

淮阴三站变频变速优化运行的分解-动态规划聚合法

龚懿¹, 程吉林^{1*}, 张仁田^{1,2}, 张礼华¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 扬州 225009)

摘要: 以泵站多机组变频变速运行日耗电费用最小为目标, 构造泵站多机组变频变速日优化运行数学模型。考虑变频装置效率随机组转速变化情况, 采用大系统分解-动态规划聚合方法求解。先以泵站日提水耗电费用最小为目标, 机组提水量为协调变量, 将该模型分解为若干个单机组变频变速日优化运行子模型; 再以各机组提水量为决策变量, 泵站提水量的离散值为状态变量, 构造聚合模型, 二者均采用动态规划方法求解。该方法对求解不同型号泵机组或各机组同型号但性能存在差异的泵站变频变速最优化运行问题同样适用。以南水北调东线第三梯级泵站淮阴三站运行为例, 获得了一系列优化成果。

关键词: 泵, 优化, 分解, 聚合, 多机组, 大系统, 动态规划, 变频变速

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.014

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0079-05

龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 淮阴三站变频变速优化运行的分解-动态规划聚合法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 79-83.

Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Optimization on variable speed operation with VFD for No.3 Huaiyin pumping station based on decomposition-dynamic programming aggregation method[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 79-83. (in Chinese with English abstract)

0 引言

随着南水北调工程建设的进一步深入, 泵站优化运行^[1-10]越来越得到重视, 特别是大系统分解-聚合法^[11-13]在水利工程优化中的应用不断增加, 为泵站优化运行研究提供了新的途径。随着变频技术的快速发展, 特别是高压、大功率变频装置的日趋成熟, 变频运行已在南水北调东线工程 3 座泵站中得到应用。目前, 对安装变频调速装置的大型泵站变频变速优化运行方法已有不少研究。

变频装置作为驱动电动机的电源变换装置, 其损耗包括整流损耗、逆变损耗和控制回路损耗, 其中整流损耗和逆变损耗取决于电力半导体器件的通态损耗和开关损耗, 约占总损耗的 90%, 而控制回路损耗与变频装置容量和负载无关, 负载电流的大小对变频装置的损耗起着决定性作用^[14]。

到目前为止, 大多数文献并未考虑这一损耗, 由此

带来的变频效益偏大; 或者将变频装置效率作为常数考虑, 而实际上随频率(转速)变化而发生改变。为此, 本文考虑变频装置效率随机组转速变化情况下, 将大系统分解-动态规划聚合方法引入到泵站多机组变频变速优化运行求解中。以江苏省淮阴三站为例, 考虑同一时段内各水泵机组在不同转速下的优化运行, 探求泵站多机组变频变速运行的优化效益。

1 多机组叶片全调节日运行优化模型与求解方法

为方便研究, 作以下定义:

1) 运行方式:

① 定角恒速运行: 在运行过程中, 泵机组以额定转速(以淮阴三站为例: 125 r/min), 叶片设计安放角(以淮阴三站为例: +1°)运行;

② 变频变速优化运行: 泵机组设计叶片安放角恒定、各阶段根据运行工况通过高压、大功率变频器调节水泵转速, 使之运行费用最低。

2) 工作负荷:

① 100% 负荷: 泵站 24 h 运行总提水量 (m^3);

② 80%、60% 负荷: 对应于定角恒速运行下 100% 负荷工作的 80%、60% 提水量 (m^3)。

3) 峰谷分时电价: 采用 2008 年 7 月江苏省物价局公布的峰谷分时销售电价, 如表 1 所示。

4) 1 日时段划分: 考虑到大型泵站不宜频繁开停机、峰谷电价过程、模型求解精度及优化工作量等因素影响, 将 1 日划分为 9 个时段, 各时段长度与峰谷电价组合如表 1 所示。

收稿日期: 2010-07-30 修订日期: 2011-03-15

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAB04A03); 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); 教育部博士点基金项目(20093250110002); 2010 年江苏省普通高校研究生科研创新计划项目资助

作者简介: 龚懿(1983-), 男, 江苏常熟人, 博士生, 主要从事水利水电工程管理决策理论及应用研究。扬州 扬州大学水利科学与工程学院, 225009。Email: gongyi_8@163.com

*通信作者: 程吉林(1963-), 男, 江苏常熟人, 教授, 博士生导师, 主要从事水利规划优化理论与应用研究。扬州 扬州大学水利科学与工程学院, 225009。Email: jlcheng@yzu.edu.cn

表1 时段划分及各时段峰谷电价

Table 1 Time period division and peak-valley electricity price of each time period

时段编号	时段划分	时段长度/h	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
1	17:00—19:00	2	0.978
2	19:00—21:00	2	0.978
3	21:00—23:00	2	0.587
4	23:00—03:00	4	0.276
5	03:00—07:00	4	0.276
6	07:00—09:00	2	0.978
7	09:00—11:00	2	0.978
8	11:00—14:00	3	0.587
9	14:00—17:00	3	0.587

注:表中峰谷电价摘自2008年7月江苏省物价局公布的峰谷分时销售电价。

1.1 多机组变频变速日运行优化模型

以泵站多机组日运行耗电费用最小为目标函数,各时段各机组转速为决策变量,1日目标提水量及水泵电动机额定功率为约束条件,建立如下多机组变频变速日优化运行数学模型。

目标函数

$$F = \min \sum_{j=1}^{JZ} F_j = \min \left(\sum_{j=1}^{JZ} \sum_{i=1}^{SN} \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{i,j}(n_i) \cdot H_i}{\eta_{zi,j} \cdot \eta_{mot,j} \cdot \eta_{int,j} \cdot \eta_f(n_i)} \cdot \Delta T_i \cdot \Delta P_i \right) \quad (1)$$

总水量约束

$$\sum_{j=1}^{JZ} \sum_{i=1}^{SN} Q_{i,j}(n_i) \cdot \Delta T_i \geq W_e \quad (2)$$

功率约束

$$N_{i,j}(n_i) \leq N_{0,j} \quad (i=1, 2, \dots, SN; j=1, 2, \dots, JZ) \quad (3)$$

式中, F 为泵站日运行最小耗电费用, 元; F_j 为第 j 台水泵机组日运行耗电费用, 元; JZ 为水泵机组台数, 台; SN 为1日划分的时段数; $Q_{i,j}(n_i)$ 为第 i 时段第 j 台水泵在叶片安放角保持额定角度不变时对应于转速 n_i 的流量, m^3/s ; H_i 为第 i 时段的时均扬程, m ; ΔT_i 为第 i 时段的时段长度, h ; ΔP_i 为第 i 时段的峰谷电价, 元/($kW \cdot h$); $\eta_{zi,j}$ 、 $\eta_{mot,j}$ 、 $\eta_{int,j}$ 分别为第 j 台机组的水泵效率, 电动机效率和传动效率, $\eta_{zi,j}$ 在转速 n_i 一定时是流量的函数, 可通过水泵性能曲线获得; 电动机效率 $\eta_{mot,j}$ 在负荷大于 60% 时, 可按 94% 常数考虑; 直联机组的传动效率 $\eta_{int,j}$ 为 100%; 变频装置的效率 $\eta_f(n_i)$ 与频率 (转速 n_i) 的变化范围密切相关, 对于 2 200 kW 的 PWM 多脉冲变频装置, 根据试验结果, 额定频率下的转速为 125 r/min 时效率可以用转速的二次多项式表示^[14]

$$\eta_f = 0.9014689 + 0.0007943n - 0.0000017n^2 \quad (n \leq 125 \text{ r/min}), \%$$

W_e 为泵站1日目标提水量, m^3 ; $N_{i,j}(n_i)$ 为第 i 时段第 j 台水泵机组对应于转速 n_i 的实际功率, kW , 应小于该水泵的电动机额定功率 $N_{0,j}$ 。

1.2 大系统分解-动态规划聚合求解方法

传统的大系统分解-聚合法在聚合时建立替代原目标函数的统计回归方程, 通过相对简单的聚合模型 (目标函数为统计回归方程+耦合约束) 的动态规划求解, 获得原问题的近似解。而大系统分解-动态规划聚合法以子系统协调变量为决策变量, 分解后, 各子系统的优化成果 (各子系统目标值与对应协调变量离散值的关系) 可根据动态规划优化方法原理直接聚合成动态规划模型求解, 不需再构造回归统计方程, 且采用该方法求得解可为全局最优解。

1.2.1 大系统模型分解

将各机组日抽水量 W_j 设为协调变量, 模型 (1)~(3) 可分解为 JZ 个单机组变频变速日运行优化子模型。该模型以单机组日开机运行总耗电费用最小为目标函数, 各时段水泵机组转速为决策变量, 单机组日提水量 W_j 及机组功率要求为约束条件

目标函数

$$\min F_j = \sum_{i=1}^{SN} \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{i,j}(n_i) \cdot H_i}{\eta_{zi,j} \cdot \eta_{mot,j} \cdot \eta_{int,j} \cdot \eta_f(n_i)} \cdot \Delta T_i \cdot \Delta P_i \quad (4)$$

总水量约束

$$\sum_{i=1}^{SN} Q_{i,j}(n_i) \Delta T_i \geq W_j \quad (5)$$

功率约束

$$N_{i,j}(n_i) \leq N_{0,j} \quad (6)$$

1.2.2 子系统模型优化

模型 (4)~(6) 为典型的一维动态规划模型, 参见文献[15], 可采用动态规划法求解。阶段变量为时段 i ($i=1, 2, \dots, SN$); 决策变量为各时段机组转速 n_i , 由式(5)可知不同阶段的提水量即为状态变量 λ 。由此可获得对应于目标配水量 W_j 的最小提水费用 F_j , 及对应的最优开机方式。

对于1座安装 JZ 台不同型号水泵机组的泵站, 或即使各机组型号相同, 但由于布置位置不同等因素, 各机组性能仍存在差异, 因此各水泵机组均有各自的性能曲线。

针对某一单机组, 在给定某一日均扬程下均有满足功率要求的最大提水量 $W_{j,max}$, 以一定步长进行离散, 采用上述子系统优化方法分别求解各离散水量下 ($W_{j,m}$) 下的最小提水费用 $F_{j,m}$ ($m=1, 2, \dots, \max$), 并获得一系列该机组日优化运行方案。重复给定其他日均扬程, 求解获得该机组不同日均扬程、不同离散水量要求下的最小提水费用及对应的日优化运行方案。

对其余各机组同样采用上述方法, 求解获得各机组不同日均扬程、不同离散水量要求下的一系列最小提水费用 $F_{j,m}$ ($j=1, 2, \dots, JZ; m=1, 2, \dots, \max$) 及最优开机方案。

1.2.3 大系统动态规划聚合

由上述各子系统获得一系列 $W_{j,m} \sim F_{j,m}(W_{j,m})$ 关系 ($j=1, 2, \dots, JZ; m=1, 2, \dots, \max$)。构造如下聚合模型

目标函数

$$F = \min \sum_{j=1}^{JZ} F_j(W_j) \quad (7)$$

水量约束

$$\sum_{j=1}^{JZ} W_j \geq W_e \quad (8)$$

上述聚合模型 (7) ~ (8) 同样为典型的一维动态规划模型, 阶段变量为机组编号 $j(j=1, 2, \dots, JZ)$; 决策变量为各机组日提水量 W_j , 其离散范围即为单机组优化时的目标水量离散范围 $W_{j,m} (m=1, 2, \dots, \max)$; 由式 (8) 可知泵站各机组提水总量的离散值即为状态变量 λ 。参照文献[15], 采用动态规划法求解该模型, 获得满足泵站日目标提水量 W_e 的最小耗电费用 F , 以及对应的各机组最优水量分配 $W_j^* (j=1, 2, \dots, JZ)$ 。

由各机组最优提水量组合 $W_j^* (j=1, 2, \dots, JZ)$ 回查子系统优化成果, 可得对应于各机组分配水量的最优开机转速组合 $n_{ij}^* (i=1, 2, \dots, SN; j=1, 2, \dots, JZ)$ 。

2 工程实例应用

2.1 淮阴三站概况

淮阴三站属南水北调东线第三级泵站, 安装 4 台灯泡贯流泵 (其中 1 台备用), 单机流量 $34 \text{ m}^3/\text{s}$, 叶轮直径 3140 mm , 配套电机功率 $2\ 200 \text{ kW}$ 。水泵与电机直接

连接, 额定转速 125 r/min , 设计叶片安放角 $+1^\circ$, 变频装置频率变化范围 $30 \sim 70 \text{ Hz}$, 对应的转速调节范围为 $75 \sim 145 \text{ r/min}$ 。根据变频装置的负载特性, 在额定频率以下为恒转矩、额定频率以上为恒功率。

淮阴三站上、下游均为大容积输水河道, 日均扬程变幅很小, 可考虑日均扬程不变。以 0.3 m 步长将淮阴三站从最大净扬程 (4.5 m) 至最小净扬程 (1.5 m) 之间离散成 11 个日均扬程。以各日均扬程下定角恒速运行时的 100% 负荷、80% 负荷及 60% 负荷水量作为日目标提水量, 采用大系统分解-动态规划聚合方法, 分别求解各日均扬程不同水量要求下泵站变频变速日优化运行最小提水费用对应的单位提水费用。

2.2 淮阴三站多机组变频变速日优化运行结果

淮阴三站变频装置效率随机组转速变化曲线如图 1 所示, 可见当转速低于 125 r/min 时, 变频装置效率随转速下降呈二次曲线下降, 当转速高于 125 r/min 时, 变频装置效率保持不变。由上述模型可得各日均扬程 ($1.5 \sim 4.5 \text{ m}$)、考虑峰谷电价、不同提水负荷 (100%、80%、60%) 下淮阴三站多机组日优化运行方案, 如日均扬程 1.8 m 100% 负荷、日均扬程 3.6 m 80% 负荷、日均扬程 4.2 m 60% 负荷优化运行方案如表 2 所示; 不同负荷下优化运行的单位提水费用如图 2 所示, 较定角恒速运行单位费用节省幅度如图 3 所示; 变频变速优化运行较定角恒速运行机组累计节省开机时长如图 4 所示。

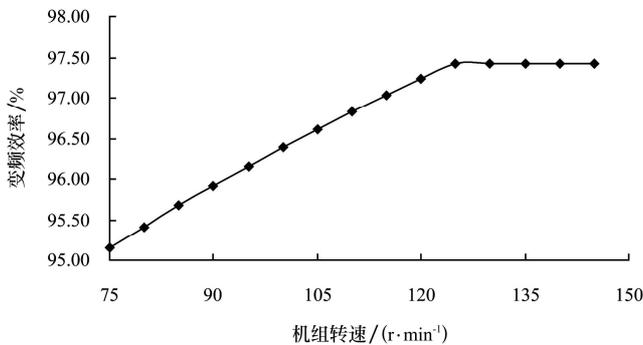


图 1 变频器效率趋势曲线

Fig.1 Trend curve of frequency converter efficiency

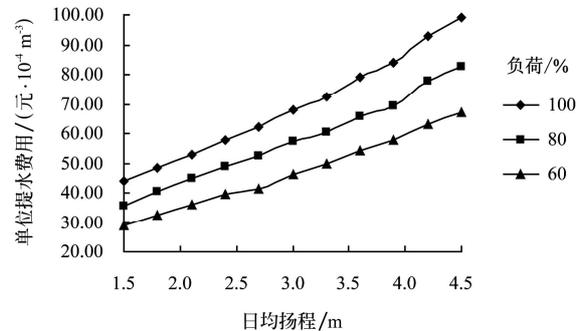


图 2 变频变速优化运行单位费用

Fig.2 Unit cost of water pumping under variable speed operation with VFD

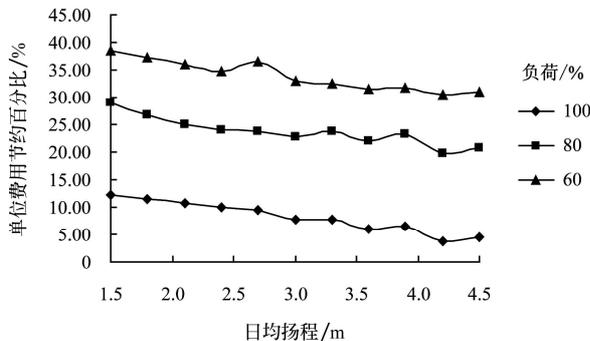


图 3 变频变速优化运行较定角恒速运行能耗节省

Fig.3 Cost saving of variable speed operation with VFD compared with that of fixed blade angle and constant speed

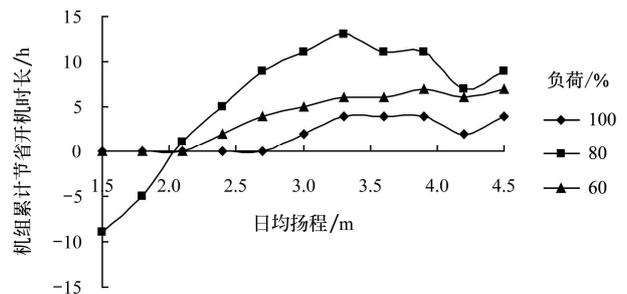


图 4 较定角恒速运行机组累计节省开机时长

Fig.4 Total saving time length of pump units compared with operation with fixed blade angle and constant speed

表2 考虑峰谷电价典型负荷部分日均扬程下变频变速优化运行方案

Table 2 Optimal schemes of variable speed operation with VFD under typical loads and several average daily heads considering peak-valley electricity price

日均扬程/ m	负荷/ %	机组 编号	时段编号								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.8	100	1	95	95	130	145	145	95	95	140	140
		2	95	95	130	145	145	95	95	140	140
		3	95	95	125	145	145	95	100	140	135
3.6	80	1	停机	停机	135	135	135	停机	130	135	130
		2	停机	125	130	135	135	停机	停机	135	130
		3	停机	停机	130	135	135	停机	停机	135	130
4.2	60	1	停机	停机	120	130	130	停机	停机	125	125
		2	停机	停机	125	130	130	停机	停机	停机	120
		3	停机	停机	125	130	130	停机	停机	停机	120

2.3 淮阴三站多机组变频变速日优化运行结果讨论

应用大系统分解-动态规划聚合法对各日均扬程不同提水负荷要求进行站内多机组变频变速优化计算,对获得的图表进行分析,可以获得以下结果:

1) 100%负荷、80%负荷、60%负荷下各日均扬程下淮阴三站机组变频变速优化运行平均单位提水费用分别为69.12、57.79、46.94元/10⁴m³,较定角恒速运行单位费用(75.28、75.76、71.06元/10⁴m³)分别节省8.18%、23.72%、33.94%。

2) 淮阴三站机组转速处于125 r/min以下时,变频装置效率随转速减少而降低,高于125 r/min时,变频装置效率按125 r/min时的效率考虑。以此计算分析可知,在淮阴三站可行扬程(1.5~4.5 m)范围内,变频变速优化运行优化效益显著。在日均扬程4.2 m,100%负荷运行时,优化效益最小(3.63%);在日均扬程1.5 m,60%负荷运行时,优化效益最大(38.59%)。

3) 优化结果表明,在高电价时段,应尽量减少开机台数或降低转速,节省费用;反之在低电价时段,可增加开机台数并提高转速,使之满足日提水量要求。

4) 100%负荷、80%负荷、60%负荷,各日均扬程下采用变频变速优化运行时机组较定角恒速运行累计节省开机时长分别为1.82、5.73、3.91 h;每种负荷下机组累计节省开机时长随日均扬程的增加呈先增后减再增的“N”形趋势,且二次增长均出现在日均扬程4.2 m时。个别日均扬程如1.5,1.8 m,80%负荷变频变速优化运行时,尽管开机时长较定角恒速运行有所增加,但节省费用仍明显。

5) 通过以上阐述,可见大系统分解-动态规划聚合法在求解泵站多机组变频变速日优化运行问题中的适用性,可求解安装不同型号水泵机组或即使各机组型号相同,但机组性能存在差异的泵站多机组变频变速日优化运行问题。同时,对形如模型(1)~(3)的复杂非线性模型求解具有一定的参考价值。

3 结论

本文在考虑考虑峰谷电价影响及变频装置效率随转

速变化的情况下,针对大型泵站多机组变频变速日优化运行数学模型,采用大系统分解-动态规划聚合法求解,可获得各机组同一时段内不同转速下运行的优化成果。通过淮阴三站工程实例的计算与分析,获得了一系列不同日均扬程及提水负荷要求下的泵站变频变速日优化运行预案,供决策者选择调用。同时,扩大了大系统分解-动态规划聚合法在水利工程优化问题中的应用,为开展复杂泵站群优化运行研究提供理论支持。

[参 考 文 献]

- [1] 陈守伦,芮钧,徐青,等. 泵站日优化运行调度研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 82-83.
Chen Shoulun, Rui Jun, Xu Qing, et al. Daily optimal operation for pumping stations[J]. Hydroelectric Energy, 2003, 21(3): 82-83. (in Chinese with English abstract)
- [2] 程吉林,张礼华,张仁田,等. 泵站单机组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 CSAM, 2010, 41(3): 72-76. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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 Asain International Conference on Fluid Machinery, AIP conference proceedings 1225: 137-146.
- [4] 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, 53.
Liu Yi, Li Huiruan, 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, 53. (in Chinese with English abstract)
- [5] Stopanoff A J. Centrifugal and Axial Flow Pumps(2nd Edition)[M]. London Chapman & Hall Ltd.,1957.
- [6] 计欣,俞国平. 基于峰谷电价的原水泵站运行调度策略[J]. 城镇供水, 2006(5): 28-29.
Ji Xin, Yu Guoping. Operation strategy of pump stations based on peak-valley electricity price[J]. City and Town Water Supply, 2006(5): 28-29. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李彬,李平夫. 泵站优化调度中考虑一次性开机约束的改

- 进遗传算法[J]. 水利水电技术, 2006, 37(8): 94—96.
- Li Bin, Li Pingfu. Improved genetic algorithm for one-time start up constraint considered for optimal operation of pumping station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(8): 94—96. (in Chinese with English abstract)
- [8] 汪亚超. 泵站多型号水泵机组运行的优化调度[J]. 中国农村水利水电, 1997, (4): 18—20.
- Wang Yachao. Optimum dispatching of pumping stations with multi-type pumping units[J]. China Rural Water and Hydropower, 1997,(4): 18—20. (in Chinese with English abstract)
- [9] 程吉林, 张仁田, 邓东升, 等. 南水北调东线泵站变速运行模式适应性[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 434—438.
- Chen Jilin, Zhang Rentian, Deng Dongsheng, et al. Adaptability research of optimal operation mode with variable frequency drives for pumping stations in the China's Eastern Route Project of S-to-N Water Diversion[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2010, 28(5): 434—438. (in Chinese with English abstract)
- [10] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站单机组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 with English abstract)
- [11] 竺慧珠, 夏富洲. 大系统分解-聚合法在拱式渡槽整体结构优化中的应用[J]. 水利学报, 1995, 26(10): 1—7.
- Zhu Hui Zhu, Xia Fuzhou. Application of decomposition-aggregation method of large-scale system on whole structural optimization of arch aqueduct[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(10): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [12] Shaaban.Hassan,Grujic.Ljubomir.Decomposition-aggregation method applied to a multimachine power system[J]. Large Scale Systems, 1986, 10(2): 115—132.
- [13] 王德智, 董增川, 丁胜祥. 供水库群的聚合分解协调模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 622—626.
- Wang Dezhi, Dong Zengchuan, Ding Shengxiang. Research on aggregation-decomposition-coordination model of feeding reservoir group[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(6): 622—626. (in Chinese with English abstract)
- [14] 姚林碧. 灯泡贯流泵机组变频装置特点与节能分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 9—12.
- Yao Linbi. VFDs features and energy-saving analyses for tubular bulb pump system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2010, 8(3): 9—12.(in Chinese with English abstract).
- [15] 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 with English abstract)

Optimization on variable speed operation with VFD for No.3 Huaiyin pumping station based on decomposition-dynamic programming aggregation method

Gong Yi¹, Cheng Jilin^{1*}, Zhang Rentian^{1,2}, Zhang Lihua¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

Abstract: The mathematical model of optimal daily operation with variable speed for multiple pump units in single pumping station was constructed by taking the minimal daily electric cost as objective function. Considering the efficiency of variable frequency drive (VFD) varied with the unit rotational speed, the decomposition-dynamic programming aggregation method was applied to solve the model above. Taking minimal daily electric cost as objective function, the water quantity pumped by units as coordinated variable, this model was decomposed into several sub-models of daily optimal operation with variable speed for single pump unit. The constructed aggregation model took water quantity pumped by each pump unit as decision variable, the discrete values of water quantity pumped by pumping station as state variable. Both sub-model and aggregation model were solved by means of dynamic programming method. The decomposition-dynamic programming aggregation method could solve the optimal variable speed operation issues for multiple pump units with different types or the units of the same type with performance differences in single pumping station. Through the study on the operation of No.3 Huaiyin Pumping Station which is the third stage pumping station of South-to-North Water Diversion Project in China, a series of optimization results were obtained.

Key words: pumps, optimization, decomposition, aggregation, multiple pump units, large scale systems, dynamic programming, variable speed operation with VFD