

# 变频调速技术在泵站节能运行中的应用分析

王伟

宁夏回族自治区水利厅固海扬水管理处

DOI:10.32629/etd.v6i12.19227

**[摘要]** 我国推进“双碳”战略、优化能源结构,节能减排成各行业核心议题。泵站是关键基础设施,能耗问题突出,泵类设备占工业总用电量20%以上,大量泵站传统定速运行,能源浪费严重。变频调速技术调速性能优异、节能效果显著,是泵站节能改造重要手段。本文阐述其基本原理与应用优势,分析水泵系统特性与能耗规律,构建节能理论模型,合理应用可使泵站节电20%~50%,提升稳定性与自动化水平,最后展望技术挑战与发展趋势,提供理论实践指导。

**[关键词]** 变频调速; 泵站; 节能; 水泵特性; 相似定律; 能效优

中图分类号: TV675 文献标识码: A

## Application Analysis of Variable Frequency Speed Regulation Technology in Energy-Saving Operation of Pump Stations

Wei Wang

Guihai Yangshui Management Office, Water Resources Department of Ningxia Hui Autonomous Region

**[Abstract]** With China's implementation of the "dual carbon" strategy and optimization of energy structure, energy conservation and emission reduction have become core issues across various industries. Pump stations are key infrastructure with prominent energy consumption issues. Pump equipment accounts for more than 20% of total industrial electricity consumption, and a large number of pump stations operate at traditional fixed speeds, resulting in serious energy waste. Variable frequency speed regulation technology, with its excellent speed regulation performance and significant energy-saving effects, is an important means for energy-saving transformation of pump stations. This paper expounds its basic principles and application advantages, analyzes the characteristics and energy consumption patterns of water pump systems, constructs an energy-saving theoretical model, and shows that reasonable application can save 20% to 50% of electricity consumption in pump stations, improve stability and automation level. Finally, it discusses technical challenges and development trends, providing theoretical and practical guidance.

**[Key words]** variable frequency speed regulation; pump station; energy saving; water pump characteristics; similarity law; energy efficiency optimization

### 引言

泵站是水利、市政、工业、农业等领域的关键动力枢纽,负责水资源输送调配。传统泵站靠阀门节流或启停控流,“以堵代调”能量损耗大,还易引发水锤、汽蚀等隐患,缩短设备寿命。近年来,电力电子等技术发展使变频调速技术(VFD)成熟,成本降低、可靠性提升。它通过改变电源频率平滑调节电机转速,直接控制水泵流量与扬程,解决能量浪费问题。多部门出台政策鼓励其推广,在此背景下,研究该技术在泵站节能中的应用机理等,有重要价值与意义。

### 1 变频调速技术基本原理

#### 1.1 技术概述

变频调速技术的核心是变频器(Inverter),其主要由整流单元、滤波单元、逆变单元及控制单元组成。工作时,变频器首先将输入的工频交流电(通常为50Hz)经整流桥转换为直流电,再通过大容量电容滤波后,由IGBT(绝缘栅双极型晶体管)等功率器件组成的逆变桥将直流电逆变为频率和电压均可调的三相交流电,供给异步电动机。通过调节输出频率 $f$ ,即可改变电机的同步转速 $n_s$ :

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

其中, $p$ 为电机极对数。由于异步电机的实际转速 $n$ 略低于同步转速(存在转差率 $s$ ),但二者呈近似线性关系,因此可通过调节 $f$ 实现对电机转速 $n$ 的精确控制。

## 1.2 调速特性

对于离心式水泵(占泵站绝大多数),其性能参数(流量 $Q$ 、扬程 $H$ 、轴功率 $P$ )与转速 $n$ 之间遵循相似定律(Affinity Laws):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

由此可见,流量与转速成正比,扬程与转速平方成正比,而轴功率则与转速立方成正比。这意味着,当系统所需流量降低时,若通过降低转速而非关小阀门来实现,功率消耗将呈立方级下降,节能潜力巨大。

例如,当流量降至额定值的80%时:

阀门节流方式:扬程基本不变,功率仅略降(约90%);

变频调速方式:转速降至80%,功率降至 $0.8^3=0.512$ ,即仅为额定功率的51.2%,节能率达48.8%。

## 2 泵站系统能耗特性分析

### 2.1 管路系统特性

泵站的实际运行工况由水泵特性曲线与管路系统特性曲线的交点决定。管路系统特性通常表示为:

$$H = H_s + KQ^2$$

其中, $H_s$ 为静扬程(如地形高差、水位差等), $K$ 为管路阻力系数。当用水需求变化时,理想情况下应使水泵工作点始终位于高效区内。该公式表明,系统所需扬程随流量的平方增长,而水泵的扬程-流量特性则呈下降趋势。两者的交点即为水泵的实际工作点。在理想状态下,该工作点应尽可能位于水泵高效区中心附近<sup>[1]</sup>。然而,在实际运行中,由于用水需求的动态变化,若水泵转速固定,则只能通过改变管路特性(如调节阀门开度)来移动工作点,这往往导致系统长期运行在低效区域,造成能源浪费。

### 2.2 传统调节方式的能耗缺陷

在定速泵站中,常用的调节手段包括出口阀门节流和多泵组合启停。阀门节流通过增加局部阻力改变管路特性曲线,使工作点左移,从而减少流量。然而,这一过程并未减少水泵本身的输出能量,而是将多余的能量以热能形式耗散在阀门上,本质上是一种“无效做功”。多泵启停控制虽能在一定程度上匹配负荷变化,但无法实现连续调节,常导致供水压力波动过大,出现“过供”或“欠供”现象。此外,频繁启停不仅对电网造成冲击,还会加速电机和机械密封的磨损,增加维护成本。这两种方式均无法改变水泵本身的运行轨迹,难以适应动态负荷需求,造成大量无效能耗,凸显了传统调节模式在能效与可靠性方面的双重不足。

## 3 变频调速在泵站中的应用模式

### 3.1 单泵变频控制

单泵变频控制适用于小型泵站或负荷波动较小的场合。该模式通过一台变频器驱动一台水泵,根据压力、流量或液位等反馈信号实时调节输出频率,实现闭环自动控制。其优势在于系统结构简单、响应速度快、控制精度高,能够有效维持管网压力或

水池液位的稳定<sup>[2]</sup>。然而,该模式也存在单点故障风险较高的问题,一旦变频器或电机出现故障,整个泵站将失去供水能力,因此通常需配置手动旁路或备用泵以保障供水安全。

### 3.2 多泵协调控制(“一拖多”或“多拖多”)

常见的变频配置包括“一拖多”和“多拖多”两种模式。“一拖多”模式采用一台大功率变频器通过切换装置轮流驱动多台泵,虽然初期投资较低,但无法实现多泵同时变频运行,调节灵活性受限,且切换过程可能引起短暂的压力波动。“多拖多”模式则为每台泵配备独立变频器,构成全变频系统,可实现任意组合的流量输出,运行效率最高,控制策略也最为灵活。更经济实用的方案是采用“变频+工频”混合模式:设置1~2台变频泵作为主调泵,其余为工频泵。当负荷较小时,仅变频泵运行;负荷增大时,依次投入工频泵,变频泵负责微调以维持系统稳定。

### 3.3 智能控制策略

#### 3.3.1 液位联动控制

在雨水泵站、污水提升泵站等排水类场景中,常采用基于集水池液位的多级控制策略。系统配置超声波或投入式液位计,实时监测水位变化。当水位达到启泵阈值(如1.8 m)时,主泵启动并以变频方式逐步加速;若水位继续上升至高报警水位(如2.2 m),则自动投入备用泵协同排水;当水位降至停泵水位(如0.6 m)时,系统延时停机,防止频繁启停。此外,为避免水泵干运转,系统设置最低安全水位(如0.3 m)作为硬性保护联锁条件,一旦低于该值即强制停泵并发出报警。

#### 3.3.2 多目标优化调度控制

在大型区域泵站或智慧水务平台中,已开始引入基于模型预测控制(MPC)、模糊逻辑或强化学习等先进算法的多目标优化策略。此类系统不仅考虑实时工况,还综合接入分时电价数据、水泵累计运行小时数、振动/温度状态监测、水质浊度指标等多维信息。例如,在谷电时段(如23:00-7:00),系统可提前蓄水至高位水池,减少峰电时段运行负荷;同时,根据水泵健康状态评估结果,优先启用磨损较小的机组,延长整体设备寿命。

#### 3.3.3 扬水站站的PLC智能控制

在扬水站中,PLC智能控制系统融合变频调速与多传感器反馈,实现恒压供水、多泵轮换及负载均衡。系统通过压力变送器采集管网压力,采用PID算法动态调节变频泵转速,维持设定压力;依据运行时间自动切换主备泵,均衡设备磨损;同时实时监测电流、温度等参数,具备故障自诊断、冗余切换与报警功能<sup>[3]</sup>。通过通信模块接入智慧水务平台,支持远程监控与调度,提升供水可靠性、安全性与能效,推动泵站向“少人值守、无人值班”模式升级。

## 4 理论节能效益量化分析

设某泵站年运行时间为 $T$ (h),额定功率为 $P_n$ (kW)。若采用变频调速后,平均负载率为 $\eta_{load}$ (即平均流量/额定流量),则理论节电率 $\Delta E$ 可估算为:

$$\Delta E \approx 1 - \eta_{load}^3$$

年节电量:

$$W_{\text{save}} = P_n \cdot T \cdot \Delta E$$

该模型虽为简化估算, 但能清晰反映转速降低对能耗的立方级影响, 为项目可行性分析提供重要依据。值得注意的是, 实际节能效果还受水泵效率曲线、管路特性、控制精度等因素影响, 通常略低于理论值, 但仍具有显著的经济价值。

为进一步量化节能效益, 还可引入以下关键指标:

年节约标准煤量 (tce):

$$M_{\text{coal}} = \frac{W_{\text{save}} \cdot q_{\text{coal}}}{1000}$$

其中  $q_{\text{coal}} \approx 0.1229 \text{ kgce/kWh}$  为电力折标煤系数。

年减少二氧化碳排放量 (tCO<sub>2</sub>):

$$M_{\text{CO}_2} = W_{\text{save}} \cdot \alpha_{\text{CO}_2}$$

其中  $\alpha_{\text{CO}_2} \approx 0.785 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$  (依区域电网碳排放因子略有差异)。

## 5 应用中的关键技术问题与对策

### 5.1 谐波干扰

变频器作为典型的非线性负载, 在运行过程中会产生大量高次谐波电流, 注入电网后可能引起电压畸变, 干扰其他敏感设备正常工作, 甚至导致保护装置误动作。为抑制谐波污染, 可在变频器输入侧加装交流电抗器或专用谐波滤波器, 有效降低电流总谐波畸变率 (THD)。此外, 选用12脉波或18脉波整流结构的变频器, 可从源头减少低次谐波的产生。在系统布线方面, 应严格分离强电与弱信号线缆, 采用金属屏蔽管敷设, 并确保良好接地, 以增强系统的电磁兼容性。

### 5.2 电机绝缘与轴承电流

变频器输出的高频PWM脉冲电压具有陡峭的上升沿 (高  $dv/dt$ ), 可能在电机绕组端部产生过电压, 加速绝缘材料老化, 缩短电机寿命。同时, 共模电压会在电机轴上感应出轴电流, 流经轴承时产生电蚀, 导致轴承点蚀甚至失效。针对这些问题, 应优先选用专为变频工况设计的电机, 其绝缘等级更高, 并常配备绝缘轴承或接地电刷<sup>[4]</sup>。在变频器输出端加装  $dV/dt$  滤波器或正弦波滤波器, 可有效平滑输出电压波形, 降低  $dv/dt$  和共模电压幅值, 从而保护电机免受电气应力损害。

### 5.3 最低转速限制

水泵在过低转速下运行时, 其内部流态可能发生紊乱, 导致效率急剧下降, 甚至无法形成有效扬程。同时, 电机自带风扇的冷却效果随转速降低而减弱, 可能引起温升超标。对于高扬程或高吸程泵, 还需特别关注汽蚀余量 (NPSH) 是否满足要求, 避免因转速过低导致进口压力不足而发生汽蚀。因此, 在系统设计时应根据水泵性能曲线设定合理的最低运行频率, 通常不低于25~

30Hz, 并通过控制逻辑确保运行点始终处于安全高效区间。

### 5.4 控制系统可靠性

复杂的变频控制系统虽然提升了自动化水平, 但也增加了潜在的故障点。为保障供水连续性, 必须采取多重可靠性措施。例如, 采用双PLC冗余配置或关键信号双回路采集, 防止单点故障导致系统瘫痪; 设置手动旁路功能, 当变频器故障时可快速切换至工频运行, 确保基本供水能力; 定期进行软件备份、参数校验和硬件维护, 及时发现并消除隐患。只有在高可靠性的前提下, 变频调速系统的节能与智能优势才能真正发挥。

## 6 发展趋势与展望

未来, 变频调速技术在泵站节能领域将呈现以下趋势: (1) 智能化深度融合: 结合物联网 (IoT)、大数据与人工智能 (AI), 实现泵站运行状态实时监测、故障预警、能效诊断与自优化控制。(2) 高效永磁同步电机 (PMSM) 应用: PMSM效率更高、体积更小, 配合专用变频器, 系统能效可进一步提升5%~10%。(3) 能量回馈技术: 在有势能回收需求的场合 (如下向输水、排水泵站), 采用四象限变频器实现制动能量回馈电网。(4) 标准化与模块化设计: 推动变频泵组成套设备标准化, 降低设计、安装与运维成本。(5) 与可再生能源协同: 在偏远地区泵站, 探索“光伏+储能+变频泵”微网系统, 实现绿色供能。

## 7 结语

变频调速技术通过改变电机转速实现对水泵流量与扬程的精准调控, 从根本上解决了传统泵站“大马拉小车”和节流损耗的问题。该技术可显著降低泵站能耗, 节电率普遍在20%~50%之间, 同时提升系统运行的安全性、稳定性和自动化水平。尽管在谐波治理、电机适配、控制策略等方面仍存在技术挑战, 但随着电力电子器件性能提升、控制算法优化及系统集成度提高, 这些问题正逐步得到解决。在国家“双碳”战略和新型城镇化建设的双重驱动下, 变频调速技术必将在泵站节能改造与新建项目中发挥更加核心的作用, 为构建绿色、高效、智能的水系统基础设施提供坚实支撑。

### [参考文献]

- [1] 聂朋, 苏培凡. 变频调速技术在泵站电机控制系统中的应用与优化研究[J]. 水电站机电技术, 2025, 48(6): 48-50+75.
- [2] 曾腾飞. 补水泵站变频调速技术节能降耗运行效果分析与实践研究[J]. 水上安全, 2025, (18): 109-111.
- [3] 尚吉武. 高压变频调速系统在扬水泵站的应用研究[J]. 中国科技投资, 2021, (35): 125-128.
- [4] 李瑾. 直接功率控制的双PWM变频调速在泵站电机上的应用[J]. 湖北工程学院学报, 2022, 42(06): 120-124.