

DPSA 和大系统分解协调在梯级水电站短期优化调度中的应用研究^{*}

李亮¹, 黄强¹, 肖燕², 肖志娟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 贵州乌江水电开发有限责任公司, 贵州 贵阳 550002)

[摘要] 建立了梯级水电站短期优化调度的数学模型, 在此基础上探讨了逐次逼近(DPSA)和大系统分解协调2种降“维”算法的主要思想和实现方法, 并对其进行了较深入的对比分析, 认为2种算法的核心思想是相同的, 都将收敛于满意优化解。决策者可根据计算精度和时间等的需要从不同优化方法中选择, 以寻求满意解。最后给出了2种优化算法在工程中的算例, 其结果可供实际应用参考。

[关键词] 水电站短期优化调度; POA 算法; DPSA 算法; 大系统分解协调算法

[中图分类号] TV 697.1⁺2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)10-0125-04

梯级水电站的优化运行一直是水电站调度管理的核心问题。在即将形成的电力市场环境, 梯级水电站要综合考虑自身特点, 只有联合调度, 总体竞价, 才可以实现有限水资源的优化配置。由于在较短时期(日、周)内进行原始信息预报(径流和负荷的预报)是可行的, 且其可信度较高, 因此根据这种准确的预报资料, 制定短期最优运行方式的可信程度也相当高, 从而更具有生产使用价值^[1]。所以, 相对于长期优化调度来说, 发电企业更关心短期优化调度的质量。本研究对逐次逼近(DPSA)和大系统分解协调2种优化方法在梯级水电站短期发电优化调度中的优缺点进行了对比分析, 以期调度管理者在实际决策中提供参考依据。

1 模型的建立

最充分、有效地利用水能, 是水电站调度管理的最终目标, 以此为目标的梯级水电站短期优化调度模型主要有: 短期内梯级总发电量最大模型、梯级总耗水(能)量最小模型和梯级调峰电量最大模型等^[2]。本研究的对象为几种主要调度方式中的梯级总发电量最大模型。

1.1 问题描述

已知梯级水电站各水库调度期的初、末水位(或总用水量), 要求对调度期的总用水量进行最优计划

分配, 即求出各电站在各时段内的最优运行过程, 使得调度期内的整个梯级水电站总发电量最大。其中短期优化调度需考虑水流时滞的影响。

1.2 目标函数

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

式中, E 为调度期内梯级总发电量; M 为梯级水电站数目; T 为时段数; $N(i, t)$ 为 i 水库 t 时段平均出力; Δt 为时段长。

1.3 约束条件

库容(水位)约束:

$$V_{\min} \leq V_{it} \leq V_{\max} \quad (2)$$

流量约束:

$$Q_{\min} \leq Q_{it} \leq Q_{\max} \quad (3)$$

出力约束:

$$N_{\min} \leq N_{it} \leq N_{\max} \quad (4)$$

水量平衡约束:

$$Q_{ri}(t) = Q_{i-1, t-\tau_i} + Q_{uit} \quad (5)$$

$$V_{i, t+1} = V_{it} + (Q_{ri} - Q_{it}) \times \Delta t \quad (6)$$

式中, $V_{\min}$ 为 i 水库的允许最小库容; V_{it} 为 i 水库 t 时段的库容; $V_{\max}$ 为 i 水库的允许最大库容; Q_{it} 为 i 水库 t 时段平均出库流量; N_{it} 为 i 水库 t 时段的电站平均出力; $Q_{i-1, t-\tau_i}$ 为 $i-1$ 水库在 $t-\tau_i$ 时段的平均出库流量; τ_i 为 i 水库与 $i-1$ 水库之间的水流传播时间;

^{*} [收稿日期] 2005-03-01

[基金项目] 国家自然科学基金资助(50479024); 西部交通建设科技项目(2003 382 952 45-02)

[作者简介] 李亮(1982-), 男, 吉林通化人, 在读硕士, 主要从事水资源系统工程研究。

$Q_{u_{it}}$ 为 i 水库 t 时段区间入流; $Q_{r_{it}}$ 为 i 水库 t 时段平均入库流量; Δt 为时段长。

2 模型求解算法及对比分析

在求解上述梯级水电站的优化调度模型时, 变量和约束条件的数目将随着水库数目的增加而急剧增加, 若采用常规的动态规划法求解, 将遇到所谓的“维数灾”问题, 会使求解变得非常困难。逐次逼近算法(DPSA)和大系统分解协调算法是2种解决“维数灾”问题的好方法, 其核心思想都是将原来 n 维状态变量的动态规划问题分解为只有一个状态变量的 m 个子问题, 使这些子问题的优化序列收敛于原问题的解, 从而达到降“维”的目的。

2.1 逐次逼近算法(DPSA)

逐次逼近算法(DPSA)是将 m 维的动态规划问题简化成 m 个一维子问题来求解, 其计算工作量随维数 m 呈线性增长, 而不是呈指数增长, 因而缩短了计算时间, 易于应用。在解决工程实际问题时, 常将DPSA算法和其他优化算法结合应用, 如POA算法^[3]。DPSA求解梯级水电站的流程见图1, 其详细计算步骤见参考文献[4], 在这里仅对其进行3点补充说明: (1)固定其他状态变量, 优化 i 库时的目标函数为梯级最优。(2)DPSA迭代时, 初始轨迹线的选择对收敛速度和精度都有较大影响。研究时可先进行单库的最优计算, 并以其计算结果作为库群DPSA迭代计算的初始轨迹。(3)DPSA已经被证明是单调的收敛^[4]。本研究旨在对比分析目标函数随迭代次数增加的优化过程, 故未如通常那样选取某一精度 ϵ 作为收敛的判断条件。

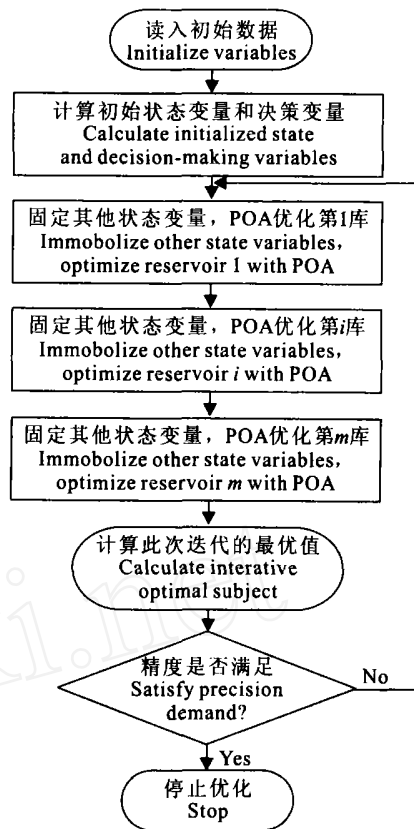


图1 DPSA-POA 求解流程图

Fig 1 Calculating process of DPSA-POA

2.2 大系统分解协调算法

大系统分解协调算法的原理是将“大系统”分解成若干个“子问题”, 然后在此基础上综合考虑各个“子问题”之间的关联。这样可以减少所需内存并大大缩短计算时间, 从而达到降“维”的目的。“分解协调”算法中最常见的两级协调结构如图2所示。

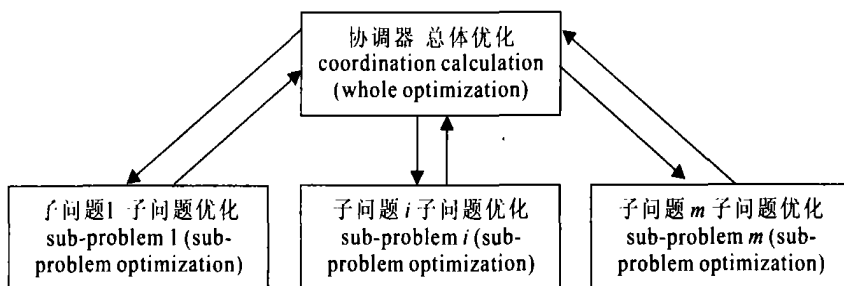


图2 大系统分解协调示意图

Fig 2 Sketch map of large-scale system decomposition-coordination

关联平衡法和关联预估法是大系统分解协调中2种最基本的递阶算法, 本研究将2种算法结合, 采用一种混合算法进行求解, 选取的协调变量为拉格朗日乘子 λ_i 和水库入库流量 $Q_{r_{it}}$, 分解后的子问题可以采用POA算法进行求解。

对原问题的分解方法详见参考文献[4, 5]。在这

里, 将一个大系统分解为如下 m 个子问题:

$$\begin{aligned} \max & (F_i + \sum_{t=1}^T \lambda_i Q_{r_{it}}) \quad (i \neq m) \\ \max & F_i \quad (i = m) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $F_i = \sum_{t=1}^T N(i, t) \times \Delta t$, 其他约束条件同前。对于

协调器(第二级)有:

$$Q_{ri}^k(t) = Q_{i-1}^k(t - \tau_i) + Q_{ui}(t) \tag{8}$$

$$\lambda_{it}^{k+1} = \sum_{j=1}^n \eta_{H_{jt}}^k \tag{9}$$

式中, k 为迭代次数; η 为 j 水库的综合出力系数; H_{jt} 为 j 水库 t 时段的水头。

2 3 算法的对比分析

逐次逼近算法和大系统分解协调算法在求解梯级水电站时, 都是将梯级水电站分解为单库水电站, 从上游到下游依次对每个电站进行求解, 然后再求解梯级最优。在求解梯级最优时, DPSA 是以梯级为目标计算每个单库, 通过逐次迭代达到梯级最优; 分解协调法是通过协调器的迭代计算协调单库最优以达到梯级最优。下面以两库为例对上述梯级电站的求解方法进行对比分析(约定梯级水库编号按入流顺序依次为 1, 2)。

在应用 DPSA 算法求解时, 假设现在为第 $k+1$ 次迭代, 求解过程为:

(1) 固定水库 2 第 k 次迭代的状态变量, 此时用 POA 法优化水库 1, 目标函数为两库发电量之和最大, 即可以用下式表示:

$$\max \left(\sum_{t=1}^T \eta_{H_{1t}}^{k+1} Q_{1t}^{k+1} + \sum_{t=1}^T \eta_{H_{2t}}^{k+1} Q_{2t}^{k+1} \right) \tag{10}$$

(2) 固定水库 1 第 $k+1$ 次迭代求得的状态变量, 用 POA 法优化水库 2, 此时由于水库 1 状态不变, 优化两库发电量最大相当于优化水库 2 单库发电量最大, 可以表示为:

$$\max \sum_{t=1}^T \eta_{H_{2t}}^{k+1} Q_{2t}^{k+1} \tag{11}$$

在用大系统分解协调算法求解时, 假设现为 $k+1$ 次迭代, 由上述公式可得分解后子问题 1(1 库) 的解为:

$$\max F_1 + \sum_{t=1}^T \lambda_{it} Q_{it} = \max \sum_{t=1}^T \eta_{H_{1t}}^{k+1} Q_{1t}^{k+1} +$$

表 1 东风和索风营水电站的主要计算参数

Table 1 Main parameter of the Dongfeng and Suofengying plant

电站 Plant	最低控制 水位/m Min control level	最高控制 水位/m Max control level	最小出力/MW Min power	最大出力/MW Max power	最小流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Min runoff	最大流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Max runoff
东风 Dongfeng	936	970	100	695	100	1 000
索风营 Suofengying	822	837	166.9	600	200	1 200

3 2 结果与分析

图 3 给出了 DPSA 和大系统分解协调 2 种算法随迭代次数的增加, 目标函数(发电量)的优化过程。由图 3 可以看出, DPSA 的收敛性略高于大系统分

$$\sum_{t=1}^T \eta_{H_{2t}}^k Q_{2t}^{k+1} \tag{12}$$

子问题 2(2 库) 的解为:

$$\max \sum_{t=1}^T \eta_{H_{2t}}^{k+1} Q_{2t}^{k+1} \tag{13}$$

其中

$$\lambda_{it}^{k+1} = \eta_{H_{2t}}^k \tag{14}$$

通过对比可以发现, 2 种求解方法的核心思想是相同的, 且求解水库 2 的目标函数式相同, 在求解水库 1 的 2 个目标函数中都考虑了水库 1 发电对水库 2 的影响, 差别在于影响计算方式的计算方法不同。在用 DPSA 算法进行第 $k+1$ 次迭代求解时, 以梯级为目标, 代入的是水库 2 第 $k+1$ 次迭代时的水头; 在用大系统分解协调进行第 $k+1$ 次迭代时, 通过协调器的计算代入的是水库 2 第 k 次迭代的水头。在进行短期优化调度中, 2 次迭代的水头差值相差不大, 并且随着迭代次数的增加而逐渐变小。同样在第 $k+1$ 次迭代中, DPSA 求解时由于考虑的是 $k+1$ 次的水头, 其优化值将略大于大系统分解协调法所求得的值。但是用大系统分解协调法求解时, 每次迭代所需的时间要少于 DPSA 的优化时间, 并且随着前后 2 次迭代水头差的减小, 经过有限次计算也将最终与 DPSA 求得的值相同。

3 实例计算与结果分析

3 1 实例计算

本研究以贵州乌江梯级水电站水库群中的东风(年调节)和索风营(日调节)两电站为例, 应用上述 2 种算法进行求解、分析。具体计算时调度期取为 1 d, 划分为 96 个时段, 即以 15 min 为 1 时段。2 种优化计算的来水及初、末水位等条件相同。两水库电站的主要参数见表 1。

解协调算法, DPSA 在经过 8~9 次迭代计算后, 目标函数就比较稳定, 大系统分解协调计算在迭代 5 次后的增长率变小, 但目标函数仍在随着迭代次数的增加而增加, 在迭代 16 次时, 目标函数趋于稳

定。2种优化算法的计算结果见表2。

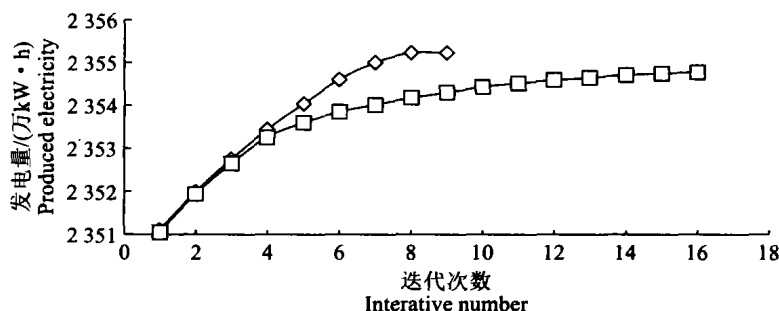


图3 2种算法目标函数的优化过程

- - . DPSA; - □ - . 分解协调法

Fig 3 Object optional process of two methods

- - . DPSA; - □ - . Decomposition-coordination

表2 东风和索风营水电站短期发电优化计算结果比较

Table 2 Results comparison between two plants' short-time optimal scheduling

万 kW · h

电站 Plant	单库按等 流量计算 Single reservoir equal runoff	单库各自最优 Single reservoir optimization	大系统分解协调 (16次迭代) Large-scale system decomposition- coordination sixteen iteration	逐次逼近法 (9次迭代) DPSA Nine iteration
东风 Dongfeng	1 168 174	1 168 387	1 167 217	1 166 796
索风营 Suofengying	1 165 045	1 181 248	1 187 551	1 188 435
总和 Total	2 333 219	2 349 645	2 354 768	2 355 231

由表2可以得出以下结论:

(1) 梯级联合优化调度的结果均比单库最优的总和要大,并且远优于等流量调节的结果,1 d内较等流量计算结果增加发电量22 012 万 kW · h,增幅接近1%,达到优化要求且符合工程实际。

(2) 对于梯级电站的短期调度,单库的最优调度接近梯级的最优调度,先进行单库最优并以其结果作为初始调度线将有利于程序收敛速度的提高,并且在一定程度上可以解决初始调度线的收敛性问题^[6]。

(3) 通过实例的优化调度结果发现,在进行梯级水电站优化调度时,上游水库(东风)牺牲自身的发电量可以达到梯级发电量最大的目标。

(4) 梯级联合优化调度中,应用大系统分解协调算法与用DPSA求出的梯级优化结果在经过数次迭代后趋于相近,从而验证了前述2 3的算法分析。

(5) 同一收敛精度或迭代次数下,DPSA求解的

优化调度值略高,但计算时间也较长。随着计算精度的提高及迭代次数的增加,2种算法的求解将逐渐接近,但计算时间也将变得很长。需要指出的是,虽然此时2种算法的目标函数已经接近最优,但是增加迭代次数仍可以优化。

4 结 语

逐次逼近算法和大系统分解协调算法,是求解梯级水电站时的2种有效的降“维”方法。本研究通过其在实际工程项目中的应用,对2种方法进行了对比分析,得到了较好的优化结果。值得说明的是,由于要收敛最优解的时间较长,实际应用中往往是决策者根据需要(如计算的时间)从不同优化方法中选择,以寻求满意解。如决策者对精度要求比较高,可以采用DPSA法求解结果;如决策者对时间要求比较高,则可以选用大系统分解协调法求解结果。

[参考文献]

- [1] 华中工学院 水电站经济运行[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
- [2] 赵振华, 周建中, 李承军. 清江梯级水电站短期优化调度模型研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2002, 14(4): 5- 7.
- [3] 宗 航, 李承军, 周建中, 等. POA 算法在梯级水电站短期优化调度中的应用[J]. 水电能源科学, 2003, 21(1): 46- 48.
- [4] 万永华. 水电能源系统规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.
- [5] 李爱玲. 水电站水库群系统优化调度的大系统分解协调方法研究[J]. 水电能源科学, 1997, 15(4): 58- 63.
- [6] 方红远, 王 浩, 程吉林. 初始轨迹对逐步优化算法收敛性的影响[J]. 水利学报, 2002, (11): 28- 30.

(下转第133页)

[参考文献]

- [1] 陈守煜 模糊水文学与水资源系统模糊优化原理[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1990
- [2] 陈守煜 区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J]. 中国工程科学, 2001, 3(2): 33- 38
- [3] 陈守煜 模糊划分理论分析模型及其在水文上的应用[J]. 水利学报, 1991, (12): 25- 30
- [4] 陈守煜 中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J]. 水利学报, 1997, (8): 15- 21
- [5] 陈守煜 区域可持续发展模糊模式识别评价量化理论[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(2): 5- 8
- [6] 楼顺天, 施 阳 基于MATLAB的系统分析与设计——人工神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998

The establishment and application of theory model for the classification and identification of runoff series

KANG Yan, CAI Huan-jie

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, North West A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Fuzzy classified theory has strict theory and physics base. It integrates inevitability and randomness and fuzzy classification and identification of hydrological phenomenon. The author applied fuzzy classified theory model to fuzzily classify annual runoff series. According to classified results, using LVQ to identify dry year, normal year or wet year of annual runoff series, identification and classification model of annual runoff series was established, and 61 years' water-data in upper reach of Yellow River were confirmed. The results show that the model can be used to classify and identify runoff.

Key words: water year; fuzzy optimum classification; LVQ Networks; runoff classification; runoff identification

(上接第128页)

Abstract ID: 1671-9387(2005)10-0125-EA

The application research of DPSA and large-scale system decomposition-coordination for cascaded hydroelectric short-term optimal scheduling

LI Lian¹, HUANG Qiang¹, XIAO Yan², XIAO Zhi-juan¹

(1 Key Laboratory of Northernmost Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 Wujiang Hydropower Development Corporation Ltd., Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: The mathematical model in cascaded hydroelectric short-term optimal scheduling is introduced. Then two methods, DPSA and Large-Scale System decomposition-coordination, are contrasted and analyzed in detail from calculating idea and process. Both methods will arrive convergence because of the identical idea. Finally, an example of two methods is given, whose results can be referred in real project. The two methods can be chosen on the need of precision and time etc.

Key words: short-term optimal scheduling of plant; POA arithmetic; DPSA arithmetic; large-scale system decomposition-coordination