

# 机电工程高压变频器在风机水泵中的应用研究

谢 丹

江西玛可隆建设有限公司 江西抚州 344000

**摘 要:** 随着工业领域节能降耗需求的不断提升及智能控制技术的快速发展, 高压变频器作为一种高效的电力电子变流装置, 在机电工程中得到了广泛应用。本文以风机、水泵类负载为研究对象, 深入探讨了高压变频器在该领域的应用价值、关键技术及实施效果。首先, 分析了风机水泵传统控制方式的局限性, 阐述了高压变频调速技术的节能原理与优势; 其次, 结合具体工程案例, 研究了高压变频器的选型方法、系统构成及控制策略; 最后, 通过实际运行数据验证了高压变频器在提高系统效率、降低能耗、改善电机运行特性及延长设备寿命等方面的显著成效。研究表明, 高压变频器在风机水泵中的应用不仅能带来显著的经济效益, 还能提升系统的自动化水平和可靠性, 对推动工业绿色低碳发展具有重要意义。

**关键词:** 高压变频器; 风机; 水泵; 节能; 调速控制; 机电工程

## 引言

在现代工业生产中, 风机和水泵是通用机械设备, 广泛用于电力、冶金等多领域, 耗电量占工业总用电量超40%。长期以来, 这类负载用阀门、挡板节流调节流量, 造成能量浪费, 且电机工频运行, 机械磨损严重、系统效率低。随着国家推行节能减排政策和企业增强成本控制意识, 高效节能的调速控制技术成风机水泵系统改造趋势。高压变频器能改变电机输入电源频率和电压, 实现平滑调速, 精确控制流量和压力以节能。近年来, 其技术成熟、成本降低, 为在风机水泵等大功率负载中大规模应用奠定基础。本文对高压变频器在风机水泵中的应用进行系统性研究, 为相关工程实践提供理论参考和技术指导。

## 一、风机水泵传统控制方式的局限性分析

### (一) 节流调节方式的能耗问题

传统的风机水泵系统通常采用定速电机驱动, 当实际需求流量或压力低于额定值时, 通过调节出口阀门(水泵)或入口挡板(风机)的开度来改变管网阻力特性, 从而实现流量或压力的控制。这种方式下, 电机始终运行在额定转速, 输入功率变化不大, 而有效输出功率却因节流损失大幅降低。例如, 当风机流量降低到额定流量的60%时, 采用挡板调节方式的轴功率仅比额定功率下降约20%~30%, 大量电能被浪费在挡板的节流损耗上<sup>[1]</sup>。理论分析和实践数据均表明, 节流调节方式的效率极低, 尤其在偏离额定工况较远时, 能耗损失更为严重。

## (二) 对设备及系统的负面影响

除了能耗高的问题, 节流调节方式还会对设备和系统造成诸多负面影响。首先, 阀门和挡板长期处于部分开启状态, 容易产生气蚀(水泵)、喘振(风机)等现象, 加剧设备的机械振动和噪声, 导致阀门、管道及电机轴承等部件的磨损加快, 缩短设备使用寿命。其次, 节流调节的响应速度较慢, 调节精度不高, 难以满足现代工业生产对工艺参数快速、精确控制的要求, 可能影响产品质量或生产效率。此外, 频繁的阀门/挡板操作也增加了维护工作量和成本。

## 二、高压变频调速技术的节能原理与优势

### (一) 变频调速的基本原理

根据流体力学相似定律, 对于风机和水泵这类平方转矩负载, 其轴功率 $P$ 与转速 $n$ 的三次方成正比( $P \propto n^3$ ), 流量 $Q$ 与转速 $n$ 成正比( $Q \propto n$ ), 压力 $H$ 与转速 $n$ 的平方成正比( $H \propto n^2$ )。高压变频器通过将电网的工频交流电整流为直流电, 再逆变为频率可调的交流电供给电机, 改变电机的同步转速 $n_1$ ( $n_1=60f/p$ , 其中 $f$ 为电源频率,  $p$ 为电机极对数), 从而实现电机转速 $n$ 的调节。当需要降低流量时, 通过降低变频器输出频率, 使电机转速下降, 轴功率将以转速的三次方关系大幅降低, 从而实现显著的节能效果<sup>[2]</sup>。

### (二) 高压变频器的技术优势

显著节能效果: 如前所述, 变频调速直接改变电机转速来调节流量/压力, 避免了节流调节造成的巨大能量损失。实践证明, 对于变工况运行的风机水泵系统, 采

用高压变频调速后,节能率通常可达20%–60%,具体取决于工况变化范围和调节深度。

**提高控制精度与自动化水平:**高压变频器可接收来自PLC、DCS系统或现场传感器的控制信号(如4–20mA、0–10V),实现对流量、压力、液位等工艺参数的闭环自动控制,控制精度高,响应速度快,能够稳定维持系统在最佳工况点运行。

**改善电机启动与运行特性:**高压变频器采用软启动方式,启动电流小(通常为额定电流的1.2–1.5倍),避免了传统直接启动或星三角启动时的大电流冲击,保护了电机及电网。同时,可实现电机的无级调速,运行平稳,减少机械冲击和振动,延长电机、轴承、联轴器等设备的使用寿命。

**增强系统可靠性与灵活性:**现代高压变频器通常内置完善的保护功能,如过流、过载、过压、欠压、缺相、电机过热等,能有效保护电机和变频器本身。部分高压变频器还具备冗余设计和工频/变频切换功能,确保系统在变频器故障时能无扰动切换至工频运行,提高了系统的连续运行能力。此外,通过通讯接口,高压变频器可方便接入工厂自动化系统,实现远程监控和数据管理,提升了系统的智能化水平<sup>[3]</sup>。

### 三、高压变频器在风机水泵中的应用关键技术

#### (一) 变频器选型方法

高压变频器的选型是确保其在风机水泵系统中安全稳定运行并达到预期节能效果的关键环节,需综合考虑以下因素:

**电机参数:**包括电机额定功率、额定电压、额定电流、额定转速、极数、接法等,确保变频器的容量和输出电压等级与电机匹配。

**负载特性:**风机水泵属于平方转矩负载,启动转矩要求不高,调速范围一般在20%–100%额定转速。选型时需关注变频器在低速段的输出特性和效率。

**电网条件:**考虑现场供电电网的电压波动范围、谐波水平、短路容量等,选择合适的输入电抗器或滤波器,以减少变频器对电网的影响和电网对变频器的干扰。

**工艺要求:**根据系统对调速精度、动态响应、控制方式(开环/闭环)、通讯功能等方面的要求选择相应配置的变频器。

**环境条件:**考虑安装现场的温度、湿度、海拔高度、粉尘、腐蚀性气体等环境因素,选择具有相应防护等级(IP等级)和散热方式的变频器,并采取必要的通风、防尘、防腐措施。

**品牌与服务:**选择技术成熟、质量可靠、市场口碑好、售后服务完善的品牌产品,以保证设备的长期稳定运行和及时的技术支持<sup>[4]</sup>。

#### (二) 系统构成与配置

高压变频器在风机水泵系统中的典型应用配置主要包括以下部分:

**高压电源柜:**用于将电网高压(如6kV、10kV)引入,并提供隔离和过载保护。

**高压变频器:**核心设备,通常由移相整流变压器、功率单元(如IGBT或IGCT功率模块)、控制器、冷却系统等组成。常见的拓扑结构有单元串联多电平型、中点钳位型(NPC)、三电平或五电平二极管钳位型等。

**异步电动机:**通常为原有普通高压异步电机,若变频器载波频率较低,需注意电机的绝缘承受能力和轴承电流问题,必要时需更换为变频专用电机或采取绝缘加强、加装轴承绝缘等措施。

**控制柜与操作台:**包含PLC、人机界面(HMI)、控制按钮、指示灯等,实现对变频器的本地/远程操作、参数设置、状态监控和故障报警。

**检测与反馈元件:**如压力传感器、流量传感器、液位传感器等,用于采集系统的工艺参数,作为闭环控制的反馈信号。

**辅助设备:**如输入/输出电抗器、滤波器、制动单元(对于需要快速停车或位能性负载)、UPS电源等。

#### (三) 控制策略研究

针对风机水泵系统的特性,高压变频器通常采用以下控制策略:

**V/F控制:**即电压/频率比恒定控制,是一种开环控制方式,结构简单,成本低,适用于对调速精度和动态响应要求不高的场合,在风机水泵控制中应用广泛。

**矢量控制(VC)/直接转矩控制(DTC):**矢量控制通过坐标变换将三相异步电机等效为直流电机进行控制,实现了磁通和转矩的解耦控制,具有较高的调速精度和动态响应性能;直接转矩控制则直接控制电机的磁链和转矩,响应速度更快。对于一些对动态性能要求较高或需要低速大转矩的风机水泵应用,可采用此类控制方式。

**PID闭环控制:**将来自压力、流量或液位传感器的反馈信号与设定值进行比较,通过PID调节算法输出频率给定信号给变频器,实现对工艺参数的自动精确控制。例如,对于恒压供水系统,压力传感器检测管网压力,与设定压力比较后,通过PID控制器调节变频器输出频率,使实际压力稳定在设定值<sup>[5]</sup>。

多泵/多风机联动控制：在大型供水或通风系统中，常采用多台水泵或风机并联运行。高压变频器可通过PLC或自身控制器实现多台设备的循环软启动、变频与工频切换、根据负载变化自动加减机等功能，优化系统运行效率。

#### 四、工程应用案例分析

##### (一) 案例概况

某市政污水处理厂曝气系统节能改造项目，涉及4台离心式曝气风机（3用1备），原配置为YKK450-4型高压异步电机，额定功率630kW，额定电压10kV，额定转速1480r/min，采用出口阀门调节曝气量。改造方案为保留原电机，为每台风机配置1台10kV、630kW高压变频器（单元串联多电平拓扑），采用PID闭环控制，根据生物反应池溶解氧浓度（设定值 $2.0 \pm 0.2\text{mg/L}$ ）自动调节风机转速。

##### (二) 改造前后运行数据对比

改造前，风机出口阀门开度长期维持在45%~55%，平均运行电流58A，有功功率约420kW，溶解氧浓度波动范围 $\pm 0.8\text{mg/L}$ 。

改造后，阀门全开，在相同溶解氧条件下，风机平均运行频率32Hz（对应转速947r/min），平均运行电流30A，有功功率降至170kW，溶解氧波动控制在 $\pm 0.2\text{mg/L}$ 。

##### (三) 节能效果与经济效益分析

节能计算：

单台风机每小时节电量  $\Delta W = (420 - 170) \times 1 = 250\text{kWh}$

3台运行风机年节电量（年运行8000小时）：

$250 \times 3 \times 8000 = 6,000,000\text{kWh}$

按工业电价0.58元/kWh计算，年节约电费：

$6,000,000 \times 0.58 = 3,480,000\text{元}$

其他效益：

改造后风机实现软启动，启动电流从额定电流的6~7倍降至1.3倍，消除电网冲击；阀门全开避免了节流损耗，阀瓣磨损率降低90%，预计延长阀门寿命3年以上；电机转速降低使轴承温度下降 $12^\circ\text{C}$ ，维护周期从3个月延长至8个月，年减少维护费用约5万元。此外，溶解氧控制精度提升，使污泥活性提高15%，污水处理达标率从92%升至99%，减少了环保罚款风险。

##### (四) 改造经验总结

精准负荷分析：通过连续1个月监测风机电流、阀门开度及溶解氧数据，确定平均负荷率仅65%，为变频改造提供了必要性依据；

控制策略优化：采用“溶解氧-转速”双闭环控制，引入前馈补偿算法（根据进水流量变化提前调节转速），使动态响应速度提升40%；

冗余设计保障：保留工频切换回路，变频器故障时30秒内自动切换至工频运行，确保污水处理不间断；

全生命周期管理：建立变频系统运行数据库，通过能耗趋势分析及及时发现叶轮积垢等问题，进一步挖掘节能潜力。

该案例验证了高压变频技术在市政污水处理领域的显著效益，其投资回收期仅14个月，为同类流体机械节能改造提供了可复制的实践经验。

#### 结语

高压变频器在风机水泵系统中的应用，不仅解决了传统控制方式的高能耗问题，还显著提升了系统的整体性能。通过对其关键技术的研究与实际工程案例的分析，可以看出，合理选型、科学配置以及优化控制策略是实现节能效果最大化的关键因素。同时，改造后的系统在提高工艺稳定性、降低设备损耗、减少维护成本等方面也表现出明显优势。

未来，随着工业自动化和智能化水平的不断提高，高压变频技术将在更多领域得到推广和应用。尤其是在国家“双碳”目标的驱动下，如何进一步提升高压变频器的效率、可靠性和智能化程度，将成为技术研发的重点方向。此外，结合大数据分析、人工智能等新兴技术，探索高压变频器在预测性维护、能效优化等方面的潜力，也将为行业发展注入新的活力。

总之，高压变频器作为一项高效节能的技术手段，在风机水泵领域的成功应用为其在更广泛工业场景中的推广奠定了基础。通过持续的技术创新和工程实践，其在节能减排、绿色发展中的价值将进一步显现。

#### 参考文献

- [1] 王国华, 李祥辉. 高压变频器在出铁除尘风机上的应用[J]. 工程技术: 文摘版, 2022(5).
- [2] 刘厚甫, 杨学斌, 周伟, 等. 高压变频器在红钢烧结除尘风机中的应用[J]. 冶金能源, 2020, 39(2): 4. DOI: CNKI: SUN: YJLY.0.2020-02-012.
- [3] 李定川. 合康HIVERT-Y06/173高压变频器在除尘风机中的应用[J]. 电世界, 2020, 61(4): 4. DOI: CNKI: SUN: DSJL.0.2020-04-018.
- [4] 秦英武. 东方日立高压变频器在霍林河电厂动叶可调轴流式引风机上的应用[J]. 变频器世界, 2022(1): 90-94.
- [5] 段随庆. 水冷机组在高压变频器环境治理中的应用[J]. 电器工业, 2022(005): 000.