

文章编号: 1673-5196(2017)05-0065-04

水电站生态发电多目标优化调度模型及应用

赵廷红¹, 李凤丽¹, 周国亚², 孙志璇¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 中国中铁一局集团第五工程有限公司, 陕西 宝鸡 721000)

摘要: 为了能够使水电站开发运行与生态和谐发展, 研究满足生态需要的水电站优化调度. 通过对水电站生态调度内涵的探讨, 建立了生态发电多目标优化调度数学模型. 模型以水量指标量化水电站调度的效益函数, 在处理多目标时采用权重系数法进行转化. 以蒲石河抽水蓄能电站为例, 利用遗传算法进行求解验算, 通过综合考虑年均发电量及各方案中下游河道生态用水的需求, 选择出较优的方案. 研究结果表明文中构建的模型是合理的, 对生态环境起一定的改善作用.

关键词: 水电站; 生态调度; 数学模型; 遗传算法

中图分类号: TV6; TV7 **文献标志码:** A

Eco-power multi-objective optimized scheduling model for hydropower station and its application

ZHAO Ting-hong¹, LI Feng-li¹, ZHOU Guo-ya², SUN Zhi-xuan¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Fifth Engineering Co. Ltd., China Railway Bureau Group, Baoji 721000, China)

Abstract: In order to make the development and operation of the hydropower station and the developing harmoniously with the ecology, an optimized scheduling of hydropower station is investigated to meet the ecological requirement. The mathematical model of multi-objective optimized scheduling of ecological power generation is established through exploration of the connotation of the ecological scheduling of hydropower station. In the model, the benefit function of hydropower station scheduling is quantified with water quantity index. The weight coefficient method is used to transform the multi-objective function. The Pushihe pumped storage power station is taken as an example for its solution check with genetic algorithm. Then through the comprehensive consideration of the annual power generation capacity and the ecological water demand in the middle and lower reaches stipulated in several options, the better option is selected. The research results show that the model built up in the article is reasonable and the ecological environment can be improved with it.

Key words: hydropower station; ecological scheduling; mathematical model; genetic algorithm

水是人类与自然生态系统联系的纽带, 良好的生态水文联系可促进社会经济可持续发展, 实现人水和谐相处^[1]. 然而随着经济社会发展对水资源需求的日益增加, 人类对河流进行了过度攫取, 恶化了河流生态水文系统的健康状况, 因此, 开展水电站的生态调度迫在眉睫^[2]. 在国外许多国家将生态调度一直作为一种主要的河流生态修复方法. 如美国的

田纳西流域的生态调度、克罗拉多河格伦峡谷大坝的适应性管理和澳大利亚墨累-达令河的生态调控等^[3-5]. 另外, 水电站生态调度已从研究阶段步入了实践和应用层次, 研究主要包括两方面: 一是对面向生态的水电站调度模式及相关技术措施; 二是调度模式和技术措施产生的生态效应的评估. 随着生态重视程度的增加, 国内自 21 世纪初开展该领域理论与实际应用, 例如通过上游库水位调节来减轻库区水库富营养化; 通过泄流方式调节水温来减弱下游河道的滞温现象^[6]; 通过水库调节水沙过程来重塑健康的河流地貌以及维持河口三角洲等, 上述

收稿日期: 2015-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(51069004, 51269009)

作者简介: 赵廷红(1974-), 女, 甘肃临夏人, 博士生, 副教授.

研究也通常被称为“生态调度”。但对其概念内涵的理解各方表述并不一致^[7]。傅春等提出了生态水利的概念,并建立了水资源可持续利用的数学模型^[8];谢东平针对枯水期的发电调度问题,研究得出若通过三峡电站和丹江口水库的联合调度,可缓解汉江的水华现象^[9];在未来一定时期内,关于生态水电站调度的研究将成为中国水电站调度工作的重点。为避免概念混淆,本文仅研究考虑下游河道生态流量的水库优化调度研究。在水电站生态调度的基本理论框架下,对生态调度的目标要素进行归纳,建立水电站生态发电多目标优化调度数学模型。通过编程对实际算例的电站进行计算,对于多目标函数,则采用权重系数法进行转化,其子目标函数权重系数大小的处理必须满足 $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$, 三个子目标函数赋予的权重大小反映了各个分目标的重要程度,因此为了实现生态电站调度的目标,结合水库调度准则,权重的大小根据所列的子目标函数的顺序依次减小。最后,利用遗传算法进行计算并分析结果,验证该数学模型及优化算法的有效性,实现水电站调度经济效益和生态效益整体最优,以期能够对水电站面向生态的优化调度起到一定的理论指导。

1 水电站生态发电多目标优化调度模型的建立

水电站生态发电多目标优化调度模型的建立需考虑经济效益、社会效益和生态效益。经济效益(发电、灌溉、航运等兴利目标)和社会效益(防洪、供水等)都可以较精确的量化,而生态效益由于生态目标的多样性以及水文-生态关系的不确定性难以量化,因此综合考虑主要通过水量指标来反映各目标的经济效益和生态效益,并通过库水位约束来实现防洪目标,解决流域生态环境问题。

1.1 目标函数

1) 确定各个单目标函数

水电站生态发电多目标优化调度主要考虑经济目标、社会目标和生态目标,为了简化目标,把各个目标转化为追求缺水最小来考虑。

① 经济效益。主要考虑了发电和灌溉,采用发电供水缺水最小和灌溉缺水最小来反映,即

$$F_1(q_V) = (q_{V1}' - q_{V1}) / q_{V1}' \quad (1)$$

$$F_2(q_V) = (q_{V2}' - q_{V2}) / q_{V2}' \quad (2)$$

② 生态效益。选用下游河道生态缺水满足程度最高作为生态目标,即

$$F_3(q_V) = (q_{V3}' - q_{V3}) / q_{V3}' \quad (3)$$

式中: q_V' 为计划流量; q_V 为实际流量。

③ 社会效益。主要考虑了防洪,因此社会目标通过库水位约束来反映。

2) 总目标函数

对于多目标优化问题,直接求解问题比较困难,因此采用权重系数变换法,给其每个子目标函数赋予权重 ω_i 来简化模型求解,因此总目标函数可写为

$$\min u = \sum_{i=1}^k \omega_i F_i(q_V) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^k \omega_i = 1 \quad (5)$$

式中: u 为多目标优化问题的评价函数; $F_i(q_V)$ 为计划值与实际值缺水量的相对值,即各个子目标; $k=3$; ω_i 为权重,反映相应的子目标函数在多目标优化问题中的重要程度。

在本模型中,利用层次分析法来计算权重,根据所选实例中水电站的发电、生态等各方面的相对重要程度而构造判断矩阵,以此来求得各个目标的权重。

1.2 约束条件

1) 水量平衡方程:

$$V_{i,j+1} = V_{i,j} + (q_{V,i,j} - q_{i,j} - q_{V,loss,i,j}) \quad (6)$$

式中: $V_{i,j}$ 为第 j 时段初第 i 电站的蓄水量; $V_{i,j+1}$ 为第 $j+1$ 时段末第 i 电站的蓄水量; $q_{V,i,j}$ 为第 j 时段第 i 电站的来流量; $q_{i,j}$ 为第 j 时段第 i 电站的泄流量; $q_{V,loss,i,j}$ 为第 j 时段第 i 电站的扣损流量。

2) 电站水位约束:

$$Z_{t,min} \leq Z_t \leq Z_{t,max} \quad (7)$$

式中: Z_t 为电站在 t 时段的水位; $Z_{t,min}$ 为第 t 时段应保证的水库最小蓄水量; $Z_{t,max}$ 为第 t 时段允许的水库最大蓄水量(如汛期防洪限制)。

3) 电站下泄流量约束:

$$q_{V,t,min} \leq q_{V,t} \leq q_{V,t,max} \quad (8)$$

式中: $q_{V,t}$ 为 t 时段电站的泄流能力; $q_{V,t,min}$ 为 t 时段允许的最小下泄流量,不得低于下游河道在 t 时段的最小环境需水量; $q_{V,t,max}$ 为 t 时段允许的电站最大下泄流量,受下游各种用水户需求和电站泄流能力的限制。

4) 电站出力约束:

$$P_{t,min} \leq P_t \leq P_{t,max} \quad (9)$$

式中: P_t 为电站 t 时段的平均出力; $P_{t,min}$ 为 t 时段电站允许的发电最小出力; $P_{t,max}$ 为 t 时段电站允许的发电最大出力,不得高于机组满发电对应的出力。

2 模型的求解方法及步骤

结合本模型的特点,本文拟采用基于遗传算法

的多目标优化算法中的权重系数变换法. 对于遗传算法,其操作使用适者生存原则,在潜在的解决方案种群中逐次产生一个近似最优的方案.其优点是仅需根据解求得相应的适应度,对求解问题没有可微性和其他方面的要求,应用广泛.本文在水位、水量、流量和出力等约束条件下,求得水电站各阶段不同状态下的缺水相对值,然后应用遗传算法求解出与最优目标值相应的发电流量和生态流量等一系列过程,由此求得水电站运行的最优轨迹,本模型以水电站的下泄流量作为决策变量.

由于本模型采用的求解方法是基于遗传算法的多目标优化算法中的权重系数变换法,需利用层次分析法确定权重.层次分析法(AHP)是将人的主观判断用数量形式表达和处理的方法^[10],并按照一定的比例标度(见表 1),构造上层因素对下层相关因素的判断矩阵,来确定各指标的权重,其过程如下:

- 1) 建立层次结构模型,将评价目标层次化.
- 2) 对指标进行两两比较构造判断矩阵.

对于同一层次的 n 个指标,可得到两两比较判断矩阵 $A, A = (a_{ij})_{n \times n}$,判断矩阵中的各个数值应满足下列条件: $a_{ij} > 0, a_{ji} = 1/a_{ij}, a_{ii} = 1$.

表 1 判断矩阵的标度方法

Tab. 1 Scaling method of judgement matrix

指标含义	同等重要	稍微重要	相当重要	强烈重要	极端重要
标度值	1	3	5	7	9

3) 计算判断矩阵的最大特征根和对应的特征向量.

- ① 将 A 的每一列向量归一化得到 W_{ij} :

$$W_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

- ② 对 W_{ij} 按行求和得到 W_i :

$$W_i = \sum_{j=1}^n W_{ij}$$

- ③ 将 W_i 归一化得到 w_i :

$$w_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i$$

则 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$,即为近似特征向量.

④ 计算 $\lambda = \sum_{i=1}^n (AW^T)_i / nW_i$,将其作为最大特征根的近似值.

4) 根据一致性指标 CI 和随机一致性比率 CR 来判断矩阵的一致性,当 $CR < 0.1$ 时就认为满足一致性要求. $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), CR = CI / RI$. RI 是平均随机一致性指标,见表 2.

表 2 平均随机一致性指标 RI 值

Tab. 2 RI values of mean random consistency index

矩阵阶数	3	4	5	6	7	8
RI	0.51	0.89	1.12	1.25	1.35	1.42
矩阵阶数	9	10	11	12	13	...
RI	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	...

3 实例研究

3.1 蒲石河电站工程概况

将建立的生态调度模型应用于蒲石河水利枢纽工程.蒲石河抽水蓄能电站是东北第一座大型抽水蓄能电站,蒲石河抽水蓄能电站分为上水库、地下厂房系统和下水库三大主体部分.电站枢纽建筑物主要由上水库及上水库钢筋混凝土面板堆石坝、引水隧洞、地下厂房枢纽及地面开关站、下水库及下水库泄洪闸排砂闸坝等组成.总装机容量 120 万 kW,装机 4 台,单机容量 300 MW,年发电量 18.6 亿 kW.上水库死水位为 360 m,相应正常蓄水位为 392 m;下水库死水位为 62 m,相应正常蓄水位为 66 m.

3.2 下游河道生态需水量计算结果

“生态需水量”的概念最早是由美国渔业和野生动物保护组织为避免河流生态系统退化而提出的.但由于河道内生态需水量的评估方法多达 200 多种,且各方法侧重点不同,评估成果差异较大^[11].本文利用 1958~2002 年共 45 年的历史水文资料换算得到长系列逐月径流过程,并采用几种国内外常用的生态环境需水量计算方法得到的计算结果见表 3.

表 3 生态需水量计算结果对比

Tab. 3 Contrast chart of results of the ecological water requirement calculation

方法名称	适用时段	生态需水量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	
		最适宜	良好
Tennant 法	10~次年 3 月 4~9 月	良好	13.14
		一般或较差	9.86
		差或最小	3.29
		2.29	2.29
		2.29	2.29
最小月平均流量法	全年	3.05	
改进的 7Q10 法	全年	1.72	

3.3 数学模型计算

针对蒲石河电站,具体的数学模型如下:

- 1) 目标函数

$$\min u = 0.69F_1(q_V) + 0.21F_2(q_V) + 0.1F_3(q_V)$$

- 2) 约束条件

- ① 水量平衡方程:

$$V_{i,j+1} = V_{i,j} + (q_{V,i,j} - q_{i,j} - q_{V,loss,i,j})$$

- ② 电站水位约束:

$$360 \leq Z_t \leq 392$$

③ 电站下泄流量约束:

$$q_{V,t,\min} \leq q_{V,t} \leq q_{V,t,\max}$$

④ 电站出力约束:

$$0 \leq P_t \leq 300\ 000$$

本文拟定不同的水电站生态调度方案:1) 不考虑下游河道生态需水;2) 考虑下游河道生态需水.对方案 2)再根据前面计算得到的生态环境需水量取值范围分Ⅶ个方案.本模型选用基于遗传算法的多目标优化算法计算,通过对上述Ⅶ个方案的比选来确定何种方案才是实现水库调度经济效益和生态效益整体最优的方案.

3.4 水电站生态调度结果与分析

通过对蒲石河电站 46 年长系列逐月计算分析得出水电站不同生态调度方案对发电、供水和灌溉的影响,水电站各生态调度方案计算结果见表 4.由表 4 方案 I~IV 的结果表明:随着定值生态流量的增大,缺水量的相对值增大,年均发电量却有所减小.究其原因,是由于生态目标和兴利目标是相互矛盾的,下游生态流量的满足,势必会带来经济效益的减少.当生态流量为 0,即不考虑下游河道生态需水的情况下,其目标函数缺水量的相对值是最小的,年均发电量最大.而对于采用时变生态流量的方案 V~VII,其结果优于定值生态流量,尤其是方案 V,缺水量的相对值是所有方案中最小的,而年均发电量却是最大的.因此统筹考虑下游河道生态用水需求,则需采用方案 V.

表 4 水电站各生态调度方案的结果对比

Tab. 4 Comparison chart of results from several ecological scheduling options for of hydropower station scheme

方案	生态流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	缺水量 (相对值)	年发电量/ (万 $kW \cdot h$)
I	0	0.52	1 295.47
II	全年 1.72	0.54	1 096.46
III	全年 3.05	0.57	1 086.88
IV	全年 3.29	0.59	1 068.43
V	10~次年 3 月 2.29 其余 3.29	0.43	1 498.66
VI	10~次年 3 月 2.29 其余 9.86	0.45	1 468.74
VII	10~次年 3 月 4.58 其余 13.14	0.46	1 308.74

4 结论

1) 在水电站生态调度的过程中,既要考虑防洪、发电、供水、灌溉等社会经济目标的实现,还要满足河流生态环境的需求,所以在考虑发挥水电站生态效益的同时,必须做好与其他目标的协调,找准生态调度中社会经济目标和生态目标的结合点,达到

社会效益和生态效益总体最优.

2) 本文所建立的水电站多目标优化调度数学模型以蒲石河抽水蓄能电站为例进行了应用研究,模型中通过水量指标来量化生态效益和经济效益,认为缺水量最小时,水电站的效益越好,在处理多目标求解问题时,采用权重系数法对多目标问题进行了转化.权重则利用层次分析法求得,即根据蒲石河电站中发电、灌溉等各方面的相对重要程度构造一个判断矩阵进行计算得出,最后利用遗传算法对模型进行调试,达到了模拟与预测均较满意的结果,有效解决了兴利调度与生态调度相冲突的问题.

3) 在未来的研究领域中,水电站生态调度的数学模型还要进一步探讨,就流域而言,干支流的同步蓄水、放水、下游河道水量的大幅增加或减少等,都将对流域中下游的生态环境产生严重的影响.因此,对于流域尺度的水电站调度应开展以梯级电站为主的调度方式,这样就能将水电站自身利益最大纳入到全流域的统一调配,使水资源能够得到更为合理科学的利用.

致谢:本文得到“兰州理工大学红柳青年资助计划项目(201008)”资助,在此表示感谢.

参考文献:

[1] 陈端,陈求稳,陈进.考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展[J].水力发电学报,2011,30(5):248-256.

[2] 赵廷红,孙志璇,李凤丽.基于分时电价的梯级水电站短期优化调度[J].兰州理工大学学报,2017,43(1):52-55.

[3] PETTS G E. Water allocation to protect river ecosystems [J]. Regulated Rivers: Research & Manage,1996,12:353-365.

[4] HUGHES D A, Ziervogel G. The inclusion of operating rules in a daily reservoir simulation model to determine ecological reserve releases for river maintenance [J]. Water SA, 1998, 24(4):293-302.

[5] BARON J S, POFF N L, ANGERMEIER P L, et al. Meeting ecological and societal needs for Freshwater [J]. Ecological Applications,2002,12:1247-1260.

[6] 邓云,李嘉,李克锋,等.梯级电站水温累积影响研究[J].水科学进展,2008,19(2):273-279.

[7] 胡和平,刘登峰,田富强,等.基于生态流量过程线的水库调度方法研究[J].水科学进展,2008,19(3):325-328.

[8] 傅春,冯尚友.水资源持续利用(生态水利)原理的探讨[J].水科学进展,2000,11(4):436-440.

[9] 窦明,谢平,夏军,等.南北水调中线工程对汉江水华影响研究[J].水科学进展,2002,13(6):23-26.

[10] 张淙皎,周振民.运用 AHP 评价水利工程业主风险[J].中国农村水利水电,2004,10(2):89-90.

[11] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻[J].水科学进展,2002,13(4):507-512.