

水火电联合短期调度的混合整数规划方法

吴宏宇, 管晓宏, 翟桥柱, 高峰

(机械制造系统工程国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Short-term Hydrothermal Scheduling Using Mixed-integer Linear Programming

WU Hong-yu, GUAN Xiao-hong, ZHAI Qiao-zhu, GAO Feng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: This paper presented a short-term hydrothermal scheduling model for large-scale power systems. The model took into account DC network security constraint and emission constraint. A multi-reservoir cascaded hydroelectric system with nonlinear hydro power production function was considered. Forbidden operating zones of hydroelectric plants and the water transport delay between connected reservoirs were also taken into consideration. Linearizing techniques were developed to convert this security-constrained unit commitment problem into a mixed-integer linear programming problem. A commercial mixed-integer linear programming software was applied to solve this difficult problem. Numerical tests were conducted with actual examples of Northwest China Power Grid. The testing results indicate the effectiveness of the proposed approaches. Some comparative results show that the generation cost can be reduced by 1.5% if the proposed approach is applied.

KEY WORDS: hydrothermal scheduling; short-term; emission constraint; security-constrained unit commitment; mixed-integer linear programming

摘要: 针对大型水火电联合系统的短期优调度问题, 建立考虑直流网络安全约束与排污约束的水火电联合调度模型。在考虑梯级水库的非线性水电转换关系、水电机组的不连续出力区间、水流延迟等因素的基础上, 提出将非线性因素线性化的合理途径, 将该安全约束机组组合问题转换为线性混合整数规划问题, 应用混合整数规划软件包对西北电网的实际算例进行了测试。结果表明, 所提出的模型能有效地处理大型水火电联合系统中的各种复杂约束, 采用的线性化方法可以显著降低求解复杂性, 求解结果表明, 采用该方案较采用

常规方案可以减少约 1.5% 的发电成本。

关键词: 水火电联合调度; 短期; 排污约束; 安全约束机组组合; 线性混合整数规划

0 引言

电力系统优化调度的核心任务是在考虑系统负荷需求约束、备用约束、传输安全约束、水库库容约束、上下游水库水量耦合约束、水火发电机组复杂运行约束等众多因素的前提下, 合理安排各机组的启停及发电计划, 使总发电成本或煤耗最低。它是一个典型的大规模非线性混合整数规划问题, 多年来也一直是一个电力工程界研究的热点问题^[1-4], 目前常见的求解算法主要有动态规划法、拉格朗日松弛法、整数规划法、内点法、遗传算法等等^[5-9]。电力系统优化调度研究实际包含了 2 个性质不同但却密切联系的问题: 一是如何针对各个具体系统的特点和要求, 建立合适的调度模型, 比如有些系统中水电所占比例很小, 此时即可忽略水力发电成本并将水电系统中一些复杂因素大幅简化; 二是针对具体模型研究设计有效的求解算法。长期以来受到数学规划计算方法效率和计算机计算能力的限制, 为降低求解复杂性, 现有模型中考虑的因素和约束条件都不够完整, 因此仅从建模角度考虑, 提高模型的精确度仍有较大空间。随着数学规划理论和方法的不断进步, 以及商业优化软件的飞速发展, 在当前国家大力推行节能发电调度的背景下, 已迫切需要研究更精确的节能调度模型和更有效的求解算法。

水火电联合调度、传输安全约束、排污约束是近年来在电力系统短期优化调度研究中受到广泛关注的几个问题。在大型电力系统中, 特别是在水电装机容量比例较高的系统中, 进行水火电联合调

基金项目: 国家自然科学基金项目(60736027, 60704033); 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2007AA04Z154)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60736027, 60704033); The National High Technology Research and Development of China(863 Program) (2007AA04Z154)。

度能显著降低发电成本,充分利用水电良好的调峰能力,但由于在建模时须考虑水电调度中复杂的水电机组出力曲线、水头影响、不稳定振动区间、梯级水库上下游耦合及水流延时等因素,目前国内外的大量文献主要单纯研究水电调度或火电调度,或者在考虑联合调度时进行简化处理,建立近似的线性整数规划模型,然后基于一般的整数规划方法求解^[10-13]。

在大型电力系统中,调度问题涉及的机组多、地域广,不仅要考虑本地区的电能需求,还需向其它区域输送电能,这使得在调度时必须考虑传输线的容量限制问题,即传输安全约束。传输安全约束目前已成为制约电力系统优化调度水平的瓶颈^[14-15]。电力生产过程会导致大量污染物产生,随着国家对节能减排问题的重视,考虑污染排放约束具有重要的现实意义,然而排污限制约束耦合了所有机组和调度周期的所有时段,所以也显著增加了调度问题的复杂性。

从目前的研究趋势看,短期内想要结合电力系统优化调度问题本身特点,设计出高效的求解算法解决以上困难的可能性较小,而针对具体系统,建立近似的线性整数规划模型并基于一般的整数规划方法求解已逐渐成为主流方法^[16]。本文即采用这一思路,先建立一种系统化、较为精确的水火电联合调度模型,在模型中同时考虑了直流传输安全约束、系统排污约束以及水轮发电机组不稳定振动区间等因素,这是比较复杂的一项工作;然后针对模型中的非线性因素,结合实际系统对模型精度的要求,提出合适的线性化方法,在允许的误差范围内将问题转化为线性混合整数规划;最后基于目前流行的混合整数规划软件包,对西北电网的实际算例进行了测试和分析,证明了模型和算法的有效性。

1 基本数学模型

水火电联合短期优化调度的目标是在满足众多复杂约束的前提下,通过合理安排各机组出力计划,使系统的总发电成本最低。水电机组的发电成本相对于火电机组很小,因此在国内外水火电联合调度的文献中,通常把水电机组的发电成本忽略不计^[17]。火电机组的发电成本主要包括燃料成本、启停成本和维护成本 3 类。由于维护成本考虑因素较多,相关函数关系十分复杂,所以很难准确量化到调度过程中。国内外大多数文献都将机组维护成本当作一个常量来看待,或是在短期调度问题中不予

以考虑^[18]。本文出于简化模型的考虑,不计水电机组的发电成本和火电机组的维护成本。

目标函数为

$$F = \min \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_i(p_{i,t}) + S_{i,t-1}] \right\} \quad (1)$$

式中: I 为火电机组个数; T 为调度周期; $C_i(p_{i,t})$ 为第 i 台火电机组在第 t 时段出力为 $p_{i,t}$ 时的燃料费用,它与机组的燃料费用特性密切相关; $S_{i,t-1}$ 为火电机组的启停费用,本文采用文献[19]中的线性启动费用。

式(1)服从下文的系统约束、火电单机组约束和独立水系约束:

1) 系统约束。

①系统能量平衡约束为

$$\left(\sum_{i=1}^I p_{i,t} + \sum_{k=1}^K g_{k,t} \right) \tau = E_t \quad (2)$$

②系统备用约束为

$$\sum_{i=1}^I S_{Ti,t} (\bar{p}_i - p_{i,t}) \geq p_{rt} \quad (3)$$

③传输网络安全约束为

$$-\bar{F}_n \leq \sum_{i=1}^I \Gamma_{ni} p_{i,t} + \sum_{k=1}^K \Gamma_{nk} g_{k,t} - \sum_{m=1}^M \Gamma_{nm} D_{m,t} \leq \bar{F}_n \quad (4)$$

④排放约束为

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \psi_i p_{i,t} \tau \leq \Theta_T \quad (5)$$

式中: $g_{k,t}$ 为第 k 个独立水系上的所有水电机组在第 t 时段内的发电功率之和; τ 为调度时长; E_t 为系统在第 t 时段的电能需求; $S_{Ti,t}$ 为第 i 台火电机组在第 t 时段内的状态变量, 1 表示开机, 0 表示关机; \bar{p}_i 和 ψ_i 分别为火电机组出力上限和排污系数; $D_{m,t}$ 为第 t 时段第 m 个节点的负载; Γ_{ni} 、 Γ_{nk} 、 Γ_{nm} 为与第 n 条传输线有关的传输因子矩阵; \bar{F}_n 为传输线的直流潮流上限; Θ_T 为调度周期内系统的排污量上限。

2) 火电单机组约束。

①最小开关机时间约束为

$$\begin{cases} u_{i,t} = 1, & 1 \leq x_{i,t} < \bar{\tau}_i \\ u_{i,t} = -1, & -\underline{\tau}_i < x_{i,t} \leq -1 \end{cases} \quad (6)$$

②状态转移约束为

$$\begin{cases} x_{i,t+1} = x_{i,t} + u_{i,t}, & x_{i,t} \cdot u_{i,t} > 0 \\ x_{i,t+1} = u_{i,t}, & x_{i,t} \cdot u_{i,t} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

③发电能力约束为

$$\begin{cases} \underline{p}_i \leq p_{i,t} \leq \bar{p}_i, & x_{i,t} > 0 \\ p_{i,t} = 0, & x_{i,t} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

④爬坡速率约束为

$$|p_{i,t+1} - p_{i,t}| \leq \Delta_i, x_{i,t} > 0 \text{ 且 } x_{i,t+1} > 0 \quad (9)$$

⑤首末开机时段约束为

$$\begin{cases} p_{i,t} = \underline{p}_i, & x_{i,t-1} < 0 \text{ 且 } u_{i,t-1} = 1 \\ p_{i,t} = \underline{p}_i, & x_{i,t} > 0 \text{ 且 } u_{i,t} = -1 \end{cases} \quad (10)$$

⑥必须开机约束为

$$\begin{cases} x_{i,t} > 0, & t \in U_i \\ x_{i,t} < 0, & t \in B_i \end{cases} \quad (11)$$

⑦初始状态约束为

$$\begin{cases} x_{i,0} = x_i^0 \\ p_{i,0} = p_i^0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： $u_{i,t}$ 为火电机组在第 t 时段末决定下一时段状态的离散控制变量，1表示开机状态，-1表示关机状态； $x_{i,t}$ 为火电机组在时段 t 的状态变量，表示已经开或关了几个时段； τ_i 和 $\bar{\tau}_i$ 为最小开机和关机时间； \underline{p}_i 为火电机组出力下限； Δ_i 为火电机组爬升速率上限； U_i 和 B_i 为必须开和关机时段的集合； x_i^0 和 p_i^0 为火电机组在初始时刻的状态和出力。

3) 独立水系约束。

①水电机组发电能力约束为

$$\begin{cases} \sum_{y=1}^{Y_{l,j,k}} z_{l,j,k,y,t} \underline{g}_{l,j,k,y} \leq g_{l,j,k,t} \leq \sum_{y=1}^{Y_{l,j,k}} z_{l,j,k,y,t} \bar{g}_{l,j,k,y} \\ \sum_{y=1}^{Y_{l,j,k}} z_{l,j,k,y,t} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中： $Y_{l,j,k}$ 为水电机组稳定出力区间总数； $Z_{l,j,k,y,t}$ 为第 k 条水系中第 j 个水库上第 l 个水电机组在第 t 时段在稳定出力区间 y 上的状态变量，1表示在此区间运行，否则为0； $\underline{g}_{l,j,k,y}$ ， $\bar{g}_{l,j,k,y}$ 分别为机组在稳定出力区间 y 上的最小、最大出力； $g_{l,j,k,t}$ 为水电机组在时段 t 的出力。由于水轮发电机组在某出力区间运行时，会产生强烈振动，造成机组运行不稳定，故水轮发电机组的出力应避开不稳定振动区间。本文处理此问题的方法是，将水轮发电机不稳定振动出力区间从整个出力区间中去掉，从而将整个出力区间分成若干个不连续的稳定出力区间，机组某一时段只能在某一个稳定出力区间上运行。

②水电转换关系为

$$g_{l,j,k,t} = \begin{cases} G\eta_{l,j,k,t}q_{l,j,k,t}h_{j,k,t}, & \sum_{y=1}^{Y_{l,j,k}} z_{l,j,k,y,t} = 1 \\ 0, & \sum_{y=1}^{Y_{l,j,k}} z_{l,j,k,y,t} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中： G 为水电转换常数； $\eta_{l,j,k,t}$ 和 $q_{l,j,k,t}$ 分别为水轮

发电机组在第 t 时段的水电转换效率和发电用水量； $h_{j,k,t}$ 为水库在第 t 时段的净水头。

③机组流量约束为

$$\sum_{y=1}^{Y_{l,j,k}} z_{l,j,k,y,t} \underline{q}_{l,j,k} \leq q_{l,j,k,t} \leq \sum_{y=1}^{Y_{l,j,k}} z_{l,j,k,y,t} \bar{q}_{l,j,k} \quad (15)$$

④库容限制约束为

$$\underline{V}_{j,k} \leq V_{j,k,t} \leq \bar{V}_{j,k} \quad (16)$$

式中： $q_{l,j,k,t}$ 为水电机组 l 在第 t 时段的发电用水量； $\bar{q}_{l,j,k}$ 、 $\underline{q}_{l,j,k}$ 为水电机组最大、小发电用水量； $V_{j,k,t}$ 为水库 j 在第 t 时段的库容； $\bar{V}_{j,k}$ 、 $\underline{V}_{j,k}$ 为在调度周期内水库的最大、最小库容。注意，这里的最大、最小库容并不是库容的物理上、下限，而是考虑到不同季节的灌溉和航运等因素，电网在调度前设定的各时段水库最大、最小库容。一般来说，丰水期的最小库容设定得较小，可用于发电的水量就相对较大；而枯水期的最小库容设定得较大，可用于发电的水量则相对较小。因此，约束(16)会直接影响到丰、枯水期水电机组的启停和出力情况。

⑤库容平衡约束为

$$\begin{cases} V_{j,k,t+1} = V_{j,k,t} + Q_{j-1,k,t-\varepsilon_{j-1,k}+1} - Q_{j,k,t+1} + w_{j,k,t+1} \\ Q_{j,k,t} = s_{j,k,t} + \sum_{l=1}^{N_{j,k}} q_{l,j,k,t} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $Q_{j,k,t}$ 为水库 j 在第 t 时段的总放水量； $w_{j,k,t}$ 和 $s_{j,k,t}$ 分别为水库在第 t 时段的自然来水量和弃水量； $N_{j,k}$ 为第 j 个水库上的水电机组数，本模型中不考虑抽水蓄能机组； $\varepsilon_{j,k}$ 为水系中第 j 个水库到第 $j+1$ 个水库的水流延时。在本模型中，每个独立水系上的水库按从最上游到最下游的顺序依次编号，每个水库最多只有一个直接下游水库，也最多只有一个直接上游水库，且假定水流延时是调度时段长度的整数倍。

2 模型的线性化

2.1 目标函数的线性化

直接求解式(1)~(17)对应的非线性混合整数规划问题在目前的技术水平下几乎是不可能的，对于整数规划问题，如果目标函数及约束都是优化变量的线性表达式，这样的问题称为线性整数规划。线性整数规划是目前研究最为深入、理论和算法相对成熟的一类复杂优化问题。即便如此，对于大规模线性整数规划问题，非专业人员仅依靠一些通用算法设计的程序根本不能在实际中使用，这一点和其他一些数值计算问题有很大区别，因此，本文在建

立了上述模型后, 确定的求解思路是对模型中的非线性因素在满足精度要求的前提下进行线性化处理, 然后采用成熟的线性整数规划商业软件包求解。

目标函数式(1)包括每个火电机组在调度周期内各个时段非线性燃料费用 $C_i(p_{i,t})$ 和线性启停费用 $S_{i,t}$ 之和, 因此需将 $C_i(p_{i,t})$ 进行线性化处理, 为此引入以下几组变量: N_i 为机组 i 的燃料费用曲线经分段线性化后的段数; $p_{i,t}^j$ 为机组 i 在第 t 时段内在其燃料费用曲线第 j 段上的出力; ρ_i^j 为机组 i 在其燃料费用曲线上第 j 段上的斜率, $j=1,2,3,\dots,N_i$ 。

假定将处于开机状态的机组 i 的出力区间 $[P_i, \bar{P}_i]$ 均分为 N_i 段, 则每段的段长为 $(\bar{P}_i - P_i)/N_i$, 且机组 i 在每段上的出力介于 0 和段长之间, 即 $0 \leq p_{i,t}^j \leq (\bar{P}_i - P_i)/N_i$ 。假设该机组在 t 时段的出力为 $p_{i,t}$, 且在 $n(n \leq N_i)$ 个段上有出力, 对应分别记为 $p_{i,t}^1, p_{i,t}^2, \dots, p_{i,t}^n$, 显然

$$p_{i,t} = P_i + p_{i,t}^1 + p_{i,t}^2 + \dots + p_{i,t}^n \quad (18)$$

根据燃料费用函数可计算出各对应段上的斜率 ρ_i^j , 于是, 燃料费用函数可写成分段线性函数之和的形式:

$$C_i(p_{i,t}) = \begin{cases} C_i(P_i) + \rho_i^1 \cdot p_{i,t}^1 + \dots + \rho_i^n p_{i,t}^n, & p_{i,t} \neq 0 \\ 0, & p_{i,t} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

这样就完成了非线性燃料费用函数的分段线性化转换, 如图 1 所示, 式(1)相应转化为如下的线性目标函数

$$F = \min \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \{ S_{Ti,t} [C_i(P_i) + \sum_j \rho_{i,j} p_{i,j,t}] + S_{i,t} \} \quad (20)$$

结合实际系统数据发现, 对非线性燃料费用曲线如果采用全局最优线性逼近(最大绝对误差最小), 则燃料费用的最大相对误差不超过 1%, 绝大部分在 0.5% 以下。即便如此, 本文仍采用了分段线性逼近进一步减小模型误差, 算例测试表明, 当分段数为 5 或 6 时, 分段线性逼近的误差已接近于 0。

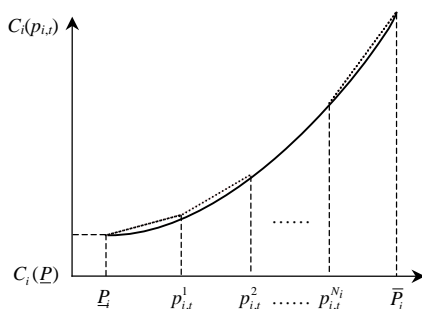


图 1 燃料费用曲线分段线性化

Fig. 1 Piece-wise linearizing of fuel cost curve

可见这种处理方法的精度非常高, 完全满足工程实际需求。

2.2 约束的线性化

2.2.1 水电转换关系的线性化

水电机组发电量为用水量、水库水位等的非线性复杂函数, 对于受水位影响较大的水库, 式(14)的水电转换关系不仅要考虑流过机组的水流量, 而且还要考虑水库水位的变化, 此时发电量是水流量和水头的非线性二元函数。本文根据西北电网实际数据, 发现若在每台水电机组的每个出力区间内进行全局最优二元线性拟合, 其精度已能满足要求。为此, 基于西北电网各大水库水电机组的《水头、出力、流量关系表》提出分片二元线性拟合公式:

$$g_{l,j,k,y,t} = a_{l,j,k,y} q_{l,j,k,y,t} + b_{l,j,k,y} h_{j,k,t} + c_{l,j,k,y} \quad (21)$$

式中 $a_{l,j,k,y}$ 、 $b_{l,j,k,y}$ 和 $c_{l,j,k,y}$ 分别为第 k 个水系第 j 个水库上的第 l 个机组在稳定运行区间 y 上的工作流量系数、水头系数和常数。

一般来说, 水库的水位与库容是非线性函数关系, 根据西北电网各大水库的《水位、库容关系表》, 采用最佳一致线性逼近, 将水头近似为库容的一元函数:

$$h_{j,k,t} = m_{j,k} V_{j,k,t} + n_{j,k} \quad (22)$$

式中 $m_{j,k}$ 和 $n_{j,k}$ 分别为第 k 条水系中第 j 个水库的库容系数和常数。误差分析表明, 对公伯峡水库, 这种最佳一致线性逼近的最大相对误差为 2%, 其它水库的最大相对误差在 1% 以内, 其精度已能满足工程需要。

由式(21)~(22)可得到水电机组在某个调度时刻某个运行区间上的发电量与水流量、库容的二元线性转换关系:

$$g_{l,j,k,y,t} = R_{l,j,k,y}^1 q_{l,j,k,y,t} + R_{l,j,k,y}^2 V_{j,k,t} + R_{l,j,k,y}^3 \quad (23)$$

通过对具体数据的拟合, 可得到各水电机组水电转换关系系数 R^1 、 R^2 和 R^3 。

本文对西北电网提供的数据进行检验, 结果发现对个别机组最大相对误差接近 5%, 其余机组的最大相对误差均在 3% 以下, 如果想进一步提高精度必然导致模型复杂度急剧增加, 由于西北电网中火电出力所占比重一般超过 70%, 所以本文最终采用此方案。

2.2.2 最小开关机时间约束的线性化

对于模型中最小开关机时间约束式(6)等非线性约束, 本文采用目前最有效的方法进行线性化处理^[17], 引入 2 组开关机操作变量: $S_{Di,t}$ 为机组 i 在

第 t 时段内的关机操作, 0-1 变量, 1 表示进行一次关机操作, 0 表示不进行关机操作; $S_{Ui,t}$ 为机组 i 在第 t 时段内的开机操作, 0-1 变量, 1 表示进行一次开机操作, 0 表示不进行开机操作。

为此, 可以用 2 个线性不等式表示式(7)中的最小开关机时间约束。

$$S_{Ui,t} + \sum_{\tau=t+1}^{\min\{T,t+\bar{\tau}_i-1\}} S_{Di,\tau} \leq 1 \tag{24}$$

$$S_{Di,t} + \sum_{\tau=t+1}^{\min\{T,t+\bar{\tau}_i-1\}} S_{Ui,\tau} \leq 1 \tag{25}$$

式(24)~(25)利用 0-1 变量, 以线性约束的形式完整描述了最小开关机时间约束, 且这种处理方法不会损失模型精度。

3 算例分析

本文采用目前流行的 CPLEX 优化软件包对上述线性混合整数规划模型进行求解。CPLEX 是一种性能卓越、功效强大的优化软件包, 它综合了分枝定界、割平面等多种算法的优点, 可以有效解决工程实际和科学研究中一些大规模的混合整数规划问题。CPLEX 优化软件包可以方便地对模型进行建立和修改, 同时用户可以方便选择求解策略^[20], 控制求解精度, 以利于找到更高质量的解。

本文针对西北电网简化系统(图 2), 以一天 24 时段的调度问题为例, 对上述模型进行了算例测试。测试系统中包含 5 个省节点、4 条省际传输线、146 台火电机组、3 条水系的 6 个梯级水库、26 台水电机组。测试在 CPU P4 2.4 GHz、内存 512 M 的台式机上, 通过 Microsoft C++ 开发平台调用 CPLEX 8.0 实现。算例 1 和算例 2 的负荷数据分别来自西北电网 07 年 10 月 30、31 日的调度计划, 各水、火电机组物理参数、传输线参数、水库库容、水库自然来水、水流延迟和地区燃料价格等数据由电网提供。表 1 给出算例的主要参数, 图 3 给出西北电网直调水库示意图。

表 2 列出了算例的主要求解结果, 在设定 CPLEX 求解间隙为 0.01 和燃料费用曲线分段数为 10 的情况下, 2 个算例都在 100 s 以内得到了优化调度问题的次优解。

由于本文建立的基本模型较精确地考虑了各类复杂的约束, 加上参加调度的机组多、调度时段长, 使得各算例中的变量数目都超过了 10 000, 其中约 2/3 为离散变量, 各类约束超过了 25 000, 其中约 1/2 为混合变量的非线性约束。对于如此大规

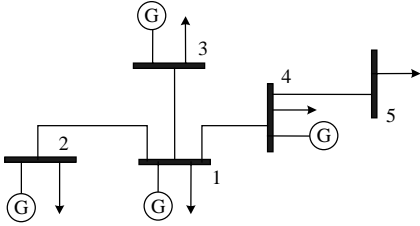


图 2 西北电网简化示意图
Fig. 2 One-line diagram for system

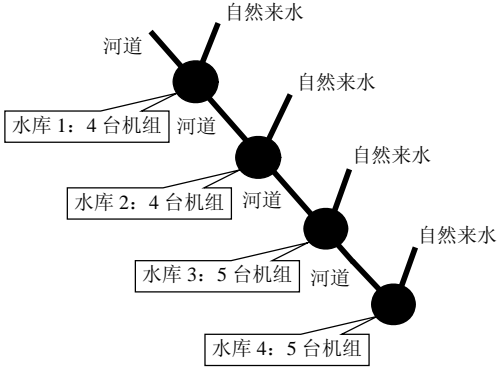


图 3 某水系直调水库示意图
Fig. 3 Diagram for directly scheduling reservoirs

表 1 算例主要参数
Tab. 1 Main parameters of tests

主要参数	算例 1	算例 2
参调火电机组数	118	119
参调水电机组数	22	24
峰值负荷/MW	24 040	21 891
低谷负荷/MW	19 435	17 687
负荷均值/MW	21 387	19 368
负荷最大波动/MW	354	358
备用系数/%	10	10

表 2 算例求解结果
Tab. 2 Results of testing cases

算例	最优目标值/万元	求解间隙	求解时间/s
1	2 735.83	0.01	92
2	2 710.19	0.01	74

算例	系统总出力/ 10^4 kW·h	火电出力比例/%	水电出力比例/%
1	46 313	79	21
2	42 785	81	19

模、离散、非线性的数学规划问题, 一般的算法很难在可接受的时间内有效求解, 而采用本文提出的线性化方法将模型转化为线性混合整数规划问题, 并采用 CPLEX 优化软件包求解, 则可以在短时间内得到高质量的解。对实际系统的验证表明, 算例的求解结果是可行和合理的。

表 3 比较了算例求解结果和电网原发电计划的发电成本。与原发电计划相比, 算例 1 和算例 2 的求解结果分别节约发电成本 2.29% 和 1.62%。本文还对西北电网 2007 年 10 月 1 日至 29 日各天的负

表 3 发电成本
Tab. 3 Generating cost of tests

算例	优化调度结果/万元	原发电计划/万元	成本节约/%
1	2 735.83	2 798.43	2.29
2	2 710.19	2 754.16	1.62

荷数据进行了的算例测试，通过与原发电计划的比较表明，在一般情况下，求解结果会节约 1.5% 左右的发电成本。

图 4 是算例 1 的系统负荷曲线 P_L 和扣除求解结果中水电出力后的负荷曲线， T_D 为调度周期。由图 4 可知，系统负荷曲线从调度周期的第 17 个时段开始急剧增大，到第 20 个时段出现峰荷，负荷峰谷差 4 605 MW；而扣除水电出力后的负荷曲线则相对平滑，在负荷高峰时段附近变化很小，负荷峰谷差缩小到 2 305 MW。这一结果说明，西北电网具有充足的水电调峰容量，水电调峰效果非常显著。为了进一步说明水电的调峰作用，本文还对单个水电站的水电机组出力进行了分析。图 5 是某水电站的出力 P_W 的曲线，除检修的机组外，该水电站当日最大发电容量为 900 MW，由图 5 可知，在负荷峰值时段其出力已达最大。

图 6 是算例 1 中火电厂 a 和 b 的出力 P_a 和 P_b 。a、b 电厂位于不同地区，各包括 4 台相同煤电机组。根据机组的煤耗量和电煤价格可计算出，在相同出力下，电厂 a 的燃料成本高于电厂 b。对比图 6(a)、(b) 可知，电厂 a 求解结果的出力小于原发电计划，电厂 b 求解结果的出力大于原发电计划，且出力差距较大。分析以上结果发现，电厂 a 是网属老电厂，而电厂 b 是刚投产发电的新厂。由于目前中国真正

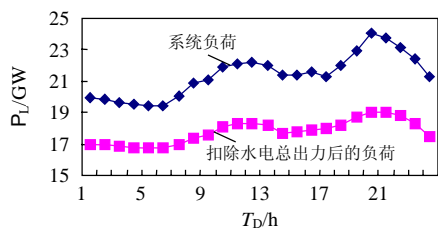


图 4 系统负荷曲线

Fig. 4 Diagram for system load

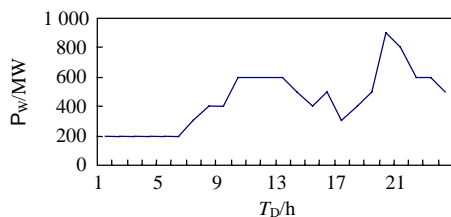
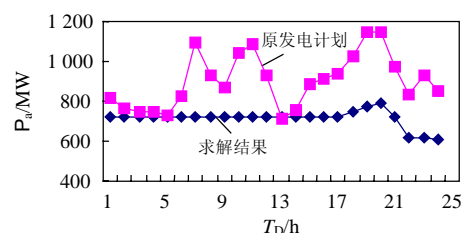
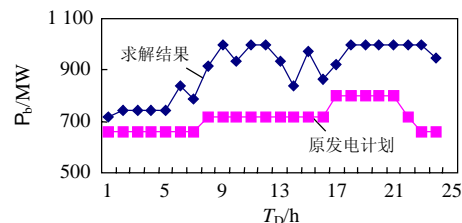


图 5 某水电站出力

Fig. 5 Generation levels of a hydroelectric plant



(a) 火电厂 a 的出力



(b) 火电厂 b 的出力

图 6 火电厂 a、b 的出力

Fig. 6 Generation levels of two thermal plants

竞争性的电力市场尚未形成，受地方保护主义等因素的影响，能耗较高的电厂 a 一直都享有较高的上网电量，从资源优化利用的角度来看，这种现象是不合理的，会导致电力生产的高耗能、高污染和低效率。在当前国家大力推行节能发电调度的背景下，对电力生产进行合理的优化调度，充分大量利用低能耗、低成本的发电容量，可有效降低能源的消耗量，减少系统总发电成本。通过对系统的验证表明，求解结果的出力是可行和合理的，这也从侧面证明了本文所建模型及采用方法的有效性。

4 结论

本文建立了综合考虑传输安全约束和排污约束等多种复杂约束、以发电成本最低为优化目标的水火电联合短期优化调度模型。针对系统实际数据，提出了将模型中的非线性因素线性化的合理途径，将模型转换为线性混合整数规划问题，基于 CPLEX 优化软件包，对西北电网的实际算例进行了测试和分析，结果表明本文提出的这种方法，求解速度快，解的质量高，能够有效处理各种复杂约束，降低电网 1.5% 左右的发电成本。基于本文提出的调度模型和方法，已开发出一套软件系统，该系统目前已交付西北电网测试，将有助于提高其节能调度水平和调度决策能力。

参考文献

- [1] 孙力勇, 张焰, 蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 82-87.
Sun Liyong, Zhang Yan, Jiang Chuanwen. A solution to the unit commitment problem based on matrix real-coded genetic algorithm

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 82-87(in Chinese).
- [2] 郭三刚, 管晓宏, 翟桥柱, 等. 具有爬升约束机组组合的充分必要条件[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 14-19.
Guo Sangang, Guan Xiaohong, Zhai Qiaozhu, et al. A new necessary and sufficient condition for checking feasibility of a solution to unit commitment problems with ramp rate constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 14-19(in Chinese).
- [3] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24-28.
Hu Jiasheng, Guo Chuangxin, Cao Yijia. A hybrid particle swarm optimization method for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 24-28(in Chinese).
- [4] 范炜, 管晓宏, 何踊跃, 等. 求解具有爬升约束机组调度问题的结构动态规划方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 13-19.
Fan Wei, Guan Xiaohong, He Yongyue, et al. Scheduling generating units with ramping constraints using constructive dynamic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 13-19(in Chinese).
- [5] 王喆, 余晓新, 张弘鹏, 等. 社会演化算法在机组组合中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 12-17.
Wang Zhe, Yu Yixin, Zhang Hongpeng, et al. Social evolutionary programming based unit commitment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 12-17(in Chinese).
- [6] 陈皓勇, 张靠社, 王锡凡. 电力系统机组组合的系统进化方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 9-13, 40.
Chen Haoyong, Zhang Kaoshe, Wang Xifan. Evolutionary optimization method of power system unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 9-13, 40(in Chinese).
- [7] 黎静华, 韦化. 求解机组组合问题的领域搜索法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 35-40.
Li Jinghua, Wei Hua. Unit commitment via local search point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 35-40(in Chinese).
- [8] 蔡兴国, 初壮. 用遗传算法解机组组合的研究[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 36-39.
Cai Xingguo, Chu Zhuang. Unit commitment based on genetic algorithms[J]. System Technology, 2003, 27(7): 36-39(in Chinese).
- [9] 韦化, 李滨, 杭乃善, 等. 大规模水火电力系统最优潮流的现代内点算法实现[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 13-18.
Wei Hua, Li Bin, Hang Naishan, et al. An implementation of interior point algorithm for large-scale hydro-thermal optimal power flow problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 13-18(in Chinese).
- [10] Chang G W, Aganagic M, Waight J G, et al. Experiences with mixed integer linear programming based approaches on short-term hydro scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 141-147.
- [11] Conejo A J, Arroyo J M, Contreras J, et al. Self-scheduling of a hydro producer in a pool-based electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1265-1272.
- [12] Prasannan B, Luh P B, Yan H, et al. Optimization-based sale transactions and hydrothermal scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 654-660.
- [13] Salam M S, Nor K M, Hamdan A R. Hydrothermal scheduling based Lagrangian relaxation approach to hydrothermal coordination[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(1): 226-235.
- [14] Guan X, Guo S, Zhai Q. The conditions for obtaining feasible solutions to security-constrained unit commitment problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1746-1756.
- [15] Martinez-Crespo J, Usaola J, Fernandez J L. Security-constrained optimal generation scheduling in large-scale power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 321-332.
- [16] Carrion M, Arroyo J M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
- [17] Mandal K K, Basu M, Chakraborty N. Particle swarm optimization technique based short-term hydrothermal scheduling[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(4): 1392-1399.
- [18] Padhy N P. Unit commitment-a bibliographical survey[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1196-1205.
- [19] 翟桥柱. 电力系统优化调度模型与算法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
Zhai Qiaozhu. Research on the model and algorithms for hydrothermal scheduling[D]. Xi'an: Xi'an Jitong University, 2005(in Chinese).
- [20] Bixby B, Rothberg E. Progress in computational mixed integer programming a look back from the other side of the tipping point[J]. Annals of Operations Research, 2007, 149(1): 37-41.



吴宏宇

收稿日期: 2009-03-09。

作者简介:

吴宏宇(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化调度及电力市场, hywu@sei.xjtu.edu.cn;

管晓宏(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力与制造系统优化调度、计算机网络信息安全等;

翟桥柱(1972—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统系统调度及大系统优化理论等;

高峰(1967—), 男, 教授, 研究方向为电力市场预测, 优化与竞标等。

(责任编辑 刘浩芳)