

煤矿瓦斯抽放泵电机变频改造的降本增效 实践与推广

郜俊伟

(山西兰科煤层气利用科技有限公司)

摘要:为解决煤矿瓦斯抽放泵恒速运行导致的高能耗和高运维成本问题,本文以山西兰花集团芦河煤业瓦斯抽放泵电机变频改造项目为研究对象,基于现场调研数据与工程实践,系统分析了改造方案的设计、降本增效的量化效益及其推广价值。研究结果显示:通过采用4套10kV 1000kW高压变频调速系统(“一拖一无切换”模式),并结合PID动态调控技术,可实现瓦斯泵的“按需供能”。改造后,系统实际节电率达到43.84%,年节电量为289.47万kW·h,年节省电费159.21万元,运维成本每年降低3.6万元,同时年减排CO₂2886吨,节约标准煤355.8吨。该项目不仅具备经济可行性,还具有良好的环境效益,为煤矿高能耗设备的节能改造提供了可复制的技术范式,具有广泛的推广价值。

关键词:煤矿瓦斯抽放泵;变频改造;降本增效;节能效益;推广建议

1 引言

在“双碳”目标(碳达峰、碳中和)及《“十四五”节能减排综合工作方案》(单位GDP能耗下降13.5%)的政策背景下,煤矿作为能源消耗大户,其高能耗设备的节能改造已成为行业绿色转型的核心任务。根据《煤矿瓦斯抽采工程设计标准》(GB50471-2018)

的规定,煤矿瓦斯抽放泵作为瓦斯治理的关键设备,必须通过变频技术提升运行效率,且变频装置的效率大于96%。

山西兰花集团芦河煤业有限公司目前配备4台瓦斯抽放泵(高低负压各2台,一用一备),采用传统的恒速控制模式,面临三大核心问题:首先,低负荷状态下能耗高,电机长期处于满负荷运行状态,无法根据瓦斯浓度动态调节转速,工频运行时实际负载

仅为额定流量的43.6%(实际运行流量 $5.5\text{m}^3/\text{s}$,额定流量 $12.7\text{m}^3/\text{s}$),导致能源浪费严重;其次,设备寿命较短,频繁启停加剧了机械磨损,年维护成本高达20万元;再者,安全风险潜藏,低负荷工况下泵效率降低,可能引发局部瓦斯积聚。基于此背景,本文通过分析该项目的改造方案及效益数据,论证变频改造在降本增效方面的价值,并提出推广建议。

2 项目背景与现状分析

2.1 设备基础参数

芦河煤业所使用的瓦斯抽放泵为水环式真空泵(型号2BES87),配套电机型号为YB34505-4。其核心参数具体如下:

- 电机额定功率:900kW;
- 额定电压:10kV;
- 额定电流:62.1A;
- 额定转速:1488r/min;
- 额定流量: $45600\text{m}^3/\text{h}$ (折合 $12.7\text{m}^3/\text{s}$);
- 电机效率:96.1%,功率因数:0.87。

2.2 工频运行能耗痛点

根据《煤矿瓦斯抽采工程设计标准》(GB50471-2018)进行计算,工频运行状态下,瓦斯泵的实际负载电流为25A(低于其额定电流62.1A),但仍存在以下问题:

2.2.1 能耗冗余

在工频模式下,2台运行电机的年耗电量高达 $1576.8\text{万kW}\cdot\text{h}$ ($900\text{kW}\times 2\times 8760\text{h}$)。然而,实际抽采需求仅需要额定流量的43.6%。由于轴功率与转速的立方成正比($P\propto n^3$),恒速运行导致在376.7kW的工频功率中,有300.4kW属于无效能耗。

2.2.2 运维成本高昂

频繁的启停操作导致轴承磨损和绕组过热,年维护费用高达20万元,设备寿命较设计值缩短了15%。

2.2.3 安全适配性不足

在低负压抽采期(下分层抽采)期间,瓦斯量仅为设计值的70%-80%,恒速运行无法有效匹配管网压力需求,存在瓦斯积聚的安全风险。

3 变频改造方案设计

3.1 改造原则与目标

核心原则:以“节能降耗”为核心,兼顾可靠性(变频器平均无故障时间达40000小时)、经济性(投资回报期不超过4年)及技术先进性(采用多电平串联交直交技术)。

改造目标:实现瓦斯泵转速的动态调节(0-50Hz),确保实际节电率不低于40%,年维护成本降低幅度超过15%,满足《煤矿安全规程》中“双设备、双回路”的要求。

3.2 变频调速节能原理

从流体力学的原理得知,使用感应电动机驱动的风机负载,轴功率 P 与流量 Q ,扬程 H 的关系为: $P\propto Q\times H$

当电动机的转速由 n_1 变化到 n_2 时, Q 、 H 、 P 与转速的关系如下:

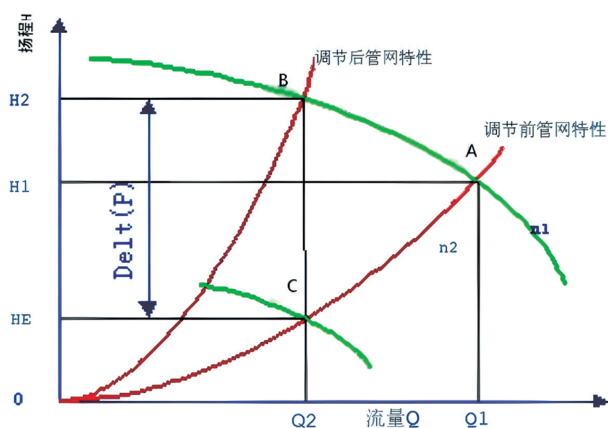
$$Q_2=Q_1\times\frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

$$H_2=H_1\times\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (2)$$

$$P_2=P_1\times\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (3)$$

可见流量 Q 和电机的转速 n 是成正比关系的,而所需的轴功率 P 与转速的立方成正比关系。所以当需要80%的额定流量时,通过调节电机的转速至额定转速的80%,即调节频率到40Hz即可,这时所需功率将仅为原来的51.2%。

如下图所示,从风机的运行曲线图来分析采用变频调速后的节能效果。



风机的运行曲线图

当所需风量、流量从 Q_1 减小到 Q_2 时,如果采用调节阀门的办法,管网阻力将会增加,管网特性曲线上移,系统的运行工况点从 A 点变到新的运行工况点 B 点运行,所需轴功率 P_2 与面积 $H_2 \times Q_2$ 成正比;如果采用调速控制方式,风机转速由 n_1 下降到 n_2 ,其管网特性并不发生改变,但风机的特性曲线将下移,因此其运行工况点由 A 点移至 C 点。此时所需轴功率 P_3 与面积 $H_B \times Q_2$ 成正比。从理论上分析,所节约的轴功率 ΔP 与 $(H_2 - H_B) \times (C - B)$ 的面积成正比。

考虑减速后效率下降和调速装置的附加损耗,通过实践的统计,风机泵类通过调速控制可节能 20% ~ 50%,有些风机负载节能比例达 60% 以上。

3.3 设备选型与技术方案

3.3.1 变频设备参数

针对 4 台瓦斯泵,配置 4 套 10kV 1000kW 高压变频调速系统,其核心参数见表 1:

3.3.2 关键技术路径

“一拖一无切换”控制模式:每台瓦斯泵配置 1 台变频器,主泵变频调速、备用泵工频待机,合闸闭锁与故障分闸联动,避免变频器故障导致系统停机。

PID 动态调控:集成瓦斯浓度、管网负压、流量传感器(如管道红外甲烷传感器),通过 DCS 系统实时调节频率,使抽放功率与瓦斯涌出量精确匹配(如高压负压抽采期频率 40Hz,低负压抽采期频率 21.67Hz)。

工变频无扰切换:通过检测工频电网频率、相位,实现变频与工频的无缝切换(切换时间 $< 0.5s$),避免瓦斯抽采中断。

4 降本增效效益量化分析

4.1 经济效益(直接成本节约显著)

4.1.1 直接节电收益

根据相似定律($Q \propto n$, $P \propto n^3$)并结合实际工况进行修正(理论节电率为 79.7%,考虑到管网泄漏及煤粉气固两相流的影响,采用 55% 的修正系数):

单台电机年节电量为 144.73 万 $kW \cdot h$ (理论值为 263.15 万 $kW \cdot h \times 55\%$);

两台运行电机年总节电量为 289.47 万 $kW \cdot h$;

年节省电费为 289.47 万 $kW \cdot h \times 0.55 \text{ 元}/kW \cdot h = 159.21$ 万元。

4.1.2 运维成本降低

变频改造后机械磨损减少,维护费用降低 18%: 20 万元/年 $\times 18\% = 3.6$ 万元/年。

设备寿命延长 10%~20%(按 15% 测算),原设备

表 1 瓦斯泵配套高压变频调速系统核心参数

参数类别	具体指标	合规性验证
额定容量	1250kVA	满足电机 900kW 额定功率
输出电流	68A	大于电机额定电流 62.1A
变频器效率	$> 96\%$ (额定输出含变压器)	符合 GB50471-2018 要求($\geq 97\%$)
输入功率因数	> 0.96 (20% 负载以上)	降低电网无功损耗
过载能力	130%/1min, 180% 立即保护	应对瓦斯量突发波动

设计寿命10年,改造后延长至11.5年,减少设备更换成本约135万元(单台电机45万元×3台,按寿命周期分摊)。

4.1.3 投资回收期估算

按行业高压变频系统单套150万元(4套合计600万元),年总收益162.81万元(159.21万元+3.6万元)计算:

静态投资回收期: $600 \text{ 万元} \div 162.81 \text{ 万元/年} \approx 3.7 \text{ 年}$, 低于煤矿设备平均投资回收期(5年)。

4.2 环境效益(助力“双碳”目标落地)

根据国家能源局发布的排放因子数据(CO_2 : $0.997 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$, 标准煤: $0.1229 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$, SO_2 : $3.0 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$, NO_x : $2.4 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$), 计算得出:

年度 CO_2 减排量如下: $289.47 \text{ 万 kW} \cdot \text{h} \times 0.997 \text{ kg/kW} \cdot \text{h} \div 1000 \approx 2886 \text{ 吨}$ 。这一减排量相当于641亩森林的年固碳量(按每亩林地年固碳4.5吨 CO_2 计算)。

年节约标准煤: $289.47 \text{ 万 kW} \cdot \text{h} \times 0.1229 \text{ kg/kW} \cdot \text{h} \div 1000 \approx 355.8 \text{ 吨}$;

年减排 SO_2 : $289.47 \text{ 万 kW} \cdot \text{h} \times 3.0 \text{ g/kW} \cdot \text{h} \div 1000 \approx 8.7 \text{ 吨}$, $\text{NO}_x \approx 6.9 \text{ 吨}$, 符合地方环保部门减排要求。

4.3 社会效益(提升行业合规性与示范价值)

政策合规:项目符合《关于进一步加强煤矿瓦斯防治工作的若干意见》(国办发[2011]26号)“瓦斯综合治理体系”要求,助力企业通过绿色制造体系认证。

技术示范:为同行业提供“大功率电机变频改造+智能监控”的一体化方案,可复制应用于煤矿风机、水泵等高能耗设备(此类设备占煤矿总能耗的60%以上)。

5 推广价值与建议

(1)技术成熟性:项目采用的多电平串联变频技术、工变频无扰切换技术已通过工业验证(变频器平均无故障时间40000小时,远超行业平均水平25000

小时);

(2)经济性适配:投资回收期 ≤ 4 年,符合企业投资预期。

(3)政策驱动:国家《煤矿安全规程》明确要求瓦斯抽采设备需具备动态调节能力,变频改造成为强制趋势。

(4)在芦河变频器改造成功运行的背景下,建议优先对各企业大功率设备进行变频改造,并在此基础上开展设备能耗普查。

6 结论

山西兰花集团芦河煤业瓦斯抽放泵电机变频改造项目,通过采用“高压变频系统+智能调控技术”的优化组合方案,成功实现了“降本增效”与“绿色安全”的双重目标。在经济层面,该项目每年可节约成本162.81万元,投资回报期仅为3.7年;在环境层面,每年可减少 CO_2 排放2886吨,有力支持了“双碳”目标的实现;在技术层面,该项目验证了大功率电机变频改造的可行性。

该项目的成功实施表明,变频改造是煤矿高能耗设备实现节能降耗的理想选择。其技术方案和效益模式具有广泛的推广价值,可应用于公司各行业,有效推动各企业向“低碳、高效、安全”的方向转型。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部,国家市场监督管理总局。煤层气(煤矿瓦斯)排放标准(GB 21522—2024)。
- [2] 《“十四五”节能减排综合工作方案》。
- [3] 《煤矿瓦斯抽采工程设计标准》(GB 50471—2018)。
- [4] 《关于进一步加强煤矿瓦斯防治工作的若干意见》(国办发[2011]26号)。
- [5] 《山西兰花集团芦河煤业有限公司瓦斯抽放泵电机变频改造节能项目论证报告》(2025年4月)。