

一洞多机引水式水电站短期负荷分配方法

赵宏辉^{1,2}, 廖胜利^{1,2}, 李刚^{1,2}, 周凌安^{1,2}, 李树山³, 吴钊平⁴

(1. 大连理工大学 水电与水信息研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623; 4. 天生桥二级水力发电有限公司, 贵州 兴义 562400)

摘要:我国许多大型水电站采用一洞多机长距离引水发电模式,短期负荷分配面临机组间水力相互干扰、水头计算困难等问题,建模及求解极其困难。考虑到一洞多机式电站机组间水力联系复杂,采用两阶段建模求解:第一阶段建立考虑持续时段约束的水电机组开停机优化模型,结合启发式搜索策略和逐步优化算法确定开机隧洞及最优开停机组合方式;第二阶段建立以电定水准则的负荷分配模型,采用动态规划方法进行给定开停机方式下机组间的负荷最优分配。以红水河某水电站枯水期不同负荷率典型日分配为例,结果表明所提方法具有较强的实用性,可满足实际运行要求。

关键词:一洞多机式水电站;短期;负荷分配;机组组合;振动区

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909034

0 引言

受水头落差、地质条件、开发方式及经济比选等影响,我国许多大型水电站采用“长距离引水+一洞多机式”复杂引水发电系统^[1]。天生桥二级水电站是红水河干流巨型电站,采用3组“一洞两机”模式,引水隧洞(以下简称隧洞)平均长9.77 km,平均水头176 m;锦屏二级水电站是雅砻江干流目前装机规模最大的水电站,装机容量达到4 800 MW,采用4组“一洞两机”模式,隧洞平均长16.67 km,平均水头290 m;我国水电建设对外开放“窗口”鲁布革水电站采用1组“一洞三机”模式,隧洞长9.38 km,平均水头327.7 m。这些一洞多机式电站不但具有装机容量大、运行水头高、振动区复杂等特点,且与常规单洞单机模式相比,在短期负荷分配过程中面临更复杂的问题。首先,一洞多机式电站中多台机组共用同一隧洞,机组间水力联系相互干扰,负荷分配时需考虑复杂的开机方式及发电流量分配;其次,当高水头机组进行调峰调频操作、快速响应系统负荷需求变化时,需考虑如何避免频繁穿越振动区;再次,遭遇恶劣水力工况或电力系统故障时,机组负荷剧烈波动将引起隧洞内发电流量剧烈变化,造成大量水能损失,甚至对电站或电网安全运行造成较大危害。

水电站短期负荷分配一般采用以电定水准则^[2],给定电站负荷需求,优化各机组的开机方式及出力,使总耗水量最少。一洞多机式水电站中单一

机组引水流量的变化直接影响到同一隧洞中其他机组的水头损失,求解过程极其复杂。本文采用两阶段进行建模求解:第一阶段建立考虑持续时间约束^[3]的水电机组开停机优化模型,确定最优开机组合方式;第二阶段在第一阶段结果的基础上,通过以电定水准则确定各机组负荷分配结果。

一洞多机式水电站短期负荷分配既有水量平衡、流量关联等复杂的水力联系,又有电力约束、电量平衡等复杂的电力联系;既要考虑水位、流量、出力限制等单时段约束,又要考虑机组开停机持续时段数、振动区穿越等多时段关联约束,因此是离散、高维、非线性、非凸的数学规划问题,常采用混合整数线性规划^[3-6]、动态规划(DP)^[7-8]及其改进算法^[9-13]等常规数学方法或遗传算法^[14]、蚁群算法^[15-16]、蜂群算法^[17]、粒子群算法^[18-19]等智能算法求解。智能算法虽然具有收敛速度快、内存占用小等优点,但存在参数选择及计算结果具有随机性、易早熟、易陷入局部最优等问题,导致实用化受限。DP及其改进算法作为经典的优化算法,具有程序实现简单、计算过程稳定、能搜索到全局最优解或次优解等优点,被广泛应用。本文第一阶段联合采用启发式搜索策略和逐步优化算法(POA)获取最优开机方式,第二阶段采用DP获得最优负荷分配结果,最后以红水河某水电站枯水期不同负荷率(负荷率高为枯大,负荷率低为枯小)下典型日负荷分配为例对所提方法进行验证。

1 数学模型

水电站短期负荷分配是给定1 d到1周的负荷需求,满足电网约束、水库运行条件、机组运行工况等物理约束或设定条件,求出机组组合、开机状态及机组出力,达到耗水量最小的目标。计算时段通常

收稿日期:2018-11-10;修回日期:2019-05-23

基金项目:国家自然科学基金-雅砻江联合基金资助项目(U1765103);辽宁省自然科学基金资助项目(20180550354)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China-Yalong River Joint Fund(U1765103) and the Natural Science Foundation of Liaoning Province(20180550354)

为 1 h 或 15 min, 本文以 15 min 为调度时段, 1 d 为调度周期, 采用两阶段建模分别建立开停机优化模型及耗水量最小模型, 模型间以机组开机方式和机组启停耗水量为纽带进行关联。

1.1 开停机优化模型

启停耗水量最小目标函数:

$$f_1 = \min \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{M_n} \sum_{t=1}^T (W_{n,i,t,\text{on}} + W_{n,i,t,\text{off}}) \quad (1)$$

$$W_{n,i,t,\text{on}} = y_{n,i,t} (1 - y_{n,i,t-1}) W_{n,i,\text{on}}$$

$$W_{n,i,t,\text{off}} = y_{n,i,t-1} (1 - y_{n,i,t}) W_{n,i,\text{off}}$$

开机台数最小目标函数:

$$m = f_2 = \min \sum_{t=1}^T m_t \quad (2)$$

其中, n 、 N 分别为隧洞编号和总数; t 、 T 分别为调度时段编号和总数; i 、 M_n 分别为隧洞 n 中机组编号和机组数目; f_1 为机组启停总耗水量 (m^3); $y_{n,i,t}$ 为隧洞 n 中机组 i 在时段 t 的状态, 取值为 0 表示关机, 取值为 1 表示开机; $W_{n,i,t,\text{on}}$ 、 $W_{n,i,t,\text{off}}$ 分别为隧洞 n 中机组 i 在时段 t 开机和停机过程耗水量 (m^3); $W_{n,i,\text{on}}$ 、 $W_{n,i,\text{off}}$ 分别为隧洞 n 中机组 i 开机和停机过程耗水量 (m^3), 为已知值; m 、 f_2 为调度周期内总开机台数; m_t 为时段 t 的开机台数。

约束条件如下。

(1) 开机台数约束:

$$0 \leq m_t \leq \bar{m}_t, \quad \bar{m}_t = \sum_{n=1}^{N_t} M_{n,t} \quad (3)$$

其中, $\bar{m}_t$ 为时段 t 可用机组数; N_t 为时段 t 可参与运行的隧洞数; $M_{n,t}$ 为隧洞 n 在时段 t 的可用机组数。

(2) 系统负荷约束:

$$0 \leq D_t \leq \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{M_{n,t}} C_{n,i} \quad (4)$$

其中, D_t 为时段 t 的给定总负荷需求 (MW); $C_{n,i}$ 为隧洞 n 中机组 i 的铭牌出力 (MW)。

(3) 组合振动区约束:

$$(D_t - \bar{p}_{zt})(D_t - \underline{p}_{zt}) > 0 \quad (5)$$

其中, $\bar{p}_{zt}$ 、 $\underline{p}_{zt}$ 分别为时段 t 的开停机组合振动区上、下限 (MW)。

(4) 机组开停机持续时间约束:

$$T_{n,i,t,\text{on}} \leq T_{n,i,t,\text{up}}, \quad T_{n,i,t,\text{off}} \leq T_{n,i,t,\text{down}} \quad (6)$$

其中, $T_{n,i,t,\text{up}}$ 、 $T_{n,i,t,\text{down}}$ 分别为隧洞 n 中机组 i 在时段 t 最小开、停机时间 (h); $T_{n,i,t,\text{on}}$ 、 $T_{n,i,t,\text{off}}$ 分别为隧洞 n 中机组 i 在时段 t 最小开、停机持续时间 (h), 为已知值。

1.2 耗水量最小模型

目标函数:

$$\min \left(\sum_{t=1}^T u_t \Delta t + f_1^* \right) \quad (7)$$

$$u_t = \sum_{i=1}^{m_t} q_{i,t}$$

其中, u_t 为时段 t 的总出库流量 (m^3/s); Δt 为时段步长 (s); f_1^* 为第一阶段最优开机方式下机组启停总耗水量 (m^3); $q_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的发电流量 (m^3/s)。

约束条件如下。

(1) 水量平衡约束:

$$V_t = V_{t-1} + (I_{Nt} - u_t) \Delta t \quad (8)$$

其中, V_t 为时段 t 的库容 (m^3); I_{Nt} 为时段 t 的入库流量 (m^3/s)。

(2) 负荷平衡约束:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{m_t} p_{i,t} = D_t \quad (9)$$

其中, $p_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的出力 (MW)。

(3) 出力限制约束:

$$\underline{p}_{i,t} \leq p_{i,t} \leq \bar{p}_{i,t} \quad (10)$$

其中, $\bar{p}_{i,t}$ 、 $\underline{p}_{i,t}$ 分别为机组 i 在时段 t 的出力上、下限 (MW)。

(4) 库容限制约束:

$$\underline{V} \leq V_t \leq \bar{V} \quad (11)$$

其中, $\bar{V}$ 、 $\underline{V}$ 分别为库容上、下限 (m^3)。

(5) 发电流量约束:

$$\underline{Q}_i \leq q_{i,t} \leq \bar{Q}_i \quad (12)$$

其中, $\bar{Q}_i$ 、 $\underline{Q}_i$ 分别为机组 i 发电流量上、下限 (m^3/s)。

(6) 初始水位约束:

$$z_0 = z_{\text{beg}} \quad (13)$$

其中, z_0 、 z_{beg} 分别为起始水位及给定的初始值 (m)。

(7) 振动区约束:

$$(p_{i,t} - \bar{p}_{si,t})(p_{i,t} - \underline{p}_{si,t}) > 0 \quad (14)$$

其中, $\bar{p}_{si,t}$ 、 $\underline{p}_{si,t}$ 分别为机组 i 在时段 t 的振动区上、下限 (MW)。

2 模型求解

2.1 总体求解思路

开停机优化模型求解主要处理约束 (1) — (4), 其中约束 (1) — (3) 为单时段约束, 处理较简单; 约束 (4) 与多时段关联, 求解时不仅要判断各时段开停机组合是否满足总负荷需求, 同时要检验机组运行是否满足最小持续时段约束要求, 故处理约束 (4) 比约束 (1) — (3) 复杂得多。按单时段和多时段约束分别处理的方式, 两阶段模型求解步骤如下。

第 I 步: 获得单时段可行域 S 。

调度周期内满足约束 (1) — (3) 的开机可行域求解分为 3 步: ① 根据约束 (1) 确定电站各时段所有开停机组合集 S' ; ② 采用约束 (2) 对 S' 中元素进行过滤得

到满足总负荷要求的可行域 S' ;③计算可行域 S' 中各时段各开机方式的组合振动区^[20],判断总负荷是否落入振动区,如果落入,则删除该开机方式,得到满足约束(1)~(3)的初始可行域 S 。

第Ⅱ步:获得多时段最优机组组合 S^* 。

采用POA寻找 S 中满足约束(4)的最优开机组合,POA需要对初始可行解进行逐步寻优,因此求解过程分为2步:①通过启发式策略在可行域 S 中寻找满足约束(4)的初始可行解 S'' ;②采用POA对 S'' 进一步优化获得最优开机组合方式 S^* 。

第Ⅲ步:机组间负荷优化分配。

以开机机组组合 S^* 为开机方式,采用DP根据最小耗水量原则进行机组间负荷分配。

2.2 单时段可行域搜索过程

确定各个时段满足约束(1)的所有机组组合集合为 $S'=\{S'_1, S'_2, \dots, S'_i, \dots, S'_T\}$,时段 t 机组组合为 $S'_t=2^{\bar{m}}-1$ (其中 $\bar{m}=\sum_{n=1}^N M_n$, $\bar{m}$ 为机组全组合数);进一步对集合 S' 进行过滤确定满足约束(2)的可行域 $S''=\{S''_1, S''_2, \dots, S''_i, \dots, S''_T\}$;接着采用文献[20]方法确定可行域 S'' 中各时段各元素开机方式的组合振动区,同时过滤不满足约束(3)的开机方式,获得初始可行域 $S=\{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_T\}$,时段 t 初始可行域为 $S_t=\sum_{U(i)} C_{N_t}^n \left(C_{M_{1,t}}^{u_{1,t}} C_{M_{2,t}}^{u_{2,t}} \dots C_{M_{n,t}}^{u_{n,t}} \right)$ (其中 $u_{n,t} \leq M_{n,t}$, $u_{n,t}$ 为隧洞 n 在时段 t 的实际开机数目,且有 $m_t=\sum_{n=1}^{N_t} u_{n,t}$, $U(i)$ 为满足约束的开机组合集合, C 为排列组合符号),在 S 中每个时段找出一组机组组合,即可合成短期计算周期内的开机过程。其详细求解步骤如下。

步骤1:设 $t=1$, S' 为满足约束(1)的各时段所有机组组合集合。

步骤2:计算时段 t 机组组合 S'_t 。

步骤3:对 S'_t 进行过滤确定时段 t 满足约束(2)的可行域 S''_t 。

步骤4:确定 S''_t 中各元素的开机组合振动区,并删除系统负荷落入约束(3)的开机方式,获得时段 t 初始可行域 S_t 。

步骤5:令 $t=t+1$,如果 $t \leq T$,则执行步骤2~4,否则执行步骤6。

步骤6:输出初始可行域 S 。

2.3 多时段启发式策略求解初始可行解

初始可行解 $S''=\{S''_1, S''_2, \dots, S''_i, \dots, S''_T\}$ 通过启发式策略在 S 中寻找各时段满足约束(4)的方式获得。当前一时段开机方式确定后,后一时段满足持续时间约束时求解范围大为缩减。求解步骤如下。

步骤1:设 s_{ik} 为初始可行域 S_i 中第 k 个元素,令 $t=1$, $k=1$,确定 s_{11} 为开机组合 S''_1 中第1个元素。

步骤2:令 $t=t+1$,如果 $t \leq T$,则令 s_{it} 为开机组合 S''_t 中的第1个元素,否则执行步骤6。

步骤3:验证区间 $[1, t]$ 上的开机方式是否满足约束(4),若是,则返回步骤2,否则执行步骤4。

步骤4:令 $k=k+1$,如果 k 大于 S_i 中元素数目,则执行步骤5,否则返回步骤3。

步骤5:令 $t=t-1$,执行步骤4。

步骤6:输出初始可行解 S'' 。

2.4 多时段POA求解全局最优解

POA的思想是将多阶段决策问题分解为若干个两阶段决策子问题,通过对子问题寻优获得原问题的最优解。POA具有搜索能力强、收敛速度快等优点,在处理多阶段优化问题时有独特的优势,被广泛用于实际工程,POA求解最优开停机组组合步骤如下。

步骤1:设置开机过程为启发式策略获得的初始可行解,计算目标函数值 f_1, f_2 ,令 $t=1, k=1$ 。

步骤2:以 S_t 中第 k 个元素替换时段 t 的原开机元素,获得新的开机方式,判断新方式是否满足约束(4),若是,则执行步骤3,否则,执行步骤4。

步骤3:分别按式(1)和式(2)计算目标函数值 f'_1, f'_2 ,判断是否满足 $f'_1 < f_1$ 且 $f'_2 < f_2$,若是,则以新开机方式替换原开机方式,并令 $f_1=f'_1, f_2=f'_2$ 。

步骤4:令 $k=k+1$,如果 k 大于 S_t 中元素数目,则执行步骤5,否则返回步骤2。

步骤5:令 $t=t+1, k=1$,如果 $t \leq T$,则返回步骤2,表示时段 t 寻优结束,检查目标函数值 f_1, f_2 是否有改进,若是,则获得新的初始可行解并执行步骤2,进行下一轮寻优,否则执行步骤6。

步骤6:输出确定机组台数、台号的最优开机组合 $S^*=\{S^*_1, S^*_2, \dots, S^*_i, \dots, S^*_T\}$ 。

2.5 耗水量最小模型求解

开停机优化模型中机组开停机状态确定后,如何在给定时段内合理地进行固定机组间最优负荷分配,是厂内经济运行中空间最优化问题,本文采用DP方法求解短期最优负荷分配方案^[1]。计算过程中,投入机组的编号 i 为阶段变量;机组总出力 $\sum_{i=1}^{m_t} p_{i,t}$

为状态变量;每台机组的出力 $p_{i,t}$ 为决策变量;发电流量 $Q_i(p_{i,t})$ 为代价函数;目标函数为总发电流量最小。在进行负荷分配时,决策变量必须在可行域之内,对落入振动区的情况采用惩罚函数 $Q'(p, h)=Q(p, h)+\Delta Q$ 予以惩罚,其中 p 为出力, h 为净水头, $Q(p, h)$ 为净水头 h 、出力 p 的出库流量, $Q'(p, h)$ 为修正后的出库流量, ΔQ 为惩罚流量值。

2.6 总体求解流程

一洞多机式电站短期负荷求解步骤分为单时段可行域搜索、多时段最优开机组合方式、机组最优负荷分配3步,总体求解框架如图1所示。

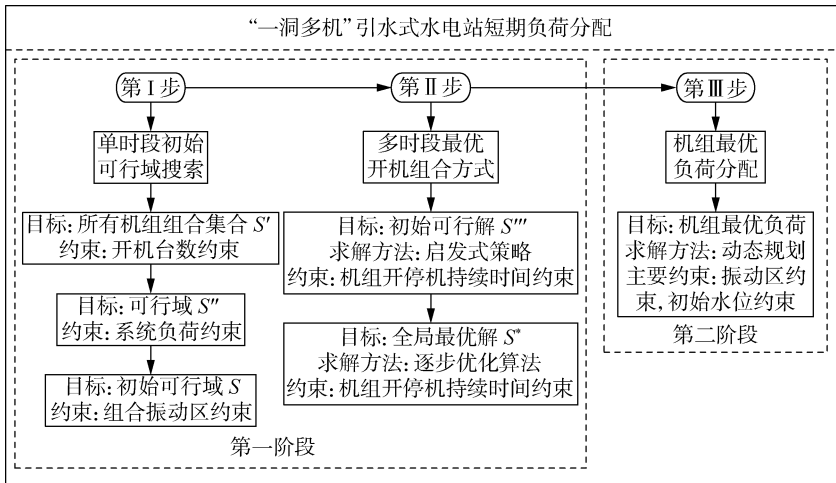


图 1 总体求解框架

Fig.1 Overall solution framework

3 实例分析

3.1 工程背景及参数选择

以红水河某水电站典型日负荷分配为例对本文方法进行验证。该电站位于南盘江下游天然落差最集中的河段,是“西电东送”的电源点,承担着重要的调峰调频任务,也是典型的高水头、大流量、长距离引水式电站。该电站共有 3 条隧洞(依次为 A、B、C),1 号和 2 号、3 号和 4 号、5 号和 6 号机组分别位于 3 条隧洞中。电站主要特征参数和计算参数见表 1。

表 1 电站主要特征参数和计算参数
Table 1 Main characteristic parameters and calculation parameters of power plant

参数	数值
正常高水位 / m	645.00
死水位 / m	637.00
总装机容量 / MW	220.0×6
单机振动区 / MW	(80, 190)
单机每次启停机耗水量 / m ³	1 200
计算起调水位 / m	641.93
机组开停机持续时段数	4
调度时段 / min	15

短期调度过程中,一洞多机式电站通过充分利用不同隧洞的开停机组合,节约发电用水量,因此在电站负荷率较低的枯水期效果更为显著。本文采用枯水期不同负荷率下的典型日计算为例进行说明,图 2 为电站负荷需求,平均负荷率为 0.50 的枯大模式为单峰,平均负荷率为 0.28 的枯小模式为双峰。

3.2 不同开机方式下的耗水分析

以单个时段(15 min)下总负荷需求 615.1 MW(负荷率为 0.47)、开机台数 3 为例,对不同开机方式的耗水流量及水头损失进行分析,结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,当开机方式采用单洞单机时,分别开隧洞 A 的 2 号、隧洞 B 的 4 号和隧洞 C 的 6 号机组,总发电流量为 355.3 m³ / s,3 台机组的损失水

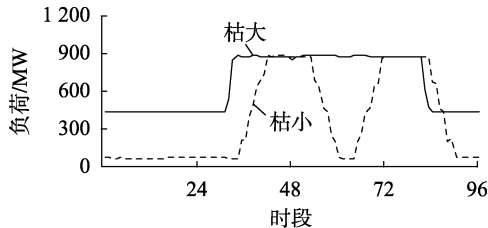


图 2 枯水期典型日负荷

Fig.2 Typical daily loads in dry-season

头均为 3.79 m,各机组及电站的平均耗水率均为 2.08 m³ / (kW·h),时段总耗水量为 3.20×10⁵ m³;而开机方式采用单洞双机时,分别开隧洞 A 的 2 号、隧洞 B 的 3 号和 4 号机组,总发电流量为 370.8 m³ / s,4 号机组的水头损失升高至 17.19 m,耗水率增加到 2.21 m³ / (kW·h),电站平均耗水率为 2.17 m³ / (kW·h),时段总耗水量为 3.34×10⁵ m³。单洞单机模式比单洞双机模式单时段节水 1.4×10⁴ m³,一天可省水量约 1.34×10⁶ m³,这对于水头高、调节库容小、调节性能差的电站效益是非常明显的。

3.3 开停机组合结果分析

表 3 和表 4 分别为枯大和枯小方式下开停机状态组合,表中仅列出了开停状态变化的时段。

从表 3 可以看出,枯大方式下至少要开 2 台机组。当负荷需求较低时(如时段 1—32),仅开隧洞 A 的 1 号和隧洞 C 的 6 号机组,为“单洞单机”模式。当负荷需求急剧增加,开机台数也随之增加,以时段 32—34 为例,负荷需求由 438 MW 增至 535.8 MW 再至 847.2 MW,开机组合由 2 台增加到 4 台(分别为隧洞 A 的 1 号和 2 号、隧洞 B 的 4 号、隧洞 C 的 6 号机组),为节约耗水,除隧洞 A 外,隧洞 B、C 均为单洞单机模式。在时段 82—84,负荷需求由 875.9 MW 迅速减少至 479.4 MW,开机台数也随之减少,由 4 台减少到单洞单机的 3 台(分别为隧洞 A 的 2 号、隧洞 B 的 4 号和隧洞 C 的 6 号机组),所有机组均未出现频繁的开停机变化,机组启停耗水量为 4 800 m³。

表2 2种开机方式耗水量对比

Table 2 Comparison of water consumption between two startup modes

隧洞	机组	单洞单机				单洞双机			
		负荷 / MW	发电流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水头损失 / m	耗水率 / [$\text{m}^3 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]	负荷 / MW	发电流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水头损失 / m	耗水率 / [$\text{m}^3 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]
A	1	0	0	3.79	—	0	0	3.79	—
	2	205	118.4		2.08	205	118.4		2.08
B	3	0	0	3.79	—	205	126.1	17.19	2.21
	4	205	118.4		2.08	205.1	126.3		2.21
C	5	0	0	3.79	—	0	0	0	—
	6	205.1	118.5		2.08	0	0		—
合计值		615.1	355.3	—	2.08	615.1	370.8	—	2.17

表3 枯大方式开停机组合

Table 3 Unit startup-shut down set in dry-season with high-rate load

时段	负荷需求 / MW	开停机组合						开机 台数	持续时 段数
		1号	2号	3号	4号	5号	6号		
1	440.0	1	0	0	0	0	1	2	31
32	438.0	1	0	0	0	0	1	2	1
33	535.8	1	1	0	1	0	1	4	1
34	847.2	1	1	0	1	0	1	4	48
82	875.9	1	1	0	1	0	1	4	1
83	615.1	0	1	0	1	0	1	3	1
84	479.4	0	1	0	1	0	1	3	1
85	437.8	0	1	0	0	0	1	2	12
96	440.0	0	1	0	0	0	1	2	—

表4 枯小方式开停机组合

Table 4 Unit startup-shut down set in dry-season with low-rate load

时段	负荷需求 / MW	开停机组合						开机 台数	持续时 段数
		1号	2号	3号	4号	5号	6号		
1	75.2	1	0	0	0	0	0	1	37
38	405.5	1	0	0	1	0	0	2	1
39	485.9	1	0	0	1	0	1	3	2
41	690.5	1	1	0	1	0	1	4	15
56	653.2	0	1	0	1	0	1	3	2
58	438.5	0	1	0	0	0	1	2	2
60	199.7	0	1	0	0	0	0	1	7
67	257.2	0	1	1	0	0	0	2	2
69	476.0	0	1	1	0	0	1	3	2
71	663.0	1	1	1	0	0	1	4	15
86	655.5	1	0	1	0	0	1	3	2
88	437.0	1	0	0	0	0	1	2	1
89	202.4	1	0	0	0	0	0	1	8
96	80.5	1	0	0	0	0	0	1	—

表4为枯小方式,负荷需求变化幅度较大,机组启停较为频繁,机组启停耗水量 $14\ 400\ \text{m}^3$,开机过程均满足最小持续时段约束要求。枯小方式为双峰模式,时段41—55和时段71—85,为满足电站调峰需求,开机台数均为4台(隧洞A开2台,隧洞B、C各开1台);剩余时段开机小于4台,均为单洞单机模式,以降低水耗,节约发电用水。

3.4 枯大方式负荷分配结果分析

机组组合振动区^[20]结果如表5所示,随着机组台数的增加,组合振动区的范围逐步减小。

表5 机组组合振动区

Table 5 Vibration regions of unit commitment

组合机组数量 / 台	组合容量 / MW	组合振动区 / MW
1	220	(80, 190)
2	440	(160, 190)U(300, 380)
3	660	(520, 570)
4	880	(740, 760)
5	1100	—
6	1320	—

图3为枯大方式机组负荷分配结果。从图中可以看出,各时段出力过程均有效避开振动区运行,且满足开停机持续时段约束要求。

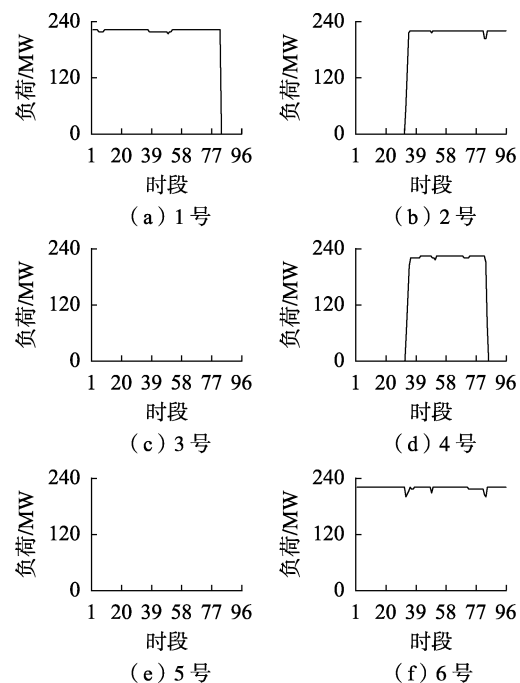


图3 枯大方式1—6号机组的负荷分配结果

Fig.3 Load distribution results of Unit 1-6 for dry-season with high-rate load

图3中,在时段1—32之间隧洞A的1号和隧洞C的6号机组满负荷运行;在时段33—82之间为满足日间调峰,隧洞A的1号和2号、隧洞B的4号、隧洞C的6号机组满负荷运行,通过上述负荷分配使运行周期内耗水量最小。需要特别指出的是,图中

出现的出力下降尖峰,以隧洞C的6号机组为例,在时段32—34之间负荷值分别为438、535.8、847.2 MW,原开机方式(1号和6号机组)已不能满足负荷需求,因此在满足持续时间等约束条件下增开隧洞A的2号和隧洞B的4号机组,使原开机方式下机组负荷下降,同时随着后期总负荷的增加,机组负荷也得到提高,故出现时段33处尖峰式出力过程。

3.5 枯小方式负荷分配结果分析

图4为枯小方式负荷分配结果。根据双峰负荷曲线特征,可以将负荷过程主要分为5个区间:区间1(时段1—37)、区间2(时段41—55)、区间3(时段60—66)、区间4(时段71—85)和区间5(时段89—96)。区间2、4负荷需求较高,需要开4台机组,由隧洞A的1号和2号、隧洞C的6号机组分别与隧洞B的3号和4号机组开机完成。其他时段区间开机方式均小于4台,全部采用“单洞单机”模式,区间1、3、5负荷需求较低,仅开1台机组即可满足要求,区间1、5开隧洞A的1号机组,区间3开隧洞A的2号机组,这是由于开停机过程及机组运行过程需避开振动区,同时满足最小开停机持续时段约束要求。

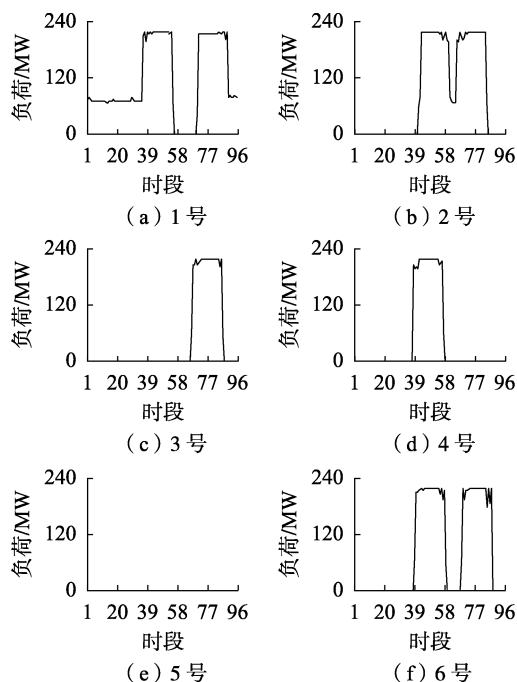


图4 枯小方式1—6号机组的负荷分配结果

Fig.4 Load distribution results of Unit 1-6 for dry-season with low-rate load

4 结论

一洞多机式电站以其装机规模大、节约工程投资、可充分利用水头等优势,在我国特别是西南地区投产较多,如何在满足电网、电站、机组等复杂时空耦合约束条件下进行短期负荷合理分配,实现其安全经济运行,是本文的主要研究内容。针对一洞多

机式电站机组间复杂的水力联系,本文进行了不同隧洞下的最优开停机组合及给定开停机组合下的负荷优化分配两阶段建模,提出了结合启发式搜索策略和逐步优化算法确定开机隧洞及开停机组合的方法,实现了以电定水准则下的负荷分配模型。最后以红水河某水电站枯大、枯小不同典型日负荷分配为例,验证所提方法的合理性和实用性,为一洞多机式电站短期负荷分配提供了切实可行的求解思路。

参考文献:

- [1] 张梁,陈宏川. 水电站长距离引水隧洞水力过渡过程数值模拟研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2016, 2(6): 70-77.
ZHANG Liang, CHEN Hongchuan. Hydraulic transients simulation in hydropower station with long water diversion tunnel [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2016, 2(6): 70-77.
- [2] 张勇传. 水电站经济运行原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1988: 123-125.
- [3] LI Xiang, LI Tiejian, WEI Jianhua, et al. Hydro unit commitment via mixed integer linear programming: a case study of the three gorges project, China [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1232-1241.
- [4] CHENG Chuntian, WANG Jianyang, WU Xiyu. Hydro unit commitment with a head-sensitive reservoir and multiple vibration zones using MILP [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4842-4852.
- [5] 贾江涛, 管晓宏, 翟桥柱. 考虑水头影响的梯级水电站群短期优化调度[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 13-16.
JIA Jiangtao, GUAN Xiaohong, ZHAI Qiaozhu. Short-term optimal scheduling of head-dependent cascaded hydropower stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 13-16.
- [6] 邓俊, 韦化, 黎静华, 等. 一种含四类0-1变量的机组组合混合整数线性规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2770-2778.
DENG Jun, WEI Hua, LI Jinghua, et al. A mixed-integer linear programming model using four sets of binary variables for the unit commitment problem [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2770-2778.
- [7] 周东清, 彭世玉, 程春田, 等. 梯级水电站群长期优化调度云计算随机动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3437-3448.
ZHOU Dongqing, PENG Shiyu, CHENG Chuntian, et al. Cloud computing stochastic dynamic programming algorithms for long-term optimal operation of cascaded hydropower stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3437-3448.
- [8] ZHANG Yanke, JIANG Zhiqiang, JI Changming, et al. Contrastive analysis of three parallel modes in multi-dimensional dynamic programming and its application in cascade reservoirs operation [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 22-34.
- [9] 冯仲恺, 牛文静, 廖胜利, 等. 水电系统中长期发电调度多核并行逐步优化方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 75-81.
FENG Zhongkai, NIU Wenjing, LIAO Shengli, et al. Multi-core parallel progressive optimization algorithm for mid-/long-term generation dispatch of hydropower system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 75-81.
- [10] 廖胜利, 程春田, 王静, 等. 中期火电机组开机优化的改进逐步优化算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 83-88.
LIAO Shengli, CHENG Chuntian, WANG Jing, et al. An improved progressive optimality algorithm for medium-term thermal-unit commitment optimization [J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2010, 34(17): 83-88.
- [11] CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, WU Xiyu. Short-term scheduling for large-scale cascaded hydropower system with multi-vibration zones of high head[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2012, 138(3): 257-267.
- [12] 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[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 31-42.
- [13] TURGEON A. Optimal short-term hydro scheduling from the principles of progressive optimality[J]. Water Resources Research, 1981, 17(3): 481-486.
- [14] 张东晓, 王静, 范伟, 等. 基于并行遗传算法的水电站群中期优化调度[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 87-91.
ZHANG Dongxiao, WANG Jing, FAN Wei, et al. Midterm optimal operation based on parallel genetic algorithm for hydropower stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 87-91.
- [15] KUMAR D N, REDDY M J. Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation[J]. Water Resources Management, 2006, 20(6): 879-898.
- [16] 张智晟, 樊秀娟, 林涛. 基于量子蚁群优化算法的梯级水电系统经济调度[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 17-21.
ZHANG Zhisheng, FAN Xiujuan, LIN Tao. Economic dispatch of cascaded hydropower system based on quantum ant colony optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 17-21.
- [17] LU Peng, ZHOU Jianzhong, WANG Chao, et al. Short-term hydro generation scheduling of Xiluodu and Xiangjiaba cascade hydropower stations using improved binary-real coded bee colony optimization algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 91(91): 19-31.
- [18] LIAO Shengli, LIU Benxi, CHENG Chuntian, et al. Long-term generation scheduling of hydropower system using multi-core parallelization of particle swarm optimization[J]. Water Resources Management, 2017, 31(9): 2791-2807.
- [19] 纪昌明, 谢维, 朱新良, 等. 基于病毒进化粒子群算法的梯级电站厂间负荷优化分配[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 38-43.
JI Changming, XIE Wei, ZHU Xinliang, et al. Optimized load allocation of cascaded hydropower stations based on virus particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 38-43.
- [20] 李树山, 廖胜利, 申建建, 等. 厂网协调模式下梯级 AGC 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1113-1123.
LI Shushan, LIAO Shengli, SHEN Jianjian, et al. Automatic generation control strategies of cascaded hydropower plants oriented to the coordination of power plants and power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1113-1123.

作者简介:



赵宏烨

赵宏烨(1993—),女,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,主要研究方向为水电系统经济运行(E-mail: hyzhao@mail.dlut.edu.cn);

廖胜利(1980—),男,湖南临湘人,副教授,博士,主要研究方向为水火电协调优化算法及系统实现(E-mail: Shengliliao@dlut.edu.cn);

李刚(1979—),男,吉林辽源人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为节能发电调度和电力系统运行方式分析(E-mail: glee@dlut.edu.cn)。

Short-term load distribution method for diversion hydropower plant with multiple turbines in one tunnel

ZHAO Hongye^{1,2}, LIAO Shengli^{1,2}, LI Gang^{1,2}, ZHOU Ling'an^{1,2}, LI Shushan³, WU Zhaoping⁴

(1. Institute of Hydropower & Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Power Dispatching Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China;

4. Power Generation Company Tianshengqiao-II Hydropower Station, Xingyi 562400, China)

Abstract: Many large hydropower stations in China adopt long distance water diversion power generation mode with multiple turbines in one tunnel, short-term load distribution faces problems of mutual interference between units and complication in hydraulic head calculation and so on, and it is extremely difficult to model and solve. Considering the complex hydraulic connection between units, two-stage modelling is adopted. In the first stage, an optimal on/off model of units considering duration constraints is established, and the heuristic searching strategy combined with progressive optimization algorithm is adopted to determine the start-up tunnel and the optimal on/off unit commitment. In the second stage, the load distribution model with the criteria of determining water consumption by electricity generation is established, and the dynamic programming method is used for optimal load distribution among units under the given on/off unit commitment. The load distribution of a hydropower station of Hongshuihe in dry-season under different typical load rates is taken for example, and results show that the proposed method is of strong practicality and can satisfy practical operation requirements.

Key words: hydropower plant with multiple turbines in one tunnel; short-term; load distribution; unit commitment; vibration zone