

南水北调东线泵站变速运行模式的适应性

程吉林¹, 张仁田^{1,2}, 邓东升³, 龚 懿¹, 冯旭松³

(1 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2 江苏省水利勘测设计研究院有限公司 江苏 扬州 225009; 3 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029)

摘 要: 以南水北调东线工程源头泵站江都四站为例, 通过单机组优化运行(叶片全调节、变频变速)数学模型的求解, 分析可知, 在南水北调东线源头泵站扬程变幅(日均扬程 7.8~3.8 m 潮差 1.2 m)范围内, 不管是否实行峰谷电价, 泵站叶片全调节优化运行是较为合适的运行模式; 变频变速运行仅在扬程低于 5.0 m 非满负荷运行时优于叶片全调节; 在满负荷工作时, 泵站变频变速与定角恒速运行相比, 变频变速优化运行带来的效益不足以抵消变频装置的耗损。同时, 从泵装置运行的机理出发, 证明了大型提水泵站只有在一次调水过程中的扬程变幅足够大时, 变频变速优化运行才能产生效益的论点。该成果可为南水北调东线大型泵站的改造、优化运行提供理论依据。

关键词: 泵站; 试验选优; 动态规划; 运行模式; 适应性

中图分类号: S77.9 T914.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2010)05-0434-05

Adaptability research of optimal operation mode with variable frequency
drives for pumping stations in China's Eastern Route
Project of S-to-N Water Diversion

Cheng Jili¹, Zhang Rentian^{1,2}, Deng Dongsheng³, Gong Yi¹, Feng Xusong³

(1 College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2 Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 3 Jiangsu Water Source Co., Ltd. of the Eastern Route of S-to-N Water Diversion, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: Taking the No. 4 Jiangdu Pumping Station in China's Eastern Route Project of S-to-N Water Diversion Project as a study case, mathematics models and solution methods were systematically proposed for optimal operation of single pump unit within a pumping station through blade-adjusting regulation and variable speed regulation with variable frequency drives. Following results were achieved: (a) Better benefits can be obtained by optimization of blade-adjusting operation compared with optimal variable speed operation by means of variable frequency drive under the conditions of the daily average pumping heads yearly varies from 3.8 m to 7.8 m and daily mean tidal range 1.2 m affected by Yangtze River tide no matter whether the peak-valley electricity price is considered; (b) The optimal variable speed operation by means of variable frequency drive is better than optimization of blade-adjusting operation only while the daily average pumping head is below 5.0 m and the pump is not with the total water amount; (c) While comparing with that of fixed blade angle and constant speed, the benefits brought about by optimization of variable speed operation cannot compensate the energy consumption of

收稿日期: 2010-03-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAH04A03); 国家自然科学基金资助项目(60974099); 江苏省属高校自然科学重大项目(09KJA570001); 教育部博士点基金资助项目(20093250110002)

作者简介: 程吉林(1963—), 男, 江苏常熟人, 教授, 博士生导师(jlcheng@yzu.edu.cn), 主要从事水利规划优化理论与应用研究。
张仁田(1964—), 男, 江苏建湖人, 教授级高级工程师(r_zhang@yzu.edu.cn), 主要从事泵及泵站工程设计研究。

variable frequency drive with the total water amount. Meanwhile, according to the mechanism of pump system, the argument is proved that better benefits of large-scale pumping station can be obtained by optimization of variable speed operation by means of variable frequency drive only while the pumping heads in a water transfer process has a large variation, which could provide theoretical basis for the renovation and optimal operation of large-scale pumping station in Eastern Route Project of S to N Water Diversion Project.

Key words: Pumping station; experimental optimization; dynamic programming; operation mode; adaptability

在南水北调东线工程中,全调节叶片泵得到广泛应用,叶片安放角的改变可以在较宽的范围内适应扬程和流量的变化,且能保持高效率^[1];随着变频设备的推广应用,大型泵站(群)的变频变速优化运行已引起关注^[2]。目前,在南水北调东线工程中已有3座泵站采用变频调节,但是变频调节的优化运行方式及其优缺点在理论上的系统研究仍相对滞后,而且,由于水厂供配水泵站变频运行的显著经济效益,给南水北调工程大型泵站变频运行决策带来一定的影响。

文中以南水北调东线工程源头泵站江都四站为例,开展单机组叶片全调节、机组变频变速优化运行研究,分别从系统优化运行与泵站装置性能的角度,对泵站变频运行效果、机理、工程应用适应性等进行阐述,对大型泵站变频优化运行节能效果进行深入对比分析,以便为南水北调东线大型泵站的改造、优化运行,提供理论依据。

1 优化运行方式的数模分析

为了比较泵站叶片全调节与变频变速优化运行的效益,以江都四站为例,进行单机组日优化运行分析。江都四站安装7台套立式轴流泵,机组额定转速 $n=150$ r/min,叶轮直径为2 900 mm,水泵叶片为液压全调节,额定叶片安放角 $\theta=0^\circ$,其调节范围为 $[-4^\circ, +4^\circ]$,电动机额定功率 $P_0=3\ 550$ kW。为了方便讨论,作定义如下:

(1)运行方式:在运行过程中,泵机组以额定转速、额定叶片安放角运行,称之为定角恒速运行;泵机组转速恒定,各阶段根据运行工况调节水泵叶片角度,使之运行费用最低,称为叶片全调节优化运行;水泵叶片安放角额定值保持不变,各阶段根据运行工况通过变频装置调节机组转速,使之运行费用最低,称之为变频变速优化运行。

(2)日均扬程与潮差^[3-4]:江都站不同年型(丰、平、枯)、不同月份可能发生的日均扬程为3.8~7.8 m;不同年型、不同月份的潮型(涨落潮时

间:平均涨潮历时3 h 37 min,落潮历时8 h 49 min,总计24 h 52 min)基本保持不变,日均潮差在1.1~1.3 m,变幅不大。在模型分析中,对潮型进行概化,各种工况的潮差均以1.2 m计。

(3)满负荷、80%负荷、60%负荷工作:泵机组1天24 h定角恒速在相应的日均扬程下运行,即为满负荷工作。80%、60%负荷,即对应于满负荷工作提水总量的80%、60%。

(4)开机时刻与潮位、峰谷电价组合:最佳开机时刻取当日起潮时刻,对应的潮位、峰谷电价组合详见文献[5]。

1.1 单机组日优化运行数学模型

以1天24 h计算,考虑峰谷电价、水位变幅等情况划分为 n_s 段($n_s=9$)^[6-7],以此来研究单机组优化运行规律。以日开机运行总耗电费最少为目标函数,1天24 h划分的时段为阶段变量,各时段叶片安放角、水泵转速为决策变量,规定时段内的抽水总量、电动机额定功率为约束条件,构建单机组全调节日优化运行数学模型,则有:

目标函数:

$$\min f_i = \sum_{i=1}^{n_s} \frac{\rho g Q_i(\theta_i, n_i) H_{ys i}}{\eta_{zi}(\theta_i, n_i) \eta_{mot} \eta_{tr} \eta_f} \Delta t C_i \quad (1)$$

总水量约束:

$$\sum_{i=1}^{n_s} Q_i(\theta_i, n_i) \Delta t \geq W_e, \quad i=1, 2, \dots, n_s \quad (2)$$

功率约束:

$$P_i(\theta_i, n_i) \leq P_0 \quad (3)$$

以上式中 f_i 表示1 d运行能耗费用,万元; ρ 为水密度,kg/m³;g为重力加速度,m/s²; $Q_i(\theta_i, n_i)$ 为在第 i 时段水泵流量,m³/s; θ_i 为叶片安放角; n_i 为机组转速; $H_{ys i}$ 为第 i 时段的平均扬程,m; Δt 为第 i 时段划分的时间长度,s; C_i 为第 i 时段的电价,元/(kW·h);采用江苏省物价局公布的现行峰谷和非峰谷电价; W_e 为日提水总量,10⁴ m³; $\eta_{zi}(\theta_i, n_i)$, η_{mot} , η_{tr} , η_f 分别指装置效率、电动机效率、传动效率和变频效率,其中 η_{zi} 与 i 时段流量、扬程有关,为了简化计算,

在负荷大于 60% 时,假定 η_{mo} 和 η_t 保持不变并分别取值为 94% 和 96%, 另外, 直联机组的 η_{int} 为 1; $P_i(\theta, n_i)$ 为阶段对应 θ_i 和 n_i 的实际功率, kW, 应小于电动机额定功率 P_0 .

当 H_{sys} 一定时, $Q_i(\theta, n_i)$ 为 θ_i 和 n_i 的函数, 其中 $Q(\theta, n_i) = 0$ 表示该阶段不开机.

1.2 叶片全调节优化运行与定角恒速运行的比较

1.2.1 叶片全调节优化运行模型的求解

在式 (1) ~ (3) 模型中, 当 n_i 为已知时, 阶段变量为 $i (i=1, 2, \dots, n_m)$, 决策变量为 θ_i , 状态变量为日提水量, 该模型为一维动态规划模型, 作者在文献 [6] 中进行了详细描述.

1.2.2 叶片全调节优化运行与定角恒速运行

不同日均扬程 (7.8 6 8 5 8 4 8 和 3.8 m)、不同提水负荷 (100%, 80% 和 60%) 和峰谷电价时, 单机叶片调节优化 (各阶段机组转速保持 150 r/min 不变) 与定角恒速运行相比, 分别平均节省单位运行能耗费用 6.90%, 22.95% 和 32.25%; 非峰谷电价时, 分别为 3.08%, 4.91% 和 6.79%, 结果详见图 1^[9]. 图 1 中 σ 为单位费用节约百分比, H_{av} 为平均扬程.

不同日均扬程情况下, 不管是否实行峰谷电价, 叶片全调节优化运行与定角恒速运行比较效益明显, 且日提水负荷越小, 效益越显著^[9].

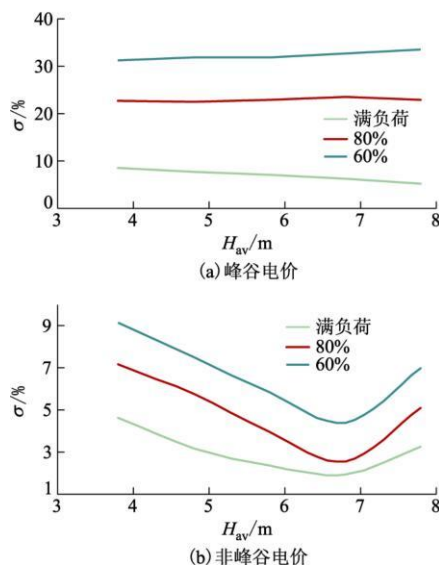


图 1 叶片全调节与定角恒速运行节能效果比较

Fig 1 Optimization of blade adjusting operation compared with operation with fixed blade angle and constant speed

1.3 变频变速优化运行与定角恒速运行的比较

1.3.1 变频变速优化运行模型求解

式 (1) ~ (3) 模型中, θ_i 为 0° 并保持不变, 则模

型就转化为决策变量为 n_i 的一维动态规划模型, 求解过程详见文献 [7].

1.3.2 变频优化运行与定角恒速运行比较

不同日均扬程, 不同提水负荷, 实行峰谷与非峰谷电价时, 变频变速日优化运行与定角恒速运行结果见图 2 由此可见:

(1) 在不同的日均扬程下, 不管是否实行峰谷电价, 满负荷工作时, 变频变速优化运行带来的效益不足以抵消变频装置的损耗.

(2) 南水北调东线工程有洪泽湖、骆马湖等调节水库, 具备不同负荷工作条件. 实行峰谷电价时, 当江都四站在 80% 和 60% 负荷工作时, 不同日均扬程变频变速运行与定角恒速运行相比, 单位提水费用平均节省 13.14% 和 25.73%, 且日运行提水量越小, 效益越显著; 非峰谷电价、部分负荷工作时, 当泵站机组低负荷、低扬程运行时, 变频变速效益才能得以充分发挥.

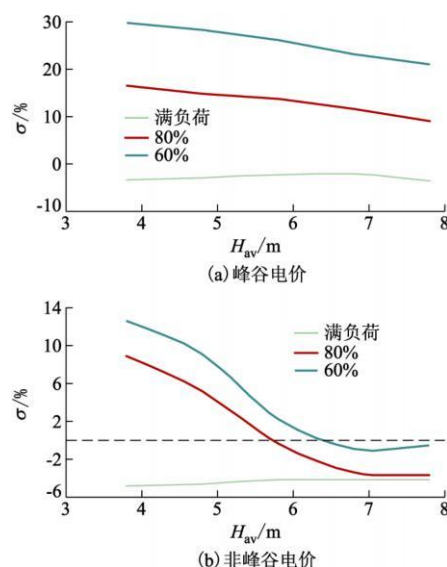


图 2 变频变速与定角恒速运行节能效果比较

Fig 2 Optimal variable speed operation by means of variable frequency drive compared with operation with fixed blade angle and constant speed

1.4 叶片全调节与变频变速优化运行的比较

由叶片全调节、变频变速优化运行与定角恒速运行的成果 (图 1, 2), 以变频调节为基准, 叶片全调节与之比较, 可得叶片全调节与变频变速优化运行的比较成果, 见图 3. 图 3 中 σ_w 为满负荷下单位费用节约百分比, 由此可见:

(1) 在南水北调源头泵站扬程变幅范围内, 不管是否实行峰谷电价, 满负荷工作时, 叶片全调节优化运行比变频变速运行能耗费用更省, 并分别在其

扬程范围内平均节省 9.48% 和 7.17%, 详见图 3^a。

(2) 非满负荷工作, 实行峰谷、非峰谷电价时, 峰谷电价、日均扬程分别是影响各时段开停机的主要因素。峰谷与非峰谷电价, 80% 负荷运行时, 叶片全调节与变频变速优化运行相比, 分别节约能耗费用为 11.24% 和 3.46%; 60% 负荷时分别为 8.83% 和 2.19%。仅在非满负荷工作、非峰谷电价、日均扬程低于 5.0 m 时, 变频变速优化运行优于叶片全调节优化运行, 80% 和 60% 负荷工作时, 分别平均节省能耗费用 0.60% 和 2.82%。

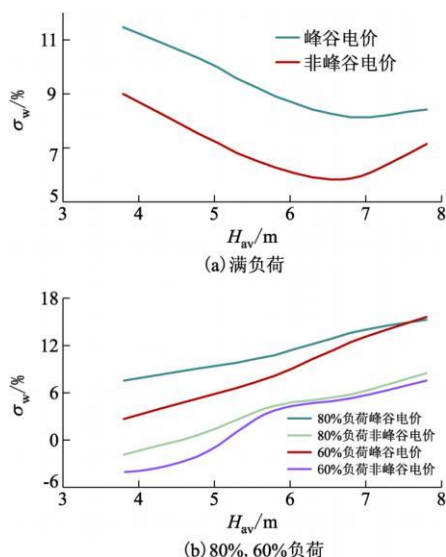


图 3 叶片全调节与变频变速优化运行相比的能耗费用节省情况

Fig 3 Cost saving of blade adjusting optimal operation compared with optimal variable speed operation by means of variable frequency drive

2 不同泵装置变频运行原理与节能

以上单机组系统优化运行模型求解分析的叶片全调节与变频变速优化运行、变频变速与定角恒速运行的比较成果 (见图 1—3), 和已有调水泵站变频优化运行相关研究成果的结论并不相同; 而管网供配水泵站变频运行具有显著经济效益, 已是不争的事实。为此, 从不同泵装置变频运行原理方面进行讨论、分析。

2.1 管网供水泵的变频运行原理

管网供水泵的设计工况是以用水高峰时流量与最不利点扬程为依据确定的。为了适应生产工艺和生活需求或外部环境的变化, 泵的工况点随之变化, 即进行泵运行调节, 如图 4^a 对于恒速 (不变频调速) 运行的泵站, 通过安装在泵出口管路上的阀门

或闸门等节流部件, 调节闸 (阀) 门的开启度来调节流量, 实质上是改变出口管路的水力损失从而改变管路特性改变泵的工况点^[8], 当流量从 Q_1 减小到 Q_2 , 维持压力不变, 通过改变管路特性后, 泵的运行工况点从工况①→到工况③, 满足流量要求。水泵变频运行是通过安装变频器, 调整水泵转速, 使水泵根据供水流量, 从工况①→到工况②……管路特性不变, 但水泵运行工况随之调整, 泵装置的功率也跟着变小。与改变管路特性运行比较, 即工况②与工况③比较, 能耗明显减小, 供水成本也随之降低。因此, 管网供水的泵装置变频运行具有显著的经济效益。

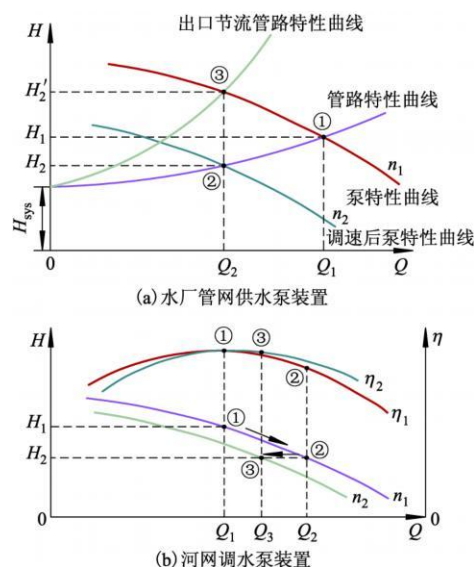


图 4 泵装置变频优化运行原理

Fig 4 Schematic diagram of optimal operation with variable frequency drive for pump system

2.2 调水泵装置的变频运行原理

上、下游均为自由水面的调水泵站, 根据设计流量与设计扬程选择泵及装置, 常常保证设计工况①在效率最高点 (即最优工况点) 运行。一次调水期间, 随着上、下游水位变化, 扬程出现变幅, 当从扬程①降低至扬程②时, 根据泵及装置的流量扬程关系, 机组转速恒定, 泵装置会随着扬程降低, 流量自动增大, 功率随之减小。此时, 泵及装置的工况可能偏离高效区。

调水泵装置的变频运行目的在于: 通过变频装置调整机组转速, 使偏离高效区的工况②, 在保证扬程与工况②相同、流量满足要求的情况下, 调整至高效区工况③运行。由图 4 b 可见, 只有当扬程变幅 ($H_1 - H_2$) 足够大, 即工况②偏离高效区足够远, 通过变频装置调整运行工况, 从工况②调整至工况③后, 在变频装置的使用寿命内, 提高的泵装置效率所

产生的效益大于变频器投入.此时,调水泵装置的变频运行才有意义.

很显然,节能与否是在考虑变频装置损耗的基础上与工况②相比较,而不是与工况①比较.这一点与水厂管网供水泵变频运行有着本质差别.

3 结 论

以南水北调东线工程源头泵站江都四站为例,通过单机组叶片全调节、机组变频变速优化运行模型求解,分别从系统优化运行与泵站装置性能的角度,对泵站变频运行效果、机理、工程应用适应性等方面进行了论证、分析,获得以下结论:

(1)在南水北调东线源头泵站扬程变幅(日均扬程 7.8~3.8 m;潮差 1.2 m)范围内,不管是否实行峰谷电价,泵站叶片全调节优化运行是较为合适的运行模式.而变频变速运行仅在扬程低于 5.0 m 非满负荷运行时优于叶片全调节;在满负荷工作时,泵站变频变速与定角恒速运行相比,变频变速优化运行带来的效益不足以抵消变频装置的耗损.

(2)管网供水泵站,较之于改变管路特性,变频优化运行具有显著经济效益;而南水北调泵站,由于河网供水的泵装置性能关系,变频运行不一定产生经济效益.

(3)根据优化分析,南水北调泵站工程只有在一次调水过程中的扬程变幅足够大时,变频优化运行才能产生效益,但随着扬程降低、转速减小,导致流量也会减小,调水量是否能够满足要求是必须慎重考虑的重要因素.

由于低扬程泵站优化运行,尤其是梯级泵站(群)的联合运行影响因素较多,比单机组优化运行复杂得多,文中结论是初步的.

参考文献 (References)

- [1] Stapanoff A J Centrifugal and Axial Flow Pumps [M]. 2nd Ed. London: London Chapman & Hall Ltd. 1957.
- [2] 冯晓莉,仇宝云,黄海田,等.南水北调东线江都排灌站优化运行研究[J].水力发电学报,2008,27(4): 130—134.
Feng Xiaoli, Qiu Baoyun, Huang Haitian, et al. Study on optimal operation of Jiangdu pump stations in Eastern Route of South to North Water Diversion Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 130—134 (in Chinese).
- [3] 江苏省江都水利工程管理处.江都排灌站[M].2版.北京:水利电力出版社,1979.
- [4] 朱红耕,黄红虎.三江营水情变化对江都排灌站影响的数理分析[J].扬州大学学报:自然科学版,2003,6(1): 75—78.
Zhu Honggeng, Huang Honghu. Mathematical analysis on the change of water regime in Sanjiangying and its influence upon Jiangdu pumping station [J]. Journal of Yangzhou University Natural Science Edition, 2003, 6(1): 75—78 (in Chinese).
- [5] Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Lihua, et al. Study on operation optimization of pumping station's 24 hours operation under influences of tides and peak-valley electricity Prices [C] // The 10th Asia International Conference on Fluid Machinery, New York: AIP Conference Proceedings, 2010, 1225: 137—146.
- [6] 程吉林,张礼华,张仁田,等.叶片可调单机组日运行优化方法研究[J].水利学报,2010,41(4): 499—504.
Cheng Jilin, Zhang Lihua, Zhang Rentian, et al. Study on optimal day-operation of single adjustable blade pump unit [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 499—504 (in Chinese).
- [7] 程吉林,张礼华,张仁田,等.泵站单机变速运行优化方法研究[J].农业机械学报,2010,41(3): 72—76.
Cheng Jilin, Zhang Lihua, Zhang Rentian, et al. Optimal methodology of single unit variable speed operation in pumping station [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 72—76 (in Chinese).
- [8] 刘宜,李会暖,刘晓阳,等.变频调速技术在水泵调节控制系统中的应用[J].排灌机械,2006,24(4): 44—46.
Liu Yi, Li Huiuan, Liu Xiaoyang, et al. Application of variable frequency speed regulation technique in pump control system [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(4): 44—46 (in Chinese).

(责任编辑 张文涛)