

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.04.001

梯级电站联合发电模型(下)

——基于总耗水量最小化目标的优化模型

吴杰康 辛保江 李杰科

(广西大学电气工程学院,广西 南宁 530004)

摘要 提出基于水能转换最大化的梯级水电站联合发电数学模型。通过计算不同时期发电机组耗水量与发电功率之间的关系进而对水电站进行耗水量分析,以梯级水电站群耗水量最小为目标、以电力系统有功功率平衡和水库调度耗水量平衡为约束条件建立函数,应用拉格朗日函数法和计算机算法,推导具有水力联系的梯级水电站之间的比耗量微增率关系式,同时考虑其他不等式约束条件,提出梯级水电站联合发电优化模型,并对四节点的电力系统进行实例计算与分析。

关键词 梯级水电站 水电能源 最优调度 联合发电

中图分类号:TV74 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2010)04-0001-03

Electric energy production scheduling model for cascade hydropower plants (part II):an optimal model based on minimization of total water consumption //WU Jie-kang , XIN Bao-jiang , LI Jie-ke(*School of Electrical Engineering , Guangxi University , Nanning 530004 , China*)

Abstract : A mathematical model for electric energy production scheduling of cascade hydropower plants based on the maximization of hydropower conversion was proposed . The relations between water consumption and electric energy production of hydropower generating sets in different periods were calculated , and the water consumption of hydropower plants was then analyzed . Based on the objective of minimization of water consumption of cascade hydropower plants and the constraints of active power balance of electric systems and water consumption balance of reservoirs , a function was established . An increment rate function for specific consumption of cascade hydropower plants was derived by use of the Lagrangian function and the relevant algorithms , and an optimal model for electric energy production scheduling considering inequality constraints was put forward . A case of electric power system with 4 nodes was calculated and analyzed .

Key words : cascade hydropower plant ; hydropower energy ; optimal scheduling ; electric energy production scheduling

我国水能资源丰富,电力总装机容量和总发电量仅次于美国,居世界第2位。但由于缺乏统一的联合发电调度机制,致使水电站群水能利用效率不理想,弃水电量损失很大。因此,开展梯级水电站群水能资源利用与联合发电调度研究具有重大的现实意义。

一般而言,大型梯级水电站群优化运行的目标是要实现发电机组发电量最大化、收益最大化、成本最小化^[1]。梯级水电站群发电调度优化问题是一种多约束条件和多变量的大规模优化问题,其求解过程非常复杂,已经有许多最优化方法和技术在这个领域获得了广泛的应用,如等微增率法、线性规划法^[2]、非线性规划法^[3]、动态规划法^[4]、随机规划法^[5]、POA 法^[6]、网络流法^[7]、判别式法^[8]、三角旋

回算法^[9]、蚁群算法^[10]、遗传算法^[11]、人工神经网络法^[12]、模糊算法^[13]、数学分解法和演变算法等。虽然这些方法各具特点,但也存在着许多不足:动态规划法存在维数灾、求解时间过长等问题;逐步优化法容易陷入局部最优解,从而使计算速度大幅度降低;遗传算法无法保证收敛到全局最优解,不易收敛;局部搜索能力弱,容易进行冗余迭代;网络流法对约束条件的结构要求较严,且无法处理系统中离散的状态变量^[14-16],等等。

基于上述方法的特点和不足,笔者以梯级水电站群耗水量最小为目标、以电力系统有功功率平衡和水库调度耗水量平衡为约束条件,应用拉格朗日函数法构造梯级水电站联合发电模型。

基金项目 国家自然科学基金(50767001);国家高技术研究发展计划(“ 863 ”计划 X 2007AA04Z197);高等学校博士学科点专项科研基金(20094501110002) 广西高校百名中青年学科带头人资助计划 RC20060808002) 广西壮族自治区教育厅科研项目(200808MS150) 广西壮族自治区研究生教育创新计划 105930901001 ,105930904068) ,高等学校博士学科点专项科研基金(20094501110002)

作者简介 吴杰康(1965—)男,广西隆安人,教授,博士,从事电力系统运行与分析研究。E-mail :wujiekang@163.com
水利水电科技进步 2010 30(4) Tel :025-83786335 E-mail :jz@hhu.edu.cn http ://hkb.hhu.edu.cn

1 水电厂耗水量特性

水电机组出力与发电流量有关,单位时间内的机组发电耗水量等于其发电流量:

令
$$W_{j,i} = Q_{G,j,i} \tag{1}$$

$$P_{G,j,i} = f(W_{j,i}) \tag{2}$$

式中: $W_{j,i}$ 为机组发电耗水量; $P_{G,j,i}$ 为时段 t 机组 i 输出功率; $Q_{G,j,i}$ 为发电流量。由此可以求出该水电站的耗水量:

$$W_{j,i} = f^{-1}(P_{G,j,i}) \tag{3}$$

发电机组出力与发电流量存在如下关系:

$$\begin{aligned} P_{G,j,i} = & 9.8(H_j - H_{1,j,i} - p_{0,j,i})Q_{G,j,i} + \\ & \frac{4.9}{g}(v_{1,j,i}^2 - v_{0,j,i}^2)Q_{G,j,i} + \\ & 9.8(H_{1,j,i} - H_{0,j,i})Q_{G,j,i} + \\ & \frac{39.2Y_j\left(\frac{a_1H_{s,i}^3}{3} + \frac{b_1H_{s,i}^2}{2} + c_1H_{s,i}\right)}{\pi D_{j,i}^2 N_{R,j}(3600T_{\max,j,i})} \cdot \\ & \sin\beta_{s,j}\cos(\alpha_{j,i} - \beta_{s,j})\cos^2\delta_{s,j}Q_{G,j,i} + \\ & \frac{39.2K_2Y_j(H_{m,j} - H_{s,j})}{\pi D_{j,i}^2 N_{R,j}(3600T_{\max,j,i})} \cdot \\ & \sin\beta_{m,j}\cos(\alpha_{j,i} - \beta_{m,j})\cos^2\delta_{m,j}Q_{G,j,i} + \\ & \frac{39.2K_4Y_j(H_j - H_{m,j})}{\pi D_{j,i}^2 N_{R,j}(3600T_{\max,j,i})} \cdot \\ & \sin\beta_{e,j}\cos(\alpha_{j,i} - \beta_{e,j})\cos^2\delta_{e,j}Q_{G,j,i} \end{aligned} \tag{4}$$

式中: $P_{G,j,i}$ 为梯级水电站 j 第 i 台机组的出力, MW; H_j 为水库蓄水位; $H_{1,j,i}$, $v_{1,j,i}$ 分别为梯级水电站 j 第 i 台机组压力管道入口处的高程和流速; $p_{0,j,i}$, $v_{0,j,i}$, $H_{0,j,i}$ 分别为梯级水电站 j 第 i 台机组压力管道出水口处的压强、流速和高程; $Q_{G,j,i}$ 为梯级水电站 j 第 i 台机组压力管道水流流量; Y_j 为水坝宽度; $D_{j,i}$ 为梯级水电站 j 第 i 台机组的圆柱形压力管道的直径。式中其他符号含义见文献[17]。

由于单位时间内发电机组耗水量等于发电流量,因此发电机组耗水量与发电功率有如下关系:

$$W_{j,i} = d_{1,j,i}P_{G,j,i} \tag{5}$$

由式(1)和式(4)可得

$$\begin{aligned} d_{1,j,i} = & \left[9.8(H_j - H_{1,j,i} - p_{0,j,i}) + \right. \\ & \left. \frac{4.9}{g}(v_{1,j,i}^2 - v_{0,j,i}^2) + 9.8(H_{1,j,i} - H_{0,j,i}) + \right. \\ & \left. \frac{39.2Y_j\left(\frac{a_1H_{s,i}^3}{3} + \frac{b_1H_{s,i}^2}{2} + c_1H_{s,i}\right)}{\pi D_{j,i}^2 N_{R,j}(3600T_{\max,j,i})} \cdot \right. \\ & \left. \sin\beta_{s,j}\cos(\alpha_{j,i} - \beta_{s,j})\cos^2\delta_{s,j} + \right. \\ & \left. \frac{39.2K_2Y_j(H_{m,j} - H_{s,j})}{\pi D_{j,i}^2 N_{R,j}(3600T_{\max,j,i})} \cdot \right. \\ & \left. \sin\beta_{m,j}\cos(\alpha_{j,i} - \beta_{m,j})\cos^2\delta_{m,j} + \right. \\ & \left. \frac{39.2K_4Y_j(H_j - H_{m,j})}{\pi D_{j,i}^2 N_{R,j}(3600T_{\max,j,i})} \cdot \right. \\ & \left. \sin\beta_{e,j}\cos(\alpha_{j,i} - \beta_{e,j})\cos^2\delta_{e,j} \right]^{-1} \end{aligned} \tag{6}$$

式中: $d_{1,j,i}$ 为丰水期发电机组的耗水量系数;其他符号含义见文献[17]。

2 联合发电优化模型

目标函数:

$$\sum W = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n'} \int_{t_1}^{t_2} W_{j,i} dt \tag{7}$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n'} P_{G,j,i} = \sum_{i=1}^m P_{Li} \tag{8}$$

$$\int_0^T \sum_{i=1}^{n'} W_{j,i}(P_{G,j,i}) dt \leq C_j \tag{9}$$

$$\begin{cases} P_{G,j,i,\min} \leq P_{G,j,i} \leq P_{G,j,i,\max} \\ Q_{G,j,i,\min} \leq Q_{G,j,i} \leq Q_{G,j,i,\max} \\ U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \end{cases} \tag{10}$$

耗水量:

$$\begin{cases} \text{高水位} & W_{j,i} = d_{1,j,i}P_{G,j,i} \\ \text{中水位} & W_{j,i} = d_{2,j,i}P_{G,j,i} \\ \text{低水位} & W_{j,i} = d_{3,j,i}P_{G,j,i} \end{cases} \tag{11}$$

3 实例计算与分析

四节点电力系统如图1所示,图中节点3和节点4点源分别为梯级水电站群中的上、下级电站,节点1和节点2所带负荷如图2所示,相关参数如表1~3所示。

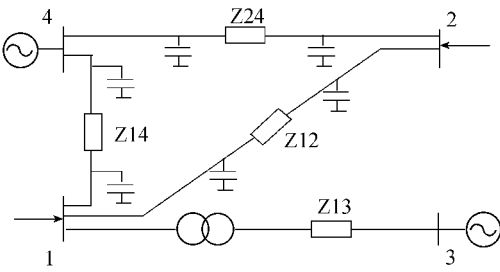


图1 四节点电力系统

图1中3号水电站装机容量为 4×300 MW, 4号水电站装机容量为 6×200 MW。

在水库底面取一些有代表性的观测点,通过数据拟合二次函数求出相应参数,用以描述水库底层特性,如表1所示。

一天内水库水位变化不大,取 h_j 为常数:

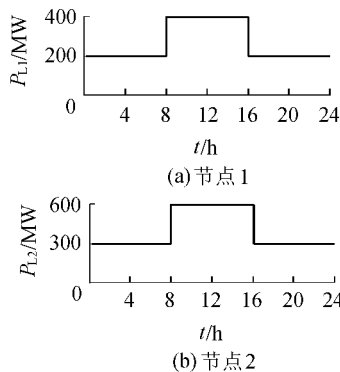


图2 日负荷曲线

表1 水库底层二次曲线拟合

水电站	(<i>a</i> ₁ , <i>b</i> ₁ , <i>c</i> ₁)	(<i>a</i> ₂ , <i>b</i> ₂ , <i>c</i> ₂)	(<i>a</i> ₃ , <i>b</i> ₃ , <i>c</i> ₃)
3号	(-2.4436, 972.74, 5000)	(-1.1309, 1075, -1190.2)	(-5.9689, 2557.5, -101060)
4号	(-1.6667, 783.33, 5000)	(5.350, 10000)	(0.1046, 5, -9651.2)

表2 水库蓄水高度 m

水电站	<i>h</i> _{max}			<i>h</i> _{min}		
	情况1	情况2	情况3	情况1	情况2	情况3
3号	841	796	755	820	775	730
4号	762	722	677	744	693	650

表3 水库参数

水电站	<i>Y_j</i> / m	<i>H_{1,j,i}</i> / m	<i>H_{0,j,i}</i> / m	<i>D_{j,i}</i> / m	<i>α_{j,i}</i> / rad	<i>v_{1,j,i}</i> / (m·s ⁻¹)
3号	1000.0	711.0	650.0	7.6	0.873	8
4号	800.0	637.0	580.0	5.7	1.047	8

水电站	<i>v_{0,j,i}</i> / (m·s ⁻¹)	<i>P_{1,j,i}</i> / Pa	<i>P_{0,j,i}</i> / Pa	<i>N_{R,j}</i>	<i>T_{max,j,i}</i> / h
3号	5	35	10	3	5000
4号	5	38	15	1/12	4000

$$h_j = \frac{h_{j\max} + h_{j\min}}{2} \quad (12)$$

3.1 目标函数

优化目标是实现耗水量最小,其目标函数为

$$\min \sum W = \sum_{i=1}^4 W_{3,i} + \sum_{i=1}^6 W_{4,i} \quad (13)$$

其中

$$\sum_{i=1}^4 W_{3,i} = \sum_{i=1}^4 \left(\int_0^8 d_{1,3,i} P_{G,3,i} + \int_8^{16} d_{1,3,i} P_{G,3,i} + \int_{16}^{24} d_{1,3,i} P_{G,3,i} \right) \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^6 W_{4,i} = \sum_{i=1}^6 \left(\int_0^8 d_{1,4,i} P_{G,4,i} + \int_8^{16} d_{1,4,i} P_{G,4,i} + \int_{16}^{24} d_{1,4,i} P_{G,4,i} \right) \quad (15)$$

3.2 约束条件

电力系统有功功率平衡:

$$\sum_{j=1}^4 P_{G,3,i} + \sum_{j=1}^6 P_{G,4,i} = P_{L1} + P_{L2} \quad (16)$$

其中,在0 00~8 00, $P_{L1} + P_{L2} = 500$ MW;8 00~16:00, $P_{L1} + P_{L2} = 1\,000$ MW;16 00~24 00, $P_{L1} + P_{L2} = 500$ MW。

机组有功功率约束 $P_{G,3,i}$ 在20~300 MW之间, $P_{G,4,i}$ 在10~200 MW之间。

水库调度用水约束为

$$\begin{cases} \int_0^{24} \sum_{i=1}^4 W_{3,i}(P_{G,3,i}) dt \leq 10^7 \\ \int_0^{24} \sum_{i=1}^6 W_{4,i}(P_{G,4,i}) dt \leq 10^7 + \int_0^{24} \sum_{i=1}^4 W_{3,i}(P_{G,3,i}) dt \end{cases} \quad (17)$$

3.3 优化计算

根据式(6)可算出各水电站的耗水量系数。3号水电站1~4号机组耗水量系数均为0.522。4号水电站1~6号机组耗水量系数均为0.425。以耗水量最小为目标函数,以各机组出力为控制变量进行优化,其优化结果如表4所示。按照式(5)计算各水电站耗水量,3号、4号水电站实际耗水量分别为931.01万m³和1691万m³。

表4 各水电站发电机组发电量 kW·h

水电站	时间	1号机组	2号机组	3号机组	4号机组	5号机组	6号机组
3号	0 00~8 00	34.971	34.984	34.984	34.971	—	—
	8 00~16 00	84.972	84.985	84.985	84.972	—	—
	16 00~24 00	34.971	34.985	34.985	34.971	—	—
4号	0 00~8 00	59.972	60.022	60.049	60.049	50.024	69.974
	8 00~16 00	109.970	110.020	110.050	110.050	110.020	109.970
	16 00~24 00	59.972	60.022	60.05	60.050	60.022	59.972

在总耗水量约束条件下,各水电站机组发电量如表4所示。按照耗水量最小的要求,在不同负荷水平和不同水库运行状态下,发电机组输出不同功率,其耗水量也不相同。

4 结 论

a. 机组的耗水量由水库特性参数和水位等因素决定。其值越小,单位发电量的耗水量就越小,效率越高,最应优先发电;反之亦然。

b. 在描述水库水能形成过程中,3层水体模型具有很好的实用性。水库底层二次曲线拟合能够合理有效地描述水库底面特征。

c. 笔者构建的水电能输移模型能够很好地描述水体的3种能量形态(势能、动能、压能)向电能转化的情况。

d. 在不同水库运行状态下发电机组的耗水量特性不同。

(下转第12页)

了计算的繁杂性。

b. 由黏聚张开位移分布与应力分布之间的对应关系,能够得到混凝土黏聚裂纹软化本构关系曲线。

参考文献：

[1] ISSA M A , CHUDNOVSKY A , ISIAM M S. Size effects in concrete fracture ,part I :experimental set up and observations [J]. International Journal of Fracture ,2000 ,102 (1) 1-24.

[2] 徐世昝 ,赵国藩.混凝土断裂力学研究[M]. 辽宁 :大连理工大学出版社 ,1991.

[3] HILLERBORG A ,MODEER M ,PETERSSON P E. Analysis of crack formarian and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite element[J]. Cement and Concrete Research ,1976 ,6 (6) :773-782.

[4] JENQ Y S , SHAH S P. Two parameters fracture model for concrete[J]. Journal Engineering Mechanical ,ASCE ,1985 , 111(10) 1227-1241.

[5] KARLHALOO B L ,NALLATHAMBI P. Effective crack model for the determination of fracture toughness of concrete[J].

Engineering Fracture Mechanics ,1990 ,35 (4/5) 637-645.

[6] XU Shi-lang ,REINHARDT H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture[J]. International Journal of Fracture ,1999 ,98 (2) :111-193.

[7] BAZANT Z P ,CHEN Er-ping. Scaling of structural failure[J]. Applied Mechanics Review ,1997 ,50 (10) 593-627.

[8] 王宝庭 ,张廷毅 ,高丹盈.混凝土断裂能产生尺寸效应的原因探讨[J]. 水利水电科技进展 ,2008 ,28 (6) 9-11.

[9] KITSUTAKA Y. Fracture parameters by polylinear tension softening analysis[J]. Journal of Enginering Mechanics , ASCE ,1997 ,125 (5) 444-449.

[10] WANG Wei , CHENG T T H , DENIS B. Generalized formulation for strip yielding model with variable cohesion and its analytical solutions[J]. International Journal of Solids and Structures ,2000 ,37 :7533-7546.

[11] 王利民 ,徐世昝 ,赵熙强.考虑软化效应的黏聚裂纹张开位移分析[J]. 中国科学 :G 辑 ,2006 ,36 (1) 59-71.

[12] 钱伟长.变分法及有限元[M]. 北京 :科学出版社 ,1980.

[13] TADA H ,PARIS P C ,IRWIN G R. The stress analysis of cracks handbook[M]. New York : ASME Press ,2000 61-63.

(收稿日期 :2009-10-20 编辑 :方宇彤)

(上接第 3 页)

参考文献：

[1] 邹进 ,刘可真.水资源系统运行与优化调度[M]. 北京 :冶金工业出版社 ,2006.

[2] CHANG G ,AGANAGIC M ,WRIGHT J ,et al. Experiences with mixed integer linear programming based approaches on short-term hydro scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2001 ,16 (4) :743-749.

[3] ARNOLD E , TATJEWSKI O , WOLOCHOWICZ P. Two methods for large-scale nonlinear optimization and their comparison on a case study of hydropower optimization[J]. Journal of Optimisation Theory Applications , 1994 ,81 (2) : 221-248.

[4] 王金文 ,袁晓辉 ,张勇传.随机动态规划在三峡梯级长期发电优化调度中的应用[J]. 电力自动化设备 ,2002 , 22 (8) 54-56.

[5] LAMOND B F. Stochastic optimization of a hydroelectric reservoir using piecewise polynomial approximations[J]. INFOR ,2003 ,41 (1) 51-69.

[6] 宗航 ,周建中 ,张勇传. POA 改进算法在梯级电站优化调度中的研究和应用[J]. 计算机工程 ,2003 ,29 (17) :105-109.

[7] 罗强 ,宋朝红 ,雷声隆.水库群系统非线性网络流规划法[J]. 武汉大学学报 :工学版 ,2001 ,34 (3) 22-26.

[8] 张铭 ,丁毅 ,袁晓辉 ,等.梯级水电站水库群联合发电优

化调度[J]. 华中科技大学学报 :自然科学版 ,2006 ,34 (6) 90-92.

[9] 左幸 ,马光文 ,过夏明.三角旋回算法求解梯级电站群短期优化调度[J]. 电力系统自动化 ,2006 ,30 (13) :28-32.

[10] 徐刚 ,马光文.基于蚁群算法的梯级水电站群优化调度[J]. 水力发电学报 ,2005 ,24 (5) 7-10.

[11] 马光文 ,王黎.水电站群优化调度的 FP 遗传算法[J]. 水力发电学报 ,1996 ,55 (4) 21-29.

[12] LIANG R H ,HSU Y Y. Scheduling of hydroelectric generations using artificial neural networks[J]. IEE Proc Gener Transm Distrib ,1994 ,141 (5) 452-458.

[13] 邹进 ,李承军.三峡梯级电站的模糊优化调度方法[J]. 水电自动化与大坝监测 ,2002 ,26 (3) 56-59.

[14] 练继建 ,马超 ,张卓.基于改进蚂蚁算法的梯级水电站短期优化调度[J]. 天津大学学报 ,2006 ,39 (3) 264-268.

[15] 王文川 ,程春田 ,徐冬梅.基于混沌遗传算法的水电站优化调度模型及应用[J]. 水力发电学报 ,2007 ,26 (6) 7-11.

[16] 王金文 ,石琦 ,伍永刚 ,等.水电系统长期发电优化调度模型及其求解[J]. 电力系统自动化 ,2006 ,26 (24) :22-30.

[17] 吴杰康 ,辛保江 ,李杰科.梯级电站联合发电模型(上):水能发电量计算方法探讨[J]. 水利水电科技进展 ,2010 ,30 (3) 1-4.

(收稿日期 :2009-10-28 编辑 :方宇彤)