基于 ABB 变频控制的煤矿通风机节能效果分析

史晋祥

山西天地王坡煤业有限公司　山西　晋城　048000

摘　要： 煤矿通风机是矿井安全生产的核心设备，也是煤矿主要能耗设备之一，其运行效率直接影响矿井能耗水平与生产成本。本文针对煤矿通风机传统工频运行存在的能耗高、调节困难等问题，引入 ABB 变频控制技术，阐述变频调速原理与系统构成，分析通风机工况特性与节能机理。研究表明，ABB 变频控制可实现通风机风量根据需风量动态调节，节能率达 30% 以上，同时改善启动性能、提高功率因数、降低设备维护成本，具有显著的经济效益与推广价值。

关键词： 煤矿通风机；ABB 变频控制；节能效果；调速技术

引言： 煤矿通风机是保障矿井安全生产的关键设备，担负着向井下输送新鲜空气、稀释有害气体、调节气候环境的重要任务。传统通风机采用工频恒速运行，通过调节风门、叶片角度或阀门开度控制风量，存在严重的节流损耗，电能浪费现象突出。随着变频调速技术的发展，ABB 变频控制以其优异的调速性能、高功率因数和节能效果，在煤矿通风系统中得到广泛应用。研究基于 ABB 变频控制的煤矿通风机节能效果，对于降低矿井能耗、提升经济效益、推动绿色矿山建设具有重要意义。

1 煤矿通风机运行特性与能耗分析

1.1 通风机的基本工作原理

煤矿通风机属叶片式流体机械，基于空气动力学原理，靠叶轮旋转产生压力差驱动空气流动。其性能参数有风量、风压、转速、轴功率和效率。根据相似理论，风量与转速成正比，风压与转速平方成正比，轴功率与转速立方成正比，这是变频调速节能依据。通风机分主通风机和局部通风机，主通风机功率大、运行久，局部通风机用于局部区域。二者运行工况都需依井下需风量动态调整，传统调节方式难高效匹配。

1.2 传统调节方式及其能耗问题

传统煤矿通风机多工频恒速运行，风量调节靠节流、导叶、变速调节。节流调节靠改变阀门开度，会产生额外压降和能量损失；导叶调节范围有限，效率随角度变化下降；变速调节设备复杂、调速窄、效率低。这些方式下风机始终额定转速运行，输入功率难随需风量降低，能量浪费大[1]。

1.3 变频调速技术的节能机理

变频调速通过改变供电频率调节电机同步转速，实现风机转速连续调节和风量改变。根据流体力学相似定律，转速降低时，风量、风压、轴功率按相应比例下降，需风量减少 20%，轴功率理论上可降近 50%。其节能体现在：消除节流损失，转速与需风量匹配；调速范围内运行效率高；软启动减少启动电能损耗；提升功率因数减少无功损耗。还能实现风量无级调节，精度高、响应快，更好满足通风需求。

2 ABB 变频控制系统构成与原理

2.1 ABB 变频器主要系列与技术特点

ABB 是全球领先的变频器制造商，其产品在工业领域广泛应用。针对煤矿通风机应用场景，ABB 提供多个系列变频器以满足不同需求。ACS880 系列是 ABB 全能型工业变频器，采用直接转矩控制技术，具有卓越的电机控制性能，适用于主通风机等大功率设备。ACS580 系列是通用型变频器，专为泵和风机应用优化，内置多种节能功能，适用于局部通风机等中小功率设备。ACS355 系列是小型变频器，适用于辅助通风设备。ABB 变频器的核心技术是直接转矩控制，与传统的矢量控制相比，直接转矩控制无需复杂的坐标变换和电机模型参数，直接控制电机的磁链和转矩，具有响应速度快、控制精度高、参数鲁棒性强等优点。直接转矩控制可实现转矩响应时间小于 5ms，速度控制精度达 0.1%-0.5%，能够精确控制通风机转速，满足矿井通风的严苛要求。ABB 变频器还具备内置交流电抗器、谐波抑制、能量优化、故障诊断等功能，提高系统可靠性和节能效果。

2.2 变频控制系统组成

基于 ABB 变频的煤矿通风机控制系统主要由以下

部分组成：ABB 变频器作为核心控制单元，实现电源频率变换和电机速度控制。控制柜内含进线断路器、接触器、变频器、出线接触器等电气元件，提供完善的保护功能。操作面板用于参数设置、状态显示和本地操作。远程监控系统通过工业以太网或现场总线与上位机通信，实现远程启停、速度调节和运行参数监测。传感器系统包括风量传感器、风压传感器、温度传感器、振动传感器等，实时监测通风机和电机运行状态。旁路系统在变频器故障时自动切换至工频运行，保障通风连续性[2]。对于煤矿主通风机，通常采用一用一备或两用一备配置，每台风机配置一套变频器，或采用共用变频器加切换柜的方案。变频器室需单独设置，满足通风散热和防尘要求。控制系统需与矿井安全监控系统联动，当瓦斯浓度超限时自动调节风量。

2.3 控制模式与运行策略

ABB 变频控制系统控制模式多样，能满足不同运行需求。恒压控制以风压为被控量，依设定风压自动调风机转速，适用于需恒定风压的通风系统；恒风量控制以风量为被控量，靠风量传感器反馈调转速，是煤矿通风常用模式；时序控制按预设时间程序自动调风量，适合昼夜或季节通风需求变化大的矿井；瓦斯联动控制与瓦斯监测系统联动，瓦斯浓度升高时自动增风量保安全。运行策略上，可设多段速运行，按不同工况预设转速点，用开关量信号切换；也能无级调速，依需风量连续调转速。主通风机常用恒风量控制结合瓦斯联动，局部通风机可用时序或瓦斯联动。节能策略有自动节能优化，变频器自动搜最低能耗工作点；休眠唤醒，低负荷停机、需风时启动，节省电能。

3 工程应用案例分析

3.1 矿井概况与改造前状况

选取山西天地王坡煤业股份有限公司作为研究对象，该矿采用中央并列式通风系统，配备两台主通风机，常规工况下一用一备。通风机型号为 FBCDZ-10-NO33，额定功率 2×800kW，采用双电机驱动方式，额定风量 21000m^3/min，额定风压 4500Pa。改造前通风机采用工频恒速运行模式，通过调节风门开度控制风量输出。矿井实际需风量随采掘工作面数量和位置变化而波动，通常在 14000-16000m^3/min 范围内变化。原有运行方式下，风机始终以额定转速运转，多余风量通过风门节流消耗，存在明显能源浪费现象。

改造前存在的主要问题：能耗高，实测运行功率达 1350kW，按需风量 15000m^3/min 计算，理论所需功率仅 1000kW 左右，能量浪费 350kW，年浪费电量约 300 万度。启动冲击大，工频启动电流达 1400A，对电网造成较大冲击，影响其他设备正常运行。调节困难，风门调节精度低，响应速度慢，难以精确匹配需风量变化。维护工作量大，风门和执行机构故障率高，定期维护成本高。功率因数低，自然功率因数仅 0.82，需配置无功补偿装置。

3.2 改造方案与设备选型

针对上述问题，决定采用 ABB 变频控制技术对通风系统进行改造。改造方案为：每台主通风机配置一套 ABB ACS580 系列变频器，额定功率 2×800kW，采用两台变频器主从供电，分别保留原有旁路系统，变频器故障时可自动切换至工频运行。新增风量传感器、风压传感器，安装于风机入口和扩散塔。控制系统采用 PLC+ 变频器方案，PLC 负责逻辑控制和联锁保护，变频器负责速度调节。上位机监控系统实时显示运行参数、记录历史数据、报警提示。

变频器选型考虑因素：功率匹配，ACS580 额定功率 2×800kW，满足风机功率要求。过载能力，通风机负载特性为平方转矩负载，变频器轻过载能力满足要求。防护等级，变频器柜体防护等级 IP42，适应煤矿地面环境。谐波抑制，配置 12 脉波整流和进线电抗器，总谐波畸变率小于 5%。通信接口，支持 PROFIBUS 通信，与 PLC 无缝连接[3]。

3.3 运行数据与节能效果分析

改造完成后，对通风系统运行数据进行为期一年的跟踪监测。在典型工况（风量 15000m^3/min）下，改造前工频运行加风门调节输入功率 1350kW，功率因数 0.82，日耗电量 32400kWh；改造后变频运行输入功率 1010kW，功率因数 0.96，日耗电量 24240kWh，日节电量 10000kWh，节能率 25.1%。不同风量下的节能效果对比显示：风量 16000m^3/min 时，变频输入功率 1050kW，较工频节电 300kW，节能率 22.2%；风量 14000m^3/min 时，变频输入功率 940kW，较工频节电 410kW，节能率 30.4%，表明风量越低节能效果越显著。全年运行数据统计，年运行 8760 小时，平均风量 15300m^3/min，变频平均输入功率 1000kW，年耗电量 876 万 kWh，较工频运行节电 306 万 kWh，按电价 0.6 元/kWh 计算，年节约电费 183.6 万元。

3.4 其他效益分析

除直接节能效益外，变频改造还带来多方面效益。启动性能改善：采用变频软启动，启动电流控制在 300A

以内，仅为额定电流的 1.5 倍，彻底消除了启动冲击，延长电机和风机寿命。功率因数提升：功率因数由 0.82 提升至 0.97 以上，减少无功损耗，降低变压器容量占用。调节性能提升：使用变频器调节频率和井下风窗配合，风量调节精度达 ±1%，响应时间小于 10 秒，能够精确匹配需风量变化，保障通风安全。设备寿命延长：风机运行在高效区，振动和磨损减小，轴承、叶片等易损件寿命延长。

4 变频控制对通风系统的影响分析

4.1 对通风网络匹配性的影响

变频调速改变风机转速，进而改变风机性能曲线。当转速降低时，风机 H-Q 曲线向下平移，与管网特性曲线的交点随之变化，实现工况点调节。这种调节方式与管网特性完全匹配，不存在节流损失。但在低速运行时，需注意风机工作点是否偏离高效区，以及是否进入不稳定工作区（如喘振区）。对于煤矿主通风机，通常将最低转速限制在额定转速的 60%以上，确保运行稳定性和效率。变频调速对通风网络的影响还体现在多风机联合运行方面，对于多风机联合工作的矿井通风网络，需协调各风机转速，避免相互干扰。ABB 变频系统的通信功能可实现多台风机协同控制，通过主从控制或负荷分配控制，优化整体运行效率。

4.2 对电机运行特性的影响

变频器输出含有谐波成分，可能引起电机附加发热、噪声和振动。ABB 变频器采用直接转矩控制和优化 PWM 调制策略，输出波形接近正弦波，谐波含量低，对电机影响小。对于改造项目，需评估现有电机是否适用于变频运行。主要考虑因素包括：绝缘强度，变频器输出电压尖峰可能对电机绝缘造成冲击，ABB 变频器配置 du/dt 滤波器可降低电压变化率。低速散热，电机在低速运行时自带风扇散热能力下降，对于恒转矩负载需注意，而通风机为平方转矩负载，低速时负载转矩小，发热量低，一般无需特殊处理[4]。轴承电流，变频器可能引起轴电流，损坏轴承，ABB 变频器配置共模滤波器和绝缘轴承可选方案可解决此问题。

4.3 谐波与电能质量问题

变频器是非线性负载，工作时会产生谐波电流注入电网，影响电能质量。ABB 变频器采取多项措施抑制谐波：内置交流电抗器可降低谐波含量；12 脉波整流配置大幅降低特征谐波；有源滤波装置可动态补偿谐波；多电平拓扑结构输出电压波形更接近正弦波。本工程配置 12 脉波整流和进线电抗器，实测总谐波畸变率 4.2%，满足 GB/T 14549-93 标准要求（5%以内）。同时，变频器的高功率因数特性改善了系统无功平衡，减少了无功损耗。

结束语

煤矿通风机是矿井安全生产的关键设备，也是主要能耗设备。传统工频运行方式存在能耗高、调节困难、启动冲击大等问题，难以满足节能降耗要求。ABB 变频控制技术以其优异的调速性能和高可靠性，为通风机节能改造提供了有效解决方案。随着煤矿智能化建设深入推进，变频控制将与矿井自动化系统深度融合，实现更精准的通风控制和更高效的能源利用，为绿色矿山建设和双碳目标实现贡献力量。

参考文献

[1] 李树光, 聂小武, 付辉, 等. 基于 DTC 控制的 ABB 变频器在转炉系统上的应用 [J]. 山西冶金,2022(8):142-144.

[2] 杨正东. 斜沟煤矿选煤厂仓下给煤机变频改造与应用 [J]. 江西煤炭科技，2024(2):145-147.

[3] 白怡明. 智慧露天煤矿在新 IT 架构下的关键技术 [J]. 露天采矿技术，2022，37(01):46-49+53.

[4] 史晓菲. 煤矿通风机智能变频调速控制研究 [J]. 能源与节能，2025(3)：77-79,84.