

考虑多重不确定因素的含风电场低碳经济调度

盛四清, 李亮亮, 刘 梦

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北保定 071003)

Low-carbon Economic Dispatch of Power System Integrated with Wind Farms by Considering Uncertainties Factors

SHENG Siqing, LI Liangliang, LIU Meng

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 碳交易引入含风电的调度系统中, 由于碳交易价格的不确定性增加了含风电系统的不确定因素的数量。针对低碳经济调度中的多重不确定因素, 根据其不同的特性和对调度系统的不同影响区别对待, 将风电预测误差和负荷预测误差表示成模糊变量和随机变量, 并用混合机会约束考虑其对调度系统旋转备用的影响, 应用多场景技术根据碳交易价格的波动模型建立考虑碳交易价格波动下的低碳调度模型。模型的求解通过机组组合方式的确定和机组出力分配两部分进行, 通过场景评价指标得到最优机组组合方式下的最优机组出力。最后通过 10 机组算例证明了模型的有效性和合理性。

关键词: 碳交易; 碳交易价格; 混合机会约束; 场景概率; 低碳经济调度

Abstract: Because of the uncertainty of the price of carbon trading, carbon trading is introduced in dispatching system integrated with wind power system, which increases the number of uncertain factors. In view of the multiple uncertainties of low-carbon economic dispatching, in this paper, according to their different characteristics and their different influence on the dispatching system, wind power forecast error and load forecast error are expressed as fuzzy variables and random variables, and a hybrid chance-constrained condition is used to consider its influence on spinning reserve of dispatching system. According to carbon trading price volatility model, multiple scenarios technology is used to establish low-carbon dispatching model by considering the carbon trading price fluctuation. The model is solved through the determining of the unit on/off status and the dispatching of unit power output, and the optimal power output is determined under the optimal unit on/off status by using scenario evaluation index. A ten-unit test system is used to verify the rationality and effectiveness of proposed model.

Keywords: carbon trading; price of carbon trading; mixed

chance constraint; scenario probability; low-carbon economic dispatch

0 引 言

我国的传统的能源发电格局是以火力发电为主, 但是大量煤炭的燃烧产生了大量 CO₂ 的排放, 这加剧了全球气候变暖。风电作为新能源发电中最具前景的发电方式已经获得人们越来越多地重视, 但是风电的波动性和间接性也给电力系统构成了巨大的威胁。

伴随着低碳经济的持续升温, 碳交易机制引入调度系统。碳交易的引入给电力调度带来了巨大的影响, 由于风力出力预测的不确定性, 再加上负荷预测的不确定性和碳交易价格的不确定性, 电力调度系统成为了一个含有多重不确定因素的复杂系统, 忽略这些不确定因素, 应用确定的预测数据进行调度, 显然会给电网带来很大的风险。

目前关于含风电调度系统的不确定性研究主要的集中在风电预测出力的不确定性和负荷预测不确定性上。文献 [1] 将模糊理论引入到含风电的调度系统中, 用梯形模糊数来表示风电场每个时段的出力。文献 [2] 中将间歇式电源出力和负荷预测出力都表示成模糊变量, 建立了基于可信性理论的模糊机会约束机组组合模型。文献 [3-4] 在调度模型中, 针对风电预测误差和负荷预测误差分别预留风电预测出力和负荷预测值的一定比例作为的旋转备用, 保证系统的安全运行, 但是这样的做法具有一定的盲目性, 容易造成备用的浪费。文献 [5] 中将风电的预测出力视作随机变量, 通过控制机会约束中的置信水平的变化实现对风电不确定性风险

的管理。文献 [6] 将风电的不确定性表示成风电预测误差的不确定性, 并且用模糊变量表示误差变量, 并据此建立了考虑旋转备用的模糊机会约束模型。综上所述, 研究含风电调度系统的不确定性主要是将风电出力的不确定性和负荷预测的不确定性表示成随机变量或者模糊变量或者同时含有模糊变量和随机变量^[7], 利用机会约束在满足一定风险要求的情况下为预测误差预留一部分的旋转备用, 使得电力系统可以安全、稳定运行。

由于日前调度碳交易价格是不确定的, 所以碳交易的引入给调度系统增加了新的不确定因素。文献 [8] 将碳交易引入到调度系统中, 应用随机规划理论构建模型, 充分地考虑了风力出力的不确定性。文献 [9] 在含大规模光伏发电的调度系统中引入碳交易, 利用场景技术考虑光伏发电的不确定性, 但文章仅考虑了光伏出力的不确定性。文献 [10] 通过引入风电的广义成本, 充分地考虑了风电的成本, 解决了碳交易背景下含风电系统接纳多少风电合适的问题, 但文章没有考虑碳交易价格的预测误差。文献 [11] 通过场景概率技术充分的考虑了风电预测误差、负荷的预测误差、碳交易价格预测误差, 但是模型的求解过程中将误差统一地表示成随机变量, 显然这是一种简化处理方式。现实中, 不确定因素具有不同的特点, 其对调度系统的影响也不相同。风电预测误差和负荷预测误差主要的对电网的安全性构成威胁, 碳交易价格的预测误差主要的对调度的经济性造成影响。传统的电力系统经济调度中负荷预测误差一直存在, 人们在预测负荷时有更多的资料、数据可以参考, 所以负荷的预测误差表现为一定的随机性, 有一定的规律可循。而由于风电预测数据的缺乏, 风电波动性、间歇性较强, 所以风电的预测误差表现为一定的模糊性。碳交易价格主要受到碳排放交易机制、碳排放权供求总量、气象条件、低碳技术风险及碳减排的投资风险的影响^[12], 波动巨大但是其总是在某一值附近波动, 所以碳交易价格预测值不是唯一的表示成一个随机变量更加的合理。

本文在前人研究的基础上, 充分地考虑到调度系统预测误差的多样性和不同特性, 将负荷预测误差和风电出力预测误差分别表示成随机变量和模糊变量, 碳交易价格预测值表示成随机变量。将碳交易价格预测值的随机性通过多场景技术体现, 将风电预测误差和负荷预测误差通过含模糊变量和随机

变量的混合机会约束控制的旋转备用约束来体现。通过引入碳交易, 使得碳排放量成为调度系统中新的决策变量, 减少了系统的碳排放量, 建立了考虑开停机的含火电机组运行成本最小和碳交易成本最小的多目标调度模型, 并通过算例分析突出所提模型的有效性和实用性。

1 碳交易模型

1.1 碳交易及其影响

碳交易是通过建立合法的碳排放权并允许这种权利进行买卖, 从而实现碳排放量减少的交易机制。当排放源的实际排放量小于所分到的排放额度时, 就可以将剩余的额度拿到市场出售获利; 而当排放源的实际排放量超过所分配的排放配额时, 就必须在碳交易市场购买超出的部分, 否则将会面临高额的罚款^[13]。

由于现实的情况下风电的发电成本要高于火电成本, 为了鼓励新能源发电的发展, 国家会对风电的并网给予一定的补贴, 但是依靠国家的政策提高风电的竞争力不是一个好的选择。由于风力发电具有不产生碳排放的优势, 所以碳交易的引入有利于降低风力发电的成本, 提高风电的竞争力, 还有利于增加节能减排机组的出力, 有利于新技术的推广。

1.2 碳交易模型的建立

若以 E_p 表示调度系统的碳排放量, E_q 表示系统分配到的碳排放配额, 则

$$E_p = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \kappa_i u_{it} P_{it} \quad (1)$$

$$E_q = \sum_{i=1}^T \zeta P_{Di} \quad (2)$$

系统的碳交易成本可以表示为

$$F_{et} = P(E_p - E_q) \quad (3)$$

式中: T 为研究周期的时段数目, 本文取 24; N 为常规火力发电机组数目; ζ 为机组 i 的碳排放强度, $t/(MWh)$; κ_i 为单位电量的碳排放配额, t/MWh ; P_{it} 为机组 i 在 t 时间段的出力; P_{Di} 为 t 时间段总的机组出力, 包括火电和风电出力; u_{it} 为机组的开停机状态, 1 表示开机 0 表示关机; P 为某天的碳交易价格, 当 $F_{et} > 0$ 时, 表示调度系统支付碳交易成本; 当 $F_{et} < 0$ 时表示调度系统获得碳交易收益。

1.3 碳交易价格波动模型及多场景处理策略

由于碳交易的价格只有在每天收盘后才能确定，而日前调度却要在前一天确定机组的出力计划，因此碳交易价格需要由预测获得。碳交易价格的预测模型有多种，本文采用更好地反映碳交易价格波动性的 AR-广义自回归条件异方差 (AR-GARCH) 模型^[12]，预测原理简介如下：

$$\begin{cases} r_t = \ln(S_t) - \ln(S_{t-1}) \\ r_t = c + \theta r_{t-1} + \delta_t \\ \delta_t = \mu_t \sigma_t \\ \sigma_t^2 = k + \lambda \delta_{t-1}^2 + \eta \sigma_{t-1}^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中： S_t 和 S_{t-1} 为第 t 日和 $t-1$ 日的碳交易价格； r_t 为碳交易价格对数的一阶方差； δ_t 和 σ_t 为中间变量； μ_t 为服从正态分布的独立随机变量，可以表示为 $\mu_t \sim N(0, 1)$ ； c 、 k 、 λ 、 η 、 θ 为常数，其估计值见文献^[14]。

若已知 $t-1$ 、 $t-2$ 、 $t-3$ 日的碳交易价格分别是 S_{t-1} 、 S_{t-2} 、 S_{t-3} ，则根据(4)式由 S_{t-2} 、 S_{t-3} 、 μ_{t-1} 可以求得 δ_{t-1} 、 σ_{t-1} ，然后再根据(4)式由碳交易价格 S_{t-1} 、 S_{t-2} 和 δ_{t-1} 、 σ_{t-1} 、 μ_t ，获得交易日的碳交易价格 S_t 。由于 μ_t 和 μ_{t-1} 为随机变量，所以求得的碳排放权价格也为随机变量，在多场景下考虑碳交易价格波动可以通过蒙特卡罗模拟抽样估计得到各个场景下的碳交易价格。多场景碳交易价格求解过程表述如下：

假设抽样的规模为 n ，随机变量的个数为 z 个，则第 i 个样本表示成 $\mathbf{X} = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iz}]$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ ，多场景产生的过程如下：

① 假设区间 $[x_{wd}, x_{wu}]$ 内的值 x_w 的概率分布函数为 $F_w(x_w)$ ，其中 $w = 1, 2, \dots, z$ ；

② 将 $[x_{wd}, x_{wu}]$ 分成 NN 个等距离的区间；

③ 计算各个区间段对应的概率值 ϵ_{wj} ，将每一区间和累积概率相联系，利用轮盘赌确定被选中的区间。随机产生一个介于0和1的随机数，当此数小于或者等于某一区间的累积概率时，该区间被选中，然后利用蒙特卡洛抽样确定样本值；

④ 求取每个场景下的场景概率。在本模型中 z 取2，则标准化场景概率为

$$P_s = \frac{\epsilon_{1,j} \epsilon_{2,k}}{\sum_{s=1}^{N_s} \epsilon_{1,j} \epsilon_{2,k}} [0, 1] \quad (5)$$

式中： P_s 为场景概率值， j 、 k 分别为两个随机变量被选中的区间代号； $j = 1, 2, \dots, NN$ ； $k = 1,$

$2, \dots, NN$ 。

通过上述过程产生的场景数一般比较多，需要利用场景缩减技术得到规定的场景数，具体的场景缩减技术参考文献^[15]。

2 碳交易环境下含多重不确定性因素的经济调度模型

2.1 目标函数

本文取多场景下火电运行成本最小和碳交易成本最小为目标函数，其表述如下：

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_s} [S_{it} u_{it} (1 - u_{i(t-1)})] + \sum_{s=1}^{N_s} P_s [\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_s} f(P_{sit})] \quad (6)$$

式中： S_{it} 为第 i 台机组在第 t 时段的启动成本； N_s 为场景个数； P_s 为第 s 个场景的场景概率值； $f(P_{sit})$ 为第 i 台机组在第 s 个场景下第 t 个时段的煤耗成本，其表达式可以表示为

$$f(P_{sit}) = a_i + b_i P_{sit} + c_i (P_{sit})^2 \quad (7)$$

式中： a_i 、 b_i 、 c_i 为第 i 台机组的煤耗系数； P_{sit} 为第 i 台机组在场景 s 下第 t 时段的出力值。

$$\min F_2 = \sum_{s=1}^{N_s} P_{ds} [P_{ds} (E_{sp} - E_q)] \quad (8)$$

式中： P_{ds} 为场景 s 下的碳交易价格； E_{sp} 为场景 s 下的碳排放量。

2.2 约束条件

调度系统约束条件可以分为系统约束条件和机组约束条件。火电机组出力、机组启停时间约束、机组的爬坡约束参考文献^[15]。

在实际的调度运行中，根据风电预测值和负荷预测值对负荷进行分配，然后对预测误差预留旋转备用，保证调度系统的安全。则系统的功率平衡可以表示为

$$\sum_{i=1}^N P_{sit} + P_{wt} = P_{lt} \quad (9)$$

式中： P_{wt} 为 t 时段风电的预测值； P_{lt} 为 t 时段负荷预测值。

由于本文中考虑到负荷预测误差和风电预测误差的不同特性，约束条件同时出现模糊变量和随机变量，本文借鉴文献^[7]处理方式应用混合机会约束条件处理旋转备用约束：

$$\text{pos} \left\{ \text{pr} \left\{ \sum_{i=1}^N u_{it} P_{imax} + P_{wt} + e_{wt} \geq P_{lt} + e_{lt} \right\} \geq \alpha \right\} \geq \beta \quad (10)$$

式中： $P_{i\max}$ 为机组*i*的最大出力； e_{wt} 、 e_{lr} 分别为风电的预测误差和负荷预测误差，由于风电出力的模糊性， e_{wt} 为一个模糊变量，在本文中将其表示成服从三角模糊参数的模糊变量，即 $e_{wt} = \{-e_{wt}, 0, e_{wt}\}$ ， e_{wt} 可以由风电的历史数据确定； e_{lr} 为负荷预测误差其值与预测负荷的大小成比例，所以可以用高斯统计变量表示，则有 $e_{lr} \sim N(0, \sigma_{lr}^2)$ ，其中 $\sigma_{lr}^2 = 0.01P_{lr}$ ； α 和 β 分别为随机变量和模糊变量的置信水平； $pos\{\cdot\}$ 为事件成立的可能性； $pr\{\cdot\}$ 为事件成立的概率。

3 模型的求解策略

本文模型分成两部分求解，即：组合的确定和机组出力的求取。由于本文的调度系统中考虑多重不确定因素的不确定性，而不确定因素对调度系统的影响不同，负荷预测误差和风电预测误差主要的影响是机组的旋转备用进而决定组合，而碳交易价格的不确定性影响是机组的出力分配，所以模型的求解分两步进行。

步骤一：首先根据旋转备用约束和机组开停机时间约束获得可行的机组组合方式。

① 随机生成 $N \times T$ 的0、1矩阵，0代表机组的关闭，1代表机组的开启；

② 计算机组的优先排序指标，值越小的越优先启动，指标公式如下：

$$priority_i = \frac{a_i + b_i P_{\max,i} + c_i (P_{\max,i})^2}{P_{\max,i}} \quad (11)$$

③ 根据混合模拟检验策略^[9]检验生成的机组开停机状态是否满足旋转备用条件。若满足，进行冗余机组的处理，按照机组的排序，值大的优先

关机，直到满足备用约束条件；若不满足，按照排序指标，值小的优先开机，直到满足旋转备用约束条件。

④ 检验是否满足开停机时间约束，此处利用文献[14]的启发式调整策略进行调整。满足开停机时间约束后重新判断是否满足旋转备用约束，若满足保留开停机方案，否则舍弃。重复步骤1得到满足条件的开停机方案 N_{pop} 个。

步骤二：多场景下考虑碳交易价格波动的机组出力分配。

① 利用轮盘赌方法计算相应场景的概率，利用蒙特卡洛抽样方法得随机变量值进而计算出碳交易价格，经场景缩减得到场景数为 N_s 个；

② 对于每个场景下进行机组的出力分配，每个场景除碳交易价格不同外，其它参数相同，机组的出力水平的确定利用多目标粒子群算法求解；

③ 比较目标函数值，确定最小成本下其机组组合方式作为最优机组组合。

4 算例分析

本文引用10机组算例，机组参数参见表1，模糊置信水平取0.75，随机置信水平取0.9，机组启停费用及机组启停时间约束参考文献[9]。交易日前三天的碳交易价格分别为18、19、17USD/t，每种机组组合方式下缩减后场景数取50，电网的基准线排放因子由边际排放因子和容量边际排放因子加权各占50%求得，取值为0.76t/MWh。负荷预测值参考文献[16]，风电的预测值参考文献[17]。

表1 常规火电机组参数

机组	P_{\max}/MW	P_{\min}/MW	$U_{\text{up}}/(\text{MW}/\text{h})$	$U_{\text{down}}/(\text{MW}/\text{h})$	$a_i/(\$/\text{h})$	$b_i/(\$/\text{MWh})$	$c_i/((\text{MW})^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$\kappa_i/(\text{t}/\text{MWh})$
G1	455	150	130	130	1 000	16.19	0.000 48	0.98
G2	455	150	130	130	970	17.26	0.000 31	0.96
G3	165	25	90	90	450	19.70	0.003 98	0.45
G4	130	20	60	60	680	16.50	0.002 11	0.40
G5	130	20	60	60	700	16.60	0.002 00	0.40
G6	85	25	40	40	480	27.74	0.000 79	1.11
G7	80	20	40	40	370	22.26	0.007 12	1.02
G8	55	10	40	40	660	25.92	0.004 13	0.98
G9	55	10	40	40	665	27.27	0.002 22	0.99
G10	55	10	40	40	670	27.79	0.001 73	1.00

表注： $U_{\text{up}}/U_{\text{down}}$ 表示火电机组单位时间内最大上升/下降速率。

在最优的启停计划下，50 个场景分别对应着不同碳交易价格预测值下的机组出力情况，可以利用式(12)，确定最优机组组合方式下的机组最优出力。

$$scenario(s) = P_s + \frac{F_s - \min\{F\}}{\min\{F\}} \quad (12)$$

式中： P_s 代表第 s 个场景下的碳交易价格 P_{c} 被选中的概率； F 为总成本，即碳交易成本与火电运行成本的和； F_s 代表的是第 s 个场景下的系统调度总成本； $\min\{F\}$ 为最优机组组合方式下 50 个价格场景中系统调度总成本最小值。

公式(12)中的 P_s 代表价格 P_{c} 被选中的概率，

由公式(4)知碳交易价格的预测值是在某一值附近波动，而这个值是最有可能的碳交易价格的真实值，越靠近真实值其被选中的概率也就越大，倒数也就越小；而公式(12)的第二项是指第 s 个场景下总成本值与总场景最小总成本值之差占总场景最小总成本值的比重，其值越小，说明第 s 场景的总成本越小，考虑的是场景的经济、环保性。综上，公式(12)既考虑碳交易价格预测的合理性，也考虑了调度的经济、环保性，其值最小的场景出力值作为最终最优的调度结果，最终得到的日前 24 时段的机组出力结果见表 2，最优机组组合方式下总成本最小为 638 310 \$，这是兼顾 50 种场景下总成本期望最小值。

表 2 50 场景下最优机组出力

时段	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
1	310.4	209.6	0	0	0	0	0	0	0	0
2	295.6	299.4	0	0	0	0	0	0	0	0
3	335.2	419.8	0	0	0	0	0	0	0	0
4	266.5	446.5	0	0	112.0	0	0	0	0	0
5	307.2	389.1	0	0	128.7	0	0	0	0	0
6	291.1	435.3	0	112.9	110.6	0	0	0	0	0
7	366.3	440.1	0	81.3	122.3	0	0	0	0	0
8	338.8	433.9	0	125.8	127.9	0	78.6	0	0	0
9	453.2	453.9	0	111.2	129.8	59.7	52.2	0	0	0
10	432.9	453.5	130.8	116.6	124.8	70.1	51.2	0	0	0
11	420.3	427.0	154.1	128.6	123.6	43.6	67.8	0	0	0
12	434.1	450.0	145.4	108.2	127.1	67.2	73.1	0	0	0
13	445.0	440.9	154.2	118.6	105.3	0	66.1	0	0	0
14	366.1	432.9	149.9	113.5	127.6	0	0	0	0	0
15	428.7	404.6	147.3	0	94.3	0	0	0	0	0
16	447.3	310.8	0	0	111.9	0	0	0	0	0
17	447.0	241.8	0	0	126.2	0	0	0	0	0
18	427.8	306.4	0	0	91.8	0	64.0	0	0	0
19	439.0	387.6	0	0	118.2	59.7	30.5	0	0	0
20	432.2	412.6	0	124.7	126.1	46.2	27.4	30.7	0	0
21	450.9	439.2	0	101.1	129.3	25.1	39.4	0	0	0
22	409.7	434.7	0	112.0	0	0	63.6	0	0	0
23	403.7	361.1	0	115.1	0	0	0	0	0	0
24	287.2	313.6	0	119.2	0	0	0	0	0	0

保持表 2 机组的组合方式不变，模式 1 仅考虑目标函数 1，模式 2 为考虑碳交易下的调度模式。两种模

式下清洁机组 3、4、5 的出力变化情况如图 1 所示。

由图 1 可知，在系统负荷比较大的 12 时段和

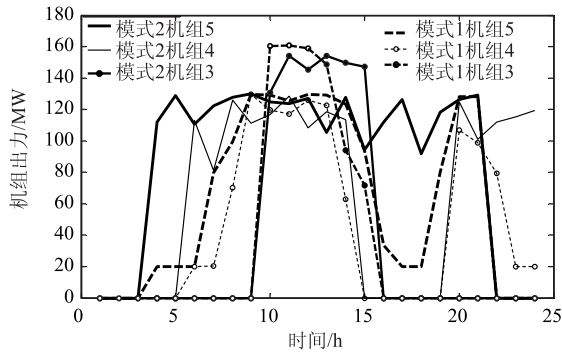


图1 不同模式下清洁机组出力情况

20时段,此时是负荷的峰值阶段,机组出力都达到较大值,出力变化不明显;在其他阶段,模式2下的机组出力明显高于模式1下的机组出力,清洁机组出力的增加有利于减少碳排放量,带来碳收益,降低系统成本。

表3列出来碳交易的引入对传统调度成本的影响。

表3 不同调度模式调度成本对比

模式	$F_1/\$$	$F_2/\$$	E_p/t	$F/\$$
1	648 680	—	21 621	648 680
2	651 570	-13 260	20 650	638 310

碳交易的引入,使得火电机组的运行费用有所增加,但是碳排放量的降低使得模式2在碳交易市场可以获得13 260\$的收益,这使得总的调度成本降低2.03%。

图2和图3分别表示保持机组最优组合方式不变的情况下,随机置信水平、模糊置信水平变化下火电运行成本和碳交易成本变化趋势。

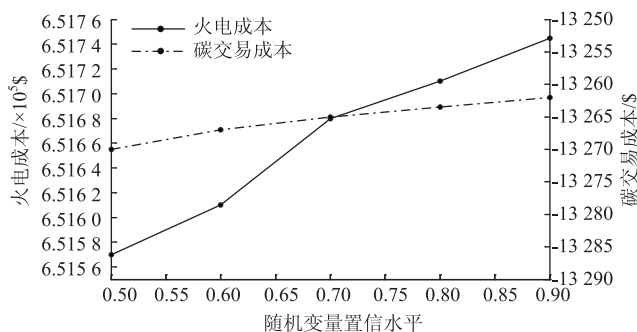


图2 火电成本、碳交易成本随随机置信水平的变化

由图2所示,伴随随机变量置信水平的提高,火电运行成本上升,碳交易成本稍微提高,这是由于,随机变量置信水平越高说明,系统能量供

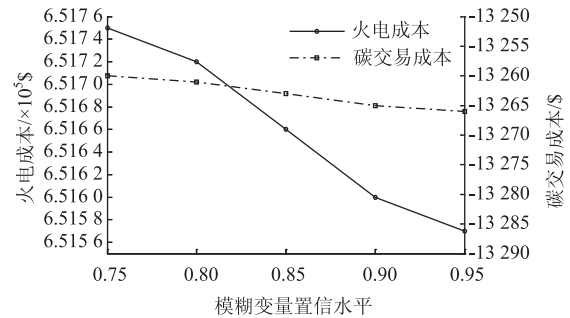


图3 火电成本、碳交易成本随模糊置信水平的变化

给越稳定,安全性越好,在负荷高峰时为保证安全性会启动更多的机组保证能量的供给,这使得火电机组的成本有所上升,由于所开机组数量的增加,清洁机组的出力会有所减少,碳交易成本会有所上升。

由图3所示,伴随着模糊变量置信水平的提高,火电运行成本有所降低,碳交易成本也有所降低。模糊变量置信水平越高说明风电预测误差可信度比较高,系统没有必要开启太多机组来应对风电预测误差,则调峰时开启的机组少,火电的运行成本降低,清洁机组的出力得到增加,碳交易成本降低。

本文模型中,通过控制随机变量置信水平、模糊变量置信水平的变化,可以在风险和经济成本中找到一个平衡点,从而达到调度系统经济、环保、安全的统一。

5 结束语

本文考虑到碳交易引入含风电调度系统中多重不确定因素,针对多重不确定因素区别建模。风电预测和负荷预测的不确定性转换成各自预测误差的不确定性并分别体现到旋转备用中去,碳交易价格的不确定性应用多场景技术处理,建立了考虑风电预测误差、负荷预测误差、碳交易价格预测误差的低碳经济调度模型。模型的建立考虑了多种机组组合方式、多种价格场景下的调度成本最小化,最终的调度结果兼顾50种碳交易价格场景,根据场景评价指标选出最优调度计划。算例分析显示,碳交易的引入可以有效地降低系统的碳排放,考虑多重不确定因素下的含风电低碳经济调度可以更加符合实际的调度情况,实现经济、环保、安全的统一。

参 考 文 献

- [1] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
- [2] Chen C L. Optimal wind-thermal generating unit commitment [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 273-280.
- [3] 王彩霞, 乔颖, 鲁宗相. 考虑风电效益的风火互济系统旋转备用确定方式 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 16-21.
- [4] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
- [5] 熊虎, 向铁元, 陈红坤, 等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 36-44.
- [6] 艾欣, 刘晓, 孙翠英. 含风电场电力系统机组组合的模糊机会约束决策模型 [J]. 电网技术, 2011, 35(12): 202-207.
- [7] 盛四清, 孙晓霞. 考虑节能减排和不确定因素的含风电场机组组合优化 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 54-59.
- [8] 张晓辉, 闫柯柯, 卢志刚, 等. 基于碳交易的含风电系统低碳经济调度 [J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2697-2704.
- [9] 娄素华, 胡斌, 吴耀武, 等. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97.
- [10] 张程飞, 袁越, 张新松, 等. 考虑碳排放配额影响的含风电系统日前调度计划模型 [J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2114-2120.
- [11] 张晓辉, 闫柯柯, 卢志刚, 等. 基于场景概率的含风电系统多目标低碳经济调度 [J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1835-1841.
- [12] 刘阳升, 周任军, 李星朗, 等. 碳排放权交易下碳捕集机组厂内优化运行 [J]. 电网技术, 2013, 37(2): 295-231.
- [13] 王信, 袁方. 碳排放权交易中的排放权分配和价格管理 [J]. 金融发展评论, 2010(11): 48-47.
- [14] Benz E, Trück S. Modeling the price dynamics of CO₂ emission allowance [J]. Energy Economics, 2009, 31(1): 4-15.
- [15] 张步涵, 邵剑, 吴小珊, 等. 基于场景数和机会约束规划的含风电场电力系统机组组合 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 127-135.
- [16] 南晓强, 李群湛, 赵元哲, 等. 计及风电预测可信度的经济调度及辅助决策方法 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 61-67.
- [17] 张晓花, 赵晋泉, 陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 71-76.

收稿日期: 2015-05-14

作者简介:

盛四清(1965—), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, E-mail: hdbdssq@163.com;

李亮亮(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, E-mail: lilianglinag412@163.com;

刘梦(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, E-mail: 15733227850@163.com。

(责任编辑: 林海文)