

电力市场中火电机组自组合的模糊优化方法

张建伟^{1,2}, 侯朝桢²

(1. 山西电力科学研究院, 山西 太原 030001; 2 北京理工大学信息科学技术学院自动控制系, 北京 100081)

摘要: 机组启停机计划是发电公司参与电力市场竞争的重要决策依据。市场环境下, 出清价格具有高度不确定性, 必须在机组自组合决策中给予考虑。在市场出清价格模糊描述的基础上, 提出不确定环境下含有启停机爬坡速率和升降出力爬坡速率约束的火电机组自组合模糊优化方法, 通过分析真实市场参与者的决策取向, 提出一种新的精确化方法, 并采用动态规划模型求解精确优化问题, 同时给出了精确化过程中多目标偏好系数的选择建议。算例分析表明, 模糊机组自组合方法能灵活反映决策目标, 是市场环境一种新的不确定性决策方法。

关键词: 机组自组合; 模糊优化算法; 爬坡速率约束; 动态规划; 电力市场

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)04-0040-06

0 引言

机组自组合是在给定的市场出清价格预测信息下, 确定利润最大的启停机计划, 为发电公司参与电力市场竞争提供决策依据。市场环境下, 日前电力市场的出清价格普遍具有不确定性, 这不仅为发电公司创造了额外的获利机会, 而且还可能带来损失, 必须在机组组合决策中考虑不确定性的影响。目前, 已经形成概率理论^[1,2]和模糊集理论^[3,4]两种决策优化方法。概率理论认为, 出清价格主要受市场主体投标策略这一随机因素的影响, 宜通过随机性描述不确定性。据此, 文献[1]建立了机组自组合的随机优化模型, 并采用动态规划技术求解。然而, 由于动态规划的计算复杂性与状态数量密切相关, 构造阶段状态变量时, 必须控制出清价格概率密度函数的抽样数量, 这就限制了算法的精度和实用价值。文献[2]将出清价格所确定利润的方差作为风险度量指标, 认为发电公司希望折衷处理利润和风险, 从而形成兼顾利润和风险的双目标决策优化模型, 来降低计算复杂性。显然, 这种方法只是试图获得统计意义上具有最小波动幅度的利润, 没有区分利润正负波动所内涵的有利影响和不利影响。模糊集理论认为, 出清价格主要受投标策略这一主观因素的影响, 更宜用模糊性描述不确定性。据此, 文献[3,4]建立模糊优化模型, 并通过保守利润最大化的精确化方法, 获得了没有任何风险的决策结果, 显然不符合发电公司追求最大可能利润、投机额外收益、防范可能损失的决策取向。

概率理论下用方差度量风险和模糊集理论下用保守利润精确化模糊优化模型的方法都没有反映出发电公司的真实决策取向。本文在模糊集理论的框架下, 研究价格接受者发电公司的火电机组自组合问题, 建立了含有启停机爬坡速率和升降出力爬坡速率约束的火电机组模糊自组合模型, 采用一种能灵活反映决策取向的精确化方法求解, 并通过算例证实了方法的可行性。

1 模糊数学模型

电力市场中, 价格接受者发电公司没有能力影响出清价格, 拥有多台火电机组发电公司的利润最大化问题可简化为单台机组的利润最大化问题^[2]。当获得市场出清价格模糊预测信息后, 火电机组自组合问题可表为如下非线性混合整数模糊优化问题。

模糊优化目标:

$$\max \tilde{=} = \sum_{t=1}^T \{ \tilde{=} P_t U_t - [f(P_t) + (1 - U_{t-1}) S_U] U_t - U_{t-1} S_D (1 - U_t) \} \quad (1)$$

精确约束条件:

1) 输出功率范围

$$P_{\min} U_t \leq P_t \leq P_{\max} U_t \quad (2)$$

2) 升降出力爬坡速率

$$\begin{cases} P_t U_t - P_{t-1} U_{t-1} \leq U \\ P_{t-1} U_{t-1} - P_t U_t \leq D \end{cases}, \quad \forall t, U_{t-1} = 1, U_t = 1 \quad (3)$$

3) 启停机爬坡速率

$$\begin{cases} P_t U_t (1 - U_{t-1}) S_{ST} & \forall t, U_{t-1} = 0, U_t = 1 \\ P_t U_t (1 - U_{t+1}) S_D & \forall t, U_t = 1, U_{t+1} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

4) 最小运行/停机时间

$$U_t = \begin{cases} 1, & 1 - x_t \leq T_{up} \\ 0, & -T_{down} \leq x_t \leq -1 \\ 0 \text{ 或 } 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T 为研究周期的时段总数,本文假定时段的时间间隔为 1 h; \tilde{p}_t 为时段 t 的市场出清价格预测值,用模糊子集表示; $\tilde{\pi}$ 为研究周期内的总利润; P_t 为时段 t 的输出功率; $f(P_t)$ 为燃料成本,取为 $f(P_t) = aP_t^2 + bP_t + c$; S_U 、 S_D 分别为启动和停机费用; U_t 为机组在时段 t 的状态 ($U_t = 0$ 表示停机; $U_t = 1$ 表示运行); P_{max} 、 P_{min} 分别为输出功率上限和下限; U_{up} 、 U_{down} 分别为升出力 and 降出力爬坡速率; S_{ST} 为启动爬坡速率,表示启动后第一个时段上的输出功率上限值; S_D 为停机爬坡速率,表示停机前一个时段上的输出功率上限值; x_t 为机组在时段 t 的连续运行时间 (> 0)或连续停机时间 (< 0); T_{up} 、 T_{down} 分别为最小运行和停机时间。

市场出清价格预测值 \tilde{p}_t 用模糊子集表示:

$$\tilde{p}_t = \{ (p, \mu_{\tilde{p}_t}(p)) \mid p \in R, 0 \leq \mu_{\tilde{p}_t}(p) \leq 1 \} \quad (6)$$

式中: $\mu_{\tilde{p}_t}(p)$ 为隶属函数,表示精确市场出清价格预测值 p 属于模糊子集 \tilde{p}_t 的程度。典型的用三角模糊集描述的市场出清价格预测值如图 1 所示。

对任一可行的机组组合计划,出清价格预测值的模糊性将导致各时段上的利润要么是对应于运行状态的模糊子集,要么是对应于停机状态的精确值 ($-S_D$ 或 0),由模糊集理论^[5]知,利润 $\tilde{\pi}$ 也是模糊子集。

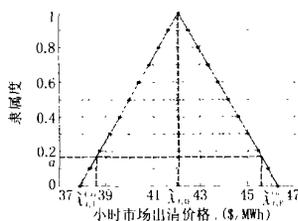


图 1 小时市场出清价格预测值模糊子集

Fig 1 Fuzzy set of the predicted hourly market clearing price

2 模糊优化问题精确化

2.1 基本概念和定义

对市场出清价格预测值和利润模糊子集,给出以下定义。

定义 1:给定隶属度 α ,市场出清价格预测值 \tilde{p}_t 的截集 $\tilde{p}_t^{(\alpha)}$ 是区间数 $[\tilde{p}_{tL}^{(\alpha)}, \tilde{p}_{tR}^{(\alpha)}]$ 。 $\tilde{p}_{tL}^{(0)}$ 是预测价格的下限,称为隶属度 α 下的悲观估计价格; $\tilde{p}_{tR}^{(0)}$ 是预测价格的上限,称为隶属度 α 下的乐观估计价格。当 $\alpha = 1$ 时, $\tilde{p}_t^{(1)}$ 退化为一个点 \tilde{p}_{t0} ,称为最大可能估计价格。各种估计价格的定义如图 1 所示。

定义 2:当按照最大可能估计价格 \tilde{p}_{t0} 做出机组组合决策时,所获得的利润 $\tilde{\pi}_0$ 称为最大可能利润。在此决策下,对应于悲观估计价格 $\tilde{p}_{tL}^{(0)}$ 的利润 $\tilde{\pi}_L^{(0)}$ 称为隶属度 α 下的悲观利润;对应于乐观估计价格 $\tilde{p}_{tR}^{(0)}$ 的利润 $\tilde{\pi}_R^{(0)}$ 称为隶属度 α 下的乐观利润。最大可能利润与悲观利润之差 $\tilde{\pi}_L^{(0)} = \tilde{\pi}_0 - \tilde{\pi}_L^{(0)}$ 称为隶属度 α 下的潜在损失,它表示真实市场价格正好取悲观估计价格时,机组组合决策将带来的损失。乐观利润与最大可能利润之差 $\tilde{\pi}_R^{(0)} = \tilde{\pi}_R^{(0)} - \tilde{\pi}_0$ 称为隶属度 α 下的潜在利润,它表示真实市场价格正好取乐观估计价格时,机组组合决策所能获得的额外利润。

2.2 模糊优化问题精确化

机组自组合的目标函数是模糊子集,需转化为精确优化问题求解。对发电公司而言,决策者并非总是希望得到文献[3,4]最坏保守估计价格下的没有任何风险的机组组合计划。相反,决策者更希望得到这样一个机组组合计划,以便在最大可能估计价格下能获得最大利润,最坏保守估计价格下潜在损失最小,最好乐观估计价格下潜在利润最大,从而对出清价格的各种可能情况都有较强的适应性,这正是本文精确化方法的基本思想。数学上,决策者的这一愿望可表为:

$$\begin{cases} \max \tilde{\pi}_0 = \sum_{t=1}^T \{ \tilde{p}_{t0} P_t U_t - [f(P_t) + (1 - U_{t-1}) S_U] U_t - U_{t-1} S_D (1 - U_t) \} \\ \min \tilde{\pi}_L^{(0)} = \tilde{\pi}_0 - \tilde{\pi}_L^{(0)} = \sum_{t=1}^T \{ (\tilde{p}_{t0} - \tilde{p}_{tL}^{(0)}) P_t U_t \} \\ \max \tilde{\pi}_R^{(0)} = \tilde{\pi}_R^{(0)} - \tilde{\pi}_0 = \sum_{t=1}^T \{ (\tilde{p}_{tR}^{(0)} - \tilde{p}_{t0}) P_t U_t \} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\tilde{p}_{tL}^{(0)}$ 是最坏的保守估计价格; $\tilde{p}_{tR}^{(0)}$ 是最好的乐观估计价格。显然,这是一个多目标优化问题,需通过加权系数将其转化成单目标优化问题:

$$\max \tilde{\pi}_{eq} = \{ \tilde{\pi}_0 - w_1 \tilde{\pi}_L^{(0)} + w_2 \tilde{\pi}_R^{(0)} \} \quad (8)$$

式中: $\tilde{\pi}_{eq}$ 是与模糊优化目标等效的精确优化目标; w_1 ($w_1 \geq 0$)和 w_2 ($w_2 \geq 0$)分别为潜在损失和潜在利

润的加权系数。

根据精确优化目标,可定义等效市场出清价格的概念。

定义 3:给定最大可能估计价格、最坏保守估计价格和最好乐观估计价格,定义

$$\tilde{t}_{eq} = \tilde{t}_0 - w_1 \tilde{t}_L^{(0)} + w_2 \tilde{t}_R^{(0)} \quad (9)$$

为等效市场出清价格。其中, $\tilde{t}_L^{(0)} = \tilde{t}_0 - \tilde{t}_L^{(0)}$, $\tilde{t}_R^{(0)} = \tilde{t}_R - \tilde{t}_0$ 。

在定义 3 的基础上,模糊优化问题的精确形式最终可表为:

$$\max \tilde{t}_{eq} = \sum_{t=1}^T \{ \tilde{t}_{eq} P_t U_t - [f(P_t) + (1 - U_{t-1}) S_U] U_t - [U_{t-1} S_D (1 - U_t)] \} \quad (10)$$

以及约束式 (2) ~ (5)。显然,这是等效市场出清价格下的精确机组自组合问题。

2.3 精确优化问题的求解

精确化所形成的单目标优化问题式 (10) 是一个含有启停机和升降出力爬坡速率约束的机组自组合问题。爬坡速率约束能更全面准确地描述机组运行特性,但因不同时段间存在连续变量关联耦合影响^[6]而增加了求解难度。实践中,采用拉格朗日乘子松弛爬坡速率约束并运用次梯度法更新乘子的方法因涉及运行和停机状态等整数变量而很难收敛,现引用文献 [7] 的思想求解精确优化问题。

不失一般性,设 $t=0$ 时段机组处于运行状态。将研究周期划分为一系列有序的时段间隔 $\{ (\overset{ON}{1}, \overset{OFF}{2}, \overset{ON}{2}, \dots, \overset{ON}{i}, \overset{OFF}{j}, \dots) \mid i=1, 2, \dots, I, j=1, 2, \dots, J \}$ 。其中, $\overset{ON}{i}$ 、 $\overset{OFF}{j}$ 分别为满足初始状态和最小运行/停机时间约束的连续运行时段间隔和连续停机时段间隔,且相邻两个时段间隔的末时段和首时段邻接; I, J 为研究周期内各自的最大时段间隔数。这样,式 (10) 可改写为:

$$\max \tilde{t}_{eq} = \sum_i \sum_{\overset{ON}{t}} \{ \tilde{t}_{eq} P_t - [f(P_t) + S_U] \} + \sum_j \sum_{\overset{OFF}{t}} \{ -S_D \} \quad (11)$$

从而使优化问题转化成寻找使 \tilde{t}_{eq} 最大的最优有序时段间隔序列的多阶段决策问题。

由式 (11) 可见,给定一个可行的时段间隔序列,优化目标对各时段间隔是加性可分离的,符合动态规划对阶段划分方法的要求。对连续运行时段间隔 $\overset{ON}{i}$,优化问题是一个爬坡速率受约束的动态经济调度问题,可运用文献 [8] 的最优化算法求解;对连续停机时段间隔 $\overset{OFF}{j}$,优化问题是一个简单的停

机成本计算问题。这样,就可按上述有序时段间隔划分方法形成动态规划模型,来求解精确化后的单目标优化问题。因未引入拉格朗日乘子,故能避免次梯度法的缺陷,使算法具有良好的实用性。

2.4 算法流程

给定研究周期各时段市场出清价格的模糊预测值,火电机组自组合模糊优化算法的算法流程如下:

- 1) 根据决策者的偏好选定加权系数 w_1 和 w_2 ;
- 2) 由式 (9) 计算等效市场出清价格,将模糊优化问题转化成式 (11) 所示的单目标精确优化问题;
- 3) 利用 2.3 节方法构造动态规划模型,求解单目标精确优化问题;
- 4) 获得机组的最优启停机计划、最优输出功率及定义 2 所述的各种利润;
- 5) 根据利润修改加权系数,返回 1),直至满足决策者的要求。

2.5 加权系数选择方法

加权系数 w_1 和 w_2 反映了决策者对潜在损失和潜在利润的偏好。记 $\tilde{t}_R^{(0)} / \tilde{t}_L^{(0)}$, 现给出一般的指导建议。

1) $w_1 = 0, w_2 = 0$ 时,由式 (9) 知, $\tilde{t}_{eq} = \tilde{t}_0$, 精确优化问题式 (10) 只优化最大可能估计价格下的利润,决策者不考虑客观存在的潜在损失和潜在利润,是不现实的决策者。

2) $w_2 = 0, w_1 > 0$ 时,精确优化问题式 (8) 在优化最大可能利润的同时,考虑价格不确定性可能带来的潜在损失。由式 (9) 知, $\tilde{t}_{eq} < \tilde{t}_0$, 机组在等效市场出清价格下的最优输出功率普遍低于最大可能估计价格下的对应值,所得机组组合计划更倾向于保守估计价格下的利润,决策者是侧重于防范风险的保守决策者。

3) $w_1 = 0, w_2 > 0$ 时,与情况 2) 相反, $\tilde{t}_{eq} > \tilde{t}_0$, 所得机组组合计划更倾向于乐观估计价格下的利润,决策者是侧重于投机额外利润的乐观决策者。

4) $w_1 w_2 > 0$ 时,精确优化问题式 (8) 综合优化最大可能利润、潜在损失和潜在利润,所得机组组合计划取决于决策者对潜在损失和潜在利润的偏好,决策者是一个混合型决策者。由式 (9) 可知,当 $w_1 / w_2 = 1$ 时, $\tilde{t}_{eq} = \tilde{t}_0$, 决策者在综合权衡潜在损失和潜在利润后,认为优化最大可能利润是最佳选择;当 $w_1 / w_2 > 1$ 时, $\tilde{t}_{eq} < \tilde{t}_0$, 决策者偏好防范潜在损失;当 $w_1 / w_2 < 1$ 时, $\tilde{t}_{eq} > \tilde{t}_0$, 决策者偏好投机潜在利润。

3 算例

现引用文献 [2] 的机组数据和出清价格预测值验证算法。机组数据和出清价格预测值分别列于表 1 和表 2。因机组受最小运行/停机时间和爬坡速率的约束,另外补充设定初始条件 $P_0 = 160 \text{ MW}$ 、 $x_0 = 3$

h。采用三角形模糊集合描述出清价格,取 $\tilde{\lambda}_{i,0}$ 为表 2 中的出清价格精确预测值,并设定 $\tilde{\lambda}_{i,L}^{(0)} = 0.90 \tilde{\lambda}_{i,0}$ 、 $\tilde{\lambda}_{i,R}^{(0)} = 1.10 \tilde{\lambda}_{i,0}$,这满足典型的 $\pm 10\%$ 的价格预报误差 [11]。

表 1 机组数据

Tab 1 Unit data

a	b	c	S_U	S_D	P_{\max}	P_{\min}	ST	SD	U	D	T_{up}	T_{down}
$/ \$ \cdot (\text{MW}^2\text{h})^{-1}$	$/ \$ \cdot (\text{MW}\text{h})^{-1}$	$/ \$ \cdot \text{h}^{-1}$	$/ \$$	$/ \$$	MW	MW	$\text{MW} \cdot \text{h}^{-1}$	$\text{MW} \cdot \text{h}^{-1}$	$\text{MW} \cdot \text{h}^{-1}$	$\text{MW} \cdot \text{h}^{-1}$	/h	/h
0.035	18	1150	1038	56	294	112	170	160	60	50	4	4

表 2 市场出清价格和不同估计价格下的机组自组合结果

Tab 2 Market clearing price and self-unit commitment results under different prices

时段	出清价格 $/ \$ \cdot (\text{MWh})^{-1}$	最优输出功率 /MW				
		最坏保守	最大可能	最好乐观	保守型	乐观型
		估计价格	估计价格	估计价格	$w_1 = 0.7, w_2 = 0$	$w_1 = 0, w_2 = 0.7$
1	33.31	160.00	160.00	210.00	160.00	160.00
2	26.53	0.00	0.00	160.00	0.00	0.00
3	22.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	23.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	22.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	23.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	24.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	24.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	25.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	27.58	0.00	0.00	170.00	0.00	165.78
11	31.60	0.00	170.00	230.00	0.00	225.78
12	35.60	170.00	230.00	290.00	170.00	285.78
13	41.05	230.00	290.00	294.00	230.00	294.00
14	41.61	277.84	294.00	294.00	290.00	294.00
15	38.98	244.02	294.00	294.00	260.73	294.00
16	39.74	253.80	294.00	294.00	270.83	294.00
17	42.02	283.11	294.00	294.00	294.00	294.00
18	42.09	284.01	294.00	294.00	294.00	294.00
19	40.74	266.65	294.00	294.00	284.11	294.00
20	38.80	241.71	294.00	294.00	258.34	294.00
21	39.63	252.38	294.00	294.00	269.37	294.00
22	46.14	294.00	294.00	294.00	294.00	294.00
23	39.04	244.00	287.28	294.00	250.92	294.00
24	33.68	194.00	237.28	272.11	200.92	257.68
最大可能利润 / \$	—	27 770.40	29 204.58 (B)	27 988.72	28 219.97	28 623.09
悲观利润 / \$	—	14 200.19 (A)	13 333.76	10 494.87	14 125.26	11 808.87
乐观利润 / \$	—	41 340.60	45 075.40	45 482.57 (C)	42 314.68	45 437.31

注:输出功率为 0 表示机组处于停机状态;粗黑体数据对应于图 2 各点。

按照最坏保守估计价格、最大可能估计价格和最好乐观估计价格分别进行精确机组自组合,算法平均执行时间为 87 s,结果列于表 2。可见,输出功率均满足爬坡速率约束,证实求解方法的正确性。图 2 给出了各种估计价格下最优机组组合计划对应的利润模糊子集。如表 2 中粗黑体数据所示,图 2 中 A、B、C 点分别能获得最优的悲观利润、最大可能

利润和乐观利润,且分属于不同估计价格下的最优机组组合计划,是相互冲突、不能同时获得的。决策过程中,发电公司总是希望既定机组组合计划在实际市场出清价格取悲观估计价格、最大可能估计价格和乐观估计价格时,能够获得 A、B、C 点所示的最优利润,这种冲突的目标需通过加权系数折衷处理。为获得等效市场出清价格的概念来指导加权系数的

选择,本文在精确化过程中将上述愿望形式化为最大可能利润 B 尽可能大,同时潜在损失 $(B - A)$ 应尽可能小和潜在利润 $(C - B)$ 应尽可能大这样一个多目标优化问题。 A 、 B 、 C 点反映的是理想情况,可作为衡量决策结果优劣的标准。

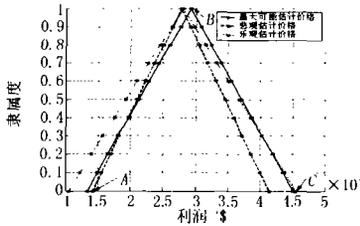


图 2 各种估计价格下的利润模糊子集

Fig 2 Profit fuzzy sets under different estimated prices

冲突的目标需通过反映决策者偏好的加权系数权衡处理。以图 2 中 A 、 B 、 C 点为基准,分以下情况讨论。

1) 保守型决策者

取定 $w_2 = 0$, 在 $[0, 1]$ 范围内以 0.1 为间隔调整 w_1 , 所得结果与基准点的偏差如图 3 (图 3~7 中, 均以 A 、 B 、 C 点为基准, 曲线给出的是相对于基准点的差值)。保守型决策者防范不确定性可能带来的损失。当 $w_1 = 0$ 时, 优化目标是最大可能估计价格下的利润。随着 w_1 的增大, 悲观利润逐渐受到重视, 并于 $w_1 = 1$ 处达到理想点 A 所示的最大悲观利润, 同时也是文献 [3, 4] 保守利润精确化方法的结果。在此过程中, 最大可能利润和乐观利润不断下降, 反映出决策目标的冲突性。在 $w_1 = 0.7$ 处, 与最大可能估计价格下的最优机组组合计划相比, 机组不再仅仅通过输出功率响应 w_1 , 而是在时段 11 处作出停机决策来防范损失, 因而各利润发生明显变化, 对应的优化结果列于表 2。

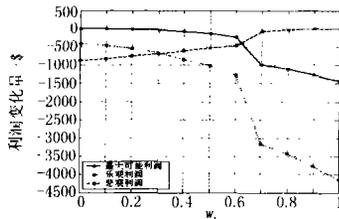


图 3 w_1 与利润

Fig 3 Profit vs w_1

2) 乐观型决策者

取定 $w_1 = 0$, 在 $[0, 1]$ 范围内以 0.1 为间隔调整 w_2 , 所得结果如图 4。乐观型决策者投机不确定性可能带来的利润。随着 w_2 的增大, 乐观利润逐渐受到重视, 并最终达到理想点 C 所示的最大乐观利

润。在 $w_2 = 0.7$ 处, 与最大可能估计价格下的最优机组组合计划相比, 机组在时段 10 提前启动来投机额外利润, 对应的优化结果列于表 2。

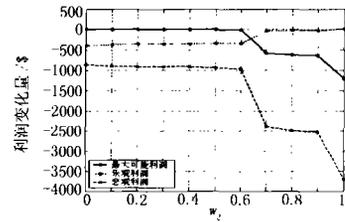


图 4 w_2 与利润

Fig 4 Profit vs w_2

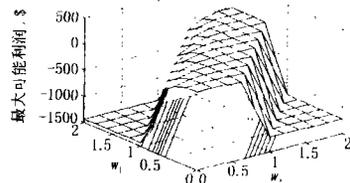


图 5 w_1 、 w_2 与最大可能利润

Fig 5 Maximum possible profit vs w_1 and w_2

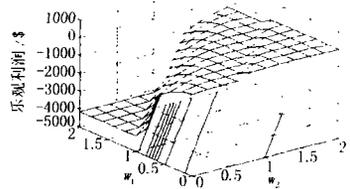


图 6 w_1 、 w_2 与乐观利润

Fig 6 Optimistic profit vs w_1 and w_2

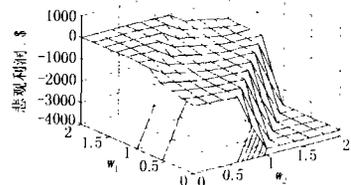


图 7 w_1 、 w_2 与悲观利润

Fig 7 Pessimistic profit vs w_1 and w_2

3) 混合型决策者

在 $[0, 2]$ 范围内以 0.2 为间隔调整 w_1 和 w_2 , 所得结果如图 5~7。图中同时给出了 w_1-w_2 平面上的等高线。因 $\alpha = 1$, 在 w_1-w_2 平面的 $(0, 0)$ 、 $(2, 2)$ 直线上, $w_1/w_2 = 1$, 决策者综合权衡潜在损失和潜在利润后最终以最大可能利润作为优化目标; 在 $(0, 0)$ 、 $(2, 2)$ 直线右侧, $w_1/w_2 < 1$, 决策者更倾向于乐观利润; 在 $(0, 0)$ 、 $(2, 2)$ 直线左侧, $w_1/w_2 > 1$, 决策者更倾向于悲观利润。决策者可依据图 5~7 权

衡各种情况下的利润,灵活确定 w_1 和 w_2 的取值,获得相应的机组组合计划。

4 结语

发电公司参与市场竞争时必须首先确定各台机组的启停机计划。本文提出火电机组自组合的模糊优化方法,能灵活反映决策者追求最大可能利润、规避风险和投机额外利润的决策趋向。然而,与多目标规划普遍存在的共性问题一样,优选加权系数是十分困难的。一种可能的途径是首先确立一个主要优化目标,然后将其余两个次要优化目标处理为主要优化目标的不等式约束,把加权系数从概念上转化为次要目标不等式约束的影子价格,并在确定机组组合计划时自动给出,这将是我们的进一步的研究内容。另外,本文只研究了价格接受者发电公司的机组自组合问题,对价格决定者发电公司,需通过需求弹性曲线考虑机组组合决策对市场出清价格的影响,在确定需求弹性曲线后,本文方法可直接推广应用到价格决定者发电公司的机组自组合。

参考文献:

- [1] Ni E, Luh P B, Rourke S. Optimal Integrated Generation Bidding and Scheduling with Risk Management under a Deregulated Daily Power Market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 600-609.
- [2] Conejo A J, Nogales F J, Arroyo J M, et al. Risk-Constrained Self-Scheduling of a Thermal Power Producer[J]. IEEE Trans on

Power Systems, 2004, 19(3): 1569-1573.

- [3] Attaviriyapap P, Kita H, Tanaka E, et al. A Fuzzy-Optimization Approach to Dynamic Economic Dispatch Considering Uncertainties[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1299-1307.
- [4] Yan in H Y. Fuzzy Self-Scheduling for GenCos[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 503-505.
- [5] Zimmermann H J. Fuzzy Set Theory and Its Applications[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [6] 张健伟,侯朝桢.发电动态经济调度的有效响应能力调整算法[J].电力系统自动化,2004,28(22):27-31.
ZHANG Jian-wei, HOU Chao-zhen. Valid Response Ability Adjusting Amount-based Algorithm for Dynamic Economic Dispatch in Power Generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 27-31.
- [7] 翟桥柱,管晓宏,郭燕,等.具有混合动态约束的生产系统优化调度新算法[J].自动化学报,2004,30(4):539-546.
ZHA I Qiao-zhu, GUAN Xiao-hong, GUO Yan, et al. A New Method for Production Scheduling with Hybrid Dynamic Constraints [J]. ACTA Automatica Sinica, 2004, 30(4): 539-546.
- [8] Lee F N, Lenonidis L, Liu K C. Price-Based Ramp-Rate Model for Dynamic Dispatch and Unit Commitment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1233-1241.

收稿日期: 2005-07-08; 修回日期: 2005-08-26

作者简介:

张健伟(1973-),男,博士,主要研究方向为电网调度、电力市场与电力市场仿真;E-mail: zjwsepri@sohu.com

侯朝桢(1938-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式控制、智能控制与容错控制。

Fuzzy optimization method based self-commitment of thermal unit in electricity market

ZHANG Jian-wei^{1,2}, HOU Chao-zhen²

(1. Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Unit commitment plan is crucial to decision-making for generating companies to participate in electricity market. Under the market environment, market clearing price has high uncertainty, which should be considered in self-unit commitment. Based on the fuzzy description of the market clearing price, fuzzy self-unit commitment optimization method of the coal-fired unit with startup/shutdown ramping rate and ramping up/down rate constraints is presented under the uncertainty environment. A new precision method converting fuzzy optimization problem to a rigorous one is proposed through the analysis of decision-making proneness of the real market participants. The resulting rigorous optimization problem has been solved via dynamic programming model. Simultaneously, advices for the preference coefficients have been suggested. Finally, an example shows that the proposed fuzzy self-unit commitment method reflects the decision-making objective flexibly and qualified as a new uncertainty decision-making method under the market environment.

Key words: self-unit commitment; fuzzy optimization method; ramping rate constraints; dynamic programming; electricity market