大型梯级水电站群调度混合非线性优化方法

申建建, 程春田*, 程雄, 武新宇

大连理工大学水电与水信息研究所, 大连 116024

* E-mail: ctcheng@dlut.edu.cn

收稿日期: 2013-11-28; 接受日期: 2013-12-20

国家自然科学基金(批准号: 51209031)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2013CB035906)和中国博士后科学基金(批准号: 2013T60284)资助项目

摘要 针对复杂空间耦合约束下大型梯级水电站群调度问题, 提出一种混合非线性优化方法. 该方法引入出力-流量转换因子松弛水电系统出力限制, 进而将复杂非线性优化问题转化为一系列标准二次规划子问题; 混合逐步优化与二次规划方法进行问题求解, 围绕前者优化结果确定后者的线性可行搜索空间, 在搜索过程中依据系统出力越限幅度动态更新转换因子, 修正二次规划问题的约束边界条件, 通过交替进行二次规划问题求解和转换因子更新以获取原问题最优解或满意解. 红水河干流梯级仿真调度实例表明, 混合非线性优化方法能够大幅提高梯级水电系统的枯水期平均出力, 得到较逐步优化方法更高的发电效益, 是一种切实可行可用方法.

关键词

梯级水电站群
优化调度
非线性优化
二次规划
逐步优化

1 引言

经过 20 多年的流域梯级滚动开发, 中国已经形成大型梯级水电系统格局^[1,2], 特别是在西南地区, 红水河、乌江等干流梯级已基本开发完成, 澜沧江、金沙江、大渡河、雅砻江等特大流域梯级也进入了集中投产和建设全面展开阶段^[3,4]. 这些大型梯级水电系统大多安装有巨型发电机组, 单站装机容量和梯级装机容量都很大, 且具有多座控制性水库, 梯级调节能力非常强, 在水电和电网调度运行中能够发挥非常重要的水力和电力补偿作用, 但同时也面临比以往小规模梯级水电站群更加复杂的互联运行条件. 现阶段, 梯级电站、机组不仅存在时间和空间维度的水力联系, 在电力上也需要考虑枯期与汛期、高峰与低谷、以及与火电等其他电源协调运行的复杂边界条

件, 再加之巨型电站和机组自身更高的安稳控制要求和限制条件, 进一步加剧了梯级水电系统调度运行难度^[5], 亟需可应用于工程实际的模型及求解方法.

从数学角度来看, 水电系统调度是典型的高维、非线性优化问题^[6], 目前国内外还没有通用的非线性优化方法直接高效求解这样复杂的数学优化模型, 而通常依赖于商业数学软件求解的混合整数优化建模方法^[7,8]则难以跟踪电网和流域日常运行中的动态变化条件和需求, 新电站或机组投产一般需要做大量的建模准备工作, 编制特定格式的求解文件, 整个计算过程也不透明, 这些都给模型调试和实际应用带来很大困难. 所以, 从工程实践角度出发, 利用降维和成熟的解析式算法简化大规模复杂水电系统优化问题^[9], 降低问题求解难度, 以快速获得满意的工

引用格式: 申建建, 程春田, 程雄, 等. 大型梯级水电站群调度混合非线性优化方法. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 306–314
Shen J J, Cheng C T, Cheng X, et al. A hybrid nonlinear optimization method for operation of large-scale cascaded hydropower plants (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 306–314, doi: 10.1360/092013-1195

程实用结果,是可行且非常有必要的^[10-14].在简化求解过程中,如何准确考虑水电站水库复杂非线性因素、以及高效处理系统约束的边界条件是优化方法是否有效可用的关键,也是问题求解难点.

本文考虑梯级水电站非线性关系和系统空间耦合约束,建立了长期水电优化调度非线性规划模型.一方面,在精度范围内应用线性化方法对模型中的非线性关系进行了近似处理,并针对模型中的水电系统出力限制,引入出力-流量转换因子,将复杂非线性优化问题转化为一组标准二次规划子问题.另一方面,混合逐步优化与二次规划方法进行问题求解,围绕前者优化结果确定后者的可行决策空间,获得各电站在不同时段的线性搜索范围,以便直接应用成熟二次规划算法获取子问题优化解;在搜索求解过程中,依据系统出力越限幅度动态更新转换因子,修正子问题的约束边界条件,通过交替进行二次规划问题求解和转换因子更新以获取原问题最优解或满意解.所提混合非线性优化方法在红水河干流梯级水电系统得到了仿真实验验证,结果显示梯级发电效益和枯期平均出力均实现了不同程度改善.

2 问题描述

本文采用水电优化调度中最为常用的发电量最大目标^[15],旨在通过梯级水电站群的补偿调节作用,最大程度地实现水能资源的发电效益.为使该目标的优化结果能真正应用于工程实际,文中在考虑电站运行约束的同时,也兼顾了梯级水电系统的出力限制约束,以切实满足电网的实际运行要求.

目标函数可以表示为

$$\max F = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M p_{m,t} \times \Delta_t, \quad (1)$$

其中 t , T 为调度时段编号和总数; m , M 为水电站水库编号和总数; $p_{m,t}$ 为 m 号水电站在时段 t 的平均出力,单位 MW. Δ_t 为 t 时段小时数.

约束条件包括以下几方面.

1) 水量平衡方程

保证单站时间维以及上下游电站空间维上的水量平衡,见下式:

$$V_{m,t+1} = V_{m,t} + 3600 \times (Q_{m,t} - q_{m,t} - Ql_{m,t}) \Delta_t. \quad (2)$$

其中 $V_{m,t}$ 为 m 号电站在时段 t 的库容,单位 m^3 ; $Q_{m,t}$

为 m 号电站在时段 t 的入库流量,单位 m^3/s ,

$Q_{m,t} = Qn_{m,t} + \sum_{k=1}^{Ku} (q_{k,t} + Ql_{k,t})$; $Qn_{m,t}$ 为 m 号电站在时段 t 的区间流量,单位 m^3/s ; Ku 为 m 号电站直接上游电站的总个数; $q_{m,t}$ 为 m 号电站在时段 t 的发电流量,单位 m^3/s ; $Ql_{m,t}$ 为 m 号电站在时段 t 的弃水流量,单位 m^3/s .

2) 单站控制目标需求

是电站在调度运行期的期望目标,在长期调度中,一般设定调度期的期末水位,见下式:

$$Z_{m,T} = Z'_{m,T}, \quad (3)$$

其中 $Z_{m,T}$, $Z'_{m,T}$ 分别为 m 号电站在时段 T 的计算期末水位和给定的期末水位需求,单位 m.

3) 发电流量约束

一般考虑上限限制,取决于水轮机的最大过流能力、机组检修计划等因素,见下式:

$$q_{m,t} \leq \bar{q}_{m,t}, \quad (4)$$

其中 $\bar{q}_{m,t}$ 为 m 号电站在时段 t 的发电流量上限,单位 m^3/s .

4) 出库流量约束

在发电调度中一般考虑下限,是满足下游航运、灌溉、生态用水等特殊需求的基本下泄流量要求,见下式:

$$\underline{S}_{m,t} \leq S_{m,t}, \quad (5)$$

其中 $S_{m,t}$, $\underline{S}_{m,t}$ 分别为 m 号电站在时段 t 的出库流量及其下限,单位 m^3/s .

5) 库水位约束

保证水库运行在安全合理的水位范围,见下式:

$$\underline{Z}_{m,t} \leq Z_{m,t} \leq \bar{Z}_{m,t}, \quad (6)$$

其中 $Z_{m,t}$, $\bar{Z}_{m,t}$, $\underline{Z}_{m,t}$ 分别为 m 号电站在时段 t 的上游水位及其上下限,单位 m.

6) 电站出力约束

限制电站的发电出力,取决于机组检修容量及其他特殊需求,见下式:

$$\underline{p}_{m,t} \leq p_{m,t} \leq \bar{p}_{m,t}, \quad (7)$$

其中 $\bar{p}_{m,t}$, $\underline{p}_{m,t}$ 分别为 m 号电站在时段 t 的平均出力上下限,单位 MW.

7) 水电系统出力限制约束

限制梯级水电站群的总出力, 取决于电网的安稳运行要求, 一般参考其他电源的发电状况来确定, 见下式:

$$\underline{N}_t \leq \sum_{m=1}^M p_{m,t} \leq \overline{N}_t, \quad (8)$$

其中 $\overline{N}_t$, $\underline{N}_t$ 分别为水电系统在时段 t 的出力上限与下限, 单位 MW.

3 求解方法

显然, 以(1)式为目标函数和(2)~(8)式为约束的水电站群优化调度问题构成了非常复杂的非线性规划模型, 在现有技术水平下, 采用非线性规划方法直接优化该模型获取最优解的难度很大, 甚至可能无法收敛. 为此, 需要对非线性规划模型做适当简化, 一般的做法是, 通过对耦合约束松弛和非线性因素线性化, 将原问题简化为易于求解的系列简单子问题, 并采用迭代求解方式逐步逼近原问题最优解. 本文基于这种思想, 将原非线性规划问题转化为一系列二次规划(QP)^[16-19]子问题进行迭代求解, 这样既可以保证非线性发电函数精度, 同时可利用现有算法求解 QP 问题以收敛到全局或局部最优解. 从数学角度讲, QP 是指在决策变量的线性等式和不等式约束下, 求二次目标函数的极小值问题, 所以下文结合水电调度问题特点, 给出了详细的二次规划模型转换过程.

3.1 二次规划模型

通过分析目标函数与约束条件特性可知, 原梯级水电调度问题是典型的多变量多约束优化问题, 可以选择水库的库水位和弃水流量, 以及水电站的发电流量作为问题求解中的主要优化变量, 以避免模型标准化带来复杂的约束转换计算, 这样原问题就可以看作是求 $3 \times M \times T$ 个决策变量 $Z_{1,1}, Z_{1,2}, \dots, Z_{1,T}, q_{1,1}, q_{1,2}, \dots, q_{1,T}, Ql_{1,1}, Ql_{1,2}, \dots, Ql_{1,T}, Z_{2,1}, Z_{2,2}, \dots, Z_{2,T}, q_{2,1}, q_{2,2}, \dots, q_{2,T}, Ql_{2,1}, Ql_{2,2}, \dots, Ql_{2,T}, \dots, Z_{M,1}, Z_{M,2}, \dots, Z_{M,T}, q_{M,1}, q_{M,2}, \dots, q_{M,T}, Ql_{M,1}, Ql_{M,2}, \dots, Ql_{M,T}$ 的发电量最大问题. 很明显, (3)~(6)式均为决策变量的线性等式或不等式约束, 其中(5)式可写成 $\underline{S}_{m,t} \leq q_{m,t} + Ql_{m,t}$; 而(1), (2), (7)和(8)式则为决策变量的复杂非线性关

系, 需要通过合理简化, 将其分别表示为决策变量的二次函数, 以及线性等式和不等式约束. 为此, 下文首先对水位-库容、尾水位-出库流量、水头损失-发电流量、水头-耗水率等水电系统中的非线性关系进行近似线性化处理, 以便进行模型转换.

对于 m 号水库, 在任一时段 t 的末库容可近似为库水位的一元函数, 同时为避免直接线性化造成水位-库容关系与实际产生较大偏差, 本文应用分段线性方法, 以减小线性化误差, 满足实用要求, 对于任一段区间 k , 库容与水位关系式为

$$V_{m,t} = a_{m,1}^k \times Z_{m,t} + a_{m,2}^k. \quad (9)$$

对于 m 号电站, 在任一时段 t 的尾水位可近似为发电流量和弃水流量的二元函数, 见下式:

$$Zd_{m,t} = b_{m,1} \times S_{m,t} + b_{m,2} = b_{m,1} \times (q_{m,t} + Ql_{m,t}) + b_{m,2}. \quad (10)$$

对于 m 号电站, 在任一时段 t 的水头损失可近似为发电流量的一元函数, 见下式:

$$Hl_{m,t} = c_{m,1} \times q_{m,t} + c_{m,2}. \quad (11)$$

所以 m 号电站在任一时段 t 的发电净水头为

$$\begin{aligned} H_{m,t} &= \frac{Z_{m,t-1} + Z_{m,t}}{2} - Zd_{m,t} - Hl_{m,t} \\ &= \frac{Z_{m,t-1}}{2} + \frac{Z_{m,t}}{2} - (b_{m,1} + c_{m,1})q_{m,t} - b_{m,1}Ql_{m,t} \\ &\quad - (b_{m,2} + c_{m,2}), \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $a_{m,1}^k$, $a_{m,2}^k$, $b_{m,1}$, $b_{m,2}$, $c_{m,1}$, $c_{m,2}$ 均为常量; $Zd_{m,t}$ 为 m 号电站在时段 t 的尾水位, 单位 m; $Hl_{m,t}$ 为 m 号电站在时段 t 的水头损失, 单位 m; $H_{m,t}$ 为 m 号电站在时段 t 的发电净水头, 单位 m.

基于上述简化, 原目标函数(1)式可等效转换为决策变量的二次函数, 见下式:

$$\begin{aligned} \min F' &= \\ &= -\sum_{t=1}^T \Delta_t \sum_{m=1}^M A_m \left[\frac{Z_{m,t-1}q_{m,t} + Z_{m,t}q_{m,t}}{2} - (b_{m,1} + c_{m,1})q_{m,t}^2 \right. \\ &\quad \left. - b_{m,1}q_{m,t}Ql_{m,t} - (b_{m,2} + c_{m,2})q_{m,t} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

依据(9)式可以将水量平衡方程(2)式等效转换为决策变量的线性等式约束, 见下式:

$$\begin{aligned} &a_{m,1}^{k1} \times Z_{m,t+1} + a_{m,2}^{k1} - (a_{m,1}^{k2} \times Z_{m,t} + a_{m,2}^{k2}) \\ &= 3600 \times (Q_{m,t} - q_{m,t} - Ql_{m,t}) \Delta_t, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $k1, k2$ 为水位-库容关系曲线的分段标号.

对于 m 号电站, 在任一时段 t 的发电耗水率可近似为发电净水头的一元函数, 见下式:

$$r_{m,t} = d_{m,1} \times H_{m,t} + d_{m,2}, \quad (15)$$

其中 $r_{m,t}$ 为 m 号电站在时段 t 的发电耗水率, 单位 m^3/kWh ; $d_{m,1}, d_{m,2}$ 均为常量.

依据电站出力的耗水率计算方式, 即:

$$p_{m,t} = \frac{q_{m,t}}{r_{m,t}} \times 3.6.$$

并结合(15)式可以将电站出力上限等效转换为决策变量的线性不等式约束, 见(16)式. 需要注意, 在优化计算中主要按照出力系数确定水电站出力, 所以为保证两种方式的一致性, 本文在计算前对耗水率计算方式进行了合理修正.

$$-\frac{d_{m,1}Z_{m,t-1}}{2} - \frac{d_{m,1}Z_{m,t}}{2} + \left(d_{m,1}(b_{m,1} + c_{m,1}) + \frac{3.6}{p_{m,t}} \right) q_{m,t} + d_{m,1}b_{m,1}Ql_{m,t} \leq d_{m,2} - d_{m,1}(b_{m,2} + c_{m,2}). \quad (16)$$

同理, 可将电站出力下限等效转换为

$$\frac{d_{m,1}Z_{m,t-1}}{2} + \frac{d_{m,1}Z_{m,t}}{2} - \left(d_{m,1}(b_{m,1} + c_{m,1}) + \frac{3.6}{p_{m,t}} \right) q_{m,t} - d_{m,1}b_{m,1}Ql_{m,t} \leq d_{m,1}(b_{m,2} + c_{m,2}) - d_{m,2}. \quad (17)$$

对于梯级水电系统出力限制, 按前述出力计算方式难以直接将其合理转换为线性不等式约束, 鉴

于电站出力可以看作是发电流量的函数, 所以本文引入出力-流量转换因子 $\{\lambda_{1t}\}$ 与 $\{\lambda_{2t}\}$, 将系统出力限制描述为等效的发电流量限制约束, 见(18)式, 其中任一时段的 λ_{1t} 与 λ_{2t} 均为动态变化值, 需要根据计算结果进行动态更新.

$$\lambda_{1t} \underline{N}_t \leq \sum_{m=1}^M q_{m,t} \leq \lambda_{2t} \overline{N}_t. \quad (18)$$

以上述转换因子为基础, 原非线性规划问题就变成由二次目标函数(13)式与线性等式和不等式约束(3)~(6), (14), (16)~(18)式构成的标准二次规划问题, 其目标函数(一般形式为 $\min Z = \frac{1}{2} X^T H X + c^T X$)的 H 阵是 $3 \times T \times M$ 阶对称阵, 此矩阵的正定特性受电站出力系数、尾水位函数系数、水头损失函数系数、时段小时数等变量影响, 与计算过程中的搜索范围有关, 当为正定或半正定阵时, 该问题的任一局部最优解即为全局最优解.

3.2 模型求解

上述模型求解过程分两步完成, 总体求解框架见图 1.

第 1 步 采用逐步优化算法求解本文问题, 生成

图 1 混合非线性方法总体求解框架

二次规划模型的初始解, 并围绕该初始解确定可行决策空间, 获得各电站水位、流量在不同时段的线性搜索区间, 以便于直接采用二次规划方法求解. 逐步优化方法在水电站群优化调度的应用求解过程可参见文献[20,21], 此处不再赘述.

第 2 步 应用成熟的二次规划算法求解二次规划问题. 对于(18)式中的出力-流量转换因子, 在求解过程中, 需要预先设定初始值, 以便于求解标准二次规划问题, 并依据最优化结果中各时段系统出力是否违反系统出力限制约束、以及破坏程度, 动态更新 $\{\lambda_1\}$ 与 $\{\lambda_2\}$, 交替进行二次规划问题求解与转换因子更新, 直至收敛于问题最优解或满意解. 详细求解步骤如下.

1) 初设出力-流量转换因子. 对于任一时段 t , λ_1 与 λ_2 的初始值可分别设置为

$$\lambda_2 = \sum_{m=1}^M \bar{q}_{m,t} / \bar{N}_t, \quad t=1,2,\dots,T, \quad (19)$$

$$\lambda_1 = \sum_{m=1}^M \underline{q}_{m,t} / \underline{N}_t, \quad t=1,2,\dots,T. \quad (20)$$

2) 将 $n(n=1, 2, 3, \dots)$ 作为当前二次规划问题的编号, 并初设 $n=1$.

3) 利用二次规划算法求解问题 n , 获取优化解, 并计算各水电站的出力过程; 逐时段判断系统总出力是否满足给定的出力限制约束, 若是, 说明问题 n 的优化结果是原问题的可行解, 转至步骤 4); 否则, 跳至步骤 6).

4) 判断目标值是否改进, 若是, 转至步骤 5); 否则, 跳至步骤 7).

5) 根据优化得到的系统平均发电耗水率 R_t 估算发电流量边界值 $\bar{q}'_t$ 和 $\underline{q}'_t$, 并与当前转换因子下的 $\bar{q}_t$ 和 $\underline{q}_t$ 逐时段对比, 确定出 $\max \left\{ \left| \bar{q}'_t - \bar{q}_t \right|, \left| \underline{q}'_t - \underline{q}_t \right| \right\}$ 对应的时段 t' , 记 $\Delta q_{t'}$ 为最大差值, 并按(21)和(22)式更新该时段 λ_1 和 λ_2 , 令 $n=n+1$, 跳至步骤 3),

$$\lambda_2' = \lambda_2 + \Delta q_{t'} / \bar{N}_{t'}, \quad (21)$$

$$\lambda_1' = \lambda_1 - \Delta q_{t'} / \underline{N}_{t'}. \quad (22)$$

6) 对于任一时段 t , 若 $\sum_{m=1}^M p_{m,t} > \bar{N}_t$, 则 λ_2 按式

(23)更新; 若 $\sum_{m=1}^M p_{m,t} < \underline{N}_t$, 则 λ_1 按(24)式更新; 令 $n=n+1$, 跳至步骤 3),

$$\lambda_2' = \lambda_2 - \left(\sum_{m=1}^M p_{m,t} / \bar{N}_t - 1 \right) R_t / 3.6, \quad (23)$$

$$\lambda_1' = \lambda_1 + \left(1 - \sum_{m=1}^M p_{m,t} / \underline{N}_t \right) R_t / 3.6, \quad (24)$$

其中 R_t 为时段 t 的系统平均发电耗水率.

7) 令 $\Delta q_{t'} = k \times \Delta q_{t'}$, 其中 k 为缩减因子, $0 < k < 1$, 判断 $\Delta q_{t'}$ 是否大于给定的最小流量步长精度, 若是, 按(21)和(22)式更新 t' 时段 λ_1 和 λ_2 , 令 $n=n+1$, 跳至步骤 3); 否则, 计算终止, 输出最优调度结果.

4 实例分析

4.1 工程背景

红水河是珠江流域西江水系的上游, 是我国开发较早的大型流域梯级, 其干流规划 10 级电站(见图 2), 有 3 座控制性水库, 均具有年调节能力, 其主要参数见表 1. 由于 3 座水库位于流域中上游, 故选取中上游天一至岩滩 5 座主要水电站作为研究对象, 通过解决梯级水电站群的平水年调度运行问题, 对提出的非线性优化方法进行仿真验证, 并根据优化计算结果, 对模型的实用性、求解方法的效率和收敛性进行重点分析和探讨.

另一方面, 通过对各水电站水库的水位-库容关系曲线分析可知, 天一、龙滩水库在正常运行范围内

图 2 红水河干流梯级水电站群拓扑结构图

表 1 主要水电站的特征参数

电站名称	正常高水位 (m)	死水位 (m)	装机 (MW)	调节性能
天一	780.00	731.00	4×300	不完全多年调节
天二	645.00	637.00	6×220	日调节
平班	440.00	437.50	3×135	日调节
龙滩	375.00	330.00	7×700	年调节
岩滩	223.00	212.00	4×302.5	年调节

直接线性化会产生较大误差, 需要分段线性, 此例线性化误差选取 1%以内.

4.2 计算结果及分析

采用 java 编制了混合非线性优化方法的求解程序, 并在双核 2.66 GHz 客户端 PC 机上完成算例测试, 其中缩减因子 k 取值 0.8(详细分析见下文). 为验证梯级水电出力限制约束对模型结果的影响, 文中给出了 4 个具有不同水电出力限制大小的仿真方案, 各方案的系统出力结果和主要统计信息分别见图 3 和表 2, 主要水电站的优化结果见图 4(方案 4 结果). 从图 4 可以看出, 各控制性水库运行过程合理, 天一汛前基本消落至死水位以腾库蓄洪; 通过龙滩调节, 岩滩电站全年一直维持高水位运行, 增大了发电水头, 减小了发电耗水率. 从图 3 和表 2 分析, 尽管系统出力限制的考虑及其下限的不断增大, 使得系统总发电量有所减小, 如出力下限最大的方案 4 较无出力限制方案 1 全年减发 1.14 亿 kWh, 约 0.29%, 但全年单月最小出力值得到了大幅提升, 其中方案 4 较方案 1 的最小出力增加了 15.7%; 具体到枯水期月份, 其出力提高更为明显, 如 1 和 2 月份的最小出力提高了约 972 MW, 达到 32.1%. 这种结果表明, 通过引入适当的梯级出力限制约束, 可以有效解决以往发电量最大目标优化结果因枯水期部分月份电量分配较少而难以应用于电网实际的问题, 有效均衡了全年水电电量, 有利于进一步开展水电与其他能源形式电站的联合补偿调度.

选取 3 种不同频率(25%, 50%, 75%)来水的典型年, 采用本文方法与逐步优化方法分别求解上述方案 4 和 1 两种有无系统出力限制条件的典型年调度问题, 并作详细分析. 表 3 给出了两种方法的优化结果, 其中枯水年来水较小, 无法满足方案 4 的系统出力下限要求, 故不考虑这种情况.

图 3 不同方案的优化结果

(a) 方案 1 (无系统出力限制); (b) 方案 2; (c) 方案 3; (d) 方案 4

表 2 各方案结果统计

名称	发电量 (亿 kWh)	全年最小出力 (MW)	1~2 月最小出力 (MW)
方案 1	396.96	3028	3028
方案 2	396.52	3500	3500
方案 3	396.15	3506	3800
方案 4	395.82	3504	4000

从 3 种典型年不同调度方案的优化结果可以直观看出, 混合非线性优化方法给出了较逐步优化方法更好结果. 当不考虑系统出力限制时, 混合非线性优化方法在丰、平、枯 3 种典型年来水条件下, 均实现了不同程度的增发电量, 年均增发电量为 5.91 亿 kWh; 考虑系统出力限制时, 在丰水年和平水年两种

图4 主要水电站水库优化结果(方案4)
(a) 天一水电站; (b) 龙滩水电站; (c) 岩滩水电站

表3 本文方法与逐步优化的计算结果对比

来水条件	方法名称	方案4		方案1	
		发电量 (亿 kWh)	计算时间 (s)	发电量 (亿 kWh)	计算时 间(s)
丰水年	本文方法	450.96	31	469.28	9
	逐步优化	445.37	11	462.14	5
平水年	本文方法	395.82	28	398.75	8
	逐步优化	390.57	10	392.86	4
枯水年	本文方法	—	—	351.91	8
	逐步优化	—	—	347.20	4

情况下平均增发电量为5.42亿kWh; 总体而言, 两种方案都有显著的增发电效益, 说明本文混合非线性优化方法总体上具有更强的搜索能力, 能给出更高的结果精度. 可以从两个方面进行分析解释: 1) 采用逐步优化方法的计算结果作为初始解, 并确定可行搜索空间, 在一定程度上改善了混合非线性优化方法的搜索效率和结果质量; 2) 混合非线性优化方法将原问题转化为一系列二次规划子问题进行迭代求解, 并采用现有成熟算法优化这些子问题, 实现了整个调度期多维多阶段全局搜索, 有效避免了逐步优化算法两阶段搜索方式易过早陷入局部最优的缺点. 从计算时间来看, 考虑系统出力限制约束会降低算法的搜索效率, 这种情况下获得可行优化解需要更多的搜索迭代次数, 两种方法均是如此; 与逐步优化相比, 本文方法尽管耗时相对较长, 但能够满足实际工程的时效性要求.

进一步分析非线性方法的收敛性, 以方案4为例, 重点探讨参数 k . 从图5可以看出, 随着 k 值的增大, 发电量不断增大, 即反映出搜索精度越高, 所求结果越接近于全局最优; 在 $k>0.8$ 后, 目标增幅明显减缓, 但迭代收敛次数增幅加大, 尤其当 k 取值为0.95时, 迭代次数达到126次, 收敛时间也会随之大幅增加. 所以, 在算法应用中, 应该根据实际需求设置合理的参数, 以在计算时间允许的范围内, 尽可能改善优化计算的结果.

5 结语

随着我国西南特大流域水电基地进入全面建设和投产运行阶段, 迫切需要更加高效的优化调度方法以指导梯级水电站群科学、高效、合理运行和最大化水能资源发电效益. 本文针对大型梯级水电站群

图 5 不同 k 值下的发电量(a)和算法迭代次数(b)

调度运行难题,给出了一种实用的混合非线性优化方法,并将其应用于红水河干流梯级水电站群,通过仿真分析,获得如下结论。

1) 在以发电量最大为优化目标的水电调度模型中考虑合理的梯级出力限制,可以有效协调水力与电力需求,增强水调优化结果在电网调度中的实用性,显著提高大水电比重电网在枯水期的电力供应能力。

2) 通过引入出力-流量转换因子,可以将复杂水电系统优化调度问题分解为一系列标准二次规划子问题,便于采用标准计算程序获取子问题优化解,进而改善原问题优化结果质量。

3) 本文混合非线性优化方法便于考虑动态变化的电网和流域运行控制条件,可以为特大流域工程实际提供重要参考和应用。

参考文献

- Cheng C T, Shen J J, Wu X Y. Operation challenges for fast-growing China's hydropower systems and response to energy saving and emission reduction. *Renew Sust Energ Rev*, 2012, 16: 2386–2393
- Huang H L, Zheng Y. Present situation and future prospect of hydropower in China. *Renew Sust Energ Rev*, 2009, 13: 1652–1656
- 周婷, 纪昌明, 朱艳霞, 等. 基于支持向量机的梯级水电站群中长期调度计划制定及评价. *电力系统自动化*, 2013, 37: 56–61
- 梅亚东, 杨娜, 翟丽妮. 雅砻江下游梯级水库生态友好型优化调度. *水科学进展*, 2009, 20: 721–725
- 程春田, 武新宇, 申建建, 等. 大规模水电站群短期优化调度方法 I: 总体概述. *水利学报*, 2011, 42: 1017–1024
- Labadie J W. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *J Water Res Pl-ASCE*, 2004, 130: 93–111
- Barros M T L, Tsai F T C, Yang S L, et al. Optimization of large-scale hydropower system operations. *J Water Res Pl-ASCE*, 2003, 129: 178–188
- Catalão J P S, Pousinho H M I, Mendes V M F. Scheduling of head-dependent cascaded hydro systems: Mixed-integer quadratic programming approach. *Energ Convers Manage*, 2010, 51: 524–530
- 程春田, 申建建, 武新宇, 等. 大规模复杂水电优化调度系统的实用化求解策略及方法. *水利学报*, 2012, 43: 85–795
- 畅建霞, 黄强, 王义民, 等. 黄河流域水库群多目标运行控制协同方法研究. *中国科学: 技术科学*, 2004, 34: 175–184
- 高仕春, 万飏, 梅亚东, 等. 三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度研究. *水利学报*, 2006, 37: 504–508
- 陈森林. 水电站水库运行与调度. 北京: 中国电力出版社, 2008
- 马超. 耦合航运要求的三峡-葛洲坝梯级水电站短期调度快速优化决策. *系统工程理论与实践*, 2013, 33: 1345–1350
- 刘攀, 郭生练, 张文选, 等. 梯级水库群联合优化调度函数研究. *水科学进展*, 2007, 18: 816–822
- 程春田, 郜晓亚, 武新宇, 等. 梯级水电站长期优化调度的粒度并行离散微分动态规划方法. *中国电机工程学报*, 2011, 30: 26–32
- Catalão J P S, Mariano S J P S, Mendes V M F, et al. Scheduling of head-sensitive cascaded hydro systems: A nonlinear approach. *IEEE T Power Syst*, 2009, 24: 337–346
- Miguel A, Marino H, Loaiciga A. Multireservoir operation planning via quadratic programming. *Energ Convers Manage*, 1985, 153: 231–240
- Sivasubramani S, Shanti S K. Hybrid DE–SQP algorithm for non-convex short term hydrothermal scheduling problem. *Sci Basis Water Resour Manag*, 2011, 52: 757–761
- Liang Q F, Johnson L E, Yu Y S. A comparison of two methods for multiobjective optimization for reservoir operation. *Water Resour Bull*, 1996, 32: 333–340
- Cheng C T, Shen J J, Wu X Y. Short-term scheduling for large-scale cascaded hydropower system with multi-vibration zones of high head. *J Water Res Pl-ASCE*, 2012, 138: 257–267
- Turgeon, A. Optimal short-term hydro scheduling from the principle of progressive optimality. *Water Resour Res*, 1981, 17: 481–486

A hybrid nonlinear optimization method for operation of large-scale cascaded hydropower plants

SHEN JianJian, CHENG ChunTian, CHENG Xiong & WU XinYu

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

This paper develops a hybrid nonlinear optimization method for solving long-term optimal operation of large-scale cascaded hydropower plants with complex spatial coupling constraints. This method proposes conversion factors relevant to generation and discharge in order to cope with complex nonlinear total generation limitation considered in the optimization problem. Thus, the original nonlinear optimization problem can be broken down into a sequence of standard quadratic programming sub-problems. A combination of progressive optimality algorithm (POA) and quadratic programming (QP) method is employed to optimize the operation of hydropower systems. The results obtained from POA are first chosen as the initial solution of QP, which also decide the feasible decision space. During the solution process, the previous conversion factors are dynamically updated depending on the destroying range of total generation limitation. The boundary values of these constraints are accordingly modified in the new QP model. Solving the QP problem and updating the convention factors are performed alternately until the optimal solution or satisfactory solution for original problem is obtained. The proposed hybrid nonlinear method is applied to scheduling Hongshui River cascaded hydropower plants. The simulation results show that our method can enhance the total power generation in dry season and produce more energy than POA.

cascaded hydropower plants, optimal operation, nonlinear optimization, quadratic programming (QP), progressive optimality

doi: 10.1360/092013-1195