

# 流域水电站群经济运行和优化调度系统设计研究

余 平

(二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 随着越来越多的流域水电站群采用集控中心进行远程监视和控制, 如何充分发挥集控中心在流域水库优化调度和电站经济运行中的作用, 提高水能资源利用率, 充分发挥流域综合经济效益已经成为一个重要课题, 本文介绍流域水电站群经济运行和优化调度系统的总体设计要求, 提出了优化调度准则和优化调度算法设计规划。

**关键词:** 流域水电站群; 优化调度; 监控系统; 经济运行

中图分类号: TP273.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2012)01-0008-05

## The Study on Economical Operation and Optimal Scheduling System of Hydroelectric Stations

YU Ping

(Ertan Hydropower Development Company, Ltd. Chengdu 610000 China)

**Abstract:** With the increasing number of hydropower stations use controlled center for remote monitor and control, how to play a role in basin reservoir optimization scheduling and power station economic operation, improve hydropower resources utilization, and full play basin integrated economic benefits has become an important research topic. This article introduces overall design requirement of hydropower station economic operation and optimal scheduling system, and describes optimal scheduling guidelines and optimization scheduling algorithm design planning.

**Key words:** hydroelectric stations; optimal scheduling; monitoring system; economic operation

### 1 引言

随着我国智能电网建设步伐的加快, 电网智能化水平不断提高, 国内越来越多的水电开发公司对流域梯级水电站群采用远方集中控制管理模式, 新的运行管理模式改变以往单一电站控制模式, 利用集控中心的流域电站经济运行和水电优化调度系统实现对流域电站的集中控制, 达到统筹利用资源、提高水能资源利用率, 充分发挥流域综合经济效益的目的。

流域水电站群经济运行和优化调度控制是一个涉及很多因素的复杂大系统优化问题, 很难整体求解, 应将该大系统问题分解为几个较简单的子系统问题分别求解以此来降低问题的复杂度。根据流域水电站优化调度控制问题的特点, 将其分为三个子系统

优化问题, 分别为流域水电站来水量预报问题、流域水电站中长期优化调度问题和流域水电站短期优化调度问题<sup>[1]</sup>。

### 2 系统结构

流域水情测报系统根据整个流域以往及当前来水情况、气象资料对流域水电站的来水量进行长、中、短期预报和实施修正, 为流域水电站优化调度决策提供基本水情信息。

流域水调自动化系统则根据水情测报系统预报的来水量, 考虑流域防洪、区间及下游综合用水要求、流域各电站的设计保证出力等因素, 进行流域水电站联合中长期发电优化调度及防洪优化调度。其主要目标是通过流域水电站合理的蓄放水次序, 提高流域水电站在

收稿日期: 2011-10-26

年内的保证出力和总发电量。

流域集控中心监控系统则根据流域水调自动化系统的中长期优化调度结果,考虑电力系统负荷平衡、频率控制要求、各水电站机组特性等众多因素,进行流域水电站联合短期优化调度和流域实时负荷分配,制定流域各电站所有机组的启停计划、并实时自动调整流域各电站、各机组的出力。其目标是在完成上级调度部门下达的负荷指令的同时,始终维持流域水电站在最小耗能状态<sup>[2]</sup>。

流域集控中心监控系统优化调度部分分为经济调度控制(EDC)和各水电站的自动发电控制(AGC)两部分<sup>[3]</sup>。

EDC 负责流域总负荷在各级水电站间的最优分配,主要考虑最优蓄放水次序、线路潮流约束、调度给定负荷的较小变动有可能导致机组的频繁启停、站间负荷分配时有可能造成负荷大规模转移、站间联合躲避机组振动区、站间负荷分配时应考虑机组开机时间等因素,在进行流域 EDC 负荷优化分配时,将各流域电站等效为一台等值机组进行计算;而 AGC 负责电厂总负荷在投入 AGC 的所有机组间的最优分配,主要考虑机组躲避振动区、最短开停机时间、机组启停顺序等因素。流域水电站经济运行和优化调度控制系统结构见图 1。

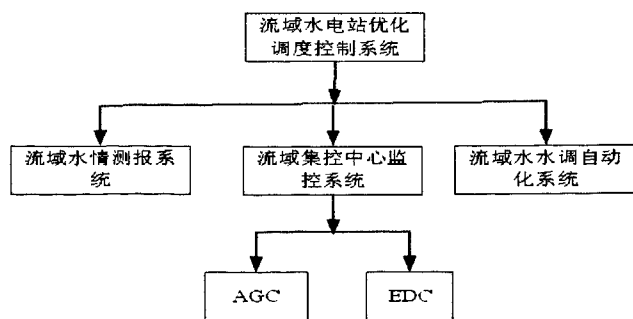


图1 流域电站经济运行和优化调度控制系统结构图

流域集控中心监控系统中针对流域的每个水电站都有一个 AGC 模块,负责远程对该水电站单独进行自动发电控制。当某水电站的 AGC 模块控制方式设为省调时,该水电站的 AGC 模块从四川省调接收负荷指令并自动对该水电站投入 AGC 的所有机组实施启停控制和负荷调整;当控制方式设为集控中心时,该 AGC 模块

从集控中心 EDC 模块接收负荷指令并自动对该水电站投入 AGC 的所有机组实施启停控制和负荷调整。这种双层的流域实时负荷分配结构使得流域水电站优化调度控制系统具备了适应多种调度方式、降低系统复杂程度、提高系统可靠性、分散计算量、提高响应速度等许多优点。此外,经济调度控制(EDC)模块还提供流域日最优发电方案计算功能,运用合理数学模型和先进优化算法计算出的最优发电方案为运行调度人员制定发电计划提供了良好的参考。流域集控中心监控系统 EDC 与 AGC 模块关系见图 2。

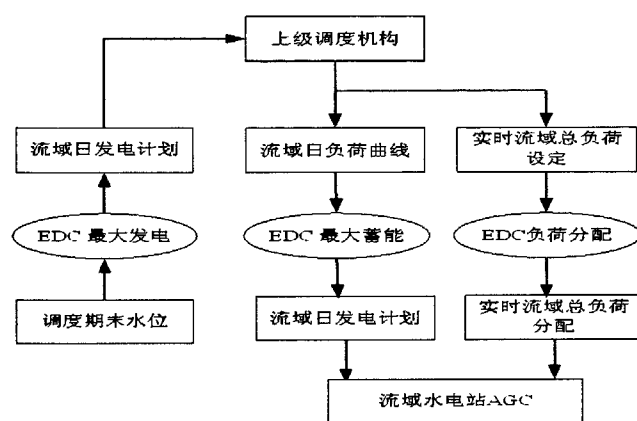


图2 流域集控中心监控系统 EDC 与 AGC 模块关系图

### 3 优化调度准则

流域水电站优化调度控制并不仅仅是简单意义上的负荷优化分配问题,而是由流域发电计划优化制定、站间及站内负荷优化分配、流域电站水位动态控制等一系列的优化调度决策共同组成的。

流域水电站优化调度控制中主要采用三个优化准则:最大发电量准则、最大蓄能量准则及库水位越限程度最小准则。在电力市场条件下,流域电站调度控制优化准则应考虑各电站时空电价差异,即各流域电站上网电价不同,同一电站各时段上网电价也不同。若需考虑电价因数,仅需在最大发电量准则、最大蓄能量准则的数学模型中乘上各电站各时段电价即可,此时优化准则分别为最大发电效益准则、最大余留效益准则。在系统的研制过程中,需要对不同优化准则的适用情况、调度模型及优化算法作详细的分析和研

究,这一步对于流域水电站优化调度控制至关重要,研究结果的正确性和合理性直接决定了优化调度控制的实用价值及优化水平<sup>[4]</sup>。

### 3.1 约束条件

水量平衡约束:

$$\begin{cases} V_i' = V_i^{t-1} + (q_i' - Q_i' - y_i')\Delta t & i=1; t=0, \dots, T \\ V_i' = V_i^{t-1} + (q_i' + Q_{i-1}^{t-1} + y_{i-1}^{t-1} - Q_i' - y_i')\Delta t & i=2, \dots, N; t=0, T \end{cases} \quad (1)$$

电站出力约束:

$$\underline{P}_i' \leq P_i' \leq \overline{P}_i' \quad (2)$$

水库蓄水量约束:

$$\underline{V}_i' \leq V_i' \leq \overline{V}_i' \quad (3)$$

电站发电流量约束:

$$\underline{Q}_i' \leq Q_i' \leq \overline{Q}_i' \quad (4)$$

### 3.2 最大发电量准则<sup>[5]</sup>

最大发电量准则主要用于在各级水库放水量已知的情况下,计算整个流域水电站在调度期内发出最大发电量所对应的流域各电站发电方案,供运行调度人员参考用以制定长、中、短期及日发电计划。流域水电站最大发电量准则数学模型如:

$$J = \text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N E(\bar{H}_i', Q_i') \quad (5)$$

式中,  $E(H_i', Q_i')$  表示第  $i$  级电站第  $t$  个时段的时段发电量,依据厂内经济运行数学模型计算。

调度期起始时刻各级水库蓄水量已知:

$$V_i^0 \quad i=1, \dots, N$$

调度期末各级水库蓄水量已知:

$$V_i^T \quad i=1, \dots, N$$

### 3.3 最大蓄能量准则

最大蓄能量准则主要用于流域集控中心在上级调度部门下达流域负荷指令后,将该流域总负荷最优地分配给流域各水电站及各机组,使整个流域水电站在调度期内所蓄的能量最大。流域水电站的最大蓄能量准则本质上与最小耗能量准则是一致的。流域水电站最大蓄能量准则的数学模型如下:

$$J = \text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N S(\bar{H}_i', Q_i') \quad (6)$$

式中,  $S(\bar{H}_i', Q_i')$  表示第  $i$  级电站第  $t$  个时段的蓄能量,计算公式如下:

$$S(\bar{H}_i', Q_i') = \begin{cases} (q_i' - Q_i' - y_i') \cdot \sum_{j=1}^N \bar{H}_j' & i=1; t=0, \dots, T \\ (q_i' + Q_{i-1}^{t-1} + y_{i-1}^{t-1} - Q_i' - y_i') \cdot \sum_{j=1}^N \bar{H}_j' & i=2, \dots, N; t=0, T \end{cases}$$

出力平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N P(\bar{H}_i', Q_i') = P_s' \quad (7)$$

式中,  $P(H_i', Q_i')$  表示第  $i$  级电站第  $t$  个时段的电站最优有功总出力,依据厂内经济运行数学模型计算。

调度期起始时刻各级水库蓄水量已知:

$$V_i^0 \quad i=1, \dots, N$$

### 3.4 库水位越限程度最小准则<sup>[6]</sup>

库水位越限程度最小准则主要用于当流域各水电站上游水库有水位控制要求而当前库水位超出该范围的情况下,这在流域防洪、施工等需要对库水位进行严格控制的情况下非常实用。其目标是使流域各水电站库水位越限程度最严重的那级电站的越限值最小,数学模型如下:

$$J = \text{Min} \{ \text{Max} \{ \delta_1, \dots, \delta_N \} \} \quad (8)$$

约束条件与最大蓄能量准则数学模型相同。

式中,  $\delta_i$  为第  $i$  级电站当前库水位与设定上下限的越限值,计算公式如下:

$$\delta_i = \begin{cases} 0 & \underline{Z}_i \leq Z_i \leq \overline{Z}_i \\ Z_i - \overline{Z}_i & Z_i > \overline{Z}_i \\ \underline{Z}_i - Z_i & Z_i < \underline{Z}_i \end{cases} \quad (9)$$

以上各模型中:

$\bar{H}_i'$  表示第  $i$  级电站第  $t$  个时段的平均发电水头;  $Q_i'$

为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的发电流量;

$q_i'$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的天然入库流量;  $y_i'$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的弃水流量;

$\tau_i$  为第  $i$  级电站到第  $i+1$  个电站的水流流达时间;

$P_i'$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的出力;

$V_i'$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的水库库容;

$\underline{P}_i'$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的允许最大有功出力;

$\overline{P}_i'$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的允许最小有功出力;

$\underline{Q}_i'$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的允许最大发电流量;

$\underline{Q}_i^t$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的允许最小发电流量;

$\underline{V}_i^t$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的允许最大蓄水量;  $\overline{V}_i^t$  为第  $i$  级电站第  $t$  个时段的允许最小蓄水量;

$Z_i$  为第  $i$  级电站当前库水位;  $\underline{Z}_i$  为第  $i$  级电站当前允许最低库水位;

$\overline{Z}_i$  为第  $i$  级电站当前允许最高库水位。

## 4 控制系统优化算法

目前在流域水电站经济运行和优化调度控制中常用的优化算法<sup>[7]</sup>主要有等微增率法、动态规划算法、逐步优化算法、基因遗传算法。

### 4.1 等微增率法

引入了数学中“微分”的思想,通过研究各台机组流量特性曲线的微增率来进行负荷的最优分配。该方法适用于机组台数不多且性能曲线较简单的单个水电站的厂内经济运行计算。当机组较多、性能曲线较复杂或者需要进行一段时期内的优化调度计算,宜采用其它优化算法。

### 4.2 动态规划简称DP(Dynamic Programming)

动态规划是解决多阶段决策过程最优化的一种数学方法,主要涉及阶段和阶段变量、状态和状态变量、决策变量和决策序列、状态转移方程、阶段效应和目标函数等概念,通过顺序或逆序逐时段递推求解问题的最优解。此算法的优点主要是理论严谨、能保证绝对收敛于全局最优解,易于编程、求解效率高等。动态规划算法也存在一定的缺点,即在处理多维问题时,很容易出现“维数灾”,导致计算无法运行或计算耗时太长无法满足实际应用要求。因此在基本动态规划算法的基础上又出现了许多改进动态规划算法,主要有增量动态规划法(DDDP)、状态逐密动态规划、动态规划逐次逼近法(DPSA)和逐步优化法(POA)<sup>[8]</sup>。

研究结果表明,对于级数不太多的流域水电站的短、中、长期优化调度及单个水电站的短、中、长期优化调度和厂内经济运行,动态规划算法及其改进算法均能够很好地求解。在这些改进算法中,有增量动态规划法(DDDP)、状态逐密动态规划、动态规划逐次逼近法(DPSA)算法比较适用于单个水电站的短、中、长期

优化调度计算及厂内经济运行计算,而逐步优化法(POA)比较适用于流域水电站群的短、中、长期优化调度计算。

### 4.3 遗传算法简称<sup>[9]</sup>GA(Genetic Algorithm)

基本思想是基于 Darwin 进化论和 Mendel 的遗传学说,遗传算法在本质上是一种不依赖具体问题的直接搜索方法,这种搜索方法决定了遗传算法能够很好地处理多维优化问题,遗传算法主要涉及基因、群体、群体规模、基因位置、基因适应度等概念,通过“染色体”群的选择(Selection)、交叉(Crossover)、变异(Mutation)过程产生更适应环境的新一代“染色体”群,一代一代地进化,最后就会收敛到最适应环境的一个“染色体”上,它就是问题的最优解。

尽管常规遗传算法能够很好地处理多维优化问题,但同时也存在着收敛速度慢、群体早熟导致收敛到局部最优解等缺点。由此,人们对常规遗传算法进行了改进,形成了许多改进遗传算法,主要有二倍体遗传算法、自适应遗传算法、多目标遗传算法及基因拟子协同进化算法(GMCA)等<sup>[10]</sup>。

## 5 优化调度控制方式

集控中心流域电站经济运行和水电优化调度系统将发电调度、防汛调度、优化调度三项功能集合,根通过对流域水情、电站发电状态、电网负荷要求和各项约束条件的综合判断分析,提供最优的发电调度方案,最终通过计算机监控系统实现方案功能,计算机监控系统应提供实现单机控制、“各流域电站”及集控中心等值控制三种 AGC 控制模式的接口。在“各流域电站”或集控中心等值控制两种 AGC 控制模式下,“各流域电站”所属单机的控制权在“各流域电站”或集控中心,而非上一级调度机 AGC。上一级调度机 AGC 只对“各流域电站”或集控中心等值机组下达控制命令,下传的控制量再分配到可控机组的过程由“各流域电站”或集控中心 AGC 完成,“各流域电站”或集控中心的机组等值应由“各流域电站”或集控中心完成。

## 6 结束语

在流域电站群经济运行和优化调度的实际的生产中,安全的重要性相对经济性而言要重要的多。因而,

在研究如何进行发电调度和优化调度时,还需要研究正确处理各项工程因素,在各项约束之间综合考虑,如适当地减少机组启/停次数,减小机组开停机磨损;根据设备的健康状况确定所带负荷大小;站间联合躲避振动区;避免负荷在站间大规模转移;避免机组频繁启动;电力系统接入点安全约束;电网系统的安全稳定;多个电站成组运行模式;电站间水流时滞时间等,全面而合理地权衡各项约束因素,找到一个最佳的结合点将是最重要的研究内容。

## 参考文献:

- [1] 王国华,单文坤.流域梯级水电站水调自动化系统设计与实现[J].山西建筑,2010,(10):367-368.
- [2] 董子敖.水库群调度与规划的优化理论和应用[M].济南:山东科学技术出版社,1989.
- [3] 戴建伟.乌江干流梯级电站远程集控中心建设与思考[J].水电厂自动化,2005,(1):49-53.
- [4] 张铭,丁毅,袁晓辉,李承军.梯级水电站水库群联合发电优化调度[J].华中科技大学学报(自然科学版),2006,(6):90-92.

[5] 范祥莉.梯级水电站群中长期多目标优化调度方法[D].大连理工大学,2010.

[6] 苏华英,孙斌,林成,程春田.贵州电网梯级水电站群联合调度运行方式研究[J].水电能源科学,2010,(6):115-117.

[7] 阎应飞,贾小飞,贺洁.梯级水电站智能调度控制系统分析[J].PLC&FA,2010,(11):63-65.

[8] 宗航,周建中,张勇传.POA改进算法在梯级电站优化调度中的研究和应用[J].计算机工程,2003,(17):35-38.

[9] 王小安,李承军.遗传算法在短期发电优化调度中的研究与应用[J].长江科学院院报,2003,(2):15-19.

[10] 罗云霞,周慕逊,王万良.基于基因拟子协同进化算法的水电优化调度研究[J].水力发电学报,2010,(4):58-62.

作者简介:余平(1981-),男,工程师,硕士研究生,主要从事水电站运行生产技术管理。

(上接第3页)

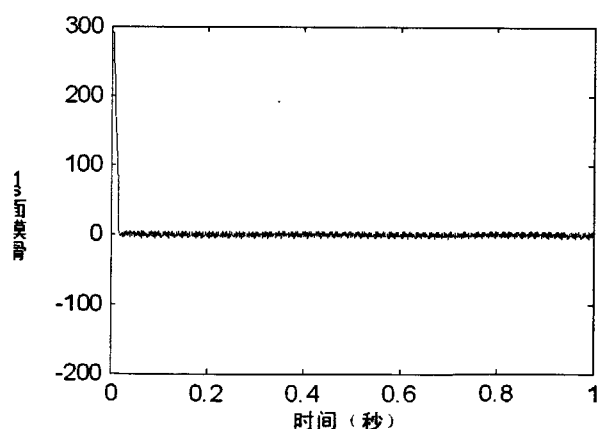


图4 滑模面  $S_1$  的系统响应曲线

## 5 结束语

由仿真图可以看出系统 Buck 变换器的状态在很快的时间内到达了平衡点,而且在负载  $R$  存在不确定性的情况下系统的稳态误差非常小。

## 参考文献:

- [1] UTKIN V I. Variables structure systems: Present

and future[J]. Automation and Remote Control, 1983, 44(9): 1105-1120.

[2] ZAK, M. Terminal attractors in neural networks[J]. Neural Networks, 1989, 2(4): 259-274.

[3] 刘云峰,陈斌文,缪栋,袁润平,杨小冈.具有强鲁棒性的滑模变结构控制[J].信息与控制,2008,37(2):140-145.

[4] 庄开宇,张克勤,苏宏业,褚健.高阶非线性系统的 Terminal 滑模控制[J].浙江大学学报(工学版),2002,9(5):482-485.

[5] 曲鑫,任章.基于 Terminal 滑模鲁棒控制器设计及应用[J].控制工程,2011,3(18):219-222.

[6] YU SH, YU XH, Man ZH. Robust global terminal sliding mode control of SISO nonlinear uncertain systems [A]. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control [C], Piscataway, N J, USA: IEEE, 2000: 2198-2203.

作者简介:李春娟(1982-),女,硕士,讲师,研究领域:鲁棒控制。