

A Fast Algorithm for Short Term Scheduling of Cascaded Hydropower Reservoir Systems

Xinyu Wu, Qilin Ying, Shengli Liao, Jianjian Shen

Institute of Hydropower & Hydro-Informatics, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning
Email: wuxinyu@dlut.edu.cn, ysr_ice@yeah.net, shengliliao@dlut.edu.cn, shenjj@dlut.edu.cn

Received: Apr. 24th, 2018; accepted: May 10th, 2018; published: May 16th, 2018

Abstract

With the development of hydropower systems, more and more complex demands are encountered by hydropower scheduling. To obtain near optimal schedules of hydropower systems effectively without solving complex mathematic programming, a fast algorithm is proposed. Without an objective function, the basic scheduling concepts of saving water, servicing for power system balance, coordination of up and down stream reservoirs, together with most of the constrains of optimization models, are used to direct the scheduling of cascaded hydropower systems. The method is composed of a series of operations for whole time horizon requirements such as final reservoir level, total energy or total turbine water of a plant, total energy of several cascaded reservoirs, and reducing spill water. To achieve one target, a successive power scheduling method is proposed in which temporal order of power rise/fall based on load characters and a local scheduling algorithm that can satisfy period coupled constraints are combined. Case study of hydropower system in Hongshui River operated by China Southern Power Grid (CSG) shows that the proposed method is effective in obtaining power schedules and complex power distribution rules can be achieved.

Keywords

Hydropower, Short Term, Scheduling, Power Allocation

梯级水电站群短期发电调度计划快速生成方法

武新宇, 应其霖, 廖胜利, 申建建

大连理工大学水电与水信息研究所, 辽宁 大连
Email: wuxinyu@dlut.edu.cn, ysr_ice@yeah.net, shengliliao@dlut.edu.cn, shenjj@dlut.edu.cn

收稿日期: 2018年4月24日; 录用日期: 2018年5月10日; 发布日期: 2018年5月16日

作者简介: 武新宇(1979.04), 吉林省长春市人, 副教授, 研究方向: 水电系统经济运行。

文章引用: 武新宇, 应其霖, 廖胜利, 申建建. 梯级水电站群短期发电调度计划快速生成方法[J]. 水资源研究, 2018, 7(3): 236-250. DOI: 10.12677/jwrr.2018.73026

摘要

随着水电系统发展,发电计划制定面临着越来越复杂的需求。为避免求解复杂数学规划模型,本文提出一种快速生成梯级水电短期发电计划的方法。该方法不采用特定的目标函数,而是根据实际调度中普遍接受的降低耗水率、有利于负荷平衡、上下游水库协调等原则,在优化模型中采用的约束条件下制定发电计划。该方法由一系列满足调度期末水位、发电用水量、总电量,以及减少弃水的基本操作构成。根据负荷特性将时段排序,并结合能够满足时段关联约束的负荷分配算法,实现这些调度目标。以南方电网红水河梯级水电站群为背景的实例研究表明该方法能有效制定发电计划,并满足复杂的出力分配规则。

关键词

水电, 短期, 调度, 出力分配

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

梯级水电站群短期发电调度是复杂的混合整数非线性规划问题,求解的主要困难在于水位-库容曲线、水头-耗水率-出力曲线等非线性曲线,以及开-停机状态等整数变量的处理[1]。梯级水电站群短期调度常用的求解方法有动态规划[2]、逐步优化[3]、网络流[4]、线性规划[5]、非线性规划[6]、混合整数规划[7] [8]等。与此同时,一些启发式算法也越来越多的应用于水库群优化调度,例如遗传算法[9]、粒子群算法[10]等。优化模型通常以发电效益最大,调峰电量最大[11]等为目标。在求解过程中,虽然可以将水库、机组特征曲线分段线性化,或利用拉格朗日松弛法求解混合整数规划模型[12],但对于大规模的水电系统,建模及求解过程非常困难,耗时过长无法满足系统短期调度高时效性的要求。

本文提出一种基于水电出力与系统负荷趋势一致[13]、降低耗水率[14]等基本概念的水电站群短期发电调度计划快速生成方法,以求解数学规划在实效性要求下难以解决的问题。该方法以水库的期末水位、总发电量、总发电水量,梯级水库群的总发电量,减少弃水量等为目标进行调度,通过逐步调整各水电站在各时段内出力大小来满足这些调度需求。时段的优先级主要由负荷峰、平、谷[15]确定,并结合如下时段排序规则:① 在负荷峰值时段均匀发电;② 在负荷峰值时段按比例发电;③ 出力与负荷趋势一致。本文所提出的梯级水电站群短期发电调度计划快速生成方法包括不同调度需求的排序、特定调度需求下出力更改时段排序,以及在单时段出力增减之后使得新的调度方案可行的算法。提出的方法应用于南方电网红水河梯级水电系统,以日发电计划为例,分别对控制上下游电站电量、控制各水库末水位和控制梯级总电量的需求进行计算,以验证方法的应用效果。

2. 建模及求解方法

2.1. 水电调度控制目标

梯级水电系统的调度需求包括单一水库或水库群控制目标,例如最小出力约束、水库蓄水量约束,减少弃水量等。另外,在一些短期调度模型中,考虑水电站出力的时间关联约束。在本文方法中,可以视情况选择以

下控制目标。

1) 水库期末蓄水量/水位:

$$S_m^{T+1} = ST_m = S_m^1 + \sum_{t=1}^T (I_m^t - R_m^t) \quad (1)$$

式中: S_m^1 (m^3)为水库期初的蓄水量; R_m^t (m^3)为水库 m 在时段 t 内的出库流量; $R_m^t = 3600 \times \Delta_t \times (q_m^t + d_m^t)$; Δ_t 为第 t 个时段的小时数, 本文中 $\Delta_t = 0.25$; q_m^t (m^3/s)是水库 m 在时段 t 内的发电流量; d_m^t (m^3/s)是水库 m 在时段 t 内的弃水流量; I_m^t (m^3)为是水库 m 在时段 t 内入库流量, 由上游水库的出库在 t 时段流达量和区间入库流量组成, 计算下游水库的入库流量时应考虑上、下游水库的滞时关系。

2) 水库发电水量:

$$W_m = \sum_{t=1}^T (3600q_m^t \Delta_t) \quad (2)$$

式中: W_m (m^3)为调度期内水库 m 的发电水量。

3) 水电站发电量:

$$E_m = \sum_{t=1}^T (p_m^t \Delta_t) \quad (3)$$

式中: E_m (MWh)为调度期内水库 m 的发电量。

对于某一水库, 可能会同时存在多个控制目标(例如同时设定水电站期末库容和发电水量目标), 相当于给定上游水库调度期内流达水量, 在上游水库也存在(1)、(2)、(3)控制目标的情况下, 可能导致上下游水电站的控制目标相互矛盾。

4) 水电站群的总电量(可选):

$$E_{sys_n} = \sum_{m \in U_n} \sum_{t=1}^T (p_m^t \Delta_t) \quad (4)$$

式中: 将梯级水库甚至跨流域水库群划分为多个子水库群, E_{sys_n} 为水库群 n 总调度期内总发电量, U_n 是属于水库群 n 的水电站集合。

2.2. 其他水电调度约束

1) 水量平衡约束:

$$S_m^{t+1} = S_m^t + I_m^t - R_m^t \quad (5)$$

2) 发电流量约束:

$$q_m^t \leq \bar{q}_m^t \quad (6)$$

式中: \bar{q}_m^t (m^3/s)为 m 号水电站 t 时段发电流量上限。

3) 水电站出力约束:

$$\underline{p}_m^t \leq p_m^t \leq \bar{p}_m^t \quad (7)$$

式中: \underline{p}_m^t (MW)、 \bar{p}_m^t (MW)分别为 m 号水电站 t 时段出力的下、上限。

4) 库容限制:

$$\underline{S}_m^t \leq S_m^t \leq \bar{S}_m^t \quad (8)$$

式中： \underline{S}_m^t (m³)、 \overline{S}_m^t (m³)分别为 m 号水电站 t 时段初库容的下、上限。

5) 水电站出力爬坡限制:

$$|p_m^t - p_m^{t-1}| \leq \overline{\Delta p}_m \quad (9)$$

式中： $\overline{\Delta p}_m$ (MW)为 m 号水电站相邻时段最大出力升降限制。

6) 出库流量限制:

$$\underline{R}_m^t \leq R_m^t \leq \overline{R}_m^t \quad (10)$$

式中： \underline{R}_m^t (m³)、 \overline{R}_m^t (m³) 分别为 m 号水电站 t 时段出库流量下、上限。

7) 水电站振动区约束:

$$[p_m^t - \overline{ps}_{m,k}(H_m^t)][p_m^t - \underline{ps}_{m,k}(H_m^t)] \geq 0 \quad (11)$$

式中： $\overline{ps}_{m,k}(Z_m^t, Z_m^{t+1}, Z_d^t)$ (MW)、 $\underline{ps}_{m,k}(Z_m^t, Z_m^{t+1}, Z_d^t)$ (MW)分别为 m 号水电站 t 时段第 k 个出力振动区的上、下限，与平均水头，或上下游水位相关。

8) 水电站出力波动限制:

$$(p_m^{t-\Delta} - p_m^{t-\Delta-1})(p_m^t - p_m^{t-1}) \geq 0, \Delta = 1, 2, \dots, tv_m - 1 \quad (12)$$

式中： tv_m 是 m 号水电站出力升降最小间隔时段数，即在一轮出力升降过程最高、最低处持续最少 tv_m 个时段。

9) 最小出力升降时段数限制:

m 号水电站出力从上升开始至下降开始，或者由下降开始至上升开始的时间间隔不少于 tp_m 个时段。此约束是通过限制出力升降的间隔时间，提高调度计划可执行性。定义状态变量 X_m^t 描述出力升降时段数，

$$X_m^t = \begin{cases} \min(X_m^{t-1} + 1, tp_m) & (p_m^t - p_m^{t-1}) \geq 0 \text{ and } X_m^{t-1} > 0 \\ 1 & (p_m^t - p_m^{t-1}) > 0 \text{ and } X_m^{t-1} < 0 \\ \max(X_m^{t-1} - 1, -tp_m) & (p_m^t - p_m^{t-1}) \leq 0 \text{ and } X_m^{t-1} < 0 \\ -1 & (p_m^t - p_m^{t-1}) < 0 \text{ and } X_m^{t-1} > 0 \end{cases}$$

最小出力升降时段约束为式(13)。

$$(|X_m^{t-1}| - tp_m) X_m^t X_m^{t-1} \leq 0 \quad (13)$$

在式(5)~(13)中， $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq m \leq M$ 。

2.3. 时段排序规则

与优化方法不同，在梯级水电站群短期发电调度计划快速生成方法中没有明确的目标函数，需遵循以下规则评价时段之间的出力分配合理性：

- 1) 水电站库容足够时，水电站出力需要优先承担系统高峰负荷，然后分配到负荷平坦阶段，最后分配到低谷阶段。根据系统负荷特点预设峰、平、谷时段[15]；
- 2) 上游水电站出库流量应考虑下游水电站机组过流能力和库容限制，避免弃水；
- 3) 对于梯级水电站群，各水电站间可以相互协调负荷尖峰(高峰负荷阶段的最高负荷)时段的出力，如单一水电站在不同尖峰负荷时段的出力比例可以设置；
- 4) 所有水电站的运行应该避免在振动区和高水耗区。

水电站的增减出力时遵循规则(1)，分配的时段排序主要由负荷峰值、平坦、低谷阶段决定。如图 1 所示，

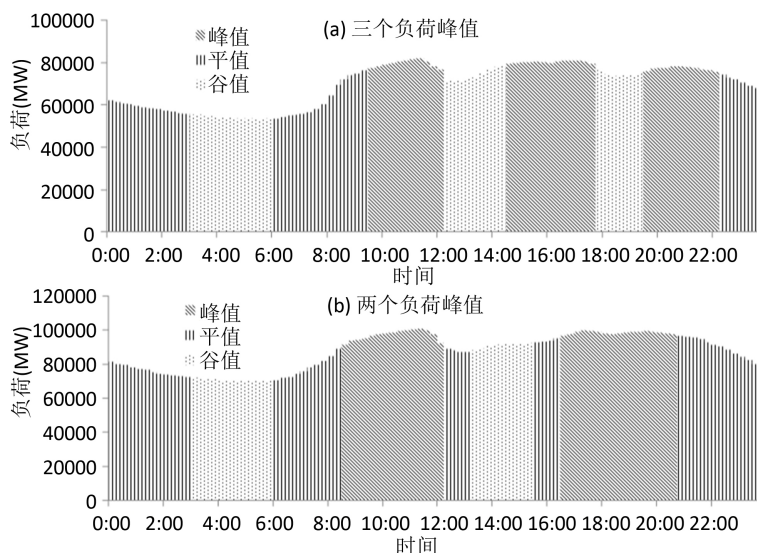


Figure 1. Distribution of peak, flat, and valley stages
图 1. 系统负荷峰值、平值和谷值分布情况

根据系统负荷的大小、变化和需求将一日的电力负荷分成若干个部分。尽管在两个峰值中间的时间段并不是真正的系统负荷低谷，但在调度过程中可视其为低谷，以利用水电出力变化调节相邻负荷高峰时段与二者之间时段的负荷差。

UP_n, UF_n, UV_n, UM_n 分别是第 n 个峰、平、谷、尖峰阶段包括的时段集合。 NP, NF, NV, NM 分别是峰、平、谷、尖峰负荷的阶段数量。当 $NP = NM$ 时，每个高峰负荷阶段只有一个尖峰。 w_m^t 为描述水电站 m 在时段 t 增加出力优先级的变量， $-w_m^t$ 描述减少出力的优先级。

$$w_m^t = a_0\varphi(t) + a_1C^t - a_2\sum_{m0=1}^M p_{m0}^t + \gamma(m,t) \tag{14}$$

$$\varphi(t) = \begin{cases} vp & t \in UP_n, n = 1, 2, \dots, NP \\ vf & t \in UF_n, n = 1, 2, \dots, NF \\ vv & t \in UV_n, n = 1, 2, \dots, NV \end{cases} \tag{15}$$

$$\gamma(m,t) = \begin{cases} a_3 \left(\frac{p_m^t}{\sum_{t0 \in UM} p_m^{t0}} - r_m^n \right) & t = UM_n, n = 1, 2, \dots, NM \\ 0 & \text{others} \end{cases} \tag{16}$$

在式(14)~(16)中： a_0, a_1, a_2, a_3 为系数， $a_0\varphi(t)$ 用来描述不同时段 t 对于出力增加优先级的影响。 vp, vf, vv 为 $\varphi(t)$ 在峰、平和谷负荷阶段的值， $vp \gg vf \gg vv$ 。 a_1C^t 用来描述负荷值对时段优先级的影响，可以区分同一峰、平、谷阶段内的时段优先级。 $a_2\sum_{m0=1}^M p_{m0}^t$ 用来描述 t 时段已经分配的出力对优先级的影响。 $\gamma(m,t)$ 用来描述水电站调峰规则对出力增加优先级的影响，如表 1。 r_m^n 为水电站 m 第 n 个尖峰时段出力与全部时段尖峰时段总出力之比。

通过公式(14)~(16)，可以使用表 1 所示的参数值定义时段排序规则。

对于均匀调峰和按比例调峰两种调度规则而言， $a_2 = 0$ 表示已经进行的出力分配不会影响后面的调度过程，两种规则的区别在于 r_m^n 值的选取。与负荷趋势一致的调峰规则不受峰、平、谷时段影响，只与剩余负荷相关。

Table 1. Period sorting rules
表 1. 时段排序规则

名称	均匀调峰	按比例调峰	与负荷趋势一致
参数值	$a_0 \gg a_3 \gg a_1, a_2 = 0, r_m^n = 1/NM$	$a_0 \gg a_3 \gg a_1, a_2 = 0, r_m^n = \text{预设值}$	$a_0 = 0, a_1 = a_2, a_3 = 0$

2.4. 可行性修正算法

当一个水电站的出力发生变化时，由于出力的爬坡限制，出力波动限制和最小出力升降时段数限制，必须修改相邻时段的出力。本文采用多变量关联的搜索算法[16][17]来处理时间关联约束。水电站 m 在 t 时段出力改变之后，如 p_m^t 增加 Δp_m ，设定 $p_m^{t'} = p_m^t$ ，新的出力值变为 $p_m^t = p_m^{t'} + \Delta p_m$ 。如果 $(p_m^t - p_m^{t+1})(p_m^t - p_m^{t-1}) > 0$ 表示在时段 t 出力上升(或下降)的趋势发生变化，相邻时段出力需要调整以形成新的可行发电计划。用式(17)求解为满足最小连续出力时段约束需调整的出力时间范围。

$$\begin{cases} \text{Ob. max } y1 \\ \text{S.T. } \begin{cases} (p_m^t - p_m^{t+1})(p_m^t - p_m^{y1}) \leq 0 \\ y1 = t - tv_m + 1, t - tv_m + 2, \dots, t - 1 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

如果公式(17)有解，在 $y1$ 和 t 之间的出力设定为 $p_m^{t'} + \Delta p_m$ ，得到 $y1$ 和 t 之间可行的出力上升(或下降)过程，否则求解模型(18)。

$$\begin{cases} \text{Ob. min } y2 \\ \text{S.T. } \begin{cases} (p_m^{t+1} - p_m^t)(p_m^{y2} - p_m^t) \leq 0 \\ y1 = t + 2, t + 3, \dots, t + tv_m \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

如果模型(18)有解，得到 t 和 $y2$ 之间可行的上升(或下降)过程，并将 $y1$ 和 $y2$ 之间的出力设定为 $p_m^{t'} + \Delta p_m$ ，否则 $y1 = t - \lceil tv_m/2 \rceil + 1, y2 = t + \lfloor tv_m/2 \rfloor$ ， $y1$ 和 $y2$ 间的出力修正为 $p_m^{t'} + \Delta p_m$ 。

在出力间隔的边缘改变出力大小时，原本的出力增加(减小)或者不变的过程会被破坏，需要进一步修改出力，得到的新的出力过程也需要进行边缘修改来满足调度需求。以图 2 为例，显示了一个典型的出力修改过程，具体操作方法见文献[17]，并在满足时段关联约束的同时避开振动区[18]。

2.5. 满足单一调度需求的方法

调度需求包括期末库容、调度期内的总发电量或发电水量控制目标，或减少弃水、满足下游水库最小流量或最小出力，甚至是梯级水库群总发电量的要求。若在特定时间范围内可用的水量不足或过多，控制目标就不能实现，需要改变调度计划以满足系统可用水量的要求，将可能需要调整的时段和水库的组合称为影响组合。对于水库 m ，假设其只有一个直接上游水库 $m-1$ ，不同需求下的潜在影响组合范围和可能改变影响组合范围的约束如表 2 所示。在表 2 中， l_{m-1} 是水库 $m-1$ 到水库 m 的最小滞时。

2.5.1. 当前水库调度计划修改方法

不同情况下，对于不同水库的不同调度需求，依次按时间顺序进行影响组合发电出力的修改。并模拟和测试修改的调度计划是否达到要求。对于水库 m 在时段 $[t1, t2]$ 内增减蓄水量的特定目标，修改水电站 m 自身的调度计划的操作步骤如下：

- 1) 获取潜在的影响范围。设定 $ts = 1$ 。如果需在时段 $[t1, t2]$ 内增加蓄水量，就需要减少该时段之前的出库水量。找到 $t1$ 前的最后一个水库水位达到上限的时段，并将 ts 重新设定为此值。因为在水位达到上限的时段之前若减小部分时段出库，将使得水位达到上限时段附近的出力变化导致时间关联约束破坏，或者出现弃水，需要对此进一步修正而使得计算非常复杂。同理，如果在时段 $[t1, t2]$ 内需要减少蓄水量，将 ts 设定为 $t1$ 前的最后一个库水位达到下限的时段；

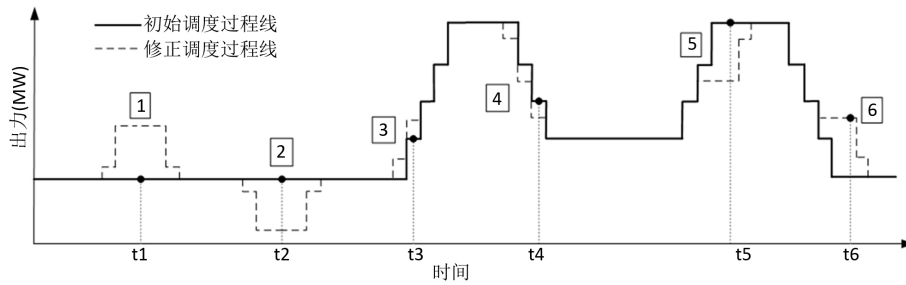


Figure 2. Examples for power modification at adjacent periods
图 2. 相邻时段出力修改示例

Table 2. Influencing combinations for requirements
表 2. 需求的影响组合

调度需求	水库 m 的期末水位, 总出力或的发电流量	水库 m 在时段 $[t1,t2]$ 减少的弃水	水库 m 在时段 $[t1,t2]$ 满足的最小流量或出力	满足水库群 $[m1,m2]$ 的总电量
潜在可用水量调整范围	$\{m\} \times [1, T]$	$\{m\} \times [1, t2]$	$\{m\} \times [1, t2]$	$(\forall m0 \in [m1, m2]) \times [1, T]$
潜在影响组合	$\{m\} \times [1, T]$ $\cup \{m-1\} \times [1, T - L_{m-1}]$	$\{m\} \times [1, t1]$ $\cup \{m-1\} \times [1, t2 - L_{m-1}]$	$\{m\} \times [1, t1]$ $\cup \{m-1\} \times [1, t2 - L_{m-1}]$	$(\forall m0 \in [m1, m2]) \times [1, T]$
约束限制	水库 m 在时段 $[1, T]$ 的库容限制; 水库 $m-1$ 在时段 $[1, T - L_{m-1}]$ 的库容限制	水库 m 在时段 $[1, t1-1]$ 的库容限制; 水库 $m-1$ 在时段 $[1, t2 - L_{m-1}]$ 的库容限制	水库 m 在时段 $[1, t1]$ 的库容限制; 水库 $m-1$ 在时段 $[1, t2 - L_{m-1}]$ 的库容限制	水库群 $m1: m2$ 在时段 $[1, T]$ 的库容限制

- 2) 将 $[ts, t1-1]$ 中的时段储存在集合 U 中, 在最小出力(或最小发电流量)约束下减小出库实现 $t1$ 时段蓄水量增加; 在最大出力(或最大发电流量)约束下增加出库实现蓄水量减小;
- 3) 将集合 U 中的时段根据时段排序规则排序, 按顺序储存为 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 并设定 $k = 1$;
- 4) 以设定步长增减时段 u_k 的出力值, 采用可行性修改算法获得新的可行出力过程。保持水库 m 的直接下游水库出库流量过程不变, 水库 m 及其下游水库按照新的调度计划进行模拟。新的调度计划可能会造成水库弃水量增加, 最小出力或最小发电流量的约束破坏, 水位超过限制等。若发生如上情况, 那么对原调度计划的修改是无效的, 重新设定 $k = k + 1 \leq n$ 并重新执行步骤 4);
- 5) 如果步骤 4)中调度计划修改成功, 但仍没有达到蓄水量增减目标, 则返回步骤 1), 否则停止。
在修正调度计划的过程中, 在每次成功修改后都要重新进行时段排序。

2.5.2. 相邻水库调度计划修改方法

通过修改直接上游水库 m 的出力过程, 改变水库 $m+1$ 在时段 $[t1, t2]$ 蓄水量的步骤如下。

- 1) 设定 $ts = 1$ 。如果水库 $m+1$ 蓄水量在时段 $[t1, t2]$ 需要增加, 找到 $t1$ 前的最后一个水库 $m+1$ 水位达到上限时的初始时段, 并将 ts 设定为此值。同理, 若要在时段内需要减少蓄水量, 则将 ts 设定为 $t1$ 前的最后一个水库 $m+1$ 水位达到下限的时段;
- 2) 考虑到上下游水流滞时, 设定水库 m 可调整时段为 $[ts', t2 - L_m]$, $ts' = ts - \bar{l}_m$, \bar{l}_m 为水库 m 到水库 $m+1$ 之间水流最大滞时时段数。如果水库 $m+1$ 在 $[t1, t2]$ 内需要增加蓄水量, 即水库 m 在 $[ts', t2 - L_m]$ 内需要加大出库, 在 $[ts', t2 - L_m]$ 内找到水库 m 最后一个水位达到下限时的时段, 将 ts' 设定为此值。同理, 若水库 $m+1$ 在 $[t1, t2]$ 内需要减少蓄水量, 则将 ts' 设定为 $[ts', t2 - L_m]$ 内最后一个水库 m 的库水位达到上限的时段。将 $[ts', t2 - L_m]$ 的时段储存在集合 U 中;
- 3) 将集合 U 中的时段进行排序, 按顺序储存为 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 并设定 $k = 1$;

4) 以设定步长修改水库 m 在时段 u_k 的出力值, 采用可行修正算法获得新的调度过程。保持水库 $m+1$ 的出库流量不变, 对水库 m 及其下游水库 $m+1$ 按照新的调度计划进行模拟。如果新的调度计划导致弃水量增加, 约束越界等情况, 那么计划修改失败, 重新设定 $k = k+1 \leq n$ 并重新执行步骤 4);

5) 如果步骤 4) 中调度计划修改成功, 但没有达到蓄水量的增减目标, 则返回步骤 1), 否则停止。

2.6. 梯级水库群发电计划制定

为满足水库群调度需求本文采用三种计算模式对调度计划进行逐步修改, 分别是自上而下、自下而上和整体协调分配出力模式。自上而下即从上游到下游模式是在考虑当前水库 m 的直接下游水库 $m+1$ 的约束的条件下, 修改当前水库 m 的调度计划来满足控制目标; 自下而上即从下游到上游模式是通过修正当前水库 m 的直接上游水库 $m-1$ 的计划来满足当前水库 m 的控制目标; 整体协调分配出力模式用来分配梯级水库群的总电量。

2.6.1. “自上而下”与“自下而上”的计算模式

对于梯级上游水库的调度, 必须考虑下游水库的调度计划和水库库容约束。因为上游水库调度计划确定后才能准确制定下游水库的调度计划, 所以第一次出力分配计算无法考虑下游水库的约束条件。所以, 修正调度出力过程需要同时综合“自上而下”和“自下而上”模式, 出力分配步骤如下:

1) 将编号 $m=1$ 的水库设置为当前水库;

2) 不考虑对下游水库 $m+1$ 的影响, 对水库 m 进行出力分配以满足其控制目标;

3) 使用“自上而下”模式来分配水库 m 的出力, 以达到减少其弃水并满足最小出力与最小流量约束的目的; 如果上游存在 $m-1$ 水库, 必要的情况下采用“自上而下”模式改变水库 $m-1$ 的出力过程减小水库 m 的弃水并满足最小出力和最小流量约束的目标;

4) 若水库 $m-1$ 由于步骤 3) 偏离控制目标, 则利用“自上而下”模式修改水库 $m-1$ 的出力。如果水库 m 的约束限制了水库 $m-1$ 的出力修改, 则反复进行时段排序并对水库 m 在排序靠前的时段进行出力增减和可行性修正, 以逐步引导水库 $m-1$ 通过“自下而上”模式满足水库 m 新的出力过程的用水, 同时使得水库 $m-1$ 接近控制目标;

5) 如果在步骤 4) 之后水库 m 的控制目标出现偏差, 则用“自上而下”模式进行再次修正 m 的调度计划;

6) 设定 $m = m+1$, 如果 $m > M$ 执行步骤 7), 否则执行步骤 2);

7) 检查水库是否仍有控制目标无法满足。如果不能同时满足上、下游水库的控制目标, 则需根据预先设定的目标优先级, 采用“自上而下”模式或“自下而上”模式对其进行修正。

在这个计算流程中, 步骤 2)~步骤 5) 是一组上下游水库的循环计算。对于当前水库 m , 初始调度计划的制定是在不考虑下游水库约束条件的情况下获得的(步骤 2)), 该调度计划的目标是水库 m 满足其自身控制目标。因为上游水库 $m-1$ 的发电计划没有考虑下游水库 m , 所以水库 $m-1$ 的不合理出力过程, 可能会导致水库 m 出现弃水, 或违反最小出力或最小流量约束的情况。解决以上问题需要同时修正水库 $m-1$ 和 m 的出力来减少弃水并满足水库 m 的控制目标(步骤 3))。在步骤 3) 中改变水库 $m-1$ 的调度过程若使其偏离控制值, 则再次对其进行修改。如果下游水库 m 的水位限制了上游水库 $m-1$ 接近其控制目标, 则首先对水库 m 的调度计划进行修正, 为上游水库 $m-1$ 的出力调整腾出库容调节空间(步骤 4))。最后, 再次修正水库 m 满足其控制目标(步骤 5))。上下游反复修正的目的在于获得同时满足上、下游水库控制目标的发电计划。

2.6.2. 整体协调分配出力模式

对于梯级水库或水库群, 可以总发电量为控制目标, 将总发电量分配到每个水电站、每个时段需要遵循以下两个基本规则: 前述的时段排序规则和期末蓄能最大的原则, 前者优先级更高, 则计算流程如下:

1) 计算 $e_m^t = \frac{\partial E_{storage}}{\partial p_m^t}$ 的值, 其中 $E_{storage}$ 是系统蓄能, 短期调度中 e_m^t 值变化幅度一般很小, 近似所有 e_m^t 为一

个值 e_m ;

- 2) 将所有水库出力设为最小值, 从上游到下游进行减少弃水的操作;
- 3) 计算电量差 $\Delta E = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T (p_m^t \Delta_t) - E_{sys_1}$, 若其绝对值小于给定精度转到步骤 8);
- 4) 按时段排序规则进行排序, 设定 $l = 1$;
- 5) 如果 $\Delta E > 0$, 将水库根据 e_m 的值降序排序; 如果 $\Delta E < 0$, 将水库根据 e_m 的值升序排序。设定 $k = 1$;
- 6) 在时段 u_l 附近修改水库 k 的出力, 如果电量差的绝对值减小, 转至步骤 3), 否则设定 $k = k + 1$, 如果 $k \leq M$, 重新执行步骤 6), 否则执行步骤 7);
- 7) 设定 $l = l + 1$, 如果 $l \leq T$, 执行步骤 5)。如果系统总电量较步骤 4) 开始时没有变化, 转到步骤 8), 否则转至步骤 4);
- 8) 停止。

3. 实例研究

3.1. 红水河梯级水电站

红水河是珠江的主要支流, 上游称为南盘江, 发源于云南省曲靖市的马雄山, 与北盘江汇合后称为红水河。将本文提出的方法应用于红水河上的 12 座水电站, 总装机容量 13,984 MW, 受南方电网公司管辖, 送电区域跨四个省: 云鹏和鲁布革水库向云南电网输电, 天生桥一级、天生桥二级和龙滩水库向广东、广西电网输送电力, 光照向贵州电网输送电力, 其它电站向广西电网输送电力。红水河水电系统的结构如图 3 所示, 各水库基本参数如表 3 所示。本文中的计算方法采用 Java 语言编程。以某日计划生成为例, 流域内调节能力最好的天生桥一级初始水位 754.92 m, 龙滩初始水位 352.42 m。

3.1.1. 实例 1, 给定各水库控制目标

给定天生桥一二级水库的末水位为控制目标, 在图 1(a)的三峰负荷曲线下, 天生桥一级和二级水库的出力分配如图 4 所示。可见在非均匀调峰模式下, 夜间负荷峰值的梯级出力低于另外两个高峰时段。在均匀调峰模式下, 水库各高峰负荷时段尽量以同样的出力运行。但是由于库容限制, 不同高峰负荷时段的出力分配可能不同。对于与负荷趋势一致模式, 出力优先分配在负荷最大的早高峰。

如图 5 所示, 以天生桥一级水库总电量为控制目标, 采用均匀调峰规则。由于天生桥一级与二级电站的机

Table 3. Basic parameters of the reservoirs

表 3. 各水库基本参数

电站名称	装机容量(MW)	死水位(m)	正常高水位(m)	调节库容(亿 m ³)
云鹏	210	877	902	2.26
鲁布革	600	1105	1130	0.74
天生桥一级	1200	731	780	57.96
天生桥二级	1320	637	645	0.08
平班	405	437.5	440	0.27
光照	1040	691	745	20.37
龙滩	4900	330	400	205.3
岩滩	1210	212	223	15.60
大化	456	153	155	0.39
百龙滩	192	125	126	0.05
乐滩	600	110	112	0.46
桥巩	456	82	84	0.27

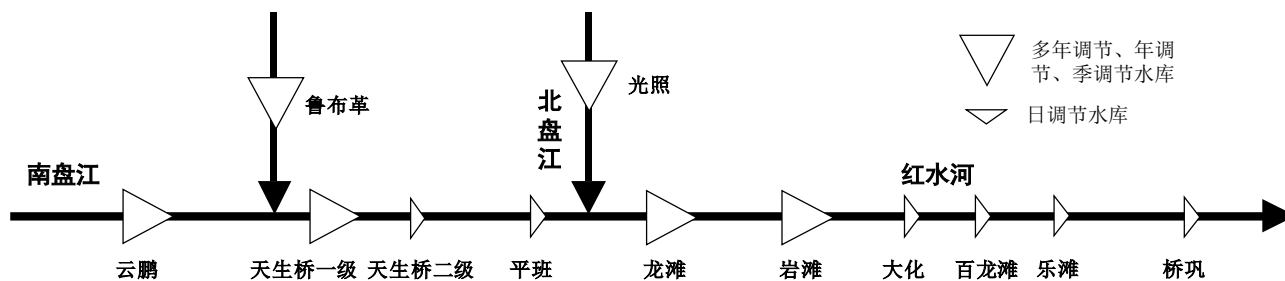


Figure 3. Schematic layout of studied hydropower system

图 3. 红水河水电系统的结构图

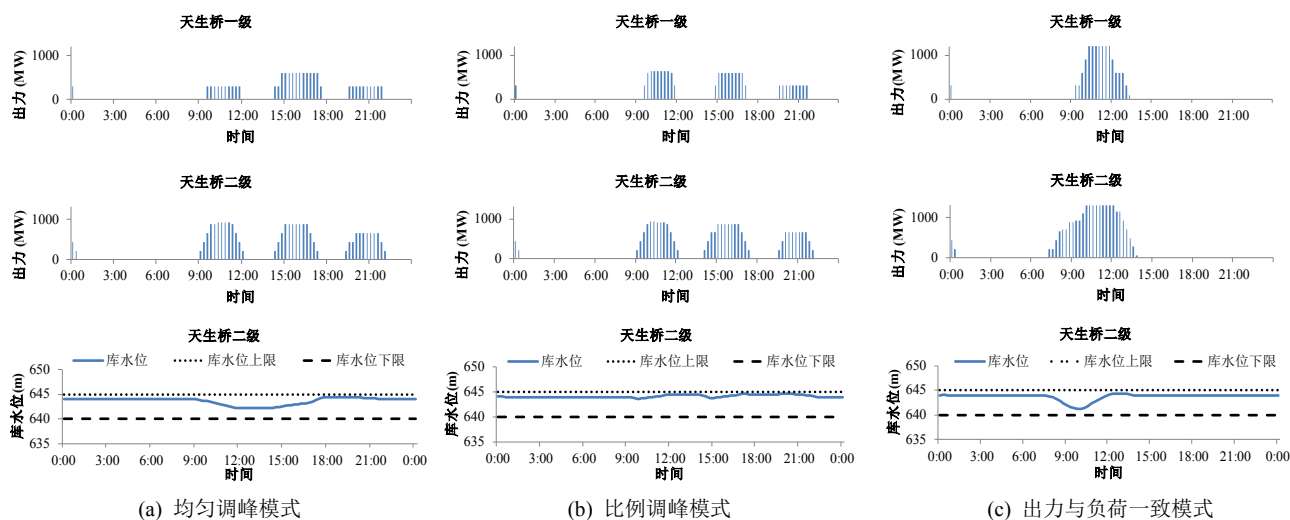
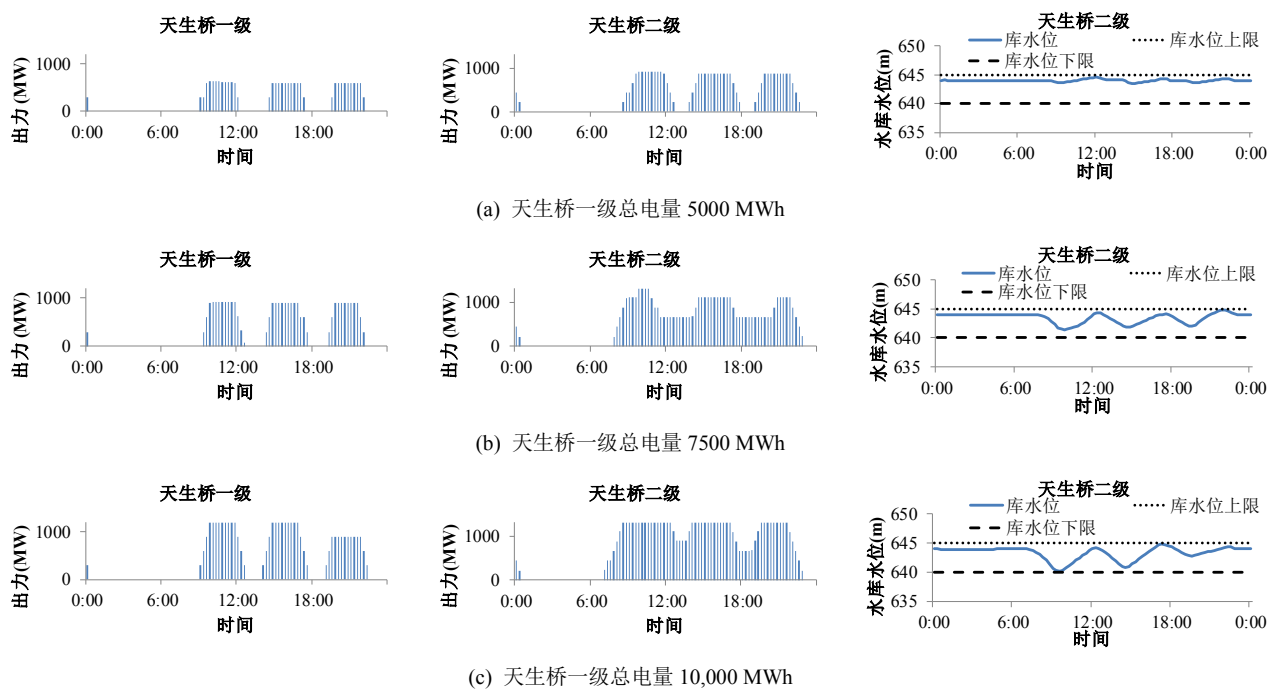


Figure 4. Comparison for different peak shaving mode

图 4. 不同调峰规则的调度过程



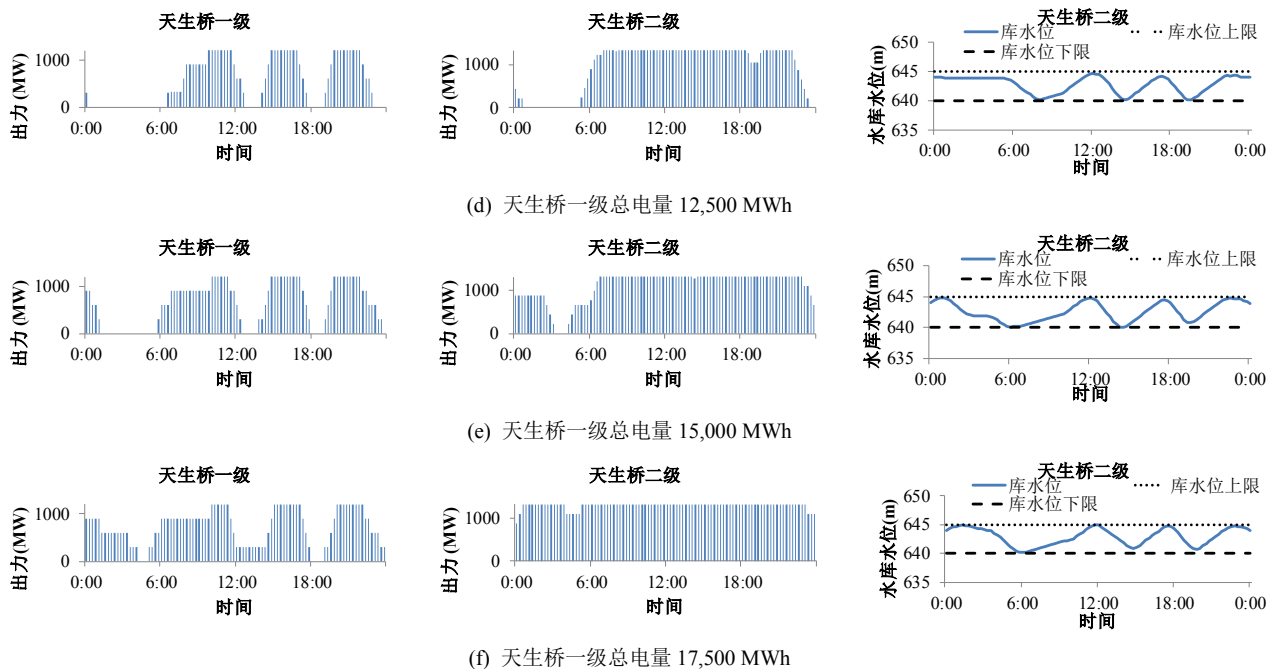
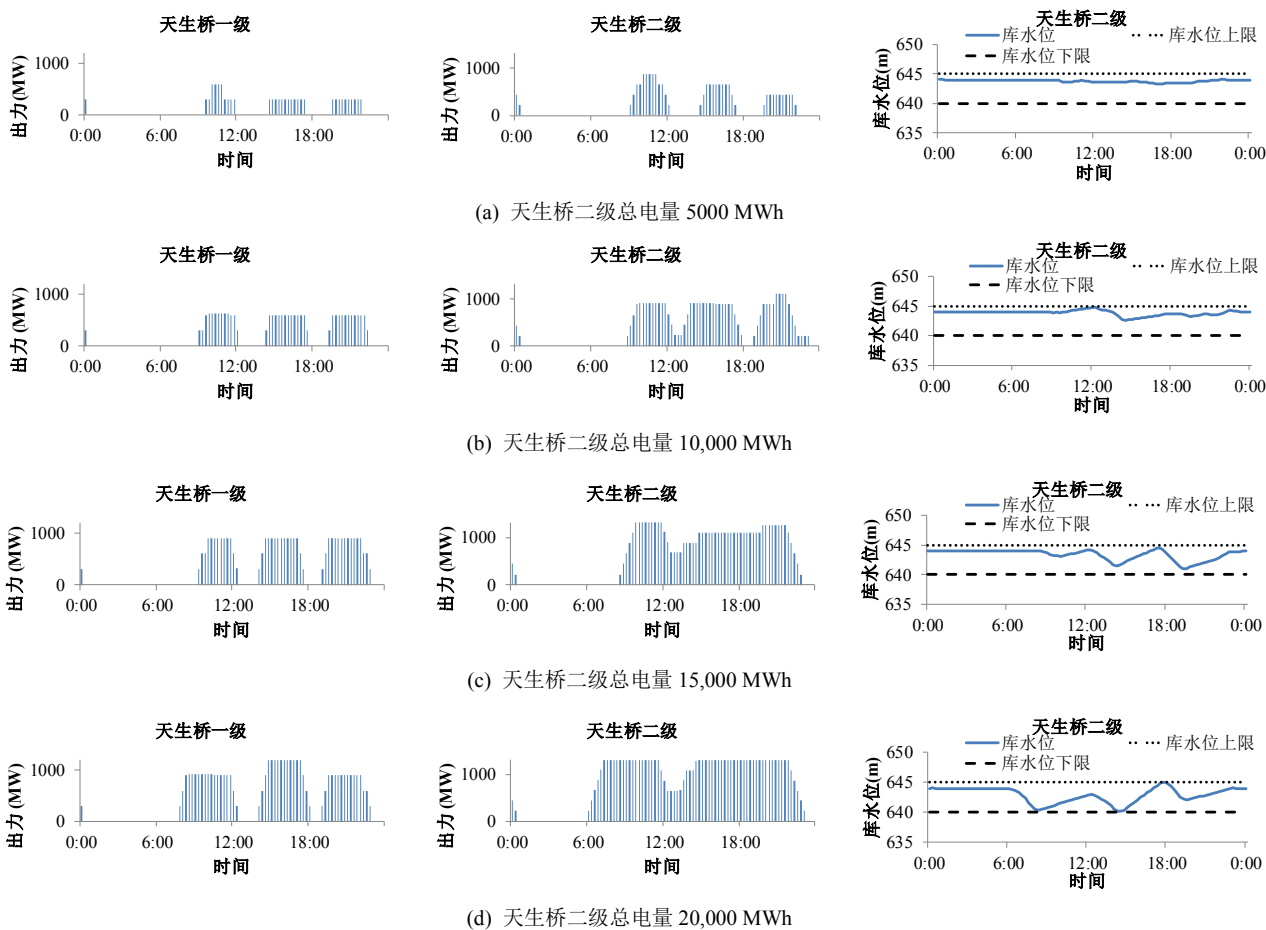


Figure 5. Schedules given energy for TSQ-1
 图 5. 给定天生桥一级发电量目标的调度过程



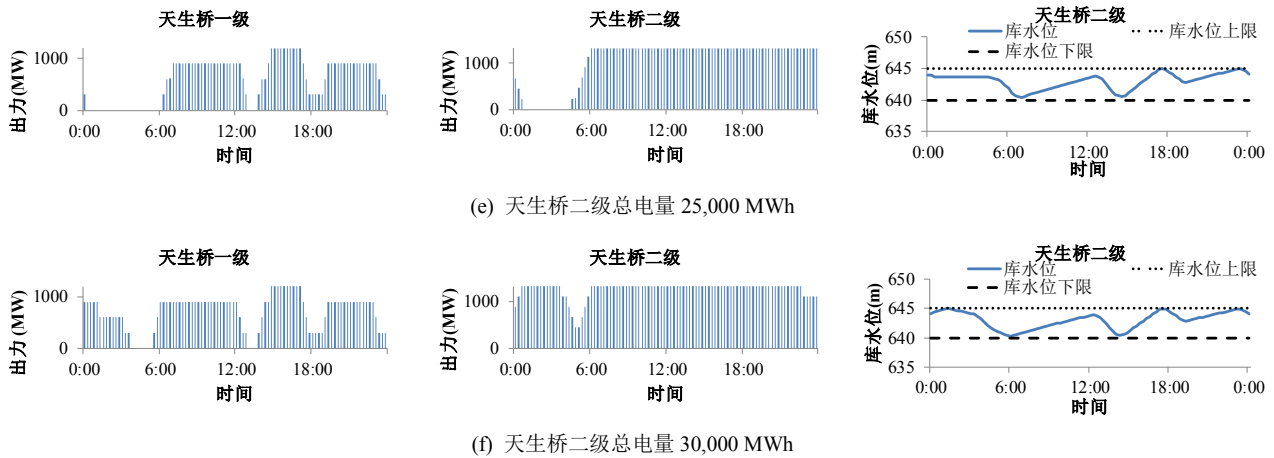


Figure 6. Schedules given energy for TSQ-2
图 6. 给定天生桥二级出力目标的调度过程

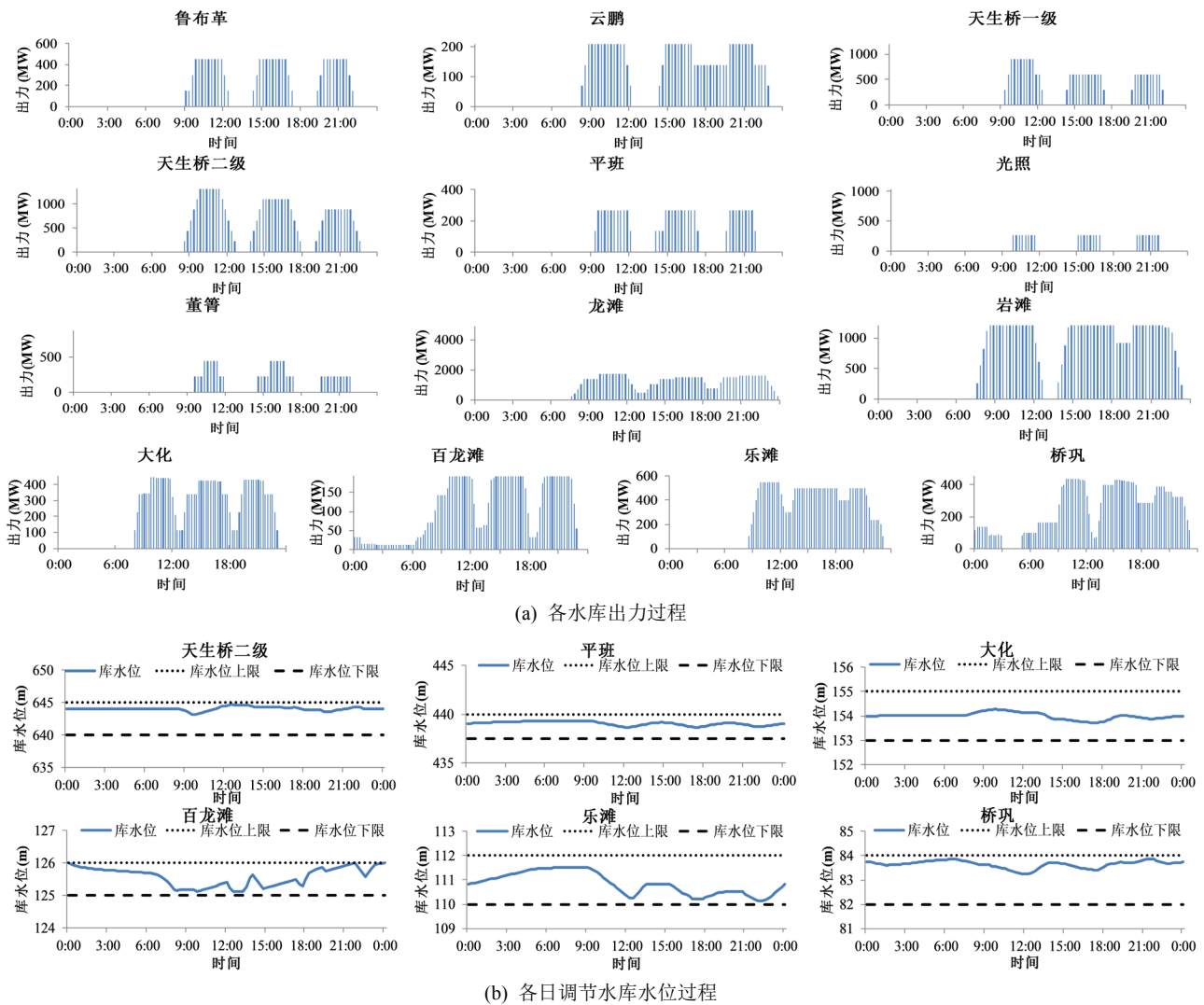


Figure 7. Schedules of plants subjected to reservoir control targets
图 7. 考虑水库控制目标的水库群调度过程

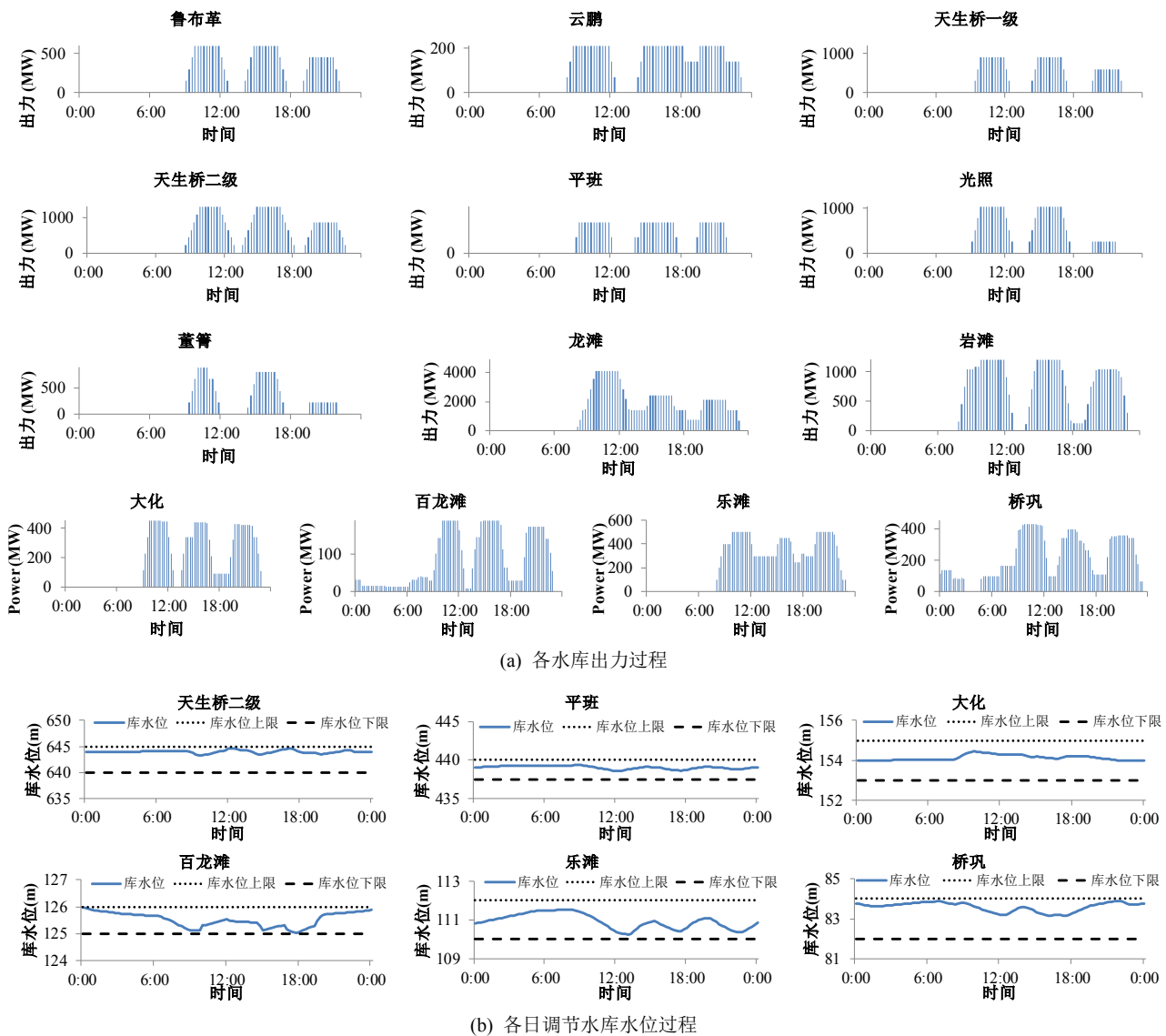


Figure 8. Schedules of plants subjected to target of cascaded system energy

图 8. 以梯级水电系统总发电量为目标的水库调度图

组最大过流能力不同，一级不能长时间以最大出力运行，否则库容很小的二级水库蓄水量超限或发生弃水。同样，二级水库在一级水库没有出库流量的情况下无法持续发电。当一级的总发电量从 5000 MWh 增加到 17,500 MWh 时，上下游水库电量增加的时段顺序基本与时段排序规则一致。二级的高峰出力在一级总电量达到 12,500 MWh 时达到最大值，一天当中二级水库水位出力会出现明显的三次波动，相应于三次高峰负荷调节的调度方式。每个实例的计算时间不超过 2 秒。

也可以给定下游天生桥二级水库的总发电量，二级水库的期末水位也可以同时为控制目标，但此时其上游一级水库不能有任何控制目标。这种控制模式的调度过程如图 6 所示，计算时间约为 3 秒。

对于整个梯级水库群，给定每个水库的期末库容，计算得到的调度出力过程和日调节水库的库水位过程如图 7 所示。

3.1.2. 实例 2，给定系统发电量控制目标

给定梯级水电系统总发电量目标为 100 GWh，采用均匀调峰模式，调度过程如图 8 所示。时间规则与空间

规则都会影响出力的分配,时间规则就是前述时段排序规则,空间规则是水库蓄能提高率最大规则。在实例中,水电出力的时间分布更重要,因而时间规则具有更高的优先级。该模型比仅给定各水库控制目标的情形更加复杂,计算时间需用70秒。

4. 结论

梯级水电站短期发电调度问题非常复杂,尤其是对于大规模集中控制的梯级水电站。本文针对没有特定目标的短期发电计划制定问题,提出了一种梯级水电站群短期发电计划快速生成方法。通过峰、平、谷负荷阶段划分,采用调峰规则结合系统负荷确定各时段出力增减的优先顺序;采用可行性修正算法在单一时段水电站出力增减后获得可行的调度计划。基于这两种方法,提出了以期末库容、总发电量、发电水量或梯级水电站群总发电量为控制目标的梯级水电站群发电计划制定算法。红水河梯级水电站的实例研究表明,该方法能够灵活高效地制定梯级水库群发电计划,对于12个水电站构成的梯级系统,计算时间最少仅需要数秒钟。同时该方法能够将调度人员的意图直接反映在发电计划中,避免了部分数学规划方法中由于目标与约束条件未能全面反映调度需求造成的应用困难。本文提出的方法已应用于南方电网直调水电站群的日发电计划制定中,其结果可直接发布为执行计划也可作为优化模型的初始解[16][17]。

基金项目

国家自然科学基金(91647113, 51679027), 国家重点研发专项(2016YFC0402208)。

参考文献 (References)

- [1] LI, X., LI, T. J., WEI, J. H., et al. Hydro unit commitment via mixed integer linear programming: A case study of the Three Gorges Project, China. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(3): 1232-1241. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6674108/> <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2288933>
- [2] YAKOWITZ, S. Dynamic programming application in water resources. *Water Resources Research*, 1982, 18(4): 673-696. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR018i004p00673> <https://doi.org/10.1029/WR018i004p00673>
- [3] TURGEON, A. Optimal short-term hydro scheduling from the principle of progressive optimality. *Water Resources Research*, 1981, 17(3): 481-486. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR017i003p00481> <https://doi.org/10.1029/WR017i003p00481>
- [4] LI, C. A., HSU, E., SVOBODA, A. J., TSENG, C. L. and JOHNSON, R. B. Hydro unit commitment in hydro-thermal optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, 12(2): 764-769. <http://ieeexplore.ieee.org/document/589675/> <https://doi.org/10.1109/59.589675>
- [5] SHAWWASH, Z. K., SIU, T. K. and RUSSELL, S. O. D. The BC hydro short term hydro scheduling optimization model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(3): 1125-1131. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/779402/> <https://doi.org/10.1109/59.871743>
- [6] CATALAO, J. P. S., POUSINHO, H. M. I. and MENDES, V. M. F. Mixed-integer nonlinear programming approach for short-term hydro scheduling. *IEEE Latin America Transactions*, 2010, 8(6): 658-663. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5688092/> <https://doi.org/10.1109/TLA.2010.5688092>
- [7] CHANG, G. W., AGANAGIC, M., WAIGHT, J. G., et al. Experiences with mixed integer linear programming based approaches on short-term hydro scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2001, 16(4): 743-749. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/962421/>
- [8] 依俊楠, 龚英, 刘攀. 基于混合整数线性规划的梯级水电站短期优化调度[J]. *水力发电*, 2013, 39(10): 69-72. YI Junjie, GONG Ying and LIU Pan. Optimal short-term hydro scheduling for cascade hydropower stations based on MILP. *Water Power*, 2013, 39(10): 69-72. (in Chinese)
- [9] WU, Y. G., HO, C. Y. and WANG, D. Y. A diploid genetic approach to short-term scheduling of hydro-thermal system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(4): 1268-1274. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/898100/>
- [10] AMJADY, N., SOLEYMANPOUR, H. R. Daily hydrothermal generation scheduling by a new modified adaptive particle

- swarm optimization technique. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(6): 723-732.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877960900282X>
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.11.004>
- [11] 王金文, 范习辉, 张勇传, 等. 大规模水电系统短期调峰电量最大模型及其求解[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(15): 29-34.
WANG Jinwen, FAN Xihui, ZHANG Yongchuan, et al. Short-term generation scheduling for the peak-energy maximization of large-scale hydropower systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(15): 29-34. (in Chinese)
- [12] GUAN, X. H., NI, E., LI, R. H. and LUH, P. B. An optimization-based algorithm for scheduling hydrothermal power systems with cascaded reservoirs and discrete hydro constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, 12(4): 1775-1780.
<http://ieeexplore.ieee.org/document/627890/>
- [13] 唐新华, 周建军. 梯级水电群联合调峰调能数学模型[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(4): 38-45.
TANG Xinhua, ZHOU Jianjun. Peak-load and intermittent power regulations by cascade hydropower-models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 32(4): 38-45. (in Chinese)
- [14] 郭富强, 郭生练, 刘攀, 等. 清江梯级水电站实时负荷分配模型研究[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(1): 5-11.
GUO Fuqiang, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Real-time load distribution models for the Qingjiang cascade hydropower plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 30(1): 5-11. (in Chinese)
- [15] 陶湘明, 陈森林, 董建凡. 水电站日典型负荷过程研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(6): 184-186.
TAO Xiangming, CHEN Senlin and DONG Jianfan. Derivation of typical daily load process in hydropower stations. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(6): 184-186. (in Chinese)
- [16] 武新宇, 程春田, 申建建, 等. 大规模水电站群短期优化调度方法III: 多电网调峰问题[J]. *水利学报*, 2012, 43(1): 31-42.
WU Xinyu, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Short-term optimal operation methods of large-scale hydropower plants III: Solution method of peak load regulation for multiple power grid. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(1): 31-42. (in Chinese)
- [17] WU, X. Y., CHENG, C. T., SHEN, J. J., LUO, B., LIAO, S. L. and LI, G. A multi-objective short term hydropower scheduling model for peak shaving. *Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 68: 278-293.
- [18] CHENG, C. T., SHEN, J. J. and WU, X. Y. Short-term scheduling for large-scale cascaded hydropower systems with multivibration zones of high head. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2012, 138(3): 257-267.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000174](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000174)