

基于模糊机会约束规划的 水火电力系统多目标随机调度模型

吴杰康¹, 唐力²

- (1. 广东工业大学自动化学院, 广东省 广州市 510006;
2. 广西右江水利开发有限责任公司, 广西壮族自治区 南宁市 530026)

Multi-objective Stochastic Scheduling Models for Hydrothermal Plants Based on Fuzzy Chance Constrained Programming

WU Jiekang¹, TANG Li²

- (1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China;
2. Guangxi Youjiang Hydroelectric Plant Limited Corporation, Nanning 530026, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

ABSTRACT: A stochastic scheduling model for hydrothermal power systems is presented based on fuzzy chance constrained programming, taking reservoir inflow and water level for a random variable. Reservoir water volume at the initial hour was formulated as a triangular fuzzy number, representing forecasting errors of reservoir water level. Aiming to represent stochastic variable characteristics due to historical data errors, fuzzy stochastic variables were used to represent the uncertainties incurred in optimization scheduling of hydrothermal power systems. A control function was introduced to coordinate the three objective functions, which includes coal consumption minimization, reservoir water level maximization and air pollutant emission minimization. A stochastic scheduling model of hydrothermal power systems can be converted into a determined form using fuzzy chance constrained programming and random chance constrained programming. A system with 8 cascaded plants and 6 coal-fired plants was taken as a study example and the results show that the model is correct.

KEY WORDS: hydrothermal power system; stochastic scheduling; fuzzy chance constrained programming; stochastic variable

基金项目: 国家自然科学基金项目(50767001); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20094501110002); 广西自然科学基金项目(2011jjA60017); 广西壮族自治区研究生教育创新计划项目(105930901001, 105930904068)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50767001); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20094501110002); Guangxi Natural Science Foundation(2011jjA60017); Innovation Project of Guangxi Graduate Education (105930901001, 105930904068).

摘要: 针对水火电力系统运行调度中所包含的不同种类的不确定量, 提出了一种基于模糊随机机会约束规划的短期水火电力系统多目标优化调度模型。将调度周期开始的水库蓄水量作为一个三角模糊量, 以描述初始蓄水预测可能存在的误差。针对某些随机变量可能由于历史数据不足而存在误差的问题, 用模糊随机变量替代这些随机变量, 描述水火电力系统运行中的不确定性。在考虑整个系统发电煤耗最小化和污染物排放最小化的目标同时, 考虑了龙头电站周期末蓄水量最大的优化目标, 并引入了火电机煤耗量与梯级水电站蓄水量目标的协调函数。按照模糊机会约束和随机机会约束的确定性等价形式, 将短期水火电调度不确定模型转化为确定性模型。以一个 8 级梯级水电站和 6 台火电机组成的水火电力系统为实例进行计算, 验证了所提出的水火电力系统随机调度模型的正确性。

关键词: 水火电力系统; 随机调度; 模糊机会约束规划; 随机变量

0 引言

水电和火电已经成为一部分电网的 2 大主要电源, 在协调水电和火电生产中, 节能发电调度为急需解决的现实问题^[1-5]。节能调度中最重要的优化目标是降低整个系统能耗, 因此, 依据发电厂的能耗对负荷进行分配, 让能耗少的发电厂承担更多的负荷。许多研究者利用出力的多项式函数来表示发电厂出力与发电成本(即发电能耗, 主要是指火电的耗量)的关系^[6-10], 即发电成本函数和耗量特性曲线, 两者目标函数的数学描述是十分相似的, 区别只是

多项式的系数不同。

在降低发电能耗的同时，节能调度的另一个重要任务是降低火力发电的污染物与温室气体的排放量，因此，在节能调度的建模过程中还需要考虑如何引入排污量及其对调度过程的影响。在现有的优化调度研究中，很多研究者已经将污染物排放量作为目标函数之一加入数学模型中^[11-14]，在以污染排放的最小化为目标时，通过在污染排放治理的花费与排放污染物所需支付的罚款之间寻求平衡，得到发电效益、能耗和排放相对最优的优化调度方案。

水电站的自然来水量本身是一个随机量，但是随机分布规律依赖于历史统计数据，而历史数据有可能由于数据量不足，导致通过统计得到的规律产生偏差，因此随机量的分布规律本身又具有模糊性。文献[15-16]分别采用三角模糊变量和正态分布的随机变量描述自然来水量以及系统的负荷需求，同时将系统的安全约束以及水库的蓄水约束转变为模糊机会约束(随机机会约束)。

水火电力系统短期经济调度是实现水火电力系统联合经济运行的重要技术手段，它是在满足负荷需求及其相关约束的前提下，确定短期内水电站水库的最佳放水策略和火电机组的最佳出力，以实现电力系统的经济运行。其数学模型是具有强非线性特点的包含物理约束、电力约束、系统约束等大量约束条件的非凸非线性优化问题。目前，已有很多优化方法应用到该优化问题的求解中，如线性规划^[17]、非线性规划^[18]、网络流^[19-20]、群体智能算法^[21-25]等。利用线性规划法建立的优化模型难以反映水火系统的强非线性因素；非线性规划法计算量相对较大，求解大规模优化问题时存在收敛特性不稳定的缺点；动态规划法易陷入“维数灾”。群体智能算法对优化模型无连续性、光滑性及其凸性要求，从理论上可全局收敛到优化问题的全局最优解，因此成为研究热点，目前已用于水火电力系统短期经济调度的求解中，并显示出其独特的优越性。

本文针对水火电力系统优化调度问题中入库流量和水库蓄水量等不确定性因素的影响，提出了一种基于模糊随机机会约束规划的短期水火电力系统多目标优化调度模型。按照模糊机会约束和随机机会约束的确定性等价形式，将短期水火电调度不确定模型转化为确定性模型。

1 水电机组功率特性

在水电机组将水库蓄水的势能与压能转化为电能的过程中，影响能量输入、能量损失和能量输出三者之间的转换关系的因素是引用流量、水头、机组效率，其物理关系为

$$P_{h,j}^t = 9.81\eta_j^t Q_j^t (H_j^t - \Delta H_j^t) \quad (1)$$

式中： $P_{h,j}^t$ 为水电厂 k 在时段 t 出力，kW； η_j^t 为水电机组发电效率； Q_j^t 为水电厂 k 在时段 t 的发电流量； H_j^t 为水电厂 k 在时段 t 时电站的毛水头， $H_j^t = Z_j^t - Z_{d,j}^t$ ， Z_j^t 为水库蓄水水位， $Z_{d,j}^t$ 为水库尾水位； ΔH_j^t 为水头损失。

将发电流量之外的影响因素综合，本文称为水电机组出力系数，表示为

$$K_j^t = 9.81\eta_{T,j}^t \eta_{G,j}^t (H_j^t - \Delta H_j^t) \quad (2)$$

式中： $\eta_{T,j}^t$ 、 $\eta_{G,j}^t$ 分别为水轮机、发电机的效率； $\eta_{T,j}^t$ 、 $\eta_{G,j}^t$ 、 Q_j^t 、 $Z_{d,j}^t$ 以及 ΔH_j^t 之间相互制约，其实际制约关系相当复杂。对水库调节能力较强的电站来说，其水库蓄水水位在短期(日)内基本可以视作不变，而径流式水电厂无调节库容，用水原则为来多少水用多少水，因此也可将其蓄水水位视作不变。发电流量向额定发电流量靠近(一般为增加)时， $\eta_{G,j}^t$ 上升，而此时尾水水位和水头损失也是上升的，前者导致耗水单位发电量下降，后者导致其上升。因此，水电厂的优化调度中，对于具有季以上调节能力的水电厂和径流式水电厂，为了简化计算，可以把水电出力系数视为常数^[15]。水电厂发电流量与出力的关系曲线变为

$$P_{h,j}^t = K_j Q_j^t \quad (3)$$

2 火电机组运行特性

2.1 火电机组煤耗特性

火电厂的综合耗量特性曲线可以用二次函数表示，所有火力发电调度对象的总耗量为

$$F_j^t = a_j P_{T,j}^2 + b_j P_{T,j}^t + c_j \quad (4)$$

式中： F_j^t 为火电机组 j 在 t 时段单位时间内的煤耗量，t/h； $P_{T,j}^t$ 为火电机组 j 在 t 时段的出力，MW； a_j 、 b_j 、 c_j 为煤耗量特性系数，单位分别为 $t/(MW \cdot h^2)$ 、 $t/(MW \cdot h)$ 、t/h。

2.2 火电机组排放特性

以发电厂锅炉的二氧化硫(SO₂)排放量为例,发电厂的大气污染物排放量计算涉及锅炉的湿度和气压、煤炭的基灰分含量和基硫分含量、煤炭燃烧的过空气系数以及二氧化硫和烟尘的排放浓度^[26]。准确计算出污染物的排放量是一个非常复杂的过程。将污染物的排放量加入数学模型之中,是为了让污染排放量小的机组在负荷分配的过程中拥有更高的优先级,因此只需大致地表达出发电机组出力变化与污染物排放量之间的关系即可达到目的。发电机组污染物排放^[27]可表示为

$$E_{m,j}^t = a_{em} P_{Tj}^t + b_{em} P_{Tj}^t + c_{em} \quad (5)$$

式中: $E_{m,j}^t$ 为火电机组 j 在 t 时段单位时间内的大气污染物排放量, kg/h; $a_{em,j}$ 、 $b_{em,j}$ 、 $c_{em,j}$ 为排放曲线系数, 单位分别为 kg/(MW·h²)、kg/(MW·h)、kg/h。

3 水系统的不确定性因素

水火电调度中, 最重要的不确定量包括流域内的自然来水以及各级水电厂水库的初始蓄水量。

本文中某一级水电厂的自然来水量, 是指从该水电厂所在的河流断面开始, 直至上一级电站所在的河流断面为止, 其间流域内的降水, 在损耗后流向该水电厂所形成的河川径流。由于降水及其损耗存在空间上与时间上的随机性, 因此水电厂的自然来水量可以视作随机变量。

水电厂的蓄水量为模糊量, 可表示为

$$V_j^t = \hat{V}_j^1 + \Delta t \sum_{\tau=1}^{t-1} (\tilde{I}_j^\tau - Q_j^\tau - S_j^\tau + Q_{j-1}^{\tau-t_{up}} + S_{j-1}^{\tau-t_{up}}) \quad (6)$$

式中: \hat{V}_j^1 为水电厂 j 的模糊初始蓄水量; \tilde{I}_j^τ 为水电厂 j 在 t 时段的随机来水流量; \tilde{I}_j^τ 为水电厂 j 在 t 时段的随机来水流量; S_j^τ 为水电厂 j 在 t 时段的弃水流量; Δt 为运行时间; $Q_{j-1}^{\tau-t_{up}}$ 和 $S_{j-1}^{\tau-t_{up}}$ 分别为上游水电站的发电流量和弃水流量; t_{up} 为上游电厂流量到达下游的时滞。

假定模糊量 $\hat{V}_j^1 = (b-d, b, b+d)$, 则

$$V_j^t = \eta^t + \Delta t \sum_{\tau=1}^{t-1} (-Q_j^\tau - S_j^\tau + Q_{j-1}^{\tau-t_{up}} + S_{j-1}^{\tau-t_{up}}) \quad (7)$$

其中: $\tau=1, 2, \dots, T$; b 、 d 为模糊量 \hat{V}_j^1 的边值; η^t 可表示为

$$\eta^t = (\hat{V}^1 + \Delta t \sum_{\tau=1}^{t-1} \tilde{I}^\tau) \quad (8)$$

式中: $\hat{V}^1 = (b_{v1} - d_{v1}, b_{v1}, b_{v1} + d_{v1})$, b_{v1} 、 d_{v1} 为模糊量 \hat{V}^1 的边值; $\Delta t \sum_{\tau=1}^{t-1} \tilde{I}^\tau$ 服从多个 \tilde{I}^τ 的联合分布。

假定序列中的各随机变量 \tilde{I}^τ 之间相互独立, 且服从正态分布 $N(v_i^\tau, \sigma_i^{\tau 2})$, 则因为正态分布的线性组合也服从正态分布, 所以存在

$$\Delta t \sum_{\tau=1}^{t-1} \tilde{I}^\tau \sim N(\Delta t \sum_{\tau=1}^{t-1} v_i^\tau, \Delta t^2 \sum_{\tau=1}^{t-1} \sigma_i^{\tau 2}) \quad (9)$$

若 η^t 为一个模糊变量和一个随机变量的和, 则 η^t 为模糊随机变量。将 η^t 分解为

$$\eta^t = b + v^t + \xi + \varepsilon^t \quad (10)$$

式中: $b = b_{v1}$; $v^t = \Delta t \sum_{\tau=1}^{t-1} v_i^\tau$; $\xi = (-d_{v1}, 0, +d_{v1})$;

$\varepsilon^t \sim N(0, \Delta t^2 \sum_{\tau=1}^{t-1} \sigma_i^{\tau 2})$ 。

水电厂的短期优化调度, 一般要求调度周期末蓄水水位恢复为初始蓄水位, 故有

$$V_j^{T+1} = \eta^{T+1} + \Delta t \sum_{\tau=1}^T (-Q_j^\tau - S_j^\tau + Q_{j-1}^{\tau-t_{up}} + S_{j-1}^{\tau-t_{up}}) = V_j^1 \quad (11)$$

4 多目标随机优化模型

4.1 目标函数

短期水火电节能调度的目标是通过优化计算, 使尽可能多利用水力进行发电和平抑由火电承担的剩余负荷, 减少火电发电量和火电启停产生的煤耗, 降低不可再生能源的消耗, 同时减少发电企业污染物的排放量。

1) 能耗指标。

火电能耗的减少, 是节能调度中最主要的目标函数。火力发电用煤的减少, 一是通过充分利用水能, 减少火电发电量, 二是通过火电机组之间的出力配合, 降低总体发电煤耗率。

$$\min f_1 = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T F_{Tj}^t \quad (12)$$

式中 N 为火电机组数量。

按照模糊随机规划的标准形式, 以火电煤耗量最小为优化目标建立数学模型:

$$\min \bar{f}_1 \quad (13)$$

$$C_r \{f_1 \leq \bar{f}_1\}(\alpha) \geq \beta \quad (14)$$

2) 污染和排放指标。

减少水电厂的污染物排放的首要任务是对大

气污染要素的控制，同时还需兼顾污水、噪声和固体废物排放。火电厂气体排放物包括温室气体和大气污染物，主要是指碳氧化合物、二氧化硫、氮氧化合物以及烟尘。由于污染物多种多样，对其进行综合评估十分复杂，一般在水火电调度的研究中，往往对具有代表性的某一种或少数几种空气污染物的排放量加以考虑，本文以二氧化硫的排放量最小为污染排放优化目标。

$$\min f_2 = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T E_{m,j}^t \quad (15)$$

3) 周期末蓄水量指标。

由于自然来水与初始蓄水的不确定性，常规的确定性调度方法事实上也承受了一定的周期末蓄水量约束违约风险，为了更加灵活地利用水资源，可以选择更大的违约风险，调度周期内可利用的总水量会随之增加，水电能够承担更多的负荷，火电能耗随之减少。然而，仅仅控制风险的变化，实质上只是单纯的减少和增加可用水能，由于火电能耗最小目标的存在，肯定是用水越多越好，在增加当前用水减少火电发电量的同时，一般会降低火电的能耗效率，同时会减少未来的可利用水能，有可能得不偿失。实现龙头电站周期末蓄能最大也是追求的目标：

$$\max f_3 = V_1^{T+1} \quad (16)$$

式中 V_1^{T+1} 为 1 号电站调度周期末蓄水量，由于调度周期末蓄水中包含不确定因素，所以该目标函数值受风险影响。

对于周期末蓄水量指标，其目标机会约束可以表示为

$$C_h \{f_3 \geq \bar{f}_3\}(\alpha_{f_3}) \geq \beta_{f_3} \quad (17)$$

式中： α_{f_3} 、 β_{f_3} 为达成蓄水量目标的机会； $\max \bar{f}_3$ 为 f_3 的 α_{f_3} 、 β_{f_3} 的乐观值； $f_3 = V_1^{T+1}$ 。

式(17)可等价于

$$-h_{0,v}^{T+1} + \bar{f}_3 - b_{v_1} - v_{v_1}^{T+1} - J_v^{T+1}(\alpha_{f_3}) + (2\beta_{f_3} - 1)d_v^{T+1} \leq 0 \quad (18)$$

式中： $h_{0,v} = \sum_{\tau=1}^{t-1} (-Q_j^\tau - S_j^\tau + Q_{j-1}^{\tau-t_{up}} + S_{j-1}^{\tau-t_{up}}) \Delta t$ ； $v_{v_1}^t = (t-1)\Delta t v_1$ ； $J_v^t = \sup \{J | J = \Phi_v^{t-1}(1-\alpha)\}$ ； $\xi_{v_1} = (-d_{v_1}, 0, d_{v_1})$ ； $\varepsilon_v^t \sim N(0, (t-1)\Delta t^2 \sigma_1^2)$ ； v_1 为水库入库流量； σ_1 为水库入库流量的方差。

4.2 约束条件

1) 功率平衡条件。

电力不易存储的特性，要求电力生产和消费具有同时性，因此要保证机组出力与负荷需求实时平衡，在不考虑网损因素时可表示为

$$\sum_{j=1}^N P_{T,j}^t + \sum_{j=N+1}^M P_{h,j}^t = P_D^t \quad (19)$$

式中： $P_{T,j}^t$ 为火电厂 j 在时段 t 的输出功率； $P_{h,j}^t$ 为水电站 j 在时段 t 的出力； P_D^t 为时段 t 的总负荷； M 为水电厂总数量。

2) 机组出力约束条件。

假定所有参与调度的机组在运行过程中都不会停运或者空载，火电机组的最小出力为最小技术出力，水电厂的最小出力设为额定出力的 10%。

$$\underline{P}_{T,j} \leq P_{T,j} \leq \overline{P}_{T,j} \quad (20)$$

$$\underline{P}_{h,j} \leq P_{h,j} \leq \overline{P}_{h,j} \quad (21)$$

3) 水量平衡约束条件。

入库径流量除了包含自然来水量之外，还包括上游水库的下泄流量：

$$V_j^t = \hat{V}_j^t + \Delta t \sum_{\tau=1}^{t-1} (\tilde{I}_j^\tau - Q_j^\tau - S_j^\tau + Q_{j-1}^{\tau-t_{up}} + S_{j-1}^{\tau-t_{up}}) \quad (22)$$

由于上游水库的下泄流量到达下游水库时存在时滞，因此在 t 时段，下游电站可以利用的上游流量为 $t-t_{up}$ 的下泄流量。

4) 水库库容约束条件。

将水库蓄水量视为不确定性变量，在一定的置信水平下满足：

$$C_h \{V_j^t - \bar{V}_j^t \leq 0\}(\alpha_{\bar{V}_j}) \geq \beta_{\bar{V}_j} \quad (23)$$

$$C_h \{V_j^t - \underline{V}_j^t \leq 0\}(\alpha_{\underline{V}_j}) \leq \beta_{\underline{V}_j} \quad (24)$$

式中： \underline{V}_j^t 为水电厂 j 在 t 时段的蓄水量下限； \bar{V}_j^t 为水电厂 j 在 t 时段的蓄水量上限，非汛期时一般为正常蓄水位对应的库容。

将模糊随机机会约束转化为确定性等价形式，考虑水电厂蓄水不确定性的影响，可得

$$C_h \left\{ \eta^t + \sum_{\tau=1}^{t-1} (-Q_j^\tau - S_j^\tau + Q_{j-1}^{\tau-t_{up}} + S_{j-1}^{\tau-t_{up}}) \Delta t - \frac{\bar{V}_j^t}{V_j^t} \leq 0 \right\}, \quad (\alpha_{\bar{V}_j}) \geq \beta_{\bar{V}_j} \quad (25)$$

$$C_h \left\{ -\eta^t - \sum_{\tau=1}^{t-1} (Q_j^\tau S_j^\tau - Q_{j-1}^{\tau-t_{up}} - S_{j-1}^{\tau-t_{up}}) \Delta t + \frac{\underline{V}_j^t}{V_j^t} \leq 0 \right\}, \quad (\alpha_{\underline{V}_j}) \geq \beta_{\underline{V}_j} \quad (26)$$

将 η^t 分解, $\eta^t = b_{V_1} + v_{V_1}^t + \xi_{V_1}^t + \varepsilon_{V_1}^t$, $-\eta^t = -b_{V_1} - v_{V_1}^t + \xi_{V_1}^t + \varepsilon_{V_1}^t$ 。假定 \tilde{I}^t 为相互独立的随机变量, 且各时段的 \tilde{I}^t 数字特征相同, 即 $\tilde{I}^t \sim (v_{I^t}, \sigma_{I^t}^2)$, $t=1, 2, \dots, T$ 。根据模糊随机函数机会测度的等价形式, 可得蓄水量约束条件:

$$h_{0,V} - \bar{V}^t + b_{V_1} + v_{V_1}^t - J_{V_1}^t(\alpha_{\bar{V},j}) + (2\beta_{\bar{V},j} - 1)d_{V_1}^t \leq 0 \quad (27)$$

$$-h_{0,V} + \underline{V}^t - b_{V_1} - v_{V_1}^t - J_{V_1}^t(\alpha_{\underline{V},j}) + (2\beta_{\underline{V},j} - 1)d_{V_1}^t \leq 0 \quad (28)$$

5) 周期末蓄水量约束条件。

每个水库周期末蓄水量满足

$$V_j^{T+1} = V_{f_j} = V_j^1 \quad (29)$$

式中 V_{f_j} 为调度周期末蓄水量, 一般由中期调度要求给出, 本文认为各水库周期末蓄水量恢复为周期初始蓄水。

将水库库容上限约束进行转换, 可得

$$\sum_{\tau=0}^{t-1} (Q_j^\tau + S_j^\tau) \Delta t \geq \sum_{\tau=0}^{t-1} (Q_{j-1}^{\tau-t_{up}} + S_{j-1}^{\tau-t_{up}}) \Delta t - \bar{V}^t + b_{V_1} - J^t(\alpha_{\bar{V},j}) + (2\beta_{\bar{V},j} - 1)d_{V_1} \quad (30)$$

将水库库容约束下限约束条件进行转化, 有

$$\sum_{\tau=0}^{t-1} (Q_j^\tau + S_j^\tau) \Delta t \leq \sum_{\tau=0}^{t-1} (Q_{j-1}^{\tau-t_{up}} + S_{j-1}^{\tau-t_{up}}) \Delta t - \underline{V}^t + b_{V_1} - J^t(\alpha_{\underline{V},j}) + (2\beta_{\underline{V},j} - 1)d_{V_1} \quad (31)$$

6) 下泄流量约束条件。

水库下泄流量满足

$$\underline{R}_j \leq Q_j^t + S_j^t \leq \bar{R}_j \quad (32)$$

式中 \underline{R}_j 、 \bar{R}_j 分别为下泄流量的下限与上限。

水电站的下泄流量下限一般受到综合利用需求, 例如下游灌溉用水的制约, 上限涉及水库的泄洪能力, 平水期和枯水期短期调度中一般对上限不予考虑。

5 多目标问题处理

多目标问题中不同目标函数的优化结果由于量纲、数量级之间的不同, 对于不同结果难以直接比较。如果能够将目标函数的值模糊化, 确定其隶属度函数, 则可以通过计算目标值对相应最优目标值的隶属程度, 得到统一的优化评价指标。

龙头水电厂周期末蓄水量最大化目标的隶属度函数为

$$\mu_n(\bar{f}_3) = \begin{cases} 1, & \bar{f}_3 > r_{31} \\ \frac{\bar{f}_3 - r_{32}}{r_{31} - r_{32}}, & r_{32} \leq \bar{f}_3 \leq r_{31} \\ 0, & \bar{f}_3 < r_{32} \end{cases} \quad (33)$$

火电能耗最小化和 SO₂ 排放最小化目标的隶属度函数为

$$\mu_n(f_i) = \begin{cases} 1, & f_i < r_{i2} \\ \frac{r_{i1} - f_i}{r_{i1} - r_{i2}}, & r_{i2} \leq f_i \leq r_{i1}, \quad i=1, 2 \\ 0, & f_i > r_{i1} \end{cases} \quad (34)$$

式中: r_{i1} 为该目标在求解单目标问题时达到的最大值; r_{i2} 为该目标在求解其他目标函数最优问题时所取得的最小值。

最大模糊满意度法是根据目标函数值隶属度求取一组非劣解的方法。定义满意度为所有隶属度值中最小的一个, 即 $k_{ST} = \min\{\lambda, \mu_1, \dots, \mu_{n_h}\}$ 。要求解非劣, 则原问题转化为 k_{ST} 最大化的单目标问题:

$$\max k_{ST} \quad (35)$$

s.t.

$$m \geq k_{ST} \quad (36)$$

$$u_n \geq k_{ST}, \quad n=1, 2, \dots, n_h \quad (37)$$

$$0 \leq k_{ST} \leq 1 \quad (38)$$

其他约束条件不变。

6 算例与分析

6.1 算例描述

以一个含有 8 级梯级水电站(其中 3 个具有季以上调节能力, 其余为径流式电站)、6 个火电机组的电网为实例进行计算分析和说明。计算时火电能耗量(即煤耗)单位为 kg, 水量单位为 m³, 目标函数优化精度为 10⁻⁴, 约束条件优化精度为 10⁻⁴, 算法迭代次数为 400 次。水电厂蓄水上限取正常蓄水库容, 具有调节能力的水电厂, 其蓄水下限取死库容, 径流式电站蓄水下限取初始蓄水量。

假定各电站各时段自然来水量都为相互独立的正态分布的随机变量。其中, 龙头电站各时段入库流量期望值为 650 m³/s, 方差为 (30/3)² m³/s, 4 级和 5 级电站流域内自然来水量期望值为 100 m³/s, 方差为 (15/3)² m³/s, 其余径流式电站自然来水量期望值为 50 m³/s, 方差为 10 m³/s。

调度周期初始蓄水量的可能偏差为 V_d ，即初始蓄水量可以用模糊数三元组 $(V-V_d, V, V+V_d)$ 来表示。令具有调节能力的 1、4、5 号水电站调度周期末蓄水量与初始蓄水量相等，其他水火电厂参数如表 1、2 所示。调度周期为 1 d，以 1 h 为 1 个时段，从 0 点开始至 24 点结束。24 个时段的负荷过程如图 1 所示。设允许库容约束和调度周期末蓄水量约束承受的随机风险为 0.5，模糊风险为 0.5。

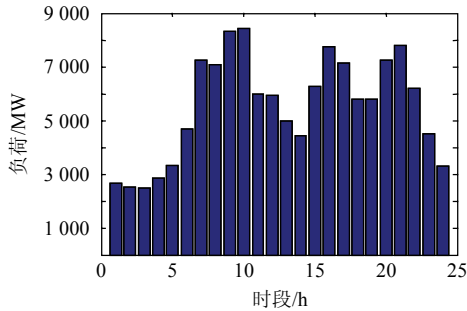


图 1 24 h 系统负荷

Fig. 1 System loads in 24 hours

6.2 多目标优化调度

考虑火电能耗最小化、污染物排放最小化、龙头电站周期末蓄水量最大化为目标的多目标优化问题。设定蓄水量约束违约风险为 $[0.5, 0.5]$ ，各个目标函数的隶属度函数参数如表 1 所示。

表 1 模糊目标隶属度函数参数

Tab. 1 Data of fuzzy objective membership functions

$\mu_1(f_1)/10^7 \text{ kg}$	$\mu_2(f_2)/10^8 \text{ m}^3$	$\mu_3(f_3)/10^8 \text{ g}$
$r_{11}=1.4769$	$r_{21}=81.04$	$r_{31}=1.8683$
$r_{12}=1.0855$	$r_{22}=80.95$	$r_{32}=1.3994$

设龙头电站周期末蓄水量最大目标机会的变化对包括自身在内的 3 个目标优化结果产生影响，结果如表 2 所示。目标机会约束的置信水平的物理意义可以理解为对应目标在不确定环境下的实现机会。从表 2 可以看出，优化问题中调度周期末蓄水能够以大于 50% 的概率同时以大于 50% 的可信性(即模糊随机事件的 0.5 机会概率大于 50%)，实现火电煤耗为 $1.2636 \times 10^7 \text{ kg}$ 、 SO_2 排放为 $1.6128 \times 10^7 \text{ g}$ 的目标，同时龙头电站周期末蓄水量乐观值达到 80.9990×10^8 亿立方米的的目标。随着目标达到机会 α_{f_3} ， β_{f_3} 由 0.5 增加至 0.7，3 个目标的优化结果都变得更差，可见多目标问题的优化结果越好，实现该结果的机会就越低。对于决策者来说，可以从计算结果判断出发电计划可能获得的效益和实现

该计划的机会。

当蓄水最大目标的随机机会与模糊机会均为 0.5 时，增加了蓄水量目标的多目标优化调度与常规单目标优化调度相比，调度周期末其龙头电站增加了 $0.0490 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的蓄水，但同时牺牲了 $0.1781 \times 10^7 \text{ kg}$ 的煤炭耗量。算例中，火电机组与现实中的火电机组运行特性基本一致，当出力接近额定功率时，机组的煤耗率会更小，因此，虽然多目标优化策略中，火电总能耗增加了，但是由于出力的增加，其单位发电煤耗很有可能减少。

额外的用煤以约 $300 \text{ kg}/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 的单位发电煤耗来计算，能够提供大约 $5700 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 的电能，而龙头电站节约的用水，可以在 8 个梯级电站重复利用，按照本周期各电站的出力系数计算，如果节约的水能够全部利用起来，第 1 级电站能提供的发电量大约为 $1300 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ，第 2 级电站约为 $2100 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ，第 3 级电站约为 $400 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ，第 4 级电站约为 $1700 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ，第 5 级电站约为 $800 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ，其他电站能够提供共约 $700 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 时电能，共计约 $7000 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 。多目标优化虽然消耗了更多的煤炭，从长远来看，却在总体上节约了更多能源。

从表 2 还可以看出，蓄水量乐观值随着目标实现机会的增大以及水电出力的减小而趋向于一个更小的值。随着水电出力减小，水库蓄水这个不确定状态变量的可能范围应该是向更大的值靠拢，然而目标机会约束的置信水平越大，意味着可能值大于乐观值的程度就越大，虽然可能值增大了，但是可能值增加的速度小于乐观值与可能值差距增加的速度，因此乐观值变得更小。

表 3 中，每个时段水电出力基本上都是随着目

表 2 龙头电站蓄水目标机会对优化结果的影响

Tab. 2 Effect of water storage objective on optimization results

α_{f_3}	β_{f_3}	$f_1/(10^7 \text{ kg})$	$f_2/(10^8 \text{ g})$	$f_3/(10^8 \text{ m}^3)$	最大满意度/%
0.5	0.5	1.2636	1.6128	80.9990	54.4977
0.5	0.6	1.2669	1.6167	80.9987	54.1665
0.5	0.7	1.2702	1.6211	80.9984	53.8121
0.6	0.5	1.2649	1.6143	80.9983	53.6489
0.6	0.6	1.2682	1.6183	80.9980	53.3177
0.6	0.7	1.2715	1.6223	80.9977	52.9630
0.7	0.5	1.2663	1.6160	80.9975	52.7997
0.7	0.6	1.2696	1.6200	80.9972	52.4682
0.7	0.7	1.2729	1.6239	80.9969	52.1133

表3 不同风险下的水火电出力过程变化
Tab. 3 Effect of risk on hydro-thermal power generation

时间	水电出力/MW			火电出力/MW		
	$\alpha_{13}=0.5$	$\alpha_{13}=0.6$	$\alpha_{13}=0.7$	$\alpha_{13}=0.5$	$\alpha_{13}=0.6$	$\alpha_{13}=0.7$
	$\beta_{13}=0.5$	$\beta_{13}=0.6$	$\beta_{13}=0.7$	$\beta_{13}=0.5$	$\beta_{13}=0.6$	$\beta_{13}=0.7$
0:00	1 085.08	1 082.98	1 076.84	1 500.92	1 503.02	1 509.16
2:00	1 132.93	1 129.94	1 129.94	1 541.07	1 544.06	1 544.06
4:00	2 275.93	2 264.34	2 253.48	1 728.07	1 739.66	1 750.52
6:00	5 346.24	5 339.83	5 333.11	1 827.26	1 833.67	1 840.39
8:00	6 547.79	6 541.41	6 535.03	1 827.21	1 833.59	1 839.97
10:00	4 136.89	4 131.05	4 123.89	1 823.61	1 829.45	1 836.61
12:00	2 887.96	2 882.20	2 874.66	1 822.04	1 827.80	1 835.34
14:00	5 182.15	5 175.88	5 169.34	1 827.35	1 833.62	1 840.16
16:00	4 635.07	4 629.15	4 622.43	1 827.43	1 833.35	1 840.07
18:00	4 695.35	4 688.37	4 682.18	1 827.15	1 834.13	1 840.32
20:00	5 175.20	5 168.80	5 162.25	1 827.30	1 833.70	1 840.25
22:00	2 261.11	2 242.93	2 227.38	1 651.89	1 670.07	1 685.62

标实现机会的增大而减少, 机组出力的变化规律与水电总发电量的变化规律一致, 由此可以看出, 蓄水量目标实现的置信水平仅仅与发电量有关, 基本上不能影响电源之间负荷分配。

在不同风险值下运行, 水电机组和火电机组有功功率的输出也出现略不相同的情况, 如表3所示。随着 α_{13} 和 β_{13} 值的增加, 水电机组和火电机组出力略有减小。

7 结论

1) 利用模糊随机规划描述水火电系统运行中的不确定性, 能够很好地描述现实中多种不同类型不确定量同时存在于一个问题中的状况, 并有利于解决由于历史数据不足使得随机变量数字特征存在误差的问题。

2) 利用模糊随机规划的确定性等价形式解决问题, 不但可以直观地看出约束条件违约风险变化引起优化结果变化的根本原因, 而且使得问题的求解可以应用数值方法, 令问题的计算有望较常规的用智能算法求解不确定问题时更加快速。

3) 允许调度中与不确定量相关的约束条件以一定置信水平违反约束, 建立模糊随机机会约束规划模型。模型以不同时段不同水电厂的发电流量、弃水量和火电厂的出力为决策变量, 以违反约束条件的机会作为风险, 最终可以得到不同风险下的最优结果。一般来说风险越大, 优化结果越好, 可以让调度者清晰地观察风险与效益的关系, 对其进行

权衡并做出决策。

参考文献

- [1] 哈比比, 余贻鑫. 一种新的水火电力系统优化潮流模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 37-45.
Binkou A, Yu Yixin. A novel formulation of optimal hydrothermal power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 37-45(in Chinese).
- [2] 吴宏宇, 管晓宏, 翟桥柱, 等. 水火电联合短期调度的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 82-88.
Wu Hongyu, Guan Xiaohong, Zhai Qiaozhu, et al. Short-term hydrothermal scheduling using mixed-integer linear programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 82-88(in Chinese).
- [3] 王雁凌, 张粒子, 杨以涵. 基于水火电置换的发电权调节市场[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 131-136.
Wang Yanling, Zhang Lizi, Yang Yihan. Adjusting market of generation rights based on hydro-thermal exchange [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 131-136(in Chinese).
- [4] 马瑞, 贺仁睦, 颜宏文, 等. 考虑水火协调的多目标优化分段竞标模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 53-57.
Ma Rui, He Renmu, Yan Hongwen, et al. A novel multi-objective optimal group and block bidding model for hydrothermal power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 53-57(in Chinese).
- [5] Khodr H M, Gómez J F, Barnique L, et al. A linear programming methodology for the optimization of electric

- power-generation schemes[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(3): 864-869.
- [6] Ohishi T. A short term hydrothermal scheduling approach for dominantly hydro systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 637-643.
- [7] Johannesen A, Gjelsvik A, Fosso O B. Optimal short term hydro scheduling including security constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 566-583.
- [8] 郭壮志, 吴杰康, 孔繁镍, 等. 梯级水电站水库蓄能利用最大化的长期优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 20-26.
Guo Zhuangzhi, Wu Jiekang, Kong Fannie, et al. Long-term optimization scheduling based on maximal storage energy exploitation of cascaded hydro-plant reservoirs[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 20-26(in Chinese).
- [9] 马瑞, 穆大庆, 李欣然, 等. 电力市场中日有功负荷多目标分配模糊决策的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 25-29.
Ma Rui, Mu Daqing, Li Xinran, et al. Study on fuzzy decision of multiobjective dispatch strategy for daily active power in electricity market[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 25-29(in Chinese).
- [10] Esteban G, Julian B, Hugh R. Short-term hydrothermal generation scheduling model using a genetic algorithm [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(4): 1256-1264.
- [11] Xie J, Wei X, Lu Y, et al. Emission-constrained optimal generation scheduling incorporating equity principles [J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(2): 201-210.
- [12] 喻洁, 季晓明, 夏安邦. 基于节能环保的水火电多目标调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 24-27.
Yu Jie, Ji Xiaoming, Xia Anbang. Multi-objective Hydro-thermal dispatch based on energy conservation and environmental protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 24-27(in Chinese).
- [13] 谭忠富, 陈广娟, 赵建保, 等. 以节能调度为导向的发电侧与售电侧峰谷分时电价联合优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 55-62.
Tan Zhongfu, Chen Guangjuan, Zhao Jianbao, et al. Optimization model for designing peak-valley time-of-use power price of generation side and sale side at the direction of energy conservation dispatch [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 55-62(in Chinese).
- [14] 韩冬, 蔡兴国. 综合环境保护及峰谷电价的水火电短期优化调度[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 78-83.
Han Dong, Cai Xingguo. Short-term scheduling of hydrothermal power system considering environmental protection and time-of-use price[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 78-83(in Chinese).
- [15] 谢永胜, 孙洪波, 徐国禹. 基于模糊来水量、模糊负荷的短期水火电调度[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6): 430-433.
Xie Yongsheng, Sun Hongbo, Xu Guoyu. A short term hydrothermal scheduling with fuzzy inflows and loads[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(6): 430-433(in Chinese).
- [16] 谢永胜, 孙洪波, 徐国禹, 等. 基于随机来水量随机负荷的短期水火电调度[J]. 系统工程学报, 1996, 11(2): 94-99.
Xie Yongsheng, Sun Hongbo, Xu Guoyu, et al. A short term hydrothermal scheduling with stochastic inflows and loads[J]. Journal of System Engineering, 1996, 11(2): 94-99.
- [17] Khodr H M, Gómez J F, Barnique L, et al. A linear programming methodology for the optimization of electric power generation schemes[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(3): 864-869.
- [18] Wei H, Sasaki H, Kubokawa J, et al. Largescale hydrothermal optimal power flow problems based on interior point nonlinear Programming[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(1): 396-403.
- [19] Li C A, Jap P J, Dan L S. Implementation of network flow programming to the hydrothermal coordination in an energy management system[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1993, 8(3): 1045-1053.
- [20] Oliveira G G, Soares S. A second-order network flow algorithm for hydrothermal scheduling[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1995, 10(3): 1635-1641.
- [21] 韩冬, 蔡兴国. 综合环境保护及峰谷电价的水火电短期优化调度[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 78-83.
Han Dong, Cai Xingguo. Short-term scheduling of hydrothermal power system considering environment protection and time-of-use price[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 75-83(in Chinese).
- [22] 卢有麟, 周建中, 覃晖, 等. 基于自适应混合差分进化算法的水火电力系统短期发电计划优化[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 32-36.
Lu Youlin, Zhou Jianzhong, Qin Hui, et al. Short-term scheduling optimization for hydro-thermal power systems based on adaptive hybrid differential evolution algorithm [J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 32-36(in

- Chinese).
- [23] 苏鹏, 刘天琪, 赵国波, 等. 基于改进粒子群算法的节能调度下多目标负荷最优分配[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 48-53.
- Su Peng, Liu Tianqi, Zhao Guobo, et al. An improved particle swarm optimization based multi-objective load dispatch under energy conservation dispatching[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 48-53(in Chinese).
- [24] 袁晓辉, 袁艳斌, 权先璋, 等. 基于混沌进化算法的梯级水电系统短期发电计划[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 34-38.
- Yuan Xiaohui, Yuan Yanbin, Quan Xianzhang, et al. Hybrid chaotic evolutionary algorithm to short-term cascaded hydroelectric scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 34-38(in Chinese).
- [25] Wu Y G, Ho C Y, Wang D Y. A diploid genetic approach to short-term scheduling of hydrothermal system[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(4): 1268-1274.
- [26] 王镭. 节能发电调度模型的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- Wang Yao. Research on the model of dispatching power generation of energy-saving[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [27] 王一, 程浩忠. 计及输电阻塞的帕累托最优多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 132-138.
- Wang Yi, Cheng Hongzhong. Pareto optimality based multi-objective transmission planning considering transmission congestion[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 132-138(in Chinese).



吴杰康

收稿日期: 2011-05-04。

作者简介:

吴杰康(1965), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是现代电力系统分析与控制、电力市场、电力工程管理, wujiekang@163.com;

唐力(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与分析, tangli.gxu@gxu.edu.cn。

(责任编辑 刘浩芳)