

文章编号: 1006-4710(2011)03-0311-06

汉江上游梯级水电站水库优化运行研究

孙晓懿¹, 黄强¹, 康田², 高凡¹, 郝鹏¹

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 河南黄河河务局, 河南 郑州 450003)

摘要: 根据汉江上游石泉、喜河、安康梯级水电站水库群的特点和任务, 分别以梯级水电站发电量最大和发电效益最大为目标函数建立优化模型, 将逐次逼近动态规划法(DPSA)与逐步优化算法(POA)相结合求解模型, 获得梯级水电站长系列优化运行结果。结果表明, 梯级水电站水库群优化运行能够充分发挥水库的补偿作用, 相比梯级水库群常规调度和单一水库优化运行获得更大的效益; 与发电量最大模型相比, 发电效益最大模型增加了梯级水电站的发电效益和枯水期出力, 调整了水电站的负荷分配, 减少了水电站弃水, 提高了水资源利用率。研究成果为汉江上游梯级水电站的优化运行提供了理论依据和技术支持。

关键词: 汉江上游梯级水电站; 梯级发电效益最大; 梯级发电量最大; 逐次逼近动态规划法; 逐步优化算法

中图分类号: TV148

文献标志码: A

Optimized Operation of the Cascade Power Station Reservoirs in the Upper Reaches of the Hanjiang River

SUN Xiaoyi¹, HUANG Qiang¹, KANG Tian², GAO Fan¹, HAO Peng¹

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Yellow River Henan Bureau, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Based on the characteristics and tasks of the cascade hydropower station reservoir groups of Shiquan, Xihe and Ankang in the upper reaches of the Hanjiang River, two optimal models with the objective functions of maximum power generation and the maximum power generation benefits are established respectively. The solution to the models is obtained via the combination of successive approximation method of dynamic programming (DPSA) and progressive optimal algorithm (POA), whereby the long-series optimal operation results of the cascade hydropower stations are obtained. The results indicate that the optimal operation of the cascade hydropower station reservoir groups can bring the compensation effect of reservoirs into full play and obtain the greater benefits in comparison with the conventional operation of the cascade reservoir groups and the single reservoir optimal operation. The results of maximum power generation benefit model are better than the results of the maximum power generation model, which the power generation benefits of the cascade hydropower stations and the outputs in the dry season increase, and the load distribution of hydropower stations are regulated, and the abandoned water decrease, and the utilization efficiency of water resource is improved. Accordingly, the research results can provide the theoretical basis and technical support for the optimal operation of the cascade hydropower stations in the upper reaches of the Hanjiang River.

Key words: cascade power stations in the upper Hanjiang River; maximizing energy output; maximizing energy benefit; successive approximation methods of dynamic programming (DPSA); progressive optimal algorithm (POA)

汉江水能资源丰富, 上游的石泉水库、喜河水库、安康水库已经形成完整的连续梯级, 其中石泉水库和安康水库为季调节水库, 调节性能较好, 喜河水

库为日调节水库, 调节性能较差。实行石泉、喜河、安康梯级水电站水库群联合优化运行, 能够充分发挥石泉、安康的调节作用, 提高梯级水电站的保证出力

收稿日期: 2011-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779053); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201101049)。

作者简介: 孙晓懿(1983-), 女, 河南新密人, 博士生, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: michelle_830216@163.com。

黄强(1958-)男, 四川梓潼人, 教授, 博导, 研究方向为水文学与水资源。E-mail: wresh@mail.xaut.edu.cn。

和年发电量。水电站水库(群)优化调度研究主要集中于优化模型研究和优化算法研究,水电站水库发电优化模型主要有发电量最大模型、发电效益最大模型和蓄能最大模型等,动态规划法、逐步优化算法、人工神经网络法等^[1-5]优化算法被应用于水电站水库(群)优化调度模型的求解。随着理论研究的不断深入,水电站水库(群)优化调度研究开始逐渐由理论研究向实际应用、由单一方法向多方法综合发展。

本文以石泉、喜河、安康梯级水电站水库群为研究对象,分别建立梯级发电量最大和梯级发电效益最大优化模型,将逐次逼近动态规划法(Successive Approximation Methods of Dynamic Programming, DP-SA)与逐步优化算法(Progressive Optimal Algorithm, POA)相结合求解模型,研究该梯级水电站水库群的优化运行问题,研究成果可为梯级水电站如何运营提供理论依据和技术支持。

1 模型建立

1.1 目标函数

本文主要研究汉江上游梯级水电站水库群的长期优化运行问题,选取44年长系列径流资料,以月为计算时段。由于喜河水库为日调节水库,在计算中作为径流式电站,只考虑利用其水头发电,无径流调节能力。石泉、喜河、安康梯级水库为小库在上、大库在下,与一般大库在上、小库在下的梯级水库群不同;石泉水库的调节性能相对于安康水库较差,因此,石泉水库与喜河水库运行受上游来水影响较大;而安康水库调节性能相对较好,能够对上游水库下泄水量进行补偿调节。

石泉、喜河、安康均是以发电为主的水电站水库,并且在电网中承担着调频、调峰、事故备用等重要作用。随着我国电力市场的不断发展,不再实行单一电价,研究电力市场环境梯级水电站水库群的优化运行则需要考虑丰枯分时电价的作用,使水电站获得最大的经济效益。因此,分别以梯级水电站总发电量最大和梯级水电站总发电效益最大为目标建立优化模型,目标函数如下:

$$\max E = \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T N_{i,t} \times \Delta t \quad (1)$$

式中, E 为梯级水电站总发电量,水库数目 $N=3$,时段数目 $T=12 \times 44$, $N_{i,t}$ 为第 i 个水电站第 t 时段的出力,时段长 $\Delta t=30.4 \times 24$ 。

$$\max B = \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T N_{i,t} \times \Delta t \times P_t \quad (2)$$

式中, B 为梯级水电站总发电效益, P_t 为第 t 时段的

电价。

1.2 约束条件

1) 梯级流量关系约束条件:

$$Q_{\lambda i+1,t} = Q_{\text{出},i,t} + Q_{\text{区},i+1,t} \quad (3)$$

式中, $Q_{\lambda i+1,t}$ 为第 $i+1$ 个水库第 t 时段的入库流量, $Q_{\text{出},i,t}$ 为第 i 个水库第 t 时段的出库流量, $Q_{\text{区},i+1,t}$ 为第 t 时段第 i 个水库与第 $i+1$ 个水库之间的区间来水流量。

2) 水库下泄流量约束条件:

$$\underline{Q}_{\text{出},i,t} \leq Q_{\text{出},i,t} \leq \bar{Q}_{\text{出},i,t} \quad (4)$$

式中, $\bar{Q}_{\text{出},i,t}$ 、 $\underline{Q}_{\text{出},i,t}$ 分别为第 i 个水库第 t 时段下泄流量的上、下限。

3) 水库水位约束条件:

$$\underline{Z}_{i,t} \leq Z_{i,t} \leq \bar{Z}_{i,t} \quad (5)$$

式中, $\bar{Z}_{i,t}$ 、 $\underline{Z}_{i,t}$ 分别为第 i 个水库第 t 时段水位 $Z_{i,t}$ 的上、下限。

4) 水电站装机容量约束条件:

$$\underline{N}_{i,t} \leq N_{i,t} \leq \bar{N}_{i,t} \quad (6)$$

式中, $\bar{N}_{i,t}$ 、 $\underline{N}_{i,t}$ 分别为第 i 个水电站第 t 时段出力 $N_{i,t}$ 的上、下限。

5) 水量平衡约束条件:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{\lambda i,t} - Q_{\text{出},i,t}) \times \Delta t \quad (7)$$

式中, $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为第 i 个水库第 t 时段的时段初、末蓄水量。

1.3 梯级水库间水力联系

梯级水库间水力联系包括流量联系和水头联系^[6]。

1) 流量联系 上游水库的下泄流量为下游水库来水的一部分,一般表示为:

$$Q_{\lambda i+1,t} = Q_{\text{出},i,t} + Q_{\text{区},i+1,t} = Q_{\lambda i,t} - \frac{dV_{i,t}}{dt} + Q_{\text{区},i+1,t} \quad (8)$$

2) 水头联系 取决于梯级水库之间的衔接情况,一般表示为:

$$Z_{\text{down},i,t} = Z_{\text{down},i,t}(Q_{\text{出},i,t}, V_{i+1,t}) \quad (9)$$

式中, $Z_{\text{down},i,t}$ 为上游水库的下游水位, $V_{i+1,t}$ 为下游水库的库容。

2 汉江上游梯级水电站丰枯电价制定

根据来水多少将一年分为丰水期、平水期、枯水期,按照不同的水电发电成本制定的季节差别电价即为丰枯电价^[7]。在发电侧实施丰枯电价,可以引导发电企业充分利用资源、提高设备利用率、降低成本,获取更多效益^[7]。根据我国实施分时电价的情况,电价可以根据实际情况,拉大峰谷价差。丰枯季

节电价中,丰水期电价可比现行电价低 30% ~ 50%,枯水期电价可比现行电价高 30% ~ 50%^[6,8]。丰枯电价制定步骤^[9]如图 1 所示。

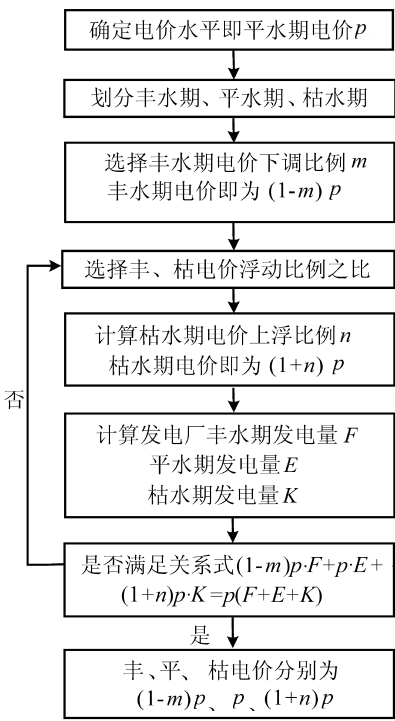


图 1 丰枯电价制定步骤
Fig. 1 Steps of seasonal tariff

电价电量平衡关系式^[8]为：
$$(1 - m)p \cdot F + p \cdot E + (1 + n)p \cdot K = p \cdot (F + E + K) \quad (10)$$

整理可得到：

$$m \cdot F = n \cdot K \text{ 即 } \frac{F}{K} = \frac{n}{m} \quad (11)$$

由式(11) 可以看出,丰、枯电量之比与丰、枯电价浮动比例之比呈反比关系。若 $m \cdot F < n \cdot K$ 即 $\frac{F}{K} < \frac{n}{m}$, 则电厂盈利。

3 模型求解算法

动态规划法 (Dynamic Programming, DP) 和逐步优化算法 (POA) 是求解水库优化调度问题比较成熟的方法。动态规划法采用网格法离散变量时,网格划分越细求解精度越高,工作量越大,随之产生“维数灾”,用来求解梯级水库群优化调度问题更易产生“维数灾”,针对这一问题,学者们提出来逐次逼近动态规划方法 (DPSA),将一个 n 维问题转化为 n 个一维子问题进行求解。逐步优化算法虽然能够获得全局最优解,但初始轨迹的选择对其计算精度和计算速度影响较大,可以先使用其他优化算法对水库群进行初步优化得到水库群的初始轨迹,再使

用逐步优化算法进行精确的计算。

根据上述分析,本文将逐次逼近动态规划 (DP-SA) 与逐步优化算法 (POA) 相结合进行汉江上游梯级水电站水库群优化模型的求解,基本思路是:首先,采用动态规划 (DP) 分别求解各水库按自身最有利方式运行的轨迹线,作为各水库的初始轨迹线;然后,用逐次逼近动态规划 (DPSA) 结合逐步优化算法 (POA) 进一步优化,最终实现梯级最优。计算流程见图 2。

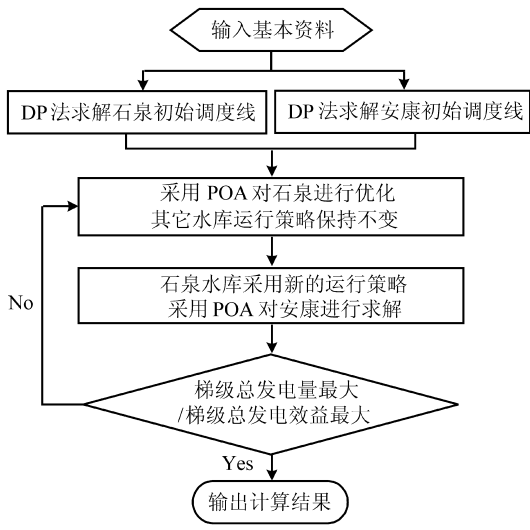


图 2 计算流程图
Fig. 2 Flow diagram of calculation

4 计算结果及分析

4.1 汉江上游梯级水电站丰枯电价制定

根据汉江上游径流规律分析结果^[10]划分丰、平、枯三个时期:丰水期为 7 ~ 9 月,枯水期为 12 月及 1 ~ 3 月,其余月份为平水期(4 ~ 6 月、10 ~ 11 月)。

由于缺乏有关陕西省丰枯季节电价的相关文献资料,参考其他省份的丰枯电价^[6,8,9,11-12],选取不同的电价水平和丰枯电价浮动比例按照图 1 中步骤进行计算^[10],结果见表 1。

表 1 丰枯电价各方案梯级丰枯电量比
Tab. 1 The ratios of energy output in the wet season to energy output in the dry season

电价水平/ (元/(kw · h))	不同丰水期电价下调比例下的丰、枯电量比				
	10%	20%	30%	40%	50%
0.2	2.9:1	2.6:1	2.47:1	2.39:1	2.32:1
0.3	2.9:1	2.6:1	2.47:1	2.40:1	2.34:1
0.4	2.9:1	2.6:1	2.47:1	2.40:1	2.34:1

由表 1 可以看出,水电站丰、枯电量之比受枯、丰电价浮动比例的影响大于受电价水平的影响;丰水期电价下调比例越大,即丰水期电价越低,枯水期

电价越高,枯、丰电价相差越大,则丰、枯电量之比就越小,即枯水期发电量越多,丰、枯电量相差越少。

表 1 中的结果是在满足式(10)的条件下得到的,由式(11)可知,当丰、枯电量比 F/K 小于枯、丰电价浮动比例之比 n/m ,发电厂即会盈利。根据计算结果,取 n/m 为 3:1,丰水期电价下调比例 m 选取一个中间值即 30%,电价水平为 0.2 元/(kW·h),

则根据确定的丰、枯电价浮动比例计算,丰水期电价为 0.14 元/(kW·h),枯水期电价为 0.38 元/(kW·h)^[10]。

4.2 梯级发电量及发电效益

按照图 2 的计算流程求解模型,得到汉江上游梯级水电站长系列优化运行结果,将两种模型的计算结果进行对比分析,结果见表 2 及表 3。

表 2 水电站多年平均发电量、发电效益比较

Tab. 2 Comparison of mean energy output and mean energy benefit for each station

电站	设计	多年平均发电量/(亿 kW·h)			多年平均发电效益/亿元		
	多年平均发电量/ (亿 kW·h)	发电量最大模型	发电效益最大模型	差值	发电量最大模型	发电效益最大模型	差值
石泉	7.09	8.34	8.17	-0.17	1.67	1.63	-0.04
喜河	4.92	5.43	5.43	0.00	1.09	1.06	-0.03
安康	28.00	30.29	29.53	-0.76	6.06	6.17	+0.11
梯级	40.01	44.06	43.13	-0.93	8.81	8.86	+0.05

由表 2 可以看出,由两种优化模型得到的石泉、喜河、安康水电站多年平均发电量均大于电站设计发电量。石泉水电站发电效益最大模型计算的多年平均发电量相比发电量最大模型减少 0.17 亿 kW·h,多年平均发电效益减少 0.04 亿元。喜河水电站发电效益最大模型计算的多年平均发电量与发电量最大模型基本相等,多年平均发电效益减少 0.03 亿元。安康水电站发电效益最大模型计算的多年平均发电量相比发电量最大模型减少 0.76 亿 kW·h,发电效益增加 0.11 亿元。尽管发电效益最大模型

计算的梯级总发电量比梯级发电量最大模型的计算结果减少 0.93 亿 kW·h,但梯级总发电效益增加了 0.05 亿元。

可以看出,以梯级总效益最大为目标,虽然梯级中个别电站的效益有所减少,但梯级总效益增加了;受到电价因子的影响,水电站发电量虽有所减少,但发电效益增加了。在市场环境下不再适宜实行恒定电价,发电量最大不一定发电效益最大。因此,以梯级总效益最大作为目标进行梯级水库优化调度能够使梯级水电站获得更大的效益。

表 3 梯级丰、平、枯各时期多年平均发电量及发电效益

Tab. 3 Mean energy output and mean energy benefit in wet, normal and dry season of the cascade

项 目	丰水期		平水期		枯水期		全年		差值
	发电效益 最大	发电量 最大	发电效益 最大	发电量 最大	发电效益 最大	发电量 最大	发电效益 最大	发电量 最大	
电价/(元/(kW·h))	0.14	0.20	0.20	0.20	0.38	0.20	-	0.20	-
梯级发电量/(亿 kW·h)	17.99	18.72	17.86	20.34	7.28	5.00	43.13	44.06	-0.93
梯级发电效益/亿元	2.52	3.74	3.57	4.07	2.77	1.00	8.86	8.81	+0.05

如表 3 所示,与发电量最大模型相比,发电效益最大模型在多年平均情况下:梯级丰水期发电量减少了 0.73 亿 kW·h,平水期发电量减少 2.48 亿 kW·h,枯水期发电量增加 2.28 亿 kW·h,全年发电量减少了 0.93 亿 kW·h,受来水和水库库容的影响,尽管枯水期发电量有所增加,但占总发电量的比例仍然较小,因此总发电量较之发电量最大模型略有减少;梯级丰水期发电效益减少了 1.22 亿元,平水期发电效益减少了 0.5 亿元,枯水期发电效益增加了 1.77 亿元,全年发电效益增加了 0.05 亿元。由于受到了电价因子的影响,部分丰水期与平水期

电量转移到了枯水期,各水电站及梯级的枯水期发电量增加,丰水期和平水期发电量均有所减少;各水电站及梯级的枯水期发电效益明显增加,丰水期发电效益明显减少,水电站发电量组成结构和发电效益组成结构发生改变。

4.3 水电站枯水期出力

梯级及其各级水电站枯水期平均出力统计结果如图 3 所示。发电效益最大模型计算得到的石泉、喜河、安康和梯级的枯水期平均出力与发电量最大模型计算结果相比,分别增加了 5.21 MW、3.12 MW、69.82 MW 和 78.15 MW。汉江汛期来水量占

全年总来水量的 80%，枯水期来水较少，导致水电站枯水期出力较低；通过计算可以看出，实行丰枯季节电价，能够调整水电站负荷分配，提高水电站枯水期出力，从而提高水电站的发电保证率，更好地发挥水电站的调峰调频作用。受来水和调节性能的影响，石泉与喜河水电站两种模型计算的枯水期平均出力变化较小，安康水电站由于其相对较好的调节性能，因此枯水期平均出力变化较大。

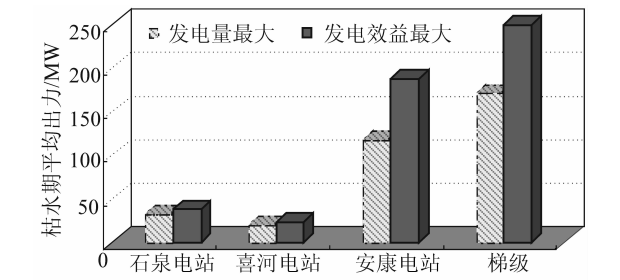


图3 枯水期平均出力比较图

Fig.3 Comparison chart of mean output in dry season

4.4 弃水量

两种模型各水电站弃水量统计结果如表4。石

泉水电站多年平均来水量为 106 亿 m³，发电量最大模型与常规调度相比，多年平均弃水量减少了 7.72 亿 m³，多年平均弃水率降低 7.19%；发电效益最大模型与发电量最大模型相比，多年平均弃水量减少了 0.05 亿 m³，多年平均弃水率降低了 0.05%。喜河水电站多年平均来水量为 114 亿 m³，发电量最大模型与常规调度相比，多年平均弃水量减少了 6.54 亿 m³，多年平均弃水率降低了 5.69%；发电效益最大模型与发电量最大模型相比，多年平均弃水量减少了 0.05 亿 m³，多年平均弃水率降低了 0.04%。安康水电站多年平均来水量为 187 亿 m³，发电量最大模型与实际运行结果相比，多年平均弃水量减少了 2.7 亿 m³，多年平均弃水率降低了 1.46%；发电效益最大模型与发电量最大模型相比，多年平均弃水量减少了 0.36 亿 m³，多年平均弃水率降低了 0.19%。

结果表明，与常规调度相比，水电站水库优化调度能够减少弃水，提高水资源的利用程度。与发电量最大模型相比，采用丰枯电价以梯级发电效益最大为目标进行优化，减少了弃水量，降低了水电站弃水率，提高了水资源利用率。

表4 弃水量统计结果

Tab.4 Statistical results of abandoned water					
电站	模型	多年平均 弃水量/亿 m ³	多年平均 弃水率/%	多年平均发电 用水量/亿 m ³	多年平均发电 径流利用率/%
石泉	常规调度	29.94	28.10	76.61	71.90
	发电量最大模型	22.22	20.91	84.05	79.09
	发电效益最大模型	22.17	20.86	84.10	79.14
喜河	常规调度	26.73	23.43	87.34	76.57
	发电量最大模型	20.19	17.74	93.59	82.26
	发电效益最大模型	20.14	17.70	93.64	82.30
安康	实际运行	24.67	13.34	160.23	86.66
	发电量最大模型	21.97	11.88	162.93	88.12
	发电效益最大模型	21.61	11.69	163.29	88.31

注：石泉、喜河常规调度结果和安康水库实际运用弃水率来自相关研究报告。

5 结 论

根据汉江上游石泉、喜河、安康梯级水电站水库群的任务、特点，分别以梯级水电站发电量最大和发电效益最大为目标函数建立优化模型，制定该梯级水电站丰枯电价，将逐次逼近动态规划法与逐步优化算法相结合求解模型，获得汉江上游梯级水电站长系列优化运行结果。结果表明，梯级水电站水库群优化运行能够充分发挥水库的补偿作用，相比梯级水库群常规调度和单一水库优化运行能够获得更多效益；与发电量最大模型相比，发电效益最大模型增加了梯级水电站的发电效益和枯水期出力，调整

了水电站的负荷分配，减少了水电站弃水，提高了水资源利用率。研究成果为汉江上游梯级水电站的优化运行提供了理论依据和技术支持。

参考文献：

[1] Salvatore B, Simona C, Nello P, et al. Discovering reservoir operation rules by a rough set approach[J]. Water Resources Management, 2006, (20): 19-36.

[2] Paulo C, Toshiharu K. Stochastic fuzzy neural network case study of optimal reservoir operation[J]. Water Resources Planning and Management, 2007, 133(6): 509-518.

[3] 解建仓, 田峰巍, 黄强, 等. 大系统分解协调算法在黄河

- 干流水库联合调度中的应用[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(1): 1-5.
- Xie Jiancang, Tian Fengwei, Huang Qiang, et al. The application of decomposition and coordination algorithm for large scale system to the joint disposals of reservoirs on the main tributaries of the Yellow River[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1998, 14(1): 1-5.
- [4] 张双虎, 黄强, 黄文政, 等. 基于模拟遗传混合算法的梯级水库优化调度图制定[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(3): 229-233.
- Zhang Shuanghu, Huang Qiang, Huang Wenzheng, et al. Linking simulation with genetic algorithm to establish optimal operation chart of cascade reservoirs[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(3): 229-233.
- [5] 张双虎, 黄强, 吴洪寿, 等. 水电站水库优化调度的改进粒子群算法[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 1-5.
- Zhang Shuanghu, Huang Qiang, Wu Hongshou, et al. Modified particle swarm optimizer for optimal operation of hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1): 1-5.
- [6] 李郁侠. 电力市场边际电价预测与水电厂竞价上网模式研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- LI Yuxia. Prediction of Marginal Electricity Price for Power Market and Research on Model of Competitive Price for Listing Power Network of Hydropower Plant[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
- [7] 雷霞, 刘俊勇. 四川省丰枯季节和峰谷分时电价状况的分析[J]. 电力技术经济, 2006, 18(3): 41-44.
- Lei Xia, Liu Junyong. Analysis on status of wet and dry season tariff and peak and off-peak tariff in Sichuan province[J]. Electric Power Technologic Economics, 2006, 18(3): 41-44.
- [8] 王丽娟. 基于电价的水库优化调度研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- Wang Lijuan. Research of Reservoir Optimal Operation Based on Power Price[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [9] 张维. 制定发电厂峰谷电价和丰枯电价的探讨[J]. 华中电力, 2004, 17(2): 42-44.
- Zhang Wei. The pricing method of power plant based on load and season[J]. Central China Electric Power, 2004, 17(2): 42-44.
- [10] 孙晓懿. 基于电力市场的汉江上游梯级水电站优化调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- Sun Xiaoyi. Study of Optimized Operation of the Cascade Power Stations in the Upper Hanjiang River Based on Electricity Market[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [11] 束洪春, 董俊, 吴水军, 等. 销售侧分行业实行丰枯峰谷分时电价初探[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 36-40.
- Shu Hongchun, Dong Jun, Wushuijun, et al. A preliminary discussion on implementing of peak-valley and time-of-use and season-of-use price for different industries at demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 36-40.
- [12] 刘昌, 李继传, 姚建刚, 等. 峰谷分时电价的分析与建模[J]. 电力需求侧管理, 2005, 7(5): 14-17.
- Liu Chang, Li Jichuan, Yao Jiangang, et al. Analysis of time-of-use price and its model[J]. Power DSM, 2005, 7(5): 14-17.

(责任编辑 杨小丽)