

计及污染气体排放风险的多目标随机动态 环境经济调度模型

文 旭¹, 王俊梅², 郭 琳², 颜 伟³

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 国网重庆电网电力交易中心, 重庆 400014;

3. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 在风电出力具有随机性的环境下, 针对现有环境经济调度模型无法满足污染气体排放风险管理的现状, 建立计及污染气体排放风险的多目标随机动态环境经济调度模型。考虑风电出力的随机性, 给出环境经济调度污染气体排放风险评估指标的定义方法; 借鉴经济学投资组合理论中半绝对离差风险的概念, 建立环境经济调度污染气体排放风险评估指标; 在多场景建模理论的框架内, 建立计及污染气体排放风险的多目标随机动态环境经济调度模型。在利用后向场景削减技术对风电随机出力的大量场景进行削减后, 采用内嵌目标相对占优的遗传算法求解模型。算例仿真验证了所提模型的有效性。

关键词: 环境经济调度; 污染气体排放; 评估指标; 风险; 风电; 遗传算法; 模型

中图分类号: TM 732; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.021

0 引言

在能源短缺和环境污染日益严峻的今天, 对占全社会污染气体排放较大比重的电力系统进行污染气体排放的评估与管理具有重要的现实意义^[1]。在此背景下, 风力发电由于具有不消耗一次能源且无污染气体排放的优点, 在世界各国得到了快速发展^[2]。环境经济调度作为电力系统控制污染气体排放的重要手段, 如何考虑风电出力的随机性实现污染气体排放的评估与管理是当前环境经济调度优化决策中亟待解决的重大课题。

从本质上而言, 兼顾环境保护和经济效益的发电调度即为环境经济调度, 其较多的体现形式为在追求火电机组发电运行成本尽可能低的经济调度模型中, 增加了使得污染气体排放量尽可能低的目标函数, 从而使得环境经济调度转变为含污染气体排放评估指标的多目标优化问题^[3]。由此, 环境经济调度必然包含 2 个评估和管理目标: 火电机组发电运行成本和污染气体排放^[3-14]。

针对环境经济调度优化目标之一的火电机组发电运行成本的评估与管理, 现有文献从确定性评估到不确定性(风险)取得了较为丰硕的研究成果。鉴于环境经济调度本质上是经济调度的延续, 显然环境经济调度可以借鉴已有的经济调度中的经济性评估指标对火电机组的发电运行成本进行评估和管理。考虑风电出力的随机性, 文献^[7, 11-14]采用火电机组发电运行成本指标或者其期望值来评

估环境经济调度中的火电机组运行成本。针对风电出力随机性造成的经济风险, 文献^[15-18]分别将风险价值 VaR(Value at Risk)、条件风险价值 CVaR(Conditional Value at Risk)和半绝对离差 SAD(Semi-Absolute Deviation)评估指标应用到含风电的经济调度中, 在最小化火电机组发电运行成本的同时, 实现对经济风险进行有效的管理。

然而, 针对环境经济调度优化目标之二的火电机组污染气体排放的评估指标, 目前还没有风险评估指标以及相应的风险管理模型的文献报道。在随机环境下, 现有文献大都采用污染气体的排放浓度、某一时段内污染气体的排放量以及单位电量减少的污染气体排放量^[4-10]等, 或者以其期望值^[11-14]作为评估指标, 而在随机环境下这些指标的的实现具有一定的风险性。再就目前电力系统节能减排的实际情况来看, 由于缺乏风险管理意识(特别是中国), 导致最后以牺牲巨大的经济利益, 采用极端的“拉闸限电”手段达到节能减排考核评估的现象, 更需要业界对现有的节能减排评估和管理方法的局限性进行深刻的反思^[19]。

另一方面, 文献^[6-8]等在对环境经济调度的污染气体排放进行评估时, 采用了价格罚因子 PPF(Price Penalty Factor)的概念将污染气体的排放转化为火电机组运行的经济成本, 从而借助经济性指标来评估污染气体的排放。该思路原理较为简单, 但如果将其运用于污染气体排放的风险评估会导致 3 个问题: ①由于各地区电源结构和负荷需求不同, PPF 的确定必然不同^[7], 其评估结果无横向可比性; ②由于人为引入了 PPF, 其评估结果不能真实地反映污染气体排放风险; ③评估结果与目前各国各地区污染气体排放的评估指标不一致(现多采用一定时期内污染气体

收稿日期: 2014-05-29; 修回日期: 2015-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177178)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177178)

排放量指标^[1,3-4])。由此,必须结合环境经济调度污染气体排放的固有特征,建立污染气体排放风险评估指标以及相应的风险管理模型。

鉴于此,本文重点在以下 2 个核心点上进行了创新性研究:①考虑风电出力的随机性,给出了环境经济调度污染气体排放风险评估指标的定义方法,同时借鉴半绝对离差风险的概念建立了污染气体排放风险评估指标;②基于多场景建模理论,在日调度周期内建立了计及污染气体排放风险的多目标随机动态环境经济调度模型。本文紧紧围绕上述核心创新点展开研究,结合风电出力的场景模拟和场景削减技术,采用内嵌目标相对占优的遗传算法求解所建模型。而算例部分也对上述研究工作的有效性进行了验证。

1 环境经济调度污染气体排放风险评估指标的构建

为实现社会经济的可持续发展,尽可能降低污染气体的排放量是电力系统环境经济调度的两大目标之一,而从电力系统污染气体排放的来源看主要为常规的火电机组。相对目前负荷预测的研究已有较大准确性而言,风电出力的预测还存在较大误差^[18]。在风电出力具有随机性的环境下,环境经济调度中火电机组的出力本质上也具有一定的随机性特征^[13],从而就极可能导致污染气体排放风险的发生。由此,有必要在风电出力具有随机性的环境下,对环境经济调度中污染气体排放可能面临的风险进行量化评估,以利于调度机构进行污染气体排放风险的管理。

1.1 污染气体排放风险评估指标的定义方法

著名学者李文沅指出,建立表征风险的指标是风险量化评估的前提^[20],其定义方法有以下 2 种:①在一定条件下发生行为主体遭受损失状态的可能性,采用风险后果发生的概率来描述;②由于各种不确定性导致行为主体可能遭受的损失,采用风险后果的严重程度来描述。其中第 2 种定义方法更符合风险指标定义的本质。

本文采用风险评估指标定义中的第 2 种方法,即以环境经济调度的调度机构作为行为主体,把风电出力作为影响环境经济调度污染气体排放的随机因素。在该随机环境下,将在一定的调度周期内,火电机组总的污染气排放量超出其期望值的部分作为污染气体排放风险;该风险的严重程度作为污染气体排放风险的度量指标,称其为环境经济调度污染气体排放风险评估指标(亦可简称为污染气体排放风险指标)。

1.2 半绝对离差风险评估指标的基本概念

在环境经济调度背景下,可将调度机构调度机组出力中火电机组的发电运行成本类比为总资产,

从各机组出力的组合中相对期望的污染气体排放量而言,减少的污染气体排放量看作其投资回报。由此,环境经济调度中污染气体排放风险的评估问题与经济学中的投资组合理论 PT(Portfolio Theory)^[21]类似,故可借鉴该理论中的经济风险评估指标来解决环境经济调度中污染气体排放风险评估指标的构建问题。

目前,投资组合理论中的经济风险评估指标大都能够一定程度上反映随机性因素给投资主体带来的经济风险,但也具有一定的局限性。均值-方差指标 MV(Mean-Variance)最大的缺点是不能体现风险的本质;半方差指标 SV(Semi-Variance)虽然体现了风险的本质,但与均值-方差指标一样依赖于收益率服从正态分布,这在实际中较难满足;风险价值指标与条件风险价值指标的缺点是当损失分布不连续时不满足一致性公理,缺乏次可加性,不适用于组合优化问题,同时条件风险价值依赖于给定的置信水平;绝对离差指标 AD(Absolute Deviation)的缺点是当风险分布不连续时不满足次可加性,同时也没有反映出风险本质^[21-24]。鉴于上述风险评估指标的局限性,文献[24]提出了半绝对离差风险的概念。该概念应用到风险评估指标时能够体现风险的本质,同时还具有一阶矩存在,不严格要求损失分布的优点。在半绝对离差风险的概念中总回报率及其期望值可分别表示如下:

$$R(x) = \sum_{i=1}^N R_i x_i \quad (1)$$

$$r(x) = \sum_{i=1}^N r_i x_i \quad (2)$$

其中, N 表示投资资产的总数; R_i 表示第 i 种投资资产的随机回报率; r_i 表示 R_i 的期望; x_i 表示在总的投资资产中第 i 种资产的比例。根据式(1)、(2),采用半绝对离差风险的概念来度量投资组合的风险时,其风险评估指标可表示如下:

$$L(x) = E[|R(x) - E(R(x))|_-] \quad (3)$$

其中, E 表示期望算子, $E(R(x))$ 表示对随机变量 $R(x)$ 取期望。针对任意的 v ,有下式成立:

$$|v|_- = \max\{0; -v\} \quad (4)$$

式(4)的具体含义为:当 $v \geq 0$ 时该表达式取值为 0;当 $v < 0$ 时该表达式取值为 $-v$ 。

由式(3)可知,半绝对离差风险评估指标具有以下 2 个基本的物理内涵:度量的是投资组合的总风险;体现了风险的本质,高于期望值的收益率对投资者不构成损失,反之则构成损失。

1.3 基于半绝对离差的污染气体排放风险评估指标

由 1.2 节可知,在随机环境下投资组合理论将低于期望值的收益率当作投资者的经济风险,这符合风险的基本定义。然而,环境经济调度中多采用污染

气体排放量来描述污染气体对环境的污染程度,当环境经济调度产生的污染气体排放量超过对应的期望值时必然就会导致风险的发生。由此,在环境经济调度中度量污染气体排放风险的评估指标可构建如下:

$$M_+ = E \left\{ \left| \sum_{i=1}^{N_G} [f_i(P_{i,G}) - E(f_i(P_{i,G}))] \right|_+ \right\} \quad (5)$$

其中, N_G 表示火发电机组的台数; $P_{i,G}$ 表示火电机组 i 的随机出力; $f_i(P_{i,G})$ 表示火电机组 i 的污染气体排放量函数。针对任意的 v 有下式成立:

$$|v|_+ = \max \{0; v\} \quad (6)$$

式(6)的具体含义为:当 $v \geq 0$ 时该表达式取值为 v ; 当 $v < 0$ 时该表达式取值为 0。

由式(5)可知,所建的环境经济调度污染气体排放风险评估指标体现了以下 2 个明确的物理内涵。

a. 符合本文 1.1 节对环境经济调度污染气体排放风险评估指标的定义。在随机环境下针对给定的调度机组出力组合,该指标可量化评估出环境经济调度可能面临的污染气体排放量损失严重程度。

b. 体现了风险的本质。在随机环境下,针对给定的调度机组出力组合的污染气体排放量,当其低于对应的期望值时不构成风险;当其高于对应的期望值时则构成风险。

鉴于所建指标具有上述明确的物理内涵,就可将该指标应用到环境经济调度优化模型中,实现污染气体排放风险防范和管理。

2 计及污染气体排放风险的多目标随机动态环境经济调度模型

将构建的污染气体排放风险评估指标式(5)应用于环境经济调度模型中就可实现其污染气体排放风险的管理。鉴于风电出力随机性的存在,可在多场景理论框架内建模^[7,13,18,25]。为突出重点,本文以日调度周期内环境经济调度火电机组污染气体排放量的期望值,及污染气体排放风险均尽可能低作为多目标函数,而将火电机组发电运行成本的期望作为约束条件。即所建模型的物理内涵描述为,在风电出力具有随机性的环境下,以满足一定的火电机组发电运行成本约束为限制条件,研究调度机构在调度周期内如何实现污染气体排放及其风险管理的多目标优化。

不失一般性,模型还作如下简化:忽略网络潮流安全约束;不考虑机组启停问题;一座风电场等效为一台风电机组^[2];忽略网损。

2.1 目标函数

a. 污染气体排放量的期望值尽可能小。

$$\min \sum_{s \in S} p_s \sum_{i=1}^{N_G} f_i(P_{i,G}^{t,s}) \quad (7)$$

其中, s 表示场景序号; S 表示场景序号集合; p_s 表示场景 s 发生的概率; T 表示调度周期时段数(本文取 24 个时段); $P_{i,G}^{t,s}$ 表示火电机组 i 在场景 s 环境下第 t 个时段的出力。 $f_i(P_{i,G}^{t,s})$ 采用污染气体综合排放函数表示,表达式如下^[4]:

$$f_i(P_{i,G}^{t,s}) = \alpha_i + \beta_i P_{i,G}^{t,s} + \gamma_i (P_{i,G}^{t,s})^2 + \eta_i e^{\delta_i P_{i,G}^{t,s}} \quad (8)$$

其中, α_i 、 β_i 、 γ_i 、 η_i 和 δ_i 表示火电机组 i 的污染气体综合排放函数的系数。

b. 污染气体排放风险尽可能最小。

将式(5)具体化到调度周期各时段,有下式成立:

$$\min \sum_{s \in S} p_s \left| \sum_{i=1}^{N_G} [f_i(P_{i,G}^{t,s}) - E(f_i(P_{i,G}^{t,s}))] \right|_+ \quad (9)$$

2.2 约束条件

2.2.1 系统运行约束

a. 火电机组发电运行成本期望约束:

$$\sum_{s \in S} p_s \sum_{i=1}^{N_G} g_i(P_{i,G}^{t,s}) \leq C \quad (10)$$

其中, C 表示火电机组发电运行成本期望值上限; $g_i(P_{i,G}^{t,s})$ 表示火电机组 i 的发电运行成本函数,表达式如式(11)所示^[7]。

$$g_i(P_{i,G}^{t,s}) = a_i + b_i P_{i,G}^{t,s} + c_i (P_{i,G}^{t,s})^2 + |d_i \sin[e_i (P_{i,G,\min} - P_{i,G}^{t,s})]| \quad (11)$$

其中, a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 和 e_i 表示火电机组 i 的发电运行成本函数的系数; $P_{i,G,\min}$ 表示火电机组 i 的出力下限。

b. 系统功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,G}^{t,s} + \sum_{j=1}^{N_W} P_{j,W}^{t,s} = P_D^t \quad t=1,2,\dots,T; s \in S \quad (12)$$

其中, N_W 表示风电机组的台数; $P_{j,W}^{t,s}$ 表示风电机组 j 在场景 s 环境下第 t 个时段的功率; P_D^t 表示第 t 个时段的系统负荷功率。

c. 系统上、下旋转备用约束。

鉴于风电出力的随机性较大,需考虑上、下 2 种旋转备用。前者用来应对风电机组出力突然较少或者火电机组强迫停运;后者用于应对负荷突然减少或风电机组出力突然增加。假设上、下旋转备用均由火电机组提供,可表示如下:

$$\sum_{i=1}^{N_G} (P_{i,G,\max} - P_{i,G}^{t,s}) \geq U_{SR}^t \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} (P_{i,G}^{t,s} - P_{i,G,\min}) \geq D_{SR}^t \quad (14)$$

其中, $t=1,2,\dots,T; s \in S$; $P_{i,G,\max}$ 表示火电机组 i 的出力上限; U_{SR}^t 、 D_{SR}^t 分别表示系统在第 t 个时段的上、下旋转备用。

2.2.2 机组运行约束

a. 火电机组出力上、下限约束:

$$P_{i,G,\min} \leq P_{i,G}^{t,s} \leq P_{i,G,\max} \quad (15)$$

其中, $t=1,2,\dots,T; i=1,2,\dots,N_G; s \in S$ 。

b. 火电机组爬坡能力约束:

$$P_{i,G}^{t,s} - P_{i,G}^{t-1,s} \leq R_{i,u} \quad (16)$$

$$P_{i,G}^{t-1,s} - P_{i,G}^{t,s} \leq R_{i,d} \quad (17)$$

其中, $t=1, 2, \dots, T; i=1, 2, \dots, N_G; s \in S; R_{i,u}, R_{i,d}$ 分别表示火电机组 i 在相邻时段出力允许的最大上升和下降值。

c. 火电机组快速调整量约束。

为了保证在不同场景发生时火电机组都有能力及时调整出力, 以适应风电出力的随机性变化, 需考虑火电机组的快速调整量约束^[18]:

$$P_{i,G}^{t,\text{avg}} = \sum_{s \in S} p_s P_{i,G}^{t,s} \quad (18)$$

$$-\Delta_{i,\text{DG}} \leq P_{i,G}^{t,s} - P_{i,G}^{t,\text{avg}} \leq \Delta_{i,\text{UG}} \quad (19)$$

其中, $t=1, 2, \dots, T; i=1, 2, \dots, N_G; s \in S; P_{i,G}^{t,\text{avg}}$ 表示火电机组 i 在各个场景中第 t 个时段出力的期望值, 即最终的机组调度出力; $P_{i,G}^{t,s} - P_{i,G}^{t,\text{avg}}$ 表示火电机组 i 在场景 s 环境下第 t 个时段的调度出力与其最终调度出力间的差值; $\Delta_{i,\text{UG}}$ 和 $\Delta_{i,\text{DG}}$ 分别表示火电机组 i 的快速调整量上、下限, 可取对应火电机组 10 min 内的最大功率改变量^[7,18]。

3 风电出力的场景模拟和场景削减技术

所建模型为多场景随机模型, 对其中风电随机出力的场景模拟, 可根据风电出力的历史数据得到其对应的统计规律, 然后根据该统计规律采用随机模拟的方法产生风电出力样本, 一个风电日出力曲线样本就对应一个场景^[18,25]。实际中风电出力场景数的庞大使得模型求解异常困难, 为此本文采用后向场景削减技术 BSR (Backward Scenario Reduction) 对模拟出的风电出力场景进行削减, 然后在削减后的风电出力场景集合基础上进行环境经济调度的优化决策。限于篇幅, 该削减算法详见文献^[18]。

需要指出的是, 削减后风电出力场景集合中场景规模需要综合考虑求解效率和精度来确定^[25]。

4 内嵌目标相对占优的遗传算法

在对风电出力的场景进行模拟并削减的基础上, 所建模型为一个复杂的动态非线性模型, 可采用经典的遗传算法求解。而针对该模型为多目标模型的特点, 为获取其综合最优解可将目标相对占优法引入遗传算法中, 形成内嵌目标相对占优的遗传算法, 以实现环境经济调度中污染气体排放及其风电的协调管理。其中, 为提高风电出力场景的模拟效率可采用高效的拉丁超立方采样技术^[18]。

4.1 基于目标相对占优的染色体适应度函数构造

文献^[26]提出了基于目标相对占优的遗传算法来获取多目标模型的综合最优解, 其基本思想是: 将种群中的各染色体分别根据每个子目标函数值排序, 选取每次迭代过程中使得各子目标函数值最小

且不为 0 的染色体作为各子目标函数的基点, 然后计算各染色体相对各基点的目标值之和 (具体见式 (21)), 目标值之和最优的染色体即为每次迭代过程中的最优染色体, 在满足终止条件时最优染色体就为所求多目标模型的综合最优解。据此, 基于目标相对占优的染色体适应度函数可构造如下:

$$A(x_i) = 1 / \left[F(x_i) + \sum_{j=1}^{N_j} (\omega_j g_j(x_i)) \right] \quad (20)$$

其中, $A(x_i)$ 表示染色体 x_i 的适应度函数; $g_j(x_i)$ 表示惩罚函数; ω_j 表示惩罚函数系数, 若 $g_j(x_i)$ 满足约束则 ω_j 为 0, 否则不为 0, 且约束越重要惩罚函数系数就越大; N_j 表示需要判断的总约束数; $F(x_i)$ 表示染色体 x_i 相对各基点的目标函数值之和, 见式 (21)。

$$F(x_i) = \sum_{j=1}^{N_j} \frac{f_j(x_i)}{f_j(x_{j_0})} \quad (21)$$

其中, $f_j(x_i)$ 表示染色体 x_i 对应的子目标函数 j 的函数值; $f_j(x_{j_0})$ 表示子目标函数 j 的基点 x_{j_0} 对应的函数值; N_j 表示子目标函数的个数。

4.2 内嵌目标相对占优的遗传算法步骤

结合风电出力的场景模拟和后向削减技术, 内嵌目标相对占优的遗传算法流程如下。其中, 为了保留最优个体而又不失种群的多样性, 采用了最优个体保存策略^[26]。

a. 输入原始数据。 输入拉丁超立方采样规模、风电出力场景削减后场景集合的场景数, 遗传算法中的种群规模、交叉概率、变异概率等算法控制参数等。

b. 风电出力场景生成和削减。 首先采用拉丁超立方采样技术生成大量风电出力的原始场景, 然后采用后向场景削减技术对该原始场景进行削减, 得到满足求解效率和精度要求的风电出力场景集合。

c. 产生初始种群。 根据式 (15) 对随机个体进行编码以产生初始种群。

d. 启发式调整。 对初始种群中火电机组出力变量进行启发式调整, 使其满足系统功率平衡约束式 (12)。

e. 适应度评价。 根据式 (21) 的目标相对占优的适应度函数对初始种群中的每个随机个体进行适应度评价。

f. 产生子种群。 对父代种群中的随机个体进行选择、交叉和变异操作, 生成本次迭代的新一代子种群, 并对该种群进行启发式调整。

g. 合并种群。 合并父代和子代种群以形成本次迭代的新种群。

h. 适应度评价。 根据式 (21) 的目标相对占优的适应度函数对合并后种群中的每个随机个体进行适应度评价。

i. 保留父代种群。 基于最优保存策略, 将本次迭代中父代和子代共 $2N$ 个个体组成新群体, 并根据

适应度值进行从大到小排序,选择 $0.5N$ 个优良个体、 $0.3N$ 个次优个体和 $0.2N$ 个不良个体,组成 N 个个体的新的父代种群,保留该新的父代种群。

j. 终止判断。判断是否满足迭代终止条件,若满足终止条件则输出最优个体,否则返回步骤 f。

5 算例验证

本文以 2 个算例来分别验证所建的污染气体排放风险评估指标和环境经济调度模型的有效性。在这 2 个算例中,旋转备用均取各时段系统负荷的 5.0%;火电机组快速调整量均取 30 MW/h;拉丁超立方采样样本数 3000 个^[18];削减后风电出力场景集合中场景规模 10 个^[13]。遗传算法参数:种群规模 80、交叉概率 0.50、变异概率 0.10;迭代终止判据为最优个体连续 30 代保持不变或达到最大迭代次数 300 次。

5.1 所建风险评估指标的有效性验证(算例 1)

本算例取文献[5]表 A1 中的前 3 台火电机组,外加本文中增加的 1 台风电机组;24 时段风电出力预测值取文献[18]附录表 A2 中的 10.0%;风电出力的标准差均取各时段预测值的 10.0%;24 时段系统负荷曲线均按照文献[5]表 A2 中对应 24 时段负荷曲线的 40.0% 折算;设定火电机组发电运行成本期望的约束值为 \$ 992600。

基于上述数据,利用后向场景削减技术得到风电出力的 10 个场景及各场景发生的概率分别见表 1、2。

表 1 10 个场景的风电出力
Table 1 Wind power output for ten scenarios

时段	风电出力 / MW									
	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5	场景 6	场景 7	场景 8	场景 9	场景 10
1	19.5	18.2	18.8	18.7	18.6	20.2	19.2	19.4	19.4	18.8
2	32.8	28.5	31.2	30.0	29.8	30.7	29.5	29.6	30.8	28.7
3	29.3	31.1	30.8	33.1	35.4	34.9	32.8	31.5	31.2	32.5
4	37.6	35.0	31.8	37.5	34.5	36.2	37.1	37.1	35.6	34.6
5	36.1	28.0	29.9	40.3	37.7	32.7	38.7	35.2	33.6	33.7
6	32.2	40.6	38.2	38.7	38.1	31.5	36.3	36.3	39.0	37.4
7	42.1	46.3	45.7	43.1	43.0	44.7	45.4	45.3	39.6	44.8
8	47.6	45.9	48.1	48.9	41.1	49.8	44.9	50.5	51.0	45.0
9	47.5	34.9	34.5	35.6	34.0	34.0	35.8	36.4	41.2	34.5
10	31.9	23.0	25.5	22.4	24.8	23.6	26.1	25.5	24.2	25.1
11	36.3	46.3	40.0	46.0	35.8	40.7	39.4	43.2	42.0	43.9
12	49.5	37.5	41.3	39.2	38.7	33.8	39.0	38.2	39.9	42.9
13	41.8	36.2	33.7	39.5	35.8	37.1	41.3	36.0	43.7	41.4
14	33.8	38.6	35.5	35.8	33.7	33.4	34.3	36.7	35.8	33.0
15	34.3	31.3	29.3	32.8	33.1	32.1	37.5	36.5	33.3	33.9
16	11.8	11.3	11.6	10.9	10.9	11.9	11.3	11.4	11.4	11.7
17	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	0.9	1.2	1.0	0.8
18	4.6	3.7	4.4	3.9	4.1	4.0	3.3	3.9	4.2	3.1
19	5.7	4.4	4.4	4.7	4.1	5.9	5.5	4.9	5.8	4.1
20	2.3	2.5	2.3	2.3	2.2	2.1	2.2	2.1	2.1	2.0
21	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5
22	22.0	25.8	24.8	23.8	27.4	23.2	27.2	22.6	26.1	23.2
23	37.5	30.6	34.3	32.5	33.9	36.8	35.6	36.2	34.7	35.1
24	27.9	21.9	23.5	21.2	25.0	23.4	24.7	27.8	23.4	22.4

表 2 10 个场景风电出力发生的概率
Table 2 Probability of wind power output for ten scenarios

场景	概率	场景	概率
1	0.007	6	0.252
2	0.035	7	0.131
3	0.082	8	0.077
4	0.075	9	0.129
5	0.113	10	0.099

为验证所建污染气体排放风险评估指标的有效性,基于本算例原始数据,将风电出力的标准差从其期望值的 10.0% 逐渐修改至 19.0%。由此得到的污染气体排放风险的变化曲线如图 1 所示。由图 1 可知,风电出力标准差逐渐从对应期望值的 10.0% 增加到 19.0% 时,污染气体排放风险从 325 lb(1 lb = 0.45359237 kg)逐渐增加到 605 lb。这是由于当风电出力随机性逐渐增大时,高污染气体排放的火电机组的随机出力超过期望值的概率也逐渐增加,从而导致污染气体风险评估指标中半绝对离差风险逐渐增

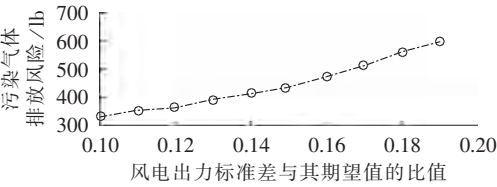


图 1 风电出力随机性与污染气体排放风险关系曲线
Fig.1 Curve of wind power randomness vs. gas pollution emission risk

加。由此证明,风电出力随机性越大,环境经济调度面临的污染气体排放风险也越大,而所建的风险评估指标能够有效评估出风电出力随机性带来的污染气体排放风险的变化。

另外,设定不同的火电机组运行成本限制值,以验证所建污染气体排放风险指标的有效性。基于本算例原始数据,将火电机组发电运行成本期望的约束值从 \$ 982 600 逐渐修改至 \$ 1 052 600,由此得到的火电机组发电运行成本期望约束值与污染气体排放风险变化关系曲线如图 2 所示。

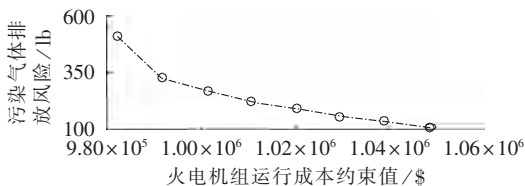


图 2 火电机组发电成本约束值与污染气体排放风险之间的关系曲线

Fig.2 Curve of thermal power generation cost constraint vs. gas pollution emission risk

由图 2 可知,当火电机组发电运行成本期望的约束值越高时,所对应的环境经济调度污染气体排放风险就越低。可见,所建的污染气体排放风险评估指标能够有效地评估出不同的火电机组运行成本限制值所带来的风险差异;同时可知,牺牲一定的经济利益可以有效地改善污染气体排放风险。

为说明仿真结果的有效性,在设定的原始数据下,表 3 给出了最终调度方案中各机组的出力状态。以其中时段 1、2、3 为例可以看出,上述时段各机组出力均满足系统功率平衡约束、机组出力上下限约束、系统旋转备用约束、各时段之间火电机组爬坡能力约束以及机组快速调整量约束,即仿真结果具有有效性。

5.2 所建环境经济调度模型的有效性验证(算例 2)

为验证本文所建模型的有效性,考虑不同风电渗透率(本文中风电渗透率描述为风电装机容量与系统日最大负荷的比值)对环境经济调度污染气体排放风险的影响再给出 1 个算例,并将本文所建模型与文献[13](注:文献[13]和[14]本质上属同一模型)中不考虑污染气体排放风险的环境经济调度模型进行比较。其中,为便于比较,将文献[13]模型中的火电机组运行成本目标函数改为如同本文模型作为约束条件考虑。

本算例由文献[6]中表 8 对应的 40 台火电机组,外加本文增加的 1 台风电机组构成;鉴于文献[6]中负荷数据为单时段数据,为此设定本算例最大负荷与文献[6]保持不变,即取 10 500 MW,日负荷曲线参照 5.1 节算例 1 的日负荷曲线变化趋势等比例产生;风电出力日预测曲线取自文献[18]中附录表 A2,

表 3 最终调度机组出力状态
Table 3 Unit power outputs of final dispatch scheme

时段	$P_{1,G}^i$ /MW	$P_{2,G}^i$ /MW	$P_{3,G}^i$ /MW	$P_{1,W}^i$ /MW	负荷/MW
1	159.3	141.0	95.1	19.0	414.4
2	160.3	144.2	109.6	30.0	444.0
3	180.2	172.8	120.2	33.0	503.2
4	193.4	180.5	151.5	36.0	562.4
5	207.6	183.1	166.3	35.0	592.0
6	238.5	193.1	182.6	37.0	651.2
7	249.9	206.9	180.0	44.0	680.8
8	263.8	216.8	182.2	46.0	710.4
9	272.2	231.8	219.7	35.0	769.6
10	294.4	277.1	232.3	25.0	828.8
11	300.7	287.3	234.5	42.0	858.4
12	298.7	289.9	244.7	38.0	888.0
13	275.8	289.3	221.9	39.0	828.8
14	260.3	260.7	217.6	34.0	769.6
15	225.3	243.8	209.3	32.0	710.4
16	206.7	218.6	184.3	12.0	621.6
17	237.8	188.0	165.2	1.0	592.0
18	248.3	215.0	183.9	4.0	651.2
19	256.2	243.3	205.9	5.0	710.4
20	298.4	283.5	244.6	2.0	828.8
21	277.7	260.1	231.6	0.5	769.6
22	221.1	226.5	178.6	25.0	651.2
23	178.3	184.8	137.3	35.0	532.8
24	168.3	159.5	121.8	24.0	473.6

出力标准差取预测值的 10.0%。基于上述原始数据再使得风电各时段的预测出力为文献[18]的 2 倍、3 倍和 4 倍,即使得风电渗透率从 4.38% 逐渐增加到 8.76%、13.1% 和 17.5%, 以此构成 4 种不同的风电渗透率仿真方案。

基于上述 4 种仿真方案,得到的火电机组污染气体排放量(期望值)、污染气体排放风险如表 4 所示(其中,文献[13]的污染气体排放风险采用事后评估^[20]的方法得到)。

表 4 4 种风电渗透率对应的仿真结果
Table 4 Simulative results for four wind power penetration ratios

渗透率/%	模型	污染气体排放量/lb	污染气体排放风险/lb
4.38	本文	$7.483\,2\times10^9$	9.48×10^7
	文献[13]	$7.466\,1\times10^9$	1.689×10^8
8.76	本文	$7.308\,6\times10^9$	1.566×10^8
	文献[13]	$7.295\,8\times10^9$	3.269×10^8
13.10	本文	$7.023\,6\times10^9$	2.588×10^8
	文献[13]	$6.948\,9\times10^9$	4.262×10^8
17.50	本文	$6.628\,5\times10^9$	3.331×10^8
	文献[13]	$6.597\,2\times10^9$	5.873×10^8

由表 4 中文献[13]的模型仿真结果可看出,随着电力系统中风电渗透率的增大,火电机组污染气体排放量逐步下降,而污染气体排放风险却急剧增加。这说明,风电渗透率的增大使得环境经济调度取得较大环境效益的同时,其出力的随机性也使得污染气体排放面临更大的风险,对环境经济调度的污染气体排

放进行风险管理具有必要性。

另一方面,对比本文所建模型与文献[13]模型中的4个仿真方案的仿真结果均可看出,虽然文献[13]中的模型优化得到的污染气体排放量较本文所建模型略优,但其实际面临的污染气体排放风险远高于本文所建模型。即本文所建模型能够有效地降低污染气体排放风险,且能够更好地兼顾污染气体排放的优化与对应风险的协调。由此,在风电渗透率逐渐增加以及大气污染越来越严重的今天,更需要采用本文所建模型进行环境经济调度以实现污染气体排放风险的有效管理。

6 结论

a. 风电出力的随机性给环境经济调度污染气体的排放管理带来一定风险,对其污染气体排放风险进行评估和管理具有重要的现实意义。

b. 给出的环境经济调度污染气体排放风险的定义方法符合风险的本质。

c. 借鉴投资组合理论中半绝对离差风险的概念建立的污染气体排放风险评估指标,能够有效地评估出环境经济调度中污染气体排放的风险信息。

d. 建立的多目标随机动态环境经济调度模型能够实现污染气体排放风险的有效管理。

e. 随着电力系统中风电渗透率的增大,更需要采用所提的环境经济调度模型对污染气体排放的风险进行管理。

需指出的是,负荷功率随机性对环境经济调度污染气体排放的管理也会带来一定的风险,本文建立的污染气体排放风险评估指标以及计及该指标的调度模型在负荷功率随机性环境下同样适用。

致 谢

本研究得到了重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室“计及风电与负荷不确定性的电网中长期‘节能减排’综合效应概率评估研究”和国家电网公司“冷热电混合能源联合优化调节关键技术研究及应用”的项目资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] ZHAO Xiaoli, WU Longli, ZHANG Sufang. Joint environmental and economic power dispatch considering wind power integration: empirical analysis from Liaoning province of China[J]. Renewable Energy, 2013, 22(12): 260-265.
- [2] PRICE L, LEVINE M, ZHOU Nan. Assessment of China's energy-saving and emission reduction accomplishments and opportunities during the 11th Five Year Plan[J]. Energy Policy, 2011, 39(4): 2165-2178.
- [3] TALAQ J H, EL-HAWARY F, EL-HAWARY M E. A summary of environmental economic dispatch algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 19(4): 1508-1516.

- [4] 邱威, 张建华, 刘念. 含大型风电场的环境经济调度模型与解法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 8-16.
- QIU Wei, ZHANG Jianhua, LIU Nian. Model and solution for environmental/economic dispatch considering large scale wind power penetration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 8-16.
- [5] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using non dominated sorting genetic algorithm-II[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2008, 30(2): 140-149.
- [6] HOTA P K, BARISAL A K, CHAKRABARTI R. Economic emission load dispatch through fuzzy based bacterial foraging algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(7): 794-803.
- [7] 陈功贵, 陈金富. 含风电场电力系统环境经济动态调度建模与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(17): 27-36.
- CHEN Gonggui, CHEN Jinfu. Environmental/economic dynamic dispatch modeling and method for power systems integrating wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(17): 27-36.
- [8] LIAO G C. A novel evolutionary algorithm for dynamic economic dispatch with energy saving and emission reduction in power system integrated wind power[J]. Energy, 2011, 36(4): 1018-1029.
- [9] 陈道君, 龚庆武, 张茂林, 等. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 10-17.
- CHEN Daojun, GONG Qingwu, ZHANG Maolin, et al. Multi objective optimal dispatch in wind power integrated system in incorporating energy environmental efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 10-17.
- [10] 邱威, 张建华, 吴旭, 等. 采用混沌多目标差分进化算法并考虑协调运行的环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 26-31.
- QIU Wei, ZHANG Jianhua, WU Xu, et al. Environmental and economic dispatch based on chaotic multi-objective differential evolution algorithm considering coordinative operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 26-31.
- [11] LEE J C, LIN W M, LIAO G C. Quantum genetic algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects and including wind power system[J]. Electrical Power and Energy System, 2011, 33(6): 189-197.
- [12] ABARGHOEE R A. Stochastic dynamic economic emission dispatch considering wind power[C]//2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM). Wuhan, China: IEEE, 2011: 158-161.
- [13] AGHAEI J, NIKNAM T, ABARGHOEE R A, et al. Scenario-based dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 30(5): 351-367.
- [14] BAHMANI-FIROUZI B F, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R. An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties[J]. Energy, 2013, 150(1): 232-244.
- [15] DAH L N R, LIU C C, LAWARREE J. Risk assessment in energy trading[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 503-511.
- [16] 任博强, 蒋传文, 彭鸣鸿, 等. 基于改进遗传算法的含风电场的电力系统短期经济调度及其风险管理[J]. 现代电力, 2010, 27(1): 76-80.
- REN Boqiang, JIANG Chuanwen, PENG Minghong, et al. Short

- term economic scheduling model including wind power based on improved genetic algorithm and risk management[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(1): 76-80.
- [17] REN Boqiang, JIANG Chuanwen. A review on the economic dispatch and risk management considering wind power in the power market[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(8): 2169-2174.
- [18] 张笑, 何光宇, 刘铠诚, 等. 基于半绝对离差风险的联合经济调度[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 53-59.
ZHANG Xiao, HE Guangyu, LIU Kaicheng, et al. A coordinated economic dispatch based on lower semi-absolute deviation risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 53-59.
- [19] 文旭, 颜伟, 郭琳, 等. 计及风电和负荷不确定性的日调度计划节能效益概率评估方法[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 959-966.
WEN Xu, YAN Wei, GUO Lin, et al. A probability assessment method for energy-saving benefit of daily generation scheduling considering uncertainties of wind power and load[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 959-966.
- [20] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-2.
- [21] LIU Y, ZHANG Z. Pivoting algorithm for mean lower semi-absolute deviation portfolio optimization model[C]//2010 Second International Conference on Multi Media and Information Technology(MMIT). Kaifeng, China: [s.n.], 2010: 1302-1305.
- [22] 颜伟, 文旭, 王俊梅, 等. 考虑网内与网外购电计划差异的月度最优外购电模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 56-60.
YAN Wei, WEN Xu, WANG Junmei, et al. An optimal monthly power purchasing model considering differences between internal and external grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 56-60.
- [23] 刘瑞花, 刘俊勇, 何迈, 等. 半绝对离差购电组合优化策略及风险管理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 9-15.
- LIU Ruihua, LIU Junyong, HE Mai, et al. Power purchasing portfolio optimization and risk measurement based on semi-absolute deviation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 9-15.
- [24] 徐绪松, 杨小青, 陈彦斌. 半绝对离差证券组合投资模型[J]. 武汉大学学报: 自然科学版, 2002, 48(3): 297-300.
XU Xusong, YANG Xiaoqing, CHEN Yanbin. Portfolio model with semi-deviation risk measure[J]. Wuhan University Journal: Natural Science Edition, 2002, 48(3): 297-300.
- [25] WANG J, SHAHIDEHPOUR M, LI Z. Security-constrained unit commitment with volatile wind[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1327.
- [26] 颜伟, 李翔, 梁文举, 等. 基于负荷分段技术的多目标月度发电计划及其遗传算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 47-52.
YAN Wei, LI Xiang, LIANG Wenju, et al. Multi-objective monthly generation scheduling based on load partition technology and its genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 47-52.

作者简介:



文旭

文旭(1980—),男,四川渠县人,工程师,博士,研究方向为电力系统优化运行与控制及风险评估、电力市场(E-mail: cquwenxu@vip.qq.com);

王俊梅(1964—),女,重庆人,高级工程师,硕士,研究方向为电力市场运行与管理;

郭琳(1969—),女,四川巴中人,高级工程师,硕士,研究方向为电力市场运行与管理;

颜伟(1968—),男,四川乐山人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统优化运行与控制及风险评估、电力市场。

Multi-objective stochastic and dynamic model of environmental and economic dispatch considering gas pollution emission risk

WEN Xu¹, WANG Junmei², GUO Lin², YAN Wei³

(1. State Grid Chongqing Electric Power Co. Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China;

2. Power Exchange Center of State Grid Chongqing Power Grid, Chongqing 400014, China;

3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Because of the randomness of wind power, the existing environmental and economic dispatch model cannot deal with the risk management of gas pollution emission, for which, a dispatch model considering the risk of gas pollution emission is built. The method considering the randomness of wind power is given for defining the evaluation index of gas pollution emission risk; the risk evaluation index is established based on the semi-absolute deviation concept of the portfolio theory in economics; a multi-objective stochastic and dynamic model of environmental and economic dispatch considering gas pollution emission risk is built based on the multi-scenario modeling theory. The backward scenario reduction technique is adopted to reduce the great amount of random wind power scenarios and the genetic algorithm with the embedded object relative dominant method is used to solve the model. Case simulation verifies the effectiveness of the proposed model.

Key words: environmental and economic dispatch; gas pollution emission; evaluation index; risks; wind power; genetic algorithms; models