

# 变频节能技术在水处理泵站电力系统中的应用探析

白鹏伟

联邦制药（内蒙古）有限公司，内蒙古自治区巴彦淖尔市，015000；

**摘要：**水处理泵站电力系统中，水泵机组长期处于“大马拉小车”的运行状态，电能浪费现象普遍存在。变频器的应用十分迅速，应用日益广泛，并且在泵站中变频技术也逐步得到了应用。本文从泵站实际运行特征出发，分析了变频调速的基本原理及其在电力系统中的节能原理，结合典型工况探讨了变频技术在流量调节、软启动、功率因数改善等方面的具体应用方式。研究表明，变频技术的应用效果与泵站运行模式密切相关，恒压供水、变流量工况等场景下节能空间较大，但变频装置自身也具有一定的损耗，选型不当反而会增加能耗。

**关键词：**变频调速；水处理泵站；电力系统；节能

**DOI：**10.69979/3060-8767.26.02.056

水处理泵站担负着取水、输水、配水等关键任务，其电力消耗通常占整个水处理系统运行成本的60%以上。大多数泵站在设计时按最大流量和最高扬程选取设备，而实际运行中水量需求波动较大，水泵长期在额定转速下工作，通过阀门启闭或调节角度来控制流量，大量电能消耗在阀门截流和管路阻力上。变频调速技术作为一种先进的电机调速方式，能够根据系统实际需求精确调节水泵转速，从而实现流量和压力的无级调节，从根本上改变了传统节流调节的耗能模式。推广应用水泵变频节能技术，对于提高能源利用效率、降低生产成本、减少环境污染、实现可持续发展具有重要的意义。

## 1 水处理泵站电力系统的运行特点与能耗构成

### 1.1 负荷波动与设计余量的矛盾

水处理泵站的运行工况受进水流量、出水压力、管网状态等多方面的因素影响。一天之内不同时间段的用水需求差异比较明显，早高峰和晚高峰水量较大，夜间和凌晨水量较小。但泵站设备选型时通常按远期规划的最大流量设计，同时留有一定的安全余量。这种设计思路保证了供水可靠性，却导致水泵在绝大多数时间内偏离高效区运行。离心泵的相似定律表明，流量与转速成正比，扬程与转速平方成正比，轴功率与转速立方成正比。当实际所需流量仅为额定流量的80%时，若采用阀门节流方式，

电机仍以额定转速运行，功率下降不明显；但如果将转速降至额定转速的80%，理论轴功率可降至额定功率的51%左右。这个差距就是变频节能的基本空间所在。

### 1.2 传统流量调节方式的能耗损失

泵站常用的流量调节方式包括阀门节流、旁路回流、变角调节等。阀门节流通过改变管路特性曲线来调节流量，水泵仍以额定转速运行，消耗的功率中相当一部分转化为阀门前后的压差损失。旁路回流则更加浪费，部分水体经旁路回流至进口，水泵做了大量的无用功。变角调节适用于轴流泵和混流泵，调节范围有限，且需要停机操作，难以应对快速变化的工况。这些传统方式本质上是让水泵持续输出高能耗，再通过各种手段消耗多余的能量，能源利用效率较低。

### 1.3 电力系统侧的主要浪费环节

从电力系统角度看，泵站的能耗浪费主要体现在三个方面：一是电机轻载运行时的效率下降，当水泵实际输出功率远低于额定功率时，电机铁损和铜损所占比例上升，综合效率降低。二是启动冲击造成的电能浪费，传统直接启动或星三角启动方式下，电机启动电流达到额定电流的5到7倍，这部分冲击能量大部分转化为热能散失。三是功率因数偏低的问题，轻载运行时电机功率因数明显下降，无功功率增加，虽然不直接计入电费，但增大了线

路损耗和变压器负担。

## 2 变频节能技术的调速原理与节能机理

### 2.1 变频调速的核心逻辑

变频调速的基本原理并不复杂，主要是改变异步电机的供电频率。异步电机的转速公式为 $n=60f(1-s)/p$ ，其中 $f$ 是电源频率， $p$ 是电机极对数， $s$ 是转差率。从公式可以看出，频率 $f$ 变化时，转速 $n$ 随之线性变化。变频器在工程中实现这一调节的方式是：先将工频交流电整流成直流，再通过逆变电路输出频率和电压均可调节的交流电。为了保证电机在不同频率下磁通量基本恒定，变频器在调节频率的同时需要按比例调节电压，即保持 $V/f$ 比值大致不变。这项技术从原理到成熟应用经历了数十年，随着功率电子器件和微处理器控制技术的进步，变频装置的可靠性已经能够满足水处理泵站连续运行的工业要求，设备成本也已下降到大多数改造项目可以接受的水平。

### 2.2 节能机理的两个层面

变频技术之所以能实现节能，可以从两个层面来理解：

第一个层面是避免了阀门节流造成的能量损失。采用阀门调节流量时，水泵仍以额定转速运行，多余的能量消耗在阀门两端的压差上，转化为热量散失。变频调节直接降低水泵转速，使其输出的扬程和流量恰好匹配管路需求，不存在节流元件的能量耗散，系统运行效率更高。

第二个层面是水泵的轴功率特性。根据相似定律，水泵的轴功率与转速的三次方成正比关系，转速下降一定比例，轴功率下降的幅度要大得多。这意味着只要工况允许降低转速运行，就能获得可观的功率节省。当然，理论计算是在假设相似工况下得出的，实际节能效果还要计入变频器自身损耗、电机在非额定频率下的效率变化等因素，这些因素会使实际节电率低于理论值。

### 2.3 变频调节的适用边界

当水泵长期在额定流量附近运行时，变频调节与阀门节流方式下的能耗差异并不大，而此时变频器本身存在整流、逆变等环节的固有损耗，一般约为输入功率的2%到4%。这部分损耗在满负荷工况

下无法被调速节省的电量抵消，加装变频器后总用电量反而可能增加。变频调节的真正优势体现在变流量工况，尤其是平均运行流量明显低于设计流量的场合。对于扬程变化较大的系统，比如取水泵站面临水源水位涨落的情况，变频调节能够根据扬程变化实时调整转速，保持水泵在高效区工作，其适应性明显优于阀门节流或是变角调节。判断一个泵站是否需要变频改造，应当先分析其实际运行负荷曲线。

## 3 变频技术在泵站电力系统中的具体应用方式

### 3.1 恒压供水中的变频控制

恒压供水是变频技术在泵站中应用最广的一种形式，其控制逻辑本身并不复杂。压力传感器安装在出水总管上，将管网压力信号以4~20mA或0~10V的电信号送至变频器或PLC的模拟输入端，与设定压力值进行比较，构成一个压力闭环控制系统。当用水量增加导致管网压力下降时，变频器提高输出频率，水泵加速；当用水量减少导致压力上升时，变频器降低频率，水泵减速。

系统通常在PID参数整定后加入回滞环和延时判断，如变频器频率达到上限且出口压力仍低于设定值一定时间后才允许增泵，而如果达到下限且压力偏高一定时间后才允许减泵，避免因负荷小幅波动导致水泵频繁加减，反而影响运行稳定性和设备寿命。从节能角度看，恒压供水减少了因用水量波动大造成水泵频繁启停所带来的电能损失。

### 3.2 变流量工况下的适配策略

水处理泵站中的变流量工况大多见于污水处理厂进水泵房和给水厂送水泵房，进水流量随管网来水条件变化，出水流量随用户需求波动。应对这种负荷变化，工程上最常见的配置是一台变频泵加多台工频泵的组合，其运行逻辑相对明确：启动阶段优先启动变频泵，频率从最低限值开始上升，当变频泵运行频率达到额定频率而系统流量仍未满足需求时，控制程序自动投入一台工频泵运行；此时系统基础流量由工频泵承担，变频泵回落至低频区进行调节，仅补充流量缺口。当负荷下降时，变频泵频率降低至下限值且流量仍过剩时，控制系统先切

除一台工频泵，再让变频泵升频匹配剩余负荷。为了避免工频泵在边界区间频繁投切，通常在变频泵频率的上下限附近设置缓冲区间，变频器容量只需匹配单台水泵，改造成本较低。

### 3.3 软启动功能对电力系统的保护价值

变频器的软启动功能在实际工程中常被低估，其实用价值不亚于调速功能。水泵直接启动时电机电流冲击可达额定电流的6倍左右，对变压器、开关设备、电缆形成较大的电流应力，同时产生机械冲击，容易造成联轴器加速磨损和管路水锤现象。

变频启动时频率从零开始逐渐上升，电机电流被限制在额定电流的1.5倍以内，启动过程平稳。对于供电容量较小的泵站，软启动功能可以降低变压器容量配置需求。同时，变频软启、软停能够平缓地加速和减速水流，可以消除启停水锤，部分长距离输水泵站采用变频器、软启动器与缓闭止回阀相结合的办法来减小或消除停泵水锤。

### 3.4 功率因数改善的附加效益

普通异步电机在轻载或是空载运行时功率因数可能降至0.3~0.5，满载时一般不超过0.85。变频器内部直流环节的滤波电容具有类似无功补偿的作用，使得从电网侧测得的功率因数可维持在0.95以上。在同样有功功率输出下，线路电流明显减小，线路损耗随之降低。

变频器改善的是电源侧功率因数，电机本身的实际功率因数仍然偏低，但这并不影响电网侧受益，对于供电线路较长或是变压器容量偏紧的偏远泵站，功率因数改善带来的线路损耗降低效果是真实可感的。但变频器的大量使用同时会引入谐波问题，谐波会引起变压器和电缆发热增加、保护装置误动、无功补偿电容器过热甚至烧毁等后果。因此，在泵站采用变频技术时不能只看功率因数改善的收益，还需要评估谐波污染程度，必要时配套加装交流电抗器或有源滤波装置。

## 4 工程应用中需要注意的几个问题

### 4.1 变频器自身损耗不容忽视

变频器在工作过程中会有整流损耗、逆变损耗和散热损耗的情况。现代IGBT型变频器的满载效率约为96%到98%，这意味着即便在理想工况下，变

频器也要消耗2%到4%的电能。当水泵长期在额定转速附近运行时，变频调速节省的电能不足以弥补变频器自身的损耗，综合能耗反而上升。这种情况在备用泵改造中较为常见，一些泵站将所有水泵都加装变频器，但平时只用一台变频泵调节，其余变频泵长期处于待机或工频旁通状态，变频器自身持续耗电却产生不了节能效果。可根据运行工况确定变频器配置比例，通常配置一到两台变频泵即可覆盖大部分调节需求。

### 4.2 谐波污染与治理措施

变频器运行时会产生谐波电流，注入电网后引起电压波形畸变。谐波的主要危害包括增加变压器和线路的附加损耗、干扰保护装置和测量仪表、引起电机附加发热和转矩脉动。对于谐波问题，可采取的措施包括：在变频器输入端加装交流电抗器，抑制谐波电流；选用带直流电抗器的变频器机型，改善整流环节的电流波形；在多台变频器共用变压器时错开载波频率，谐波治理需要根据泵站的变压器容量和电网条件确定，过度的滤波措施增加投资，不足则影响设备运行，一般要求总谐波畸变率控制在5%以内。

### 4.3 低频运行时的电机散热问题

变频器低频输出时，电机转速降低，自带风扇的冷却能力下降。对于自冷式电机，转速降至额定转速的50%时，风量只有额定的50%左右，散热条件明显恶化。如果电机长期在低频下满载运行，温升可能超过绝缘等级允许范围。

对此，可选用带独立强迫风冷的变频电机，风扇由工频电源供电，不受转速影响；在标准电机上加装外接风扇；将变频调节的最低频率限定在额定频率的30%以上，结合水泵的最低运行频率要求来选择电机类型，不可盲目用标准电机配变频器。

### 4.4 变频与工频切换的逻辑设计

采用变频泵加工频泵的组合方案时，变频泵与工频泵的切换控制逻辑需要合理设计。常见的问题有两种：一种是不恰当的切换点设定，例如变频泵频率升至工频频率时仍不能满足流量需求，此时启动工频泵并联运行，但变频泵没有及时降频，造成两泵工况点严重偏离，甚至出现工频泵向变频泵倒

灌的现象。另一种是切换过程中的电气冲击,变频泵切工频或是工频泵直接启动时产生较大电流冲击。可采用变频器同步切换技术,先通过变频器调节使待切入泵的转速与电网频率同步,再切换到工频运行,同时配合电控阀门调节泵出口压力。

## 5 结语

变频节能技术在水处理泵站中的应用价值已经被大量工程实践验证,但这种价值是有条件的、有限的。变频调节的优势区间是变流量、低负荷工况,恒压供水和流量调节是其最适用的场景。同时也要看到,变频器自身损耗、谐波污染、低频散热等问题如果处理不当,不仅影响节能效果,还可能损害设备。泵站节能改造应当从实际运行数据出发,分析负荷曲线,测算节能潜力,再决定变频器的选型、配置比例和控制策略。

## 参考文献

- [1] 聂云飞,柯臻玮. 碳减排背景下变频技术在污水泵站节能降耗中的应用[J]. 市政技术,2024,42(12): 61-66,116.
- [2] 邹志豪. 一种基于PI控制策略的自动化水泵调频脚本设计方法[J]. 今日自动化,2024(4):163-165.
- [3] 段存虎. 乳化液泵站智能化集控系统[J]. 电气开关,2024,62(03):17-20+26.
- [4] 马春福,宇文洪. 浅谈水处理变频供水泵的实用性[J]. 冶金设备,2025(z1):150-151,143.
- [5] 张静,张晓岚,申今生,等. 北方某深度处理水厂能耗分析与节能改造[J]. 净水技术,2023,42(10):70-75,189.

作者简介:白鹏伟(1986.11.25)汉族,工程师(中级),本科学历。