文章编号：1000-7709(2015)04-0052-04

基于检修计划的水电站群联合调峰优化方案

何国春[1]，唐海华[2]

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司，四川 成都 610051；2. 南京南瑞集团公司，江苏 南京 211106)

摘要： 基于检修计划的水电站群联合调峰优化问题，在优化调峰效益时充分考虑电网的实际水电负荷需求，以负荷爬坡阈值平抑锯齿，得到平稳的水电调峰系数曲线；同时，考虑机组额定容量、预想出力、可用台数等限制，构建了完整的水电站群中期联合优化调峰效益最大模型。该模型求解采用 DDDP-DPSA 混合算法，通过优化—检验—调整—再优化的循环模式对线路和机组的检修计划进行校验和调整，最终获得水电站群中期联合调峰优化方案。

关键词： 水电站群联合优化调度；调峰效益；负荷需求；爬坡阈值；检修计划；DDDP-DPSA

中图分类号： TV697　　**文献标志码：** A

1 引言

目前，在电网水库调度计划制作过程中，仅将调度期内线路及机组检修计划转化为相关电站检修期的发电能力约束处理，缺少对检修计划的反馈与调整机制。国内对水电站群基于检修计划产生的效益研究主要集中在合理安排水电站机组检修周期、水电站设备检修策略、检修诊断和判别方法等方面[1~4]，在满足电网安全稳定约束下对水电站群发电效益的研究则主要集中在调峰系数、电网潮流等方面[5,6]。国外水电检修计划大多采用分级检修策略，重点考虑物质供给、成本消耗和电力电量平衡等因素，而中长期尺度的调峰则大多侧重于火电系统的宏观协调研究。在水电调峰方面，基于检修计划与调峰联动的水电站群中长期调峰优化研究非常少见。鉴此，本文将检修计划与水库群优化调度相结合，按优化—检验—调整—再优化的循环模式对检修计划进行反复判别调整，从而获得以水电站群调峰效益最大为目标的联合调度方案，其调峰依据不再采用传统的典型负荷方式，而是由电网的实际负荷预测结果扣除非水电出力计划，并通过阈值平抑锯齿后获得。实例应用表明该方案能真实反映电网的水电负荷需求，抑制了水电调峰的负荷波动幅度，具有代表性和可操作性。

2 数学模型

2.1 目标函数

为充分体现水电的调峰效益，在水资源有限的前提下，应尽量安排在负荷需求高峰期发电。传统的理论研究中，负荷需求通常以概化的典型负荷曲线表达，一般分为 3 段式或 5 段式，分别代表单峰型和双峰型负荷曲线，其计算结果物理内涵明确，对水电参与调峰时发电计划编制具有一定的决策辅助作用，但实用程度较低，生产应用价值极为有限。

本文从电网调度的实际应用需求出发，以水电作为主力调峰杠杆，直接采用电网的负荷预测结果扣除非水电计划作为主要调峰依据，并采用负荷阈值平抑法过滤负荷爬坡阈值以内的随机波动，从而获得代表性强、可灵活交互的调峰效益曲线。并借鉴广义发电效益优化模型构建方式[7]建立水电站群的中期联合调峰效益最大模型，其目标函数为：

$$B=\max\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}[N_{i,t}-\lambda\alpha_i(N_{i,p}-N_{i,t})]\Delta t\theta_t \quad (1)$$

$$\theta_t=\begin{cases}P_1 & t=1\\ \theta_{t-1}+n\gamma & 1<t\leqslant T\end{cases} \quad (2)$$

式中，B 为水电站群的总调峰效益；I 为电站数；T 为调度时段数；$N_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段平均出力；λ 为惩罚开关，当 $N_{i,t}\geqslant N_{i,p}$ 时，$\lambda=0$，否则 $\lambda=1$；α_i 为 i 电站惩罚系数；$N_{i,p}$ 为 i 电站的保证出力；Δt 为时段长；θ_t 为 t 时段电网调峰系数，由水电负荷需求经归一化处理获得；n 为整数且 $n\gamma\leqslant P_t-P_{t-1}<(n+1)\gamma$；$P_t$ 为 t 时段电网的水电负荷需求；γ 为

收稿日期： 2014-07-15，**修回日期：** 2014-09-04

作者简介： 何国春(1982-)，男，工程师，研究方向为水库调度，E-mail：heguochun@ehdc.com.cn

负荷爬坡阈值。

2.2 约束条件

结合水电站水库的调度运行边界及其在电网计划制定中需要考虑的限制因素，所构建数学模型需考虑以下约束条件：①水量平衡约束。

$$V_{i,t}=V_{i,t-1}+(I_{i,t}-Q_{i,t})\Delta t \quad \forall t\in T \tag{3}$$

②库容约束。

$$V_{\mathrm{L}_{i,t}}\leqslant V_{i,t}\leqslant V_{\mathrm{U}_{i,t}} \quad \forall t\in T \tag{4}$$

③出库流量约束。

$$Q_{\mathrm{L}_{i,t}}\leqslant Q_{i,t}\leqslant Q_{\mathrm{U}_{i,t}} \quad \forall t\in T \tag{5}$$

④平均出力约束。

$$N_{\mathrm{L}_{i,t}}\leqslant N_{i,t}\leqslant N_{\mathrm{U}_{i,t}} \quad \forall t\in T \tag{6}$$

⑤水库之间的水力联系。

$$I_{i,t}=Q_{i-1,t}+R_{i,t} \quad \forall t\in T \tag{7}$$

⑥调度期初末状态。

$$Z_{i,0}=Z_{i,c};Z_{i,T-1}=Z_{i,c} \tag{8}$$

⑦电网水电总出力约束。

$$P_{\mathrm{L}_t}\leqslant\sum_{i=1}^{I}N_{i,t}\leqslant P_{\mathrm{U}_t} \quad \forall t\in T \tag{9}$$

式中，$V_{i,t}$、$V_{\mathrm{L}_{i,t}}$、$V_{\mathrm{U}_{i,t}}$分别为第 i 水库 t 时段末蓄水量、蓄水量下限和上限；$I_{i,t}$为第 i 水库 t 时段入库流量；$Q_{i,t}$、$Q_{\mathrm{L}_{i,t}}$、$Q_{\mathrm{U}_{i,t}}$分别为第 i 水电站 t 时段出库流量、出库流量下限和上限；N_{L_t}、N_{U_t}分别为第 i 水电站 t 时段出力下限和上限；$R_{i,t}$为第 $i-1$、i 水库之间 t 时段区间入流；$Z_{i,0}$、$Z_{i,T-1}$分别为第 i 水库调度初、末控制水位；P_{L_t}、P_{U_t}分别为 t 时段电网需水电站群提供的出力下、上限。

此外，电站的实际最大出力还受机组额定容量、预想出力、可用台数等限制，即：

$$\overline{N}_{\mathrm{U}_{i,t}}=\min\left\{N_{\mathrm{U}_{i,t}},\sum_{j}N_{\mathrm{um}_{i,j,t}}P_{\mathrm{E}_{i,j,y,t}},\sum_{j}N_{\mathrm{um}_{i,j,t}}P_{\mathrm{E}_{i,j,c}}\right\} \quad \forall t\in T \tag{10}$$

式中，$\overline{N}_{\mathrm{U}_{i,t}}$为第 i 水电站 t 时段实际最大出力；$N_{\mathrm{um}_{i,j,t}}$为第 i 水电站 t 时段 j 类型机组的可用台数，是线路检修计划和机组检修计划的响应接口；$P_{\mathrm{E}_{i,j,y,t}}$为第 i 水电站 t 时段 j 类型机组的预想出力；$P_{\mathrm{E}_{i,j,c}}$为第 i 水电站 j 类型机组的额定容量。

3 求解算法及优化方案

3.1 模型求解算法

水库群联合优化调度模型的求解方法很多，传统动态规划及其变形改进算法、群智能仿生算法等均已被广泛应用。结合中期水电站群联合优化调度模型的结构及其边界约束特点，采用 DDDP-DPSA 混合算法[6]进行求解。主要步骤如下。

步骤 1　根据水电站群的水力拓扑关系按先上游后下游、先支流后干流的顺序进行排序，并计算各电站的初始可行解。

步骤 2　从调度期初开始，逐时段依次按逐次逼近算法（DPSA）逐库计算，其中具备季调节能力及以上的电站按离散微分动态规划算法（DDDP）优化，日调节和无调节电站则按固定水位过程控制。

步骤 3　判断时段内水电站群总出力是否满足电网的水电总出力带宽约束，若不满足则根据约束破坏程度和惩罚系数对时段总效益进行惩罚。

步骤 4　逐时段滚动计算至调度期末，以本轮优化的各水库水位过程作为新的初始可行解，返回步骤 2 继续优化，直至目标函数收敛。

DDDP-DPSA 混合算法流程见图 1。

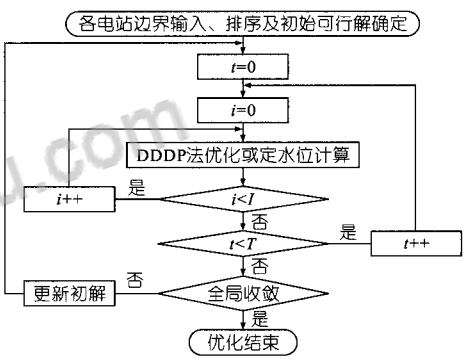

图 1　DDDP-DPSA 混合算法流程

Fig. 1　Flow chart of DDDP-DPSA

3.2 优化方案实施

本文所构建的数学模型结构及求解算法与常规水电站群联合优化调度类似，改进点主要在于边界约束处理方式及模型的运用机制。①在调峰效益计算时，各时段的调峰系数统一按电网对水电的需求程度确定，充分利用了电网的负荷预测结果及其他非水电能源的调度计划信息，更贴近生产实际；②为避免水电调度计划的锯齿跳变，采用负荷爬坡阈值平抑手段，提前对调峰系数源头进行处理，过滤了负荷爬坡阈值内的小幅波动，且阈值可灵活交互；③为充分反映线路检修计划和机组检修计划与水电调度计划的相互影响，设计了优化—检验—调整—再优化的循环计算模式，可同时获得水电站群的检修计划调整建议及对应的联合优化调度方案。基于检修计划的水电站群联合调峰优化调度方案实施步骤如下。

步骤 1　获取调度期内电网的负荷预测结果、风功率预测结果、火电及其他非水电能源的出力计划等，先按供求关系逐时段由负荷预测结果扣除非水电出力计划获得水电的负荷需求曲线

http://www.kneshu.com

http://www.ixueshu.com