

# 灌溉泵站流量调节及变频调速节能效益分析

谭剑波<sup>1</sup>, 何自立<sup>2</sup>, 王立青<sup>2</sup>

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为提高水泵机组运行性能和灌溉供水效益,根据水泵运转关联性函数,联合流量调节变频调速特性,对筛珠洞灌区三级泵站技改方案进行评估分析,并确定与工程实际相匹配的流量调节控制策略。结果表明:变频器智能运算生成与灌溉需水量相符的电源频率,经水泵转速改变实现管阻特性不变条件下的流量动态准确调节。通过合理更新升级改造,水泵机组电能转换效率和自动化控制水平得到全面提高,流量调节响应快,动作可靠性高,供水用电单耗降低。

**关键词:** 灌溉泵站; 流量调节; 运转特性; 变频调速; 节能降耗

中图分类号: TV93; S277.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0172-05

## Analysis of flow regulation and frequency control energy-saving efficiency of irrigation pump

TAN Jianbo<sup>1</sup>, HE Zili<sup>2</sup>, WANG Liqing<sup>2</sup>

(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to improve the operational performance and water supply benefits of pump unit after transformation, based on pump running correlation function and flow governing characteristic by frequency conversion, the assessment and analysis of technical transformation program for the three-level pumping station in Shaizhudong Irrigation District has been done, and the water-pump control tactics which has good matched with actual project has been confirmed. The designing application shows that the power frequency signal generated by inverter intelligent operation can match irrigation water demand, and through frequency to realize speed change can dynamically and accurately adjustment water flow under no changing tube resistance characteristics. After reasonable technological transformation, the power conversion efficiency and automation control level is improved. The operating energy consumption has been reduced with fast response of flow adjustment and high reliability operation. The pump station can realize the aims of energy conservation and consumption reduction at the same time of technical upgrading.

**Key words:** irrigation pump station; flow regulating; operating characteristics; frequency control; energy-saving

## 1 研究背景

泵站是实现农田高效节水灌溉、促进农村新兴经济体快速发展的重要基础保障设施。截止2010年底,全国机电灌排容量已从1994年的 $7 \times 10^4$  kW增加到 $8753 \times 10^4$  kW<sup>[1]</sup>。遍布全国各地的各类灌排

泵站,在新农村社会经济发展、精准扶贫和抗旱应急等方面均发挥着非常重要的作用。然而,受当时建设规划理念、设计标准、施工技术、设备制造水平和运维管理意识等因素制约,加上数十年运行又缺乏合理养护,1990至1995年以前建成的大部分灌排泵站现已处于低效运行甚至病险状况。为提高泵站

收稿日期:2018-03-09; 修回日期:2018-06-02

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAD10B02); 陕西省水利科技项目(SLKJ-2013-14)

作者简介:谭剑波(1983-),男,四川江安人,硕士,讲师,研究方向为水力机械调节建模仿真、农村小水电节能改造分析。

通讯作者:何自立(1977-),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,研究方向为水力机械流动理论、新能源开发及应用。

水泵机组电能转换效率,降低能源损耗,促进农业灌溉泵站的技术升级,流量调节节水节能改造是一项重要的工程措施。文献[3-4]基于并联水泵工况点求解基础上,建立水泵并联流量随并联台数间变化的能耗分析模型,可为灌溉泵站节能改造设计提供重要理论支撑。李明思等<sup>[5]</sup>中探讨了滴灌泵站流量总调节与离心泵变频调速特性间的调速工况等效率因素。文献[6-7]基于风机泵类变频调速节能改造前后的扬程特性和管阻特性变化规律,对流量调节的节能原理、节能影响因素及节能效果进行了研究。文献[8-10]探讨了水泵流量调节变频控制策略及灌溉泵站运行效率提高的技术措施。田云等<sup>[11]</sup>、孙洪义<sup>[12]</sup>、苏丽秋等<sup>[13]</sup>分析得出:泵站采用恒定供水水压与变流量相结合的恒压变频调速节能改造后,水泵能耗可以减少 30% 以上。近年来,研究人员和工程实践人员在灌溉水泵变频节能调速控制策略和装备性能等方面做了很大努力,也取得较多研究成果,而基于管网特性与水泵并联的高压变频流量调节方面的应用研究较少。在此背景下,结合灌溉加压泵站管网特性与水泵并联流量调节特性,通过筛珠洞抽水灌区泵站技术升级改造实例,对灌溉泵站流量调节及变频调速节能改造设计方案及应用效益进行了分析研究。通过制定合理的流量调节策略和技术升级改造设计方案,确保灌溉泵站的社会、经济等综合效益高效稳定发挥。

## 2 水泵运转特性关联性函数

水泵作为将电能转换为水能的一种流体机械,其不同运行工况下的运转特性复杂多变,不同流量调节方式会对水泵扬程特性和管道阻力特性带来较大影响。要确保水泵长期运行在高效节能工况,必须通过对水泵运转特性曲线进行全面分析,掌握其与实际运行相匹配的运转特性关系,以便选择合理的节能改造方案。

### 2.1 水泵运转特性曲线

水泵运转特性由水泵各参数间关系表示,但由于这些参数相互间关系较复杂,很难用单一数学函数来表达其变化规律,通常采用关系曲线进行表达。体现水泵运转特性的关系曲线主要有扬程( $H$ )与流量( $Q$ )和效率( $\eta$ )与流量( $Q$ )两种,其曲线拟合函数表达为<sup>[4]</sup>:

$$H = k_0 + k_1 Q + k_2 Q^2 \quad (1)$$

$$\eta = c_0 + c_1 Q + c_2 Q^2$$

式中: $k_0, k_1, k_2$  和  $c_0, c_1, c_2$  为待定系数,可根据厂家

数据结合现场试验确定。

除了扬程特性外,影响水泵运行性能的因素还有管道阻力特性,由管道系统实际运行状况决定,在某一特定条件下其值是固定的。对于农业灌溉泵站而言,水流通过加压水泵的能量增值,除用于提升水流能量外,还需克服管道阻力,也即工程中的需要扬程,其具体函数表达为:

$$H = H_0 + kQ^2 \quad (2)$$

式中: $k$  为管阻系数; $Q$  为管道流量, $m^3/s$ ;  $H_0$  为泵站净扬程(提水高度), $m$ 。

### 2.2 水泵运转特性分析

水泵特性曲线上任一点均对应一种运行工况,其工况点即为水泵自身扬程特性和管道阻力特性间的交点<sup>[6]</sup>。为确保水泵长期运行在高效工况区,就需要采取不同调节方式,以改变水泵运行工况点,达到节能降耗的目的。假定水泵在设计转速( $n_1$ )条件下运行时,扬程特性和管阻特性的交点( $A$ )即为水泵设计工况点,此时电机一直处于额定全速运转,如图 1 所示。根据供水系统需求,当水泵流量需要从( $Q_1$ )调节到( $Q_2$ )时:(1)采用调整水泵出口闸阀开度来调节流量,此时水泵转速始终处于设计转速扬程特性。因此,改变闸阀开度实际是通过改变管阻特性来实现水泵流量的动态调节,即由管阻特性( $R_1$ )变化到( $R_2$ ),对应水泵工况点由( $A$ )变化到( $B$ )点,相应轴功率由( $0Q_1AH_1$ )变化到( $0Q_2BH'_2$ ),没有多大变化。(2)采用变频调速进行流量调节,与闸阀调节原理正好相反,其是在维持原管阻特性不变基础上,通过变频器控制水泵输入电源频率改变电机转速(扬程特性)而实现对水泵流量的动态调节,即由扬程特性( $n_1$ )变化到( $n_2$ ),对应水泵工况点由( $A$ )变化到( $C$ )点,相应轴功率由( $0Q_1AH_1$ )变化到( $0Q_2CH_2$ ),节能较为明显。

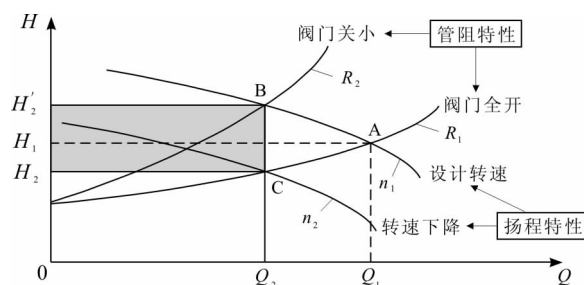


图 1 不同调节方式水泵运转工况特性

根据水泵调速原理可认为流量、扬程和轴功率均可由转速来体现,其具体函数表达为<sup>[10]</sup>:

$$Q \propto n; H \propto n^2; P_{\text{轴}} \propto QH \propto n^3 \quad (3)$$

从图1和公式(3)可知,当水泵流量由 $Q_1$ 调节到 $Q_2$ 时,常规闸阀节流调节条件下,工况点从(A)调节到(B)时水泵扬程不降反而从 $H_1$ 上升到 $H'_2$ ,虽流量降低但扬程上升而轴功率变化不大,相应单位流量运行能耗增加;而采用变频调速,随水泵转速降低,则水泵输出流量降低,扬程也从 $H_1$ 降低到 $H_2$ ,此时水泵轴功率相比额定工况点(A)要降低很多,单位流量运行能耗明显减少。

采用闸阀进行流量调节实际是人为增加管道阻力,造成大量电能浪费在节流阀上。同时,工况点从(A)调节到(B)时,水泵运行效率( $\eta$ )从高效工况区转移到低效工况区,电能转换效率降低,能耗增加。采用变频调速技术进行流量调节,水泵闸阀长期处于全开状态,可以降低阀门的节流损失,且轴功率也随流量和扬程减小而大大降低。因此,对于大功率水泵电机采用变频调速技术升级改造后,可在维持现状管道系统不变的基础上,根据灌溉需求流量适时控制水泵转速,完成流量调节的同时实现节能降耗的目的。

### 3 灌溉泵站变频调速节能技术改造实例分析

#### 3.1 工程概况

筛珠洞抽水灌区位于泾阳县王桥镇西北部,泾惠渠渠首下游,始建于1982年,从泾河直接引水。灌区由一级至四级泵站提水,总装机7台,装机容量1395 kW,总扬程176 m,设计引水流量 $0.56 \text{ m}^3/\text{s}$ ,灌区设施灌溉面积1400  $\text{hm}^2$ ,有效灌溉面积1120  $\text{hm}^2$ 。其中,三级泵站装机2台(原设计3台),装机功率600 kW,设计流量 $0.44 \text{ m}^3/\text{s}$ ,净扬程73 m,电压等级为6 kV。三级泵站目前输水渠道、进水前池、压力管道和泵站厂房等水工建筑物运行性能良好。但水泵机组、电气设备和辅助设备从机组及设备选型就存在一定的技术问题,加上多年非设计工况运行且没有得到合理养护,机组效率逐年降低、能耗逐年增加,安全隐患凸显,亟待对水泵机组进行全面技术升级改造<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 机组技术升级改造方案

三级泵站一是向四级泵站引水渠供水,二是向西苗、范李、宗沟等8个村约267  $\text{hm}^2$ 滴灌和喷灌区管网供水。泵房内原安装2台设计流量为900  $\text{m}^3/\text{h}$ 工频泵,由水泵出口闸阀控制流量。实际运行统计数据发现,水泵长期运行在低效工况区,单位配水能耗高<sup>[15]</sup>。由于三级泵站供水管网复杂且流量、

水压波动较大,常规闸阀调节方案在调节可靠性、准确性和节能经济性等方面,均很难满足灌区精细化、精益化调节供水需求。另外,规划在太和村和岳家坡村新建喷灌区约100  $\text{hm}^2$ ,经水资源供需平衡分析,原2台水泵供水水量不能满足新增喷灌区用水需求。为此,设计在泵房原预留3#机的位置增设1台6kV机组,装机容量由600kW扩容到900kW。同时,结合二级泵站6kV机组变频调速改造经验,三级泵站3台机组均采用SLW节能型单级单吸卧式离心泵,并配置高压变频调速系统进行变频调速节能控制。6kV水泵机组“一拖一”高压变频调速电气方案,如图2所示。

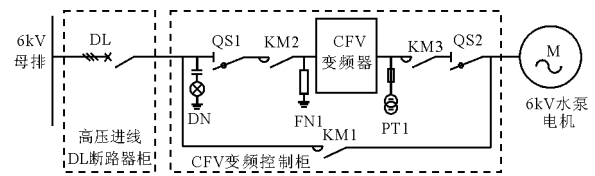


图2 一拖一高压变频调速电气方案

水泵变频调速改造选用西安西驰公司生产的“CFV高-高电压源型”双核数字控制变频调速系统,配置DL进线断路器柜1面和CFV变频柜1面。高压变频柜内装设1台CFV-300kW型6.3kV变频器,3个高压真空接触器KM1-KM3和2个高压负荷开关QS1-QS2。6kV电源经DL进线断路器柜、QS1和KM2将高压电源送入变频器,经内部DSP算法硬核+并发控制硬核双控制引擎运算分析后形成对应控制策略,通过调节变频器输出电源频率经KM3和QS2完成水泵电机转速(流量)的动态调节,以匹配实时灌溉用水需求<sup>[16-17]</sup>。另外,对于灌溉用水高峰期,电动机需长期运行在满负荷工况,如继续采用变频调速控制,则一方面变频器自身运行会带来4%~8%电能损耗,且变频器大功率运行会产生大量热量对设备性能和质量会带来损坏。为此,设计在高峰灌水区由控制模块自动将控制方式切换到工频运行工况,由KM1不经变频器直接将电源供给电动机,以额定工况工频运行<sup>[18]</sup>。

#### 3.3 改造效益分析

技改设计采用3台SLW300-500、 $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 型单级单吸卧式离心泵,配3面DL进线断路器柜和3面CFV变频启动柜。经电能统计数据,泵站配水综合能耗(全站总电耗(含站用电)/供水总流量)和配水能耗(水泵机组总电耗/(供水总流量×水头))的变化特性如图3所示。

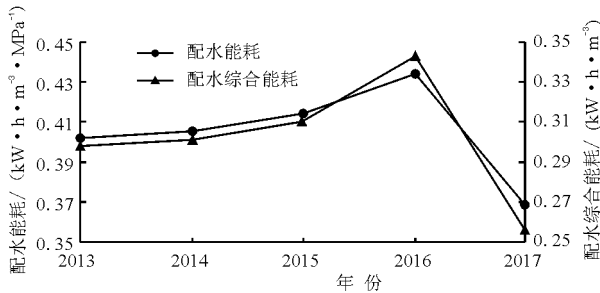


图3 泵站2013-2017年运行能耗分析

从图3可知,改造前2013-2016年期间配水能耗和配水综合能耗均呈上升趋势,机组运行效率不断降低,且在2015-2016年期间有明显恶化加剧趋势,技术改造已刻不容缓。

3台机组全部更新升级改造并采用CFV变频调速智能控制,配水能耗从改造前2016年的 $0.433(\text{kW} \cdot \text{h})/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$ 降低到改造后2017年的 $0.368(\text{kW} \cdot \text{h})/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$ ;配水综合能耗也从改造前2016年的 $0.343(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 降低到改造后2017年的 $0.255(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 。改造前后,单机运行工况下水泵机组运行特性参数如表1所示。

表1 水泵机组改造前后特性参数

灌溉面积/ $\text{hm}^2$	改造前				改造后			
	电流/A	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	出口压强/MPa	频率/Hz	电流/A	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	出口压强/MPa	频率/Hz
110	452	728	0.78	49.9	320	728	0.63	46.7
80	448	675	0.76	49.8	256	675	0.55	43.2
60	450	456	0.77	50.1	208	456	0.49	38.6
55	447	412	0.78	49.8	193	412	0.47	37.5

## 4 结论

泵站更新改造是提高机组效率、降低能耗、提升自动化水平、改善运行环境和促进灌区经济稳定发展的再创造过程。通过对筛珠洞灌区6kV高压机组改造方案中流量调节控制策略和变频调速技改方案的可行性与节能效益分析,主要取得如下结论:

(1)基于水泵扬程特性和管阻特性分析,选用与工程调节特性更加匹配的变频调速方案可实现泵站机组更新改造和节能降耗。

(2)优选的SLW机组具有较高电能转换效率,可节约灌溉供水用电单耗,且能满足泵站在不同灌溉条件下的流量调节运行需求,匹配性好、适应性强。

(3)采用“一拖一”双引擎数据运算的CFV变频调速智能控制方案,按灌溉用水量进行变频/工频自动切换,提高了机组运行效率和智能化控制

水平,可为灌区精细化、精益化灌溉供水提供保障。从图3和表1水泵机组运行状况来看,在灌溉同面积条件下改造前后机组运行电流、出口压强和频率均有明显降低,运行条件得到明显改善。在机组100%~50%负荷区间,电流下降幅度达29.2%~56.8%。按年均供水 $800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 计算,采取CFV变频调速智能控制后,2017年相比2016年泵站全年总节省电能 $= 800 \times 10^4 \text{ m}^3 \times (0.343 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3 - 0.255 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3) = 70.4 \times 10^4 (\text{kW} \cdot \text{h})$ 。按陕西省2017年农业生产用电电价 $0.433 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计算,泵站经技术升级节能改造后,2017年比2016年全年节约电费 $30.48 \times 10^4 \text{ 元}$ ,节电效果非常明显。

采用CFV变频调速智能控制为核心的泵站改造,达到预期机组自动化技术升级和节能降耗的目的,不仅提高机组运行效率、减少供水用电单耗和电费支出,同时CFV变频器双核数字控制引擎实现控制数据高速并行处理,能在很大程度上提高机组自动控制水平、降低冲击振动及运行噪声,确保泵站机组高效优质、节能经济的变频调节运行。

水平,可为灌区精细化、精益化灌溉供水提供保障。

(4)灌溉供水流量调节方式选择及控制策略制定是灌区泵站技术更新升级改造的关键内容,也是工程改造后能否取得预期效益的设计关键点。除此之外,在技改方案设计中还需考虑泵站其他电气设备及辅助设备的配套设计,优化“电-机-水”三者间的匹配性能,确保泵站灌溉供水运行效益最大程度地发挥。

## 参考文献:

- [1] 李琪,许建中,李端明.我国机电灌排泵站标准研究[C]//中国水利学会2011学术年会——大力推广节水节能技术促进农村水利现代化建设,北京:中国灌溉排水发展中心,2011.
- [2] 李琪,许建中,李端明,等.中国灌溉排水泵站的发展与展望[J].中国农村水利水电,2015(12):6-10.

- [3] 李明思,蓝明菊,吕廷波. 滴灌加压泵站离心泵并联总流量分析模型[J]. 农业工程学报,2012,28(13):72-76.
- [4] 马志毅. 变频泵供水系统的运行效率探讨[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(6):79-80+84.
- [5] 李明思,吕廷波,蓝明菊. 滴灌泵站调速工况等效性理论分析[J]. 中国农村水利水电,2013(5):137-140+144.
- [6] 汪书苹,盛明珺,胡丹. 风机泵类高压变频改造的节能分析及计算方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):117-120.
- [7] 王全锋,杨璐,马会珍,等. 折引特性曲线法在扬黄灌溉泵站更新改造中的应用[J]. 中国农村水利水电,2017(9):207-209+214.
- [8] 刘永华,陈志明,王念春. PLC及变频调速恒压喷灌系统的设计[J]. 节水灌溉,2009(1):44-45+49.
- [9] 刘宏,翟庆志. 水泵变频驱动的农田灌溉系统仿真研究[J]. 中国农业大学学报,2014,19(6):201-207.
- [10] 周东让,何芳侠. 变频恒压自动供水控制系统及其在坡地喷灌中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(4):163-165.
- [11] 田云,史洁,金东琦. PLC变频调速节能灌溉系统的设计[J]. 农机使用与维修,2014(5):13-16.
- [12] 孙洪义. 转油站掺水变频节能技术研究及应用[J]. 科学技术与工程,2011,11(14):3280-3283.
- [13] 苏丽秋,李振平. 变频器在中央空调节能系统中的应用[J]. 电机与控制应用,2013,40(8):61-65.
- [14] 李开来,朱满林,李小周,等. 井群泵站经济运行方案研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):173-176.
- [15] 郭昕,贾敏智,徐晨晨. 泵站群控系统的节能优化调度研究[J]. 中国农村水利水电,2017(3):160-164.
- [16] 徐存东,王亚楠,谢利云,等. 梯级泵站的提水效率评估模型与方法[J]. 水利水电技术,2014,45(4):47-49.
- [17] 李加念,洪添胜,倪慧娜. 基于太阳能的微灌系统恒压供水自动控制装置研制[J]. 农业工程学报,2013,29(12):86-93.
- [18] 邱明权,李伟,邱志鹏,等. 恒压控制在喷灌系统中的应用[J]. 中国农机化学报,2014,35(4):135-139.

(上接第171页)

- [12] 李高会,刘子乔,高悦,等. 连接管对调压室涌波水位和水锤压力的影响[J]. 人民长江,2017,48(15):81-85.
- [13] 吴世勇,周济芳,申满斌. 锦屏二级水电站复杂超长引水发电系统水力过渡过程复核计算研究[J]. 水力发电学报,2015,34(1):107-116.
- [14] 洪振国,刘浩林. 水电站阻抗式受力复杂调压井设计[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(6):148-153.
- [15] 化卓,张永良. 带有调压室的长距离引水系统水力特性研究[J]. 黑龙江大学学报,2016,7(4):1-7+13.
- [16] 芦月,屈波,何中伟. 抽水蓄能电站不同水头下导叶关闭规律研究[J]. 水力发电,2016,42(12):85-89.
- [17] 徐晓燕,张晓宏,李建斌. 水轮机导叶关闭过程的探讨研究[J]. 电网与清洁能源,2015,31(2):135-138.
- [18] 占小涛,张晓宏,张俊发. 调压室位置和面积变化对尾水管压力的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):125-129.
- [19] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程调压室设计规范:SL 655-2014[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [20] 龚娟,张健,俞晓东. 高扬程输水系统空气罐阻抗孔尺寸优化[J]. 水电能源科学,2013,31(5):166-169.
- [21] 国家能源局. 水电站调压室设计规范:NB/T 35021-2014[S]. 北京:中国电力出版社,2014.