

变频技术在煤矿机电设备中的应用实践

陈佐伟

宁夏王洼煤业有限公司银洞沟煤矿 宁夏 固原 756000

摘要：为解决煤矿机电设备工频运行能耗高、冲击大、故障率高的问题，本文探究变频技术在煤矿设备中的应用价值。首先阐述变频技术核心原理与煤矿复杂工况的适配性，围绕通风机、皮带输送机、提升机等核心设备，分析变频改造的应用方案与实践成效。同时梳理设备运维、谐波干扰、环境适配等现存问题，提出技术优化与运维体系升级对策，并展望智能化、一体化的技术发展趋势，为煤矿机电设备高效低碳运行提供参考。

关键词：变频技术；煤矿机电设备；应用实践

引言：煤矿机电设备长期处于高尘、高湿、负荷波动频繁的恶劣工况，传统工频调速方式存在能耗损耗大、设备冲击严重、调控精度低等弊端，易引发机械故障与电网安全隐患，制约煤矿安全生产与节能增效发展。变频技术具备无级调速、软启动、能耗可控等优势，适配煤矿多类设备的动态运行需求。基于煤矿智能化与低碳开采发展背景，本文系统研究变频技术在煤矿核心机电设备的应用实践，剖析现存问题并制定优化方案，助力煤矿机电系统提质降耗、安全智能升级。

1 变频技术核心原理与煤矿应用适配性

1.1 变频技术基本工作原理

(1) 变频调速通过改变电机定子供电频率，调节旋转磁场转速，实现无级调速。依据同步转速公式 $n = 60f/p$ ，频率变化直接决定转速，转矩、功率动态匹配负载需求。(2) 变频器主电路含整流、逆变与控制单元。整流单元将工频交流电转为直流电；逆变单元利用 IGBT 等开关器件，经 PWM 技术将直流电逆变为频率可调的交流电；控制单元采集电压、电流、转速等信号，生成驱动脉冲，实现闭环或开环调节。(3) 相较液力耦合器、电磁滑差调速等传统方式，变频调速具有范围宽、精度高、启停平滑且转差损耗小的优势；同时可使电机功率因数接近 1，轻载时显著降低无功损耗，综合节电率普遍达 20%~40%。

1.2 煤矿机电设备运行工况特点

(1) 井下设备负荷波动剧烈，如采煤机割煤阻力随机变化、输送机煤量不稳定，且设备需频繁启停以适应采掘循环，同时主通风机、排水泵等长期连续运行，对电机调速响应速度与过载能力提出较高要求。(2) 煤矿环境潮湿（相对湿度常达 95% 以上）、粉尘浓度高（煤

尘、岩尘），且存在瓦斯等易燃易爆气体，要求电气设备具备 IP54 以上防护等级及 ExdI 或 ExibI 级防爆资质，并具有较强的电磁兼容性以抵抗变频器高频开关造成的谐波干扰。(3) 传统工频运行方式下，设备多以挡板、风门或液力耦合器调节流量，人为造成大量截流损耗；电机频繁硬启动、重载冲击既加剧机械磨损，也因启动电流（5~7 倍额定电流）引发电网电压跌落，埋下电气火灾与机械断裂等安全隐患^[1]。

1.3 变频技术煤矿应用适配性分析

(1) 变频调速可实现从零到额定转速的平滑无级调节，精确匹配采掘、运输、提升等工序对转矩与速度的动态需求；其软启动功能可将启动电流限制在 1.5 倍额定以内，有效减少机械冲击与电气冲击，延长设备检修周期。(2) 针对煤矿防爆要求，可采用隔爆型变频器或将其置于井下中央变电所等安全区域通过长电缆驱动；利用输入电抗器、滤波器及屏蔽电缆抑制谐波与电磁辐射；同时选用三防涂层、密封结构及冗余散热设计，保障设备在高温、高湿、高尘环境下稳定运行。(3) 变频技术作为煤矿智能化建设的关键执行环节，可与矿井综合自动化平台对接，依据煤流、风流、水位等传感器实时数据自动调节转速，实现按需供能，降低吨煤电耗；同时精准调控有助于减少设备空载与重载损耗，推动煤矿向低碳、高效、少人化方向持续升级。

2 变频技术在煤矿核心机电设备中的应用实践

2.1 在煤矿通风机设备中的应用

(1) 传统通风机采用恒速运行、风门或导叶调节风量，电机长期以工频转速运转，能量大量消耗在截流损失上，造成严重电力浪费；同时风量调节响应滞后，无法根据井下作业面瓦斯涌出量、人员分布等实时变化

进行动态匹配,存在“大流量过剩、小流量不足”的矛盾,既增加能耗又威胁通风安全。(2)变频智能按需供风系统采用“变频器+PLC控制器+多参数传感器(甲烷、风速、负压)”的闭环控制架构,以工作面瓦斯浓度或风压设定值为目标量,经PID运算实时调节风机转速。运行模式上,系统可自动切换“恒风压”“恒风量”或“混合模式”,实现无人值守条件下的动态跟随调节^[2]。(3)实际应用表明,变频改造后风量调控精度可达 $\pm 2\%$,通风电耗普遍降低 $25\%\sim 35\%$,风机运行频率多稳定在 $35\sim 45\text{Hz}$ 区间;同时避免风机长时间高速运行带来的轴承过热、叶轮磨损问题,设备大修周期延长约1.5倍,停机检修时间大幅减少。

2.2 在皮带输送机中的应用

(1)皮带机传统直接启动或液力耦合器启动方式下,启动电流高达额定电流 $5\sim 7$ 倍,且启动转矩不可控,导致输送带承受剧烈张力冲击,极易诱发皮带打滑、跑偏、接头撕裂及滚筒包胶脱落;多机驱动时功率分配不均问题尤为突出,轻则降低传动效率,重则造成断带事故。(2)变频软启动控制方案采用“多机主从同步控制+加速度S曲线给定”策略,启动时间可在 $10\sim 120\text{s}$ 范围内连续设定,启动转矩平稳上升至设定值,有效避免冲击峰值;运行过程中,通过安装在皮带上的速度传感器和料流检测装置,变频器自动调节运行频率以匹配煤量变化,实现“煤多快转、煤少慢转”的自适应调速。(3)现场应用后,皮带机启动张力峰值降低约 40% ,皮带使用寿命延长 $20\%\sim 30\%$;多电机驱动时的转矩不平衡度控制在 $\pm 3\%$ 以内;轻载或空载时段自动降速运行,综合节电率达 $15\%\sim 25\%$,运输系统故障停机次数显著下降^[3]。

2.3 在矿井提升机中的应用

(1)提升机传统调速多采用转子串电阻或直流调速方式,调速精度差、速度阶跃明显,加减速过程中顿挫感强烈,不仅影响提升容器平稳运行,还加剧钢丝绳、天轮及制动闸瓦的疲劳磨损;尤其在减速爬行段,速度控制不稳易导致过卷或蹲罐事故,安全隐患突出。(2)变频调速系统采用“交-直-交”电压源型变频器配合同步电机或异步电机,结合编码器构成速度、位置双闭环矢量控制,实现全速段平滑调节;制动优化设计方面,采用能量回馈单元代替传统电阻能耗制动,将下放过程中的再生电能回馈电网,同时配套闸控系统实现电气制动与机械制动的协同配合,确保紧急停车时的制动力矩冗余^[4]。(3)实践表明,变频改造后提升速度控制精度达 $\pm 0.01\text{m/s}$,启动、加速、匀速、减速、爬行、停车各阶段

过渡平滑无冲击;能量回馈效率达 95% 以上,综合节电率约 $20\%\sim 30\%$;同时由于电气制动优先介入,机械闸瓦磨损量大幅减少,提升系统安全性和运行舒适度得到根本性改善。

2.4 在井下排水、压风设备中的应用

(1)井下排水泵需根据水仓水位间歇性启停,压风机则随用风设备的开关频繁加载卸载,两者均长期处于“全速运行—停止—全速运行”的冲击工况;由于管路阻力特性与泵(压缩机)的额定工况不匹配,实际运行点偏离高效区,造成大量无效能耗,同时频繁启停加剧电机绝缘老化和接触器烧蚀故障。(2)变频自适应调控系统部署方案为:排水系统以水仓水位为控制目标,采用“水位闭环+轮询切换”策略,多台水泵根据水位变化速率自动调节转速并轮换投切;压风系统以母管压力为反馈量,变频器实时调节压缩机转速维持压力恒定在设定值(如 $0.7\text{MPa}\pm 0.02\text{MPa}$),卸载时自动降为休眠频率,负载回升时快速唤醒。两套系统均集成远程监控与故障自诊断功能。(3)现场应用数据显示,排水系统变频改造后吨水百米电耗降低约 $18\%\sim 22\%$,水泵效率提升至额定工况的 90% 以上,且因软启软停避免了水锤效应对管路和阀门的冲击;压风系统压力波动范围由改造前的 $\pm 0.1\text{MPa}$ 收窄至 $\pm 0.02\text{MPa}$,系统卸载时间减少约 60% ,综合节电率达 $20\%\sim 28\%$ 。设备故障率明显降低,维护周期由每月检修延长至每季度一次,运维成本显著优化。

3 变频技术煤矿机电设备应用现存问题与优化对策

3.1 现场应用现存主要问题

(1)井下潮湿、多尘、空间受限的恶劣环境对变频器可靠运行构成持续威胁。粉尘积聚易堵塞散热风道,导致IGBT模块过热触发保护停机;凝露侵入控制板引发短路或绝缘下降故障;部分隔爆型变频器因壳体密封胶条老化,防爆结合面间隙超标,存在失爆风险。(2)变频器为精密电力电子设备,现场运维人员多擅长传统机电检修,对变频器参数设定、故障代码解读、波形分析等专业操作不够熟练。常见问题如制动电阻选配不当、加减速时间设置不合理、载波频率盲目调高等,导致变频器频繁报警或保护误动,影响生产连续性。(3)变频器整流环节产生5、7、11次等特征谐波,注入矿井供电系统后引起电压波形畸变,降低功率因数,影响同一母线下其他保护装置和计量仪表的准确动作;部分改造项目因变频器容量与电机额定参数匹配欠妥,低速运行时转矩不足或高速时过调制,无法充分发挥变频调节效能。

3.2 技术优化改进策略

(1) 根据井下安装位置合理选型, 采掘工作面等防爆区域选用矿用隔爆兼本质安全型变频器, 变电所等相对安全区域可选正压型或加强防护型。实施防护升级改造, 进风口增设可拆卸不锈钢防尘滤网, 散热器表面喷涂三防漆, 控制腔加装智能凝露监测与自动除湿装置, 定期检测隔爆面平面度并涂抹防锈油脂。(2) 在变频器输入侧加装进线电抗器和 EMC 滤波器, 抑制高频谐波注入电网; 集中补偿方面, 于变电所母线处设置动态无功补偿装置 (SVG) 或有源电力滤波器 (APF), 实现谐波动态跟踪补偿, 将电压总谐波畸变率控制在国标 5% 以内, 功率因数提升至 0.95 以上, 保障矿井供电品质。(3) 依据不同负载特性优化控制程序参数。对通风机、排水泵等平方转矩负载, 采用 V/f 控制并设定转矩提升曲线; 对皮带机、提升机等恒转矩负载, 启用矢量控制并设置 S 型加减速曲线; 增设转速追踪再启动功能, 防止电网瞬时失压时变频器跳闸; 完善故障自恢复逻辑, 减少非必要停机^[5]。

3.3 运维管理体系优化措施

(1) 建立分级巡检制度, 日常巡检重点检查运行温度、电流、电压及散热风机状态, 每周清理滤网并检查接线端子松动情况; 定期检修时使用红外热成像仪检测功率器件温升分布, 采用高压绝缘测试仪检测主回路绝缘性能, 形成设备健康档案, 实现预防性维护。(2) 制定变频技术专项培训计划, 涵盖变频器工作原理、参数设置方法、典型故障代码解析及示波器使用等实操内容, 采用“理论授课+现场实训+故障模拟”相结合的方式, 确保运维人员具备独立处理常见故障的能力, 考试合格方可上岗操作。(3) 搭建矿用变频设备智能监控平台, 通过工业以太网将各变频器运行数据 (输出频率、电流、温度、直流母线电压、故障代码等) 实时上传至地面集控中心, 设置多级预警阈值 (如温度超 65℃ 预警、超 75℃ 报警停机), 实现远程参数修改、启停控制和故障诊断, 大幅缩短故障响应时间。

3.4 技术发展展望

(1) 变频技术将与物联网感知层深度融合, 通过在变频器内置振动、温度、电流等多维传感器, 结合大数据分析建立设备退化模型, 实现剩余寿命预测; 人工智能算法可自适应优化 PID 参数和转速给定策略, 使变频调节从“按设定执行”升级为“主动预判调节”。(2) 矿用防爆智能变频一体化设备是重要发展方向, 将变频器、电机、减速器、传感器高度集成, 取消外置控制柜和长距离动力电缆, 既降低谐波辐射干扰, 又减少井下安装空间占用; 新一代宽禁带半导体器件 (SiC、GaN) 的应用将大幅提升功率密度和高温耐受能力。(3) 煤矿全域变频节能智能控制系统将以矿井综合自动化平台为核心, 将通风、排水、压风、运输、提升等环节的变频设备统一调度, 依据全矿能耗实时数据和生产计划进行协同优化, 实现“源—网—荷—储”联动调节, 推动煤矿机电系统整体能效达到最优水平。

结束语

本文系统探究了变频技术在煤矿各类机电设备中的应用优势与实践效果, 证实该技术可有效降低设备能耗、减少机械磨损、提升调控精度与运行安全性。针对现场应用中的环境适配、谐波干扰、运维短板等问题, 提出了设备选型、技术整改、运维升级的综合优化策略。未来需深化变频技术与物联网、人工智能的融合, 推进一体化智能变频设备应用, 实现煤矿机电设备全域智能调控, 赋能煤矿绿色智能高质量发展。

参考文献

- [1] 王磊, 张勇, 李建伟. 长距离掘进工作面通风机变频智能调控技术及应用 [J]. 工矿自动化, 2024, 50(03): 76-82.
- [2] 张桂林, 刘建功, 王毅颖. 矿用复合变频控制系统优化及机电设备适配性研究 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(09): 188-195.
- [3] 李团结, 赵鹏. 煤矿机电设备变频节能改造关键技术与实践 [J]. 煤矿安全, 2023, 54(07): 167-172.
- [4] 范宝冬, 周文凯. 刮板输送机变频调速智能控制技术及应用研究 [J]. 工矿自动化, 2025, 51(02): 91-97.
- [5] 李向南. 煤矿机电变频技术原理及现场应用效能分析 [J]. 能源与节能, 2023, 13(08): 68-70.