典型的高危高耗能流程工业企业，其生产过程中涉及大量高温、高压、易燃易爆气体（如焦炉煤气）及强腐蚀性介质，对电力系统的安全性和连续性要求极为严苛。厂区内分布有数十台中低压配电柜，负责为焦炉、鼓风机、循环水泵、除尘系统、DCS控制系统等关键设备供电。过去，该厂曾因配电柜内电缆接头过热引发局部火灾，导致整条生产线非计划停机，不仅造成数百万元的直接经济损失，还带来严重的安全隐患。

为从根本上提升配电安全水平，该焦化厂于2023年对其核心区域的32台关键配电柜实施了基于机电一体化技术的智能安全防护系统改造。系统部署后，运行效果显著，具体体现在以下几个方面：

4.1 有效防控高温高湿环境下的电气风险

焦化厂环境普遍高温、高粉尘、高湿度，传统配电柜极易因凝露、积灰导致绝缘性能下降。新系统在每台柜内关键节点（如母排连接处、断路器进出线端子）部署了高精度红外测温传感器和温湿度复合传感器，并结合电流监测数据进行多源融合分析。系统上线三个月内，成功预警5起因接头松动或氧化导致的异常温升事件。例如，在一次鼓风机配电柜监测中，系统发现A相接头温度在负载未明显变化的情况下持续上升至85°C，同时伴随微弱的局部放电信号。系统立即触发二级预警，推送至电气运维班组手机App。检修人员及时断电检查，发现接头处已严重氧化并出现微小电弧烧蚀痕迹，若未及时处理，极可能在数小时内发展为短路故障。此次预警避免了一次可能导致鼓风机停机、进而引发焦炉熄火的生产事故。

4.2 实现防爆区域的智能门禁与操作联锁

部分配电柜位于焦炉煤气区域，属于防爆危险区。系统集成了一本安型门禁模块（支持IC卡+密码双重认证）与机械-电气联锁机构。只有持有效权限卡并通过身份验证的人员才能开启柜门；柜门开启瞬间，系统自动通过PLC闭锁所有断路器的操作机构，禁止任何带电操作。同时，柜内安装的高清防爆摄像头可记录每次开门操作全过程，视频数据同步上传至厂区安全监控平台，满足《焦化安全规程》（GB12710）对高危区域操作可追溯性的强制要求。

4.3 联动火灾早期抑制，提升应急响应能力

针对焦化厂火灾风险高的特点，系统在每台柜内顶部集成烟雾传感器与温度复合探测器，并与柜内安装的环保型气溶胶自动灭火装置实现硬接线联动。一旦系统判定发生三级火灾告警（如烟浓度突增且温度超过90°C），可在3秒内自动启动灭火装置，同时切断上级电源并向中央控制室发送声光报警及定位信息。自系统投运以来，虽未发生真实火灾，但成功进行了两次模拟联动测试，响应时间与灭火效果均符合设计预期，极大提升了现场应急处置能力。

4.4 推动运维模式向预测性维护转型

所有配电柜的运行数据（包括电流、电压、温度、开关状态、报警记录等）通过厂区工业环网实时上传至能源管理中心的云平台。平台利用大数据分析引擎，对历史数据进行趋势挖掘，生成每台配电柜的“健康指数”和“风险热力图”。运维部门据此优化巡检计划，将资源集中于高风险设备，常规巡检频次降低40%，而关键设备的故障发现率提升至98%以上。2024年上半年，全厂因配电系统故障导致的非计划停机时间同比下降62%，直接节约维修与停产损失约180万元。

5 结语

本文系统论述了机电一体化技术在配电柜安全防护系统中的应用，通过多技术深度融合构建起集智能感知、自主决策、自动执行和远程管理于一体的先进安全防护体系，实现了从被动到主动、从离散到集成、从经验到数据驱动的转变，显著提升了电力系统安全性、可靠性与智能化水平。展望未来，该领域将呈现诸多发展趋势：AI深度赋能，人工智能尤其是深度学习技术会在故障模式识别、剩余寿命预测等方面发挥更大作用，赋予系统更强“认知”“学习”能力；边缘计算普及，更多智能分析功能下沉到本地边缘计算节点，实现“端-边-云”协同；标准化与互操作性加强，行业推动通信协议、数据格式标准化，构建开放兼容生态；绿色与节能受重视，安全防护系统注重能效，与配电柜能效管理系统联动，达成安全与节能双重目标。

参考文献

- [1]李科锋.配电自动化系统中安全防护机制的设计与实现[J].光源与照明,2025,(07):218-220.
- [2]侯洁,杜鹃,闫明蔚.基于机电一体化的配电柜智能巡检系统设计[J].电气技术与经济,2025,(03):84-86.
- [3]史小娇.配电自动化系统安全防护技术[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(五).国网河北省电力有限公司保定供电分公司,2024:130-132.
- [4]李俊,丁浩川,李莉.配电系统信息安全防护方案综述[J].湖北电力,2022,46(02):57-62.