

基于系统分解方法的梯级水电站优化调度

谢国新

国能长源十堰水电开发有限公司, 湖北十堰, 442000;

摘要: 梯级水电站作为一种重要的可再生能源发电方式, 具有调节水资源、发电和防洪等多重功能。由于其复杂的水文条件和多目标特性, 优化调度一直是水电工程领域的研究热点。基于此, 本文以竹溪县泉河流域梯级电站为例, 提出了基于系统分解方法的梯级水电站优化调度策略, 通过协调机制实现整体系统的最优性能。研究旨在为梯级水电站优化调度提供参考。

关键词: 系统分解; 梯级水电站; 水电站优化; 优化调度

Optimal Operation of Cascade Hydropower Stations Based on System Decomposition Method

XIE Guo-xin, WANG Si-yang

CHN Energy Changyuan Shiyan Hydropower Development CO., LTD, Hubei Shiyan, 442000;

Abstract: As an important renewable energy generation mode, Cascade Hydropower stations have multiple functions, such as water resources regulation, power generation and flood control. Due to its complex hydrological conditions and multi-objective characteristics, optimal dispatching has been a hot research topic in the field of Hydropower engineering. Based on this, taking Quanhe River cascade Hydropower station in Zhuxi County as an example, this paper proposes an optimal dispatching strategy of Cascade Hydropower Station based on system decomposition method, and realizes the optimal performance of the whole system through coordination mechanism. The purpose of this study is to provide reference for optimal operation of Cascade Hydropower stations.

Key words: System decomposition; Cascade Hydropower stations; Optimization of Hydropower station; Optimize scheduling

DOI: 10. 69979/3060-8767. 25. 10. 030

引言

泉河流域梯级水电站是在湖北十堰市竹溪县泉河流域上串联建设的 5 座水电站, 各电站之间存在电力联系、水力联系, 通过电网紧密相连, 实现电力的统一调度与分配, 更在物理上通过水流形成紧密的水力联系。龙头红岩一级水电站的发电量和泄水策略, 会直接影响下游各级水电站的入库水量、水头和发电潜力, 形成连锁反应。同时, 天然来水的季节性变化、水库的蓄放水能力、防洪灌溉等综合利用需求, 以及电力市场的实时变化, 均对梯级水电站的优化调度提出更高要求^[1]。这些因素相互交织, 使得梯级水电站的优化调度问题成为多变量、多约束、高度复杂且充满不确定性的系统工程。传统的优化调度方法往往难以在大规模、多约束的梯级水电系统中取得理想的效果^[2]。因此, 探索高效、智能的优化调度方法, 对于提升梯级水电站的运行效益和整体性能具有重要意义。

1 基于系统分解方法的梯级水电站优化调度

1.1 系统分解方法

在水电站调度中, 系统分解方法的应用主要体现在以下几个方面。首先, 通过系统分解, 可以简化问题的复杂性, 降低计算难度, 提高求解效率。其次, 系统分解方法可以实现各子系统的独立优化和协调运行^[3]。在梯级水电站调度中, 通过系统分解, 可针对每个水电站不同的运行特性、调度要求进行优化调度, 通过协调机制保证各水电站之间的协调运行, 避免资源浪费。通过系统分解, 可以针对实际运行中水资源状况和用电需求的变化, 灵活调整各子系统的调度方案, 及时响应变化。在大规模梯级水电站调度中, 通过系统分解可将调度问题分解为若干子问题, 利用多核集群或分布式计算资源进行并行求解, 提高计算效率和求解速度^[4]。

1.2 优化调度模型构建

探讨基于系统分解方法的梯级水电站优化调度时, 首先需构建优化调度模型。模型需考虑目标函数的设定, 约束条件的界定、决策变量的选择以及各子系统间的协调机制等多个方面。

1.2.1 目标函数

在中长期调度中,以梯级水电站发电量最大为优化目标,提高水电效益。仅考虑水电站间的水电计划编制,通过“以水定电”优化水资源利用,不考虑厂内机组间的精细化负荷分配。因此,水电站的发电流量、弃水流量、出力等均取调度时段内的期望均值,水电转换特性也为期望均值下的特性。目标函数描述为:最大化梯级水电站的发电量,以提高整体水电效益^[5]。因此,目标函数可以表示为各水电站发电量之和的最大值,具体如下:

$$\max E = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^J \eta_i \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中:

E 为调度周期内的总发电量 (亿 kWh);

T 为优化总时段数;

t 为时段变量;

J 为水电站总数;

i 为水电站的编号;

η_i 为水电站 (i) 的综合平均出力系数,反映水电站机组出力效率的参数;

η_i 为时段 t 水电站 i 的平均发电流量 (m^3/s),即用于发电的水量;

$H_{i,t}$ 为水电站 i 在时间 t 内的净水头 m ,即水流的势能差;

Δt 为单位时段,取 1 月 (按 30 天计算)。

1.2.2 决策变量

决策变量是指需要优化决策的参数,直接影响目标函数的值以及是否满足约束条件。基于系统分解方法的梯级水电站优化调度模型中,主要决策变量包括各水电站在每个调度时段内的发电流量 ($Q_{i,t}$)、弃水流量。实际应用中决策变量需根据系统分解的结果,针对每个子系统独立设定和优化。例如,可将每个水电站作为一个子系统,针对其特定的水力条件、发电能力和调度需求,独立确定其在各时段的发电流量,确保整个梯级系统的整体优化目标得以实现。

1.3 梯级水电站系统分解原则

梯级水电站系统的分解过程中,需遵循几个核心原则以确保分解的有效性和合理性。

(1) 水力联系原则。即分解时应保持各子系统之间必要的水力联系,确保上游水电站的出库水量能够合理、高效地传递给下游水电站^[6]。

(2) 调度需求相似性原则。将具有相似调度目标和需求的水电站归入同一子系统,有助于简化调度决策过程。再者,独立性原则要求各子系统在调度优化上应保持一定的独立性,以便进行并行处理,提高求解效率。

(3) 全局最优性原则。即分解后的子系统在独立优化的同时,应能通过有效的协调机制实现整个梯级系统的全局最优。

1.4 系统分解协调递阶模型

在梯级水电站优化调度中,构建系统分解协调递阶模型是实现复杂系统高效管理的关键。该模型通过将梯级水电站系统分解为多个相对独立而又相互关联的分区子系统,在各子系统间建立协调机制,以实现整体系统的优化调度。

1.4.1 分区子系统调度层

首先需根据梯级水电站的地理位置、水流联系、水库特性及调度需求等因素,将整个系统划分为若干个分区子系统。每个分区子系统包含若干个水电站,这些水电站之间具有紧密的水力联系和相似的调度需求。分区子系统调度层的水电调度根据来水丰枯变化,结合“保证出力”、“递增流量”和“不弃流量”三个元素,分别应对枯水期、平水期和丰水期。调度主要考虑保障枯水期供水需求和发电量,平水期满足供水需求并预泄腾库,丰水期减少弃水并实现汛末满蓄。对于每个分区子系统,可以构建如下调度模型:

$$\max E_k = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in S_k} \eta_{i,t} \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \cdot \Delta t \quad (2)$$

式中:

E_k 表示第 k 个分区子系统在调度周期;

T 内的总发电量;

S_k 表示第 k 个分区子系统内水电站的集合;

$\eta_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 、 $H_{i,t}$ 分别表示第 i 个水电站在时段 t 的综合平均出力系数、发电流量和净水头;

Δt 为时段长度。

该模型以分区子系统内的总发电量最大化为目标。在分区子系统调度层,每个子系统独立进行调度优化,求解各自的最优发电计划。然而,由于子系统之间存在水力联系、相互影响,因此需建立协调机制来平衡各子系统之间的调度需求。通常涉及到上级协调机构对子系统间关联变量的调优,以确保整个梯级水电站在全局范

围内的最优调度。

1.4.2 模型分解层

该层将复杂的优化问题进一步分解为多个易于处理的子问题，为这些子问题建立相互关联与协调的机制，确保整体系统优化性能。首先将梯级水电站的优化调度问题分解为多个子系统的优化问题，每个子系统对应一个或多个具有紧密水力联系的水电站。对于每个子系统，可以定义如下优化模型：

$$\begin{aligned} \max E_k &= \sum_{t=1}^T \sum_{i \in S_k} f_{i,t}(Q_{i,t}, H_{i,t}) \\ \text{s.t. } g_{i,t}(Q_{i,t}, H_{i,t}, V_{i,t}) &\leq 0, \quad \forall i \in S_k, \forall t \\ h_{k,t}(Q_{k,t}^{\text{in}}, Q_{k,t}^{\text{out}}) &= 0, \quad \forall t \end{aligned} \quad (3)$$

式中：

E_k 是子系统 k 的发电量目标；

$f_{i,t}$ 是水电站 i 在时段 t 的发电量函数，依赖于发电流量 $Q_{i,t}$ 、净水头 $H_{i,t}$ ；

$g_{i,t}$ 表示水电站 i 的约束条件，如水库水位 $V_{i,t}$ 、出力限制等；

$h_{k,t}$ 表示子系统 k 的输入输出水量平衡约束，其中 $Q_{k,t}^{\text{in}}$ 、 $Q_{k,t}^{\text{out}}$ 分别是子系统 k 在时段 t 的总入库水量和总出库水量。

1.4.3 系统协调层

系统协调层的主要任务是在满足各子系统独立优化结果的基础上，通过调整关联变量（如水量分配、水位控制等），使整个梯级水电站的运行达到全局最优。这一层通过建立协调优化模型来实现，该模型考虑了子系统间的水力联系、调度目标差异以及系统整体运行约束。系统协调层的优化模型可表示为：

$$\begin{aligned} \max \sum_{k=1}^K w_k E_k - C(x) \\ \text{s.t. } \sum_{i \in S_k} Q_{i,t}^{\text{out}} &= \sum_{j \in S_{k+1}} Q_{j,t}^{\text{in}}, \quad \forall k, \forall t \\ g^{\text{global}}(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中：

E_k 是第 k 个子系统的发电量（在子系统调度层优化得到）；

w_k 是子系统 k 的权重，反映不同子系统在全局优化中的重要性；

$C(x)$ 是协调过程中引入的惩罚函数或协调成本，

用于平衡子系统间的冲突；

x 是协调层的决策变量，可能包括各子系统间的水量分配、各水库的水位调整等；

S_k 和 S_{k+1} 分别表示相邻的两个子系统的水电站集合；第一个约束条件确保了子系统间水量的连续性和平衡；

$g^{\text{global}}(x)$ 表示系统全局的约束条件，如整个梯级系统的总蓄水量限制、下游河道的最小生态流量要求等。

基于系统分解的梯级水电站调度流程如图1所示

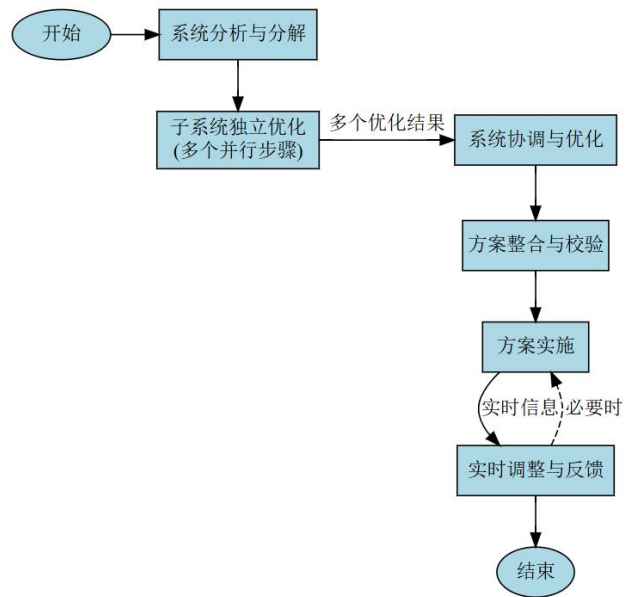


图1 基于系统分解的梯级水电站调度流程

2 算例分析

2.1 数据基础

为验证基于系统分解方法的梯级水电站优化调度策略的有效性，选取泉河流域的梯级水电站作为算例进行分析。该流域共有5个梯级水电站，分别为红岩一级电站（库容式、季调节）、红岩二级电站（径流式）、大峡电站（库容式、季调节）、龙滩电站（径流式）和白沙河电站（库容式、年调节）。假设水位离散步长为0.01m，优化调度时段 t 以月为单位，调度周期为一年（即12个月）。

2.2 优化结果分析

调度周期内，各水电站的出力均有所提高。第6个调度时段，红岩一级水电站的出力达到最大值12 MW，红岩二级水电站的出力为18 MW，大峡水电站的出力为21 MW，龙滩水电站的出力为14 MW，白沙河水电站的出

力为 50 MW, 表明优化调度策略能够有效利用水资源, 提高发电效益。各水电站的水位在调度周期内保持在合理范围内。例如, 第 6 个调度时段, 红岩一级水电站的水位达到最大值 715m, 红岩二级水电站的前池水位为 10m, 能通过发电控制水位, 大峡水电站的水位为 560 m, 龙滩水电站的水位为 7m, 能通过发电控制水位, 白沙河水电站的水位为 440m, 均未超过汛限水位, 表明通过合理的调度策略, 各水电站能够有效控制水位, 满足发电需求, 确保水库的安全运行。

2.3 系统分解调度与整体调度比较分析

为进一步验证系统分解方法的优越性, 将系统分解调度与整体调度进行比较分析。整体调度是指不进行系统分解, 直接对整个梯级水电站系统进行优化调度。

系统分解调度方式下总发电量 300 万 kW·h, 计算时间 120s; 整体调度方式下总发电量 280 万 kW·h, 计算时间 300s。可以看出, 系统分解调度在总发电量上优于整体调度, 同时计算时间显著减少, 表明系统分解方法在提高求解效率和优化效果方面具有明显优势。

3 结论

系统分解方法能有效简化梯级水电站优化调度问题, 将复杂整体问题分解为若干较小的子问题, 显著提高求解效率和优化效果。首先, 通过系统分解方法, 各子系统可以独立进行优化调度, 充分利用各自的水资源、发电潜力, 避免传统整体调度方法中可能出现的资源浪费。其次, 系统分解方法能够灵活应对水资源状况、用

电需求的变化, 通过协调机制实现各子系统之间的有效协同, 确保整体系统最优性能。算例分析结果显示, 基于系统分解方法的优化调度策略在提高各电站出力和控制水位变化方面具有显著优势。例如, 在调度周期内, 各水电站的出力均有所提高。同时, 各水电站的水位在调度周期内保持在合理范围内, 满足发电需求的同时确保水库的安全运行。

参考文献

- [1] 牛文静, 申建建, 冯仲恺, 等. 基于数据挖掘的梯级水电站群指令调度优化方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 66-73.
- [2] 郝永怀, 王海. 基于可变电价和流量传播系数的梯级水电站优化调度模型应用研究[J]. 黑龙江科技信息, 2017(11): 53-54.
- [3] 高新稳. 梯级水电站群长中短期多目标优化调度及系统设计研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2018.
- [4] 王兴壮, 唐强. 某水电站群优化调度模型大系统分解协调算法[J]. 水科学与工程技术, 2017(5): 78-82.
- [5] 曹辉. 乌江梯级水电站短期优化调度研究[J]. 水力发电, 2017, 43(11): 98-101, 112.
- [6] 谢敏萍, 魏新煦. 基于大系统逐步优化算法的梯级水电站优化调度[J]. 中国科技信息, 2020(5): 82-84.

作者简介: 谢国新(1981-), 男, 湖北谷城人, 工程师, 主要从事水电站运行管理工作。