

水电站群发电能力的优化方法及应用分析

唐海华¹, 舒凯¹, 赵宇¹, 肖燕², 陆涛¹

(1. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 211106; 2. 贵州乌江水电开发有限公司, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 针对水电站群中长期发电计划编制的调度期末控制水位决策需求, 建立以发电能力最大为目标的水电站群联合优化调度模型, 并采用改进的逐次逼近与离散微分动态规划组合算法进行求解。以华电贵州区域乌江和北盘江两流域水电站群为例, 采用2013年实际来水过程计算, 通过与发电量最大、补偿效益最大等传统优化目标对比分析。结果表明: 本文模型可根据各电站发电效率变化情况自动确定水库蓄放策略, 实现水电站群调度期末控制水位及对应发电计划过程的同步优化, 准确体现水电站群调度期内总发电量和调度期末总蓄能量的动态博弈关系。

关键词: 水电站群; 中长期发电计划; 优化调度; 发电能力

中图分类号: TV737

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0174-05

Optimization method and application analysis of power generation capacity for hydropower station group

TANG Haihua¹, SHU Kai¹, ZHAO Yu¹, XIAO Yan², LU Tao¹

(1. NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China; 2. Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd. Guiyang 550002, Chian)

Abstract: In the light of the demand of water level decision in period end of scheduling of medium and long term power generation planning of hydropower station group, the paper established the joint optimal dispatching model which took the maximum power generation capacity as the target, and used improved combination dynamic programming algorithm of discrete differential and successive approximation to solve the model. It took the hydropower station group of Wujiang and Beipanjian basin in Guizhou province for example, and using the actual inflow process in 2013, this model is compared with optimization objective of maximum power generation and compensation benefit. The result shows that the model can automatically determine the scheduling strategy of reservoir according to the change of power generation efficiency of power station, and realized the synchronization optimization of water level decision of hydropower station group dispatching and corresponding generation planning. The model can accurately reflect the dynamic game relationship of total generating capacity in scheduling period and total energy storage at the end of scheduling period.

Key words: hydropower station group; medium and long term power generation plan; optimal dispatching; power generation capacity

水电站群优化调度不仅是水力发电企业充分发挥电站潜能和提高经济效益的有效措施, 同时亦对电网缓解峰谷矛盾, 提高调峰调频能力, 增强补偿调度效益, 保障安全运行等具有重要影响。20世纪50年代以来, 国内外诸多学者对水库优化调度的理论方法进行了研究和探索。经过60多年的持续发展, 已取得了丰硕成果, 提出了众多的优化调度模型及

其求解算法^[1-2]。水电站群补偿优化调度是对单一水库优化调度的拓展和延伸, 相关理论技术研究亦取得了长足进展, 在发电调度方面主要以水电站群的总发电量最大、联合保证出力最大等作为补偿优化目标, 主要目的在于充分挖掘水电站群的库容补偿、径流补偿和电力补偿潜力^[3-8]。

随着国家清洁能源发展战略的稳步推进, 我国

水电发展面临新的需求和挑战,水电站群联合调度应突出节能增效、洪水资源化和协同优化等时代特征。传统的水电站群中长期优化调度通常先固定可用水量,然后再以发电量最大、补偿效益最大等作为优化目标计算调度方案。此类以水定电模式在当前水库调度决策支持系统及相关科研课题中被广泛采用,可有效优化水电站的水量分配和水头效益,实现水能资源高效利用。该方式在应用过程中需提前确定各水库的调度期末控制水位,通常来源于多年确定性优化分析或专家经验,优化调度结果只能反映调度期内的决策过程优化,无法兼顾未来的水库调度期望,难以体现调度期内即得效益与调度期末期望效益的动态博弈关系。

针对这一现状,本文提出了水电站群发电能力最大模型,以水电站群的总发电能力最大为优化目标,追求水电站群的调度期内总发电量和调度期末总蓄能量之和最大,自动优化各水库期末控制水位及对应的决策过程,并以华电贵州区域的乌江和北盘江两流域水电站群为例进行了分析验证。

1 发电能力最大模型

1.1 目标函数

$$Obj: \max E = \sum_{i=1}^I \left(\sum_{t=1}^T P_{i,t} \cdot \Delta t + EX_i \right) \quad (1)$$

式中: E 为水电站群发电能力,即调度期总发电量与调度期末总蓄能量之和, $\text{MW} \cdot \text{h}$; I 、 T 分别为总电站数和调度期计算时段数; $P_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段的平均出力, MW ; Δt 为时段小时数, h ; EX_i 为 i 电站的调度期末梯级蓄能量, $\text{MW} \cdot \text{h}$, 其计算公式为:

$$EX_i = \int_{V_{\min_i}}^{V_{E_i}} [f_i(V) + \sum_{j=1}^{J_i} f_j(V)] dV \quad (2)$$

式中: $V_{\min_i}$ 、 V_{E_i} 分别为 i 电站的蓄水下限和期末蓄水量, m^3 ; $f_i(V)$ 为 i 电站在不同蓄水状态下的平均耗水率倒数函数; J_i 表示 i 电站的下游电站个数。

1.2 约束条件

(1) 梯级上下游水库之间的水力联系

$$QI_{i,t} = QO_{i-1,t} + S_{i-1,t} + QR_{i,t} \quad (3)$$

式中: $QI_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段的平均入库流量, m^3/s ; $QO_{i-1,t}$ 为 i 电站 t 时段的所有上级电站的出库流量之和, m^3/s ; $S_{i-1,t}$ 为 i 电站 t 时段的所有上级电站的损失流量之和, 包括蒸发、渗漏、填洼等, m^3/s ; $QR_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段的区间入库流量, m^3/s 。

(2) 水库水量平衡约束

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (QI_{i,t} - QO_{i,t} - S_{i,t}) \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中: $V_{i,t}$ 为 i 电站 t 时刻的库容, m^3 。

(3) 水库蓄水量约束(与水位约束等效)

$$V_{\min_i,t} \leq V_{i,t} \leq V_{\max_i,t} \quad (5)$$

(4) 出库流量约束

$$Q_{\min_i,t} \leq QO_{i,t} \leq P_{\max_i,t} \quad (6)$$

式中: $Q_{\min_i,t}$ 、 $Q_{\max_i,t}$ 分别为 i 电站 t 时段的出库流量下限和上限。

(5) 电站平均出力约束

$$P_{\min_i,t} \leq P_{i,t} \leq P_{\max_i,t} \quad (7)$$

式中: $P_{\min_i,t}$ 、 $P_{\max_i,t}$ 分别为 i 电站 t 时段的平均出力下限和上限, m^3/s , 且应将机组检修状态转化到该约束中, 并在计算过程中充分考虑水头受阻的动态制约。

(6) 水电站群总出力约束

$$PS_{\min t} \leq \sum_{i=1}^I P_{i,t} \leq PS_{\max t} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

式中: $PS_{\min t}$ 、 $PS_{\max t}$ 分别为水电站群 t 时段的总出力下限和上限, MW 。该约束可根据水电站群的调度关系进行线性分解, 不同调度部门可分别设置所调水电站群的总出力下限和上限, 且应将联络线、网架等负荷并网的相关限制转化到该约束条件中。

2 求解算法

由上述模型结构可以看出, 当给定各电站的调度期末控制水位后, 本文模型等效于传统的发电量最大模型。因此, 模型求解应先离散各电站的调度期末水库蓄水状态, 然后分别计算各蓄水状态组合下的水电站群调度期最大发电量与调度期末总蓄能, 最后按二者之和最大筛选最优解。综上, 本文模型的求解核心在于调度期末蓄水状态确定后的水电站群联合优化。本文采用文献[9]中的逐次逼近(DPSA)与离散微分动态规划(DDDP)组合算法原理进行求解。前者用于水电站群循环迭代, 其核心任务是降维, 将水电站群联合优化的高维问题转化为多个单站优化的一维问题; 后者则用于单站过程优化, 计算某调度期末蓄水状态下的最优决策过程。

DDDP 法最突出的优点是它能克服传统动态规划存储量大和计算时间长的缺点。然而, 该算法若直接应用于水库优化调度, 还存在若干缺陷: 首先, 当离散增量的大小选择不当时, 算法可能提前收敛于局部最优解; 其次, 当离散增量始终保持不变时, 若离散步长过大, 则优化精度较低, 若离散步长过小则计算耗时较长; 第三, 面对高度非线性问题, 即便离散增量选择合理, 亦有可能因初始轨迹不合适而无法收敛到全局最优解。根据以上分析, 本文对

DDDP 法进行了三方面改进:

(1)根据水库调节库容大小,按给定等分数动态计算离散增量的初值和收敛标准。

(2)离散增量采用变步长动态衰减。为提高全局最优解覆盖率,离散增量初值通常较大,然后按二分法逐次衰减至收敛标准。

(3)采用多组初始可行解作为起点同步寻优,扩大搜索范围,降低局部收敛概率。

改进后的 DDDP + DPSA 组合优化算法可在一定程度上兼顾求解过程的高效率、高精度和高稳定性,并满足水电站群的规模扩展和对象移植等推广需求,具有更强的适用性和生产应用价值。

3 工程实例分析

以华电集团公司贵州区域的乌江和北盘江流域为例,其中乌江流域包括干流洪家渡至沙沱梯级、三岔河支流普定—引子渡梯级以及清水河支流大花

水—格里桥梯级,北盘江流域则包括干流光照—董箐梯级,该混联水电站群的拓扑关系见图 1。采用 2013 年的实际运行情况作为参照,各电站的基础特征参数、关键输入及约束边界等信息见表 1。为便于对比分析,以各电站的实际来水情况和水位决策过程模拟作为常规调度方案①,该方案计算结果是各优化目标的效益统计基础。为对比本文模型与传统模型的优化差异,分别构建方案②发电能力最大、方案③发电量最大和方案④补偿效益最大等三个优化方案。

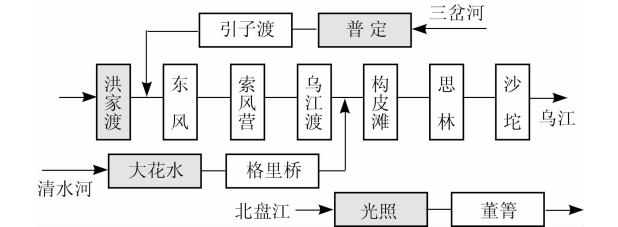


图 1 水电站群拓扑关系

表 1 水电站群输入信息及计算参数

电站	初水位/ m	末水位/ m	实发电量/ 10 ⁸ kW · h	最高水位/ m	汛限水位 (月份)/m	最低水位/ m	最大出力/ MW	保证出力/ MW	K 值
普定	1142.29	1132.39	1.8706	1145	1142.00(6-7) 1142.50(8)	1126.0	84	13.9	8.00
引子渡	1073.14	1055.13	4.4376	1086		1052.0	360	49.3	8.00
洪家渡	1112.88	1088.11	11.1485	1140	1138.00(6-8)	1076.0	600	159.1	8.10
东风	967.41	958.55	19.2437	970		936.0	695	236.0	8.20
索风营	834.45	836.59	13.4888	837		822.0	600	166.9	8.30
乌江渡	747.66	747.39	23.8425	760		720.0(1-3) 736.0(4-5)	1250	332.0	7.80
构皮滩	603.03	598.23	57.0286	630	626.24(6-7) 628.12(8)	590.0	3000	746.4	8.25
思林	436.80	435.52	27.9569	440	435.00(6-8)	431.0	1050	303.6	8.30
沙沱	296.93	361.59	17.4978	365	357.00(6-8)	353.5	1120	322.9	8.00
大花水	858.53	856.99	5.4978	868		845.0	200	40.5	8.00
格里桥	716.39	717.88	4.3628	719		709.0	150	25.5	8.00
光照	743.65	730.47	13.1288	745		691.0	1040	180.2	8.50
董箐	487.49	486.53	15.8500	490		483.0	880	172.0	8.50

各调节型电站在不同方案下的水位计算结果见图 2,主要指标统计及对比情况见表 2 和表 3。可以看出:

(1)发电能力最大方案与常规调度方案相比,站群年电量减少 26.08 × 10⁸ kW · h,减幅 12.58%,但水量利用率提高了 1.9%;与发电量最大方案相

比,站群年电量减少了 35.672 × 10⁸ kW · h,减幅 16.45%,但水量利用率提高了 1.4%;与补偿效益最大方案相比,站群年电量减少了 30.362 × 10⁸ kW · h,减幅 14.35%。可见,该方案在所有方案中的站群总发电量最低,但水量利用率反而最高,水能利用效益最佳,其中普定、引子渡、洪家渡、大花水等

主要调节型电站(具备季调节及以上调节能力)的年末水位均大幅上涨,站群总蓄能值量显著提高。这一现象表明该年度水电站群蓄能比发电更为有利,应尽量抬高调节型电站的年末水位,为次年发电计划安排创造更好的水头效益。

(2)发电量最大方案在所有方案中的站群总电量最大。与常规调度方案相比,站群年电量增加 $9.592 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,增幅4.63%,水量利用率提高0.5%。

(3)补偿效益最大方案在所有方案中的站群最小出力最大,电力补偿效果最突出。与常规调度相比,站

群年电量增加 $4.282 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,增幅2.07%,站群最小出力增加998.4 MW,增幅79.23%。

由以上分析可知,在给定可用水量的传统优化模式下,发电量最大目标可获得最多的水电站群总发电量,补偿效益最大目标则在尽可能多发电量的前提下最大程度挖掘了水电站群的联合供电能力。本文提出的发电能力最大优化目标从本质上实现了调度期内实发电量与调度期末总蓄能量的良好平衡,实现了即得效益与期望效益的统筹兼顾,实现了水位决策过程和期末蓄水状态的同步优化。

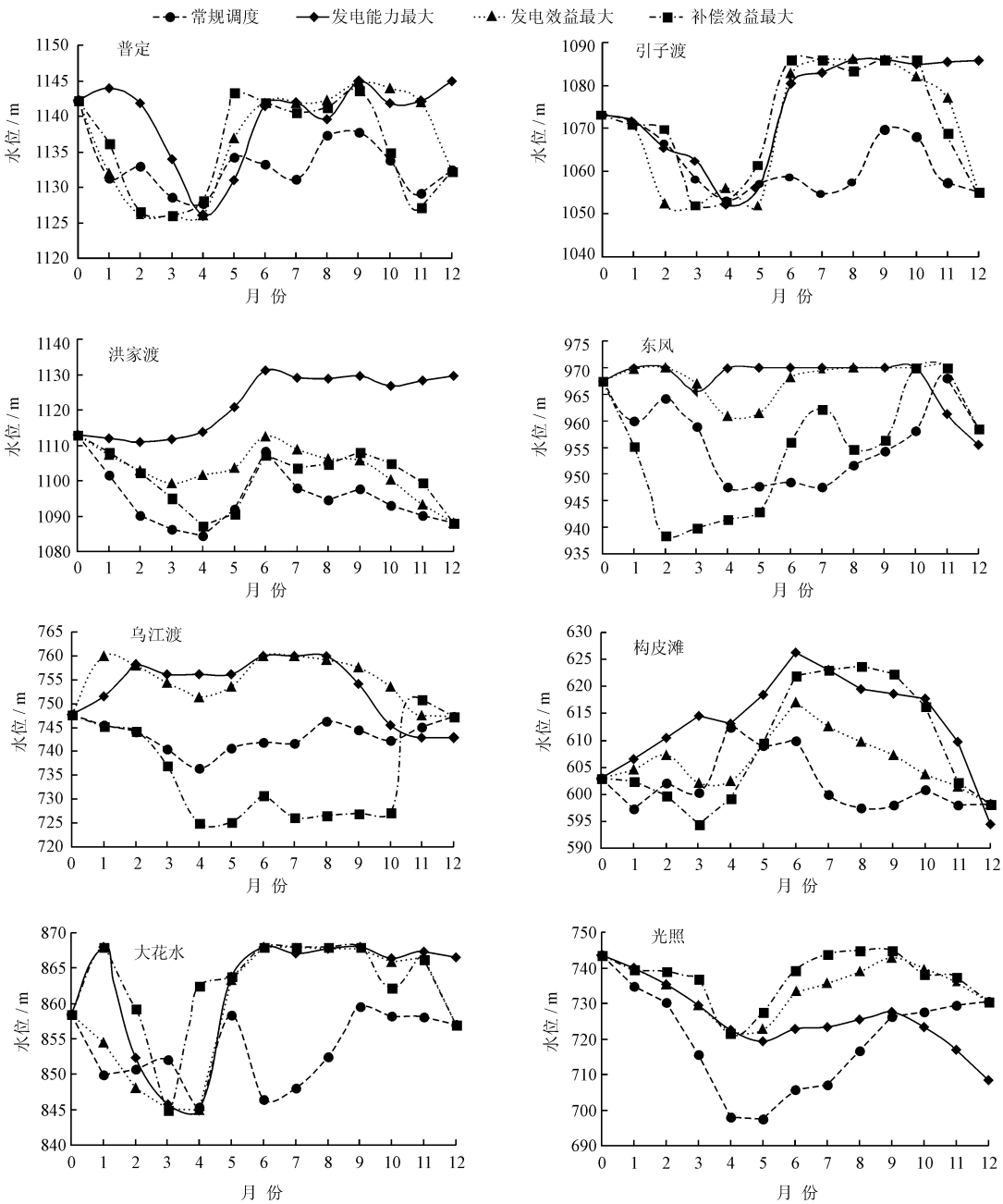


图2 各调节型电站不同方案水位计算结果

表 2 两流域 2013 年各方案计算结果统计表

电站	①常规调度		②发电能力最大			③发电效益最大		④补偿效益最大	
	年电量/ 10 ⁸ kW·h	年弃水/ 10 ⁶ m ³	年末水 位/m	年电量/ 10 ⁸ kW·h	年弃水/ 10 ⁶ m ³	年电量/ 10 ⁸ kW·h	年弃水/ 10 ⁶ m ³	年电量/ 10 ⁸ kW·h	年弃水/ 10 ⁶ m ³
普定	1.673	0	1144.87	1.616	0	1.852	0	1.874	0
引子渡	3.893	0	1085.85	3.330	0	4.391	0	4.594	0
洪家渡	10.166	0	1129.70	5.264	0	10.709	0	10.410	0
东风	17.547	0	955.50	11.917	0	19.374	0	17.602	0
索风营	12.671	0	834.45	8.202	0	12.956	0	12.897	0
乌江渡	21.097	0	743.00	16.650	0	23.364	0	19.776	0
构皮滩	53.941	0	594.50	48.555	0	55.242	0	55.947	0
思林	25.380	0	436.80	21.974	0	25.661	0	25.228	0
沙沱	25.380	4528.22	358.00	21.974	2469.92	25.661	4170.53	25.228	5541.70
大花水	5.056	59.88	866.50	5.411	0.37	5.547	0	5.661	1.93
格里桥	4.000	11.40	719.00	3.964	0	4.063	0	4.044	0
光照	12.023	0	708.45	15.462	0	13.508	0	13.757	0
董箐	14.456	0	487.49	16.884	0	14.549	0	14.550	0
合计	207.285	4599.50		181.205	2470.28	216.877	4170.53	211.567	5543.62
最小出力/MW	1260.10			580.70		1340.10		2258.50	
水量利用率/%	94.79			96.63		95.29		93.74	

表 3 两流域 2013 年各方案统计结果对比表

电站	方案②－方案①			方案③－方案①		方案④－方案①		方案②－方案③		方案②－方案④	
	年末水 位/m	年电量/ 10 ⁸ kW·h	增幅/ %	年电量/ 10 ⁸ kW·h	增幅/%	年电量/ 10 ⁸ kW·h	增幅/%	年电量/ 10 ⁸ kW·h	增幅/%	年电量/ 10 ⁸ kW·h	增幅/%
普定	12.48	-0.057	-3.41	0.179	10.70	0.201	12.01	-0.236	-12.74	-0.258	-13.77
引子渡	30.72	-0.563	-14.46	0.498	12.79	0.701	18.01	-1.061	-24.16	-1.264	-27.51
洪家渡	41.59	-4.902	-48.22	0.543	5.34	0.244	2.40	-5.445	-50.85	-5.146	-49.43
东风	-3.05	-5.63	-32.09	1.827	10.41	0.055	0.31	-7.457	-38.49	-5.685	-32.30
索风营	-2.14	-4.469	-35.27	0.285	2.25	0.226	1.78	-4.754	-36.69	-4.695	-36.40
乌江渡	-4.39	-4.447	-21.08	2.267	10.75	-1.321	-6.26	-6.714	-28.74	-3.126	-15.81
构皮滩	-3.73	-5.386	-9.98	1.301	2.41	2.006	3.72	-6.687	-12.10	-7.392	-13.21
思林	1.28	-3.406	-13.42	0.281	1.11	-0.152	-0.60	-3.687	-14.37	-3.254	-12.90
沙沱	-3.59	-3.406	-13.42	0.281	1.11	-0.152	-0.60	-3.687	-14.37	-3.254	-12.90
大花水	9.51	0.355	7.02	0.491	9.71	0.605	11.97	-0.136	-2.45	-0.25	-4.42
格里桥	1.12	-0.036	-0.90	0.063	1.57	0.044	1.10	-0.099	-2.44	-0.08	-1.98
光照	-22.02	3.439	28.60	1.485	12.35	1.734	14.42	1.954	14.47	1.705	12.39
董箐	0.96	2.428	16.80	0.093	0.64	0.094	0.65	2.335	16.05	2.334	16.04
水电站群统计		-26.08	-12.58	9.592	4.63	4.282	2.07	-35.672	-16.45	-30.362	-14.35
最小出力增量/MW		-679.40		80		998.40		-759.40		-1677.80	
最小出力增幅/%		-53.92		6.35		79.23		-56.67		-74.29	

4 结 论

本文在传统水电站群优化调度模型基础上,以水电站群的发电能力作为优化目标进行建模,一方面可根据各电站发电效率变化情况自动确定水库的蓄放策略,实现水电站群调度期末控制水位及对应发电计划过程的双重优化,可准确体现水电站群调

度期内总发电量和调度期末总蓄能量的动态博弈关系;另一方面可结合水电站群来水过程的时空分布规律,充分利用不同水库的调蓄能力,优化水能资源利用,发挥能量补偿效益,实现协同调度决策,更有利于各电站的滚动发电计划安排。

(下转第 183 页)

参考文献:

- [1] 李春,叶舟,高伟,等. 现代大型风力机设计原理[M]. 上海:上海科学技术出版社,2013.
- [2] Sieros G, Chaviaropoulos P, Sørensen J D, et al. Upscaling wind turbines: theoretical and practical aspects and their impact on the cost of energy[J]. Wind Energy, 2012, 15(1): 3-17.
- [3] Overgaard L C T, Lund E, Thomsen O T. Structural collapse of a wind turbine blade. Part A: Static test and equivalent single layered models[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(2): 257-270.
- [4] Chen Jin, Wang Quan, Shen Wenzhong, et al. Structural optimization study of composite wind turbine blade[J]. Materials & Design, 2013, 46(4): 247-255.
- [5] Balokas G A, Theotokoglou E E. Computational analysis and material selection in cross-section of a composite wind turbine blade[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015, 34(2): 101-115.
- [6] 张兰挺,邓海龙,邵佳佳,等. 铺层参数对风力机叶片静态结构性能的影响分析[J]. 太阳能学报,2014,35(6): 1059-1064.
- [7] 刘雄,李钢强,陈严,等. 水平轴风力机叶片动态响应分析[J]. 机械工程学报,2010,46(12):128-134+141.
- [8] 任勇生,刘廷瑞,杨树莲. 风力机复合材料叶片的动力失

- 速气弹稳定性研究[J]. 机械工程学报,2011,47(12): 113-125.
- [9] 廖猜猜,王建礼,石可重,等. 风力机叶片截面刚度优化设计[J]. 工程热物理学报,2010,31(7):1127-1130.
- [10] Yin Jiacong, Xie Yu, Chen Pu. Modal analysis comparison of beam and shell models for composite blades[C]//. Asia-pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China, 2009.
- [11] Liu Wei, Ma Yuli, Su Xiangyue, et al. Buckling analysis of wind turbine blade using pressure distributions obtained from CFD[C]//. Asia-pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, 2009.
- [12] 周鹏展,肖加余,曾竟成,等. 基于ANSYS的大型复合材料风力机叶片结构分析[J]. 国防科技大学学报, 2010,32(2):46-50.
- [13] 张瑞琴,翁建生. 基于流固耦合的叶片颤振分析[J]. 计算机仿真,2011,28(3):48-51+76.
- [14] 廖猜猜,赵晓路,王建礼,等. 基于风力机叶片铺层的频率优化设计[J]. 工程热物理学报,2011,32(8):1311-1314.
- [15] 寇晓东,唐可,田彩军. ALGOR 结构分析高级教程[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [16] 李德源,叶枝全,包能胜,等. 风力机旋转风轮振动模态分析[J]. 太阳能学报,2004,25(1):72-77.

(上接第178页)

在模型求解方面,结合 DDDP 算法在水库调度领域的应用实践进行针对性改进,并与 DPSA 算法有机结合,有效提高了大规模混联水电站群联合优化调度的解算能力。

此外,本文提出的模型结构灵活,在实际工程应用中,可将水电站群的期末控制水位视为弹性交互边界:若控制,则等效于传统的水电站群发电量最大模型;若不控制,则在优化过程中按发电能力最大原则自动平衡调度期内总发电量和调度期末总蓄能。因此,发电能力最大优化目标可视为传统发电量最大优化目标的扩展和延伸,兼顾既得效益和期望效益,体现了更为丰富的物理内涵,具有良好的适用性和推广应用价值。

参考文献:

- [1] 郭生练,陈炯宏,刘攀,等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展,2010,21(4):496-503.
- [2] 马黎,冶运涛. 梯级水库群联合优化调度算法研究综述

- [J]. 人民黄河,2015,37(9):126-132+139.
- [3] 裴哲义,伍永刚,纪昌明等. 跨区域水电站群优化调度初步研究[J]. 电力系统自动化,2010,34(24):23-26+50.
- [4] 王建军,唐海华,黄春雷. 电网水电站水库群跨流域补偿调度方法[J]. 水电自动化与大坝监测,2010,34(6):57-60.
- [5] 杨春花,许继军. 金沙江下游梯级与三峡梯级水库联合发电调度[J]. 水电能源科学,2011,29(5):142-144.
- [6] 唐海华,胡挺,梅亚东,等. 长江上游控制型梯级水库群联合补偿效益分析[J]. 水电自动化与大坝监测,2012, 36(3):61-65+80.
- [7] 白涛,黄强,陈广圣等. 基于水库群优化调度的黄河干流梯级补偿效益分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(5):189-195.
- [8] 高海东,解建仓,张永进等. 冶峪河流域供水水库优化调度及用水补偿研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):149-153.
- [9] 何国春,唐海华. 基于检修计划的水电站群联合调峰优化方案[J]. 水电能源科学,2015,33(4):52-55.