

导入碳交易的新能源发电系统调度管理研究

——以风电为例

温晴岚 程思齐 邱雅茹 张霏月 金晶亮*

摘要:在“双碳”背景下,发展低碳电力、实现电力调度低碳转型具有重要的现实和战略意义。针对导入碳交易的含风电力系统调度管理问题,本文在传统电力调度模型基础上引入了自适应场景集的鲁棒思想,建立了考虑碳交易与风电接入的两阶段鲁棒优化调度模型。首先,以经济成本为目标函数,且在其中加入惩罚因子以有效应对风电不确定性。其次,将碳排放权作为约束条件限制煤电的碳排放量,设计合作减排模式以促进煤电清洁高效利用,通过初始碳排放权的分配和交易共享碳排放权。再者,进一步优化电力系统的经济成本,分别在静态合作减排和动态合作减排模式下,实现了风险最大化下的经济成本最小化。然后基于仿真结果验证了模型的合理性。最终通过模型确定了合理的风电比例和合适的煤电合作减排模式以应对风电不确定性及碳交易的不可预测性,进而归纳出了低碳电力调度管理策略。本文研究结论可以为相关部门制定“双碳”背景下的电力调度政策提供科学方法与理论支撑,并为检验或评价政策的合理性提供模拟工具。

关键词:电力调度;风电接入;碳交易;合作碳减排;鲁棒性

一、引言

由于气候变化问题日益紧迫,低碳化和清洁化成为全球经济体的共同发展趋势。在第七十五届联合国大会上我国提出将提高自主贡献度,采取更加有利的政策和措施,二氧化碳排

*温晴岚,南通大学理学院,邮政编码:226019,电子信箱:wql2002310012@126.com;程思齐,南通大学理学院,邮政编码:226019,电子信箱:csq905076306@163.com;邱雅茹,南通大学理学院,邮政编码:226019,电子信箱:535007972@qq.com;张霏月,南通大学理学院,邮政编码:226019,电子信箱:1014802623@qq.com;金晶亮(通讯作者),南通大学理学院,邮政编码:226019,电子信箱:chinajjl@ntu.edu.cn。

本文系国家自然科学基金项目“风电接入系统的低碳电力调度研究”(71603135)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家的宝贵修改意见。文责自负。

放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和(新华网,2020)。由于我国的能源结构以煤为主,电力行业作为主体,在带来经济效益的同时也成为了二氧化碳排放的主力军。据2021年国家统计局数据显示,至2020年我国煤炭消费占能源总消费的56.83%,因此实现能源结构低碳化发展具有重要的现实意义与战略意义。

由于风能相对成本低、易捕获等特点,大规模风电并网是目前低碳形式下环境经济调度应用较为普遍、较为广泛的形式。据2022年国家能源局数据显示,至2021年,风电发电量已经占全社会用电量的7.9%。然而,风电固有不确定性和碳交易的不可预测性对电力系统的安全稳定运行具有显著影响(王锐等,2017)。因此对风电统计特征和碳交易形式的研究至关重要。风速的概率分布作为风电统计特性的一种重要形式,当分布未知时,可以根据统计学中的非参数方法结合实际风速数据进行拟合,当分布确定时,可通过参数估计的方法确定风电的分布函数形式以及参数特征,从而确定风电出力统计特征(李慧等,2014)。此外,也可通过使用时间序列方法,计算和比较能量密度曲线以获得最佳模型选择,来评估建模过程中功率谱经典模型的有效性,进而处理风速的不确定性(马赛、褚福磊,2019)。通过建立考虑风能接入不同负荷水平的输电网规划模型,不仅能在一定程度上简化求解过程,并且可以提高电力系统的可控性,进而使得系统的可靠性、安全性和运行效率都得到大幅度提升(徐浩,2019)。

传统的电力调度只考虑经济效益,即实现发电成本的最小化,忽视了污染物排放造成的环境问题(樊迪,2020)。在新的形势下,传统的电力系统将面临变革,低碳电力调度将成为主要研究趋势(陈启鑫等,2009)。在低碳经济下,电力系统在考虑安全稳定运行和经济效益的同时,还应兼顾其对环境的影响,即关注生产过程中的碳排放问题(黄华等,2018)。康重庆等(2009)深入分析了我国电力行业的碳排放特点,论述了发展低碳电力的必要性和紧迫性,并从低碳电力的作用与定位、低碳技术的研究与运用、宏观低碳政策与制度的制定、低碳Energy Mix的优化、低碳模式下电网结构与运行特性的分析、低碳电力调度模式与调度技术、低碳电力市场结构与运行机制、电力企业面向低碳经济的应对策略等八个方面深入挖掘电力模式的新特点与新趋势。陈启鑫等(2010)基于低碳经济,考虑低碳目标,综合各类低碳要素构建新型、高效的低碳电力调度方式,将二氧化碳排放作为一类可调度资源,建立了低碳电力调度决策初步模型,以协调电力调度中的“电平衡”与“碳平衡”。崔杨等(2020)针对风电并网后系统的不确定因素,引入模糊机会约束,提出一种考虑模糊机会约束的低碳型经济调度模型。该模型综合考虑阶梯型碳交易成本、风电和负荷不确定性对电网调度运行的影响,能够明显降低碳排放量同时提高系统的风电消纳量。

面对电力行业的碳减排需求,亟须很好地协调不同类型电能之间的关系,形成有利于碳减排的协同效应,随着各种低碳方式的引入,低碳电力调度问题本质上就是电能的优化分配问题。针对风电一体化和火电碳交易这两个重要途径,在上述途径的引入下,协调风电和火

电之间的新型关系显得尤为重要。因此,要清洁高效利用火电,提高风电消纳能力,促进火电与风电的优化组合。基于此,本文以电力行业低碳化进程中的电力调度模式为研究对象,以应对低碳方式(风电接入、碳交易机制)的导入为切入点,通过建立调度模型、开发优化算法,确定了合理的风电比例和合适的煤电合作减排模式以应对风电不确定性及碳交易的不可预测性,进而归纳出了低碳电力调度管理策略。

二、方法介绍

(一)风电统计特征

针对风电的不确定性,本文基于场景分析,并根据风速与风电出力的关系,借助风速的概率分布函数推导出风电出力的统计特征。风速的概率密度函数主要有 Weibull、Gamma、Rayleigh、Log-normal、Burr 五种分布形式(Jin et al., 2021)。

Weibull分布形式相对简单,计算方便且应用范围最广。

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

其中, v 是风速, k 是形状参数, c 是尺度参数。

Gamma分布是最早用于确定风速的分布模型。

$$f(v) = \frac{v^{\zeta-1}}{\beta^{\zeta} \Gamma(\zeta)} \exp\left(-\frac{v}{\beta}\right) \quad (2)$$

其中, ζ 是形状参数, β 是尺度参数。

Rayleigh分布对数据要求很高,不仅需要数据的数量充足,并且其离散程度需要设置足够小。

$$f(v) = \frac{v}{\tau^2} \exp\left(-\frac{v^2}{2\tau^2}\right) \quad (3)$$

其中, τ 是尺度参数。

风速在频率处于中间状态时,Log-normal通常拟合效果较好。

$$f(v) = \frac{1}{v\lambda\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(\ln v - \eta)^2}{2\lambda^2}\right] \quad (4)$$

其中, η 是变量 v 对数的平均值, λ 是变量 v 的标准差。

Burr分布虽然模型形式复杂,但通常情况拟合效果较好且稳定。

$$f(v) = \frac{\varepsilon \varphi \left(\frac{v}{\omega}\right)^{\varepsilon-1}}{\omega \left[1 + \left(\frac{v}{\omega}\right)^{\varepsilon}\right]^{\varphi+1}} \quad (5)$$

其中, ε 是形状参数, ω 和 φ 为尺度参数。

由此根据风电出力转换推导出风电输出功率的统计特性, 对应的变换形式为:

$$P_{wt} = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \\ P_{rate} \frac{v - v_{in}}{v_{rate} - v_{in}}, & v_{in} \leq v < v_{rate} \\ P_{rate}, & v_{rate} \leq v < v_{out} \\ 0, & v \geq v_{out} \end{cases} \quad (6)$$

其中, v_{in} 为切入风速, v_{out} 为切出风速, v_{rate} 为额定风速, P_{rate} 为风电机组的额定功率。

基于上述理论基础, 可以通过概率统计中的参数估计的方法对各风速分布进行估计, 通过单个分布或各个分布共同拟合构建混合分布的方式研究风电出力的统计特征。

(二) 场景分析

针对低碳电力调度中火电机组可控, 而风电机组不可控的特点, 本文通过场景分析的方法对风电出力进行研究。考虑各个场景下风电出力的情况, 将风电的出力由不确定性转化为确定性, 从而调整火电机组以协调风电, 使得电力系统更安全、高效运行。从理论上而言, 风速场景划分得越多, 风电出力的描述就越精确。

场景的选取可将风速区间 $[0, v_r]$ 均匀划分成 S 个区间, 则 S 个区间分别为 $[0, \frac{1}{S}v_r]$, $[\frac{1}{S}v_r, \frac{2}{S}v_r] \cdots [(\frac{S-1}{S}v_r, v_r]$ 。由风速分布概率密度函数可以求出每个场景出现的概率 $P_r(s)$, 每个场景根据对应的风速有一个风电计划出力 W_s 。如图 1 所示, 横坐标为风速, 纵坐标为密度函数值, 图中的曲线为风速概率密度函数, 用平行于 y 轴的直线截取函数, 每两条直线之间与横纵坐标共同构成的区域代表一个风速场景, 每一个区域的面积则是每一个场景发生的概率, 记 $w(n)$ 为第 n 个场景。

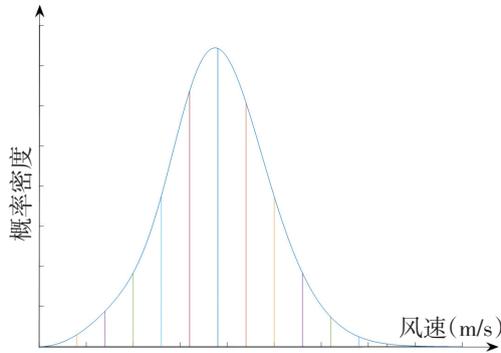


图 1 场景生成

在实际应用中, 如果分别计算每个场景, 计算量过大。因此, 本文采用同步回代消减法对风电场景进行压缩, 保证保留场景集与原始场景的概率距离最小(崔承刚等, 2020)。场景压缩技术的目的是在保证模型计算精度的同时, 利用较少的风电场景最大限度地描述风电不确定性。具体方法步骤设计如下:

步骤1:确定要削减的场景 $w(s^*), s^* \in (1, 2, \dots, S)$, 既考虑不同场景 $w(n)$ 和 $w(m)$ 间的 Wasserstein 距离 $d(w(n), w(m))$, 又同时兼顾各个场景出现的概率 $P_r(s^{(n)})$ 和 $P_r(s^{(m)})$, 从而使不具有代表性的场景更容易被剔除。如式(7)所示:

$$P_r(s^*) \{ \min_{s \neq s^*} P_r(s) d(w(s), w(s^*)) \} = \min_{m \in \{1, 2, \dots, S\}} P_r(s^{(m)}) \{ \min_{n \neq m, n \in \{1, 2, \dots, S\}} P_r(s^{(n)}) d(w(n), w(m)) \} \quad (7)$$

步骤2:选出与场景 $w(s^*)$ 最近的场景 $w(s)$ 。

步骤3:根据确定的被削减的场景 $w(s^*)$ 和选出的与其距离最近的场景 $w(s)$ 对合并形成的新场景概率进行更新。计算如式(8)所示:

$$P_r(s^*) = P_r(s^*) + P_r(s) \quad (8)$$

步骤4:更新场景总数。如式(9)所示:

$$S = S - 1 \quad (9)$$

步骤5:如果剩余场景数仍然大于所需场景数,则重复步骤1中的削减过程。否则,完成削减。

如上所述,同步回代消减法的主要流程如图2所示:

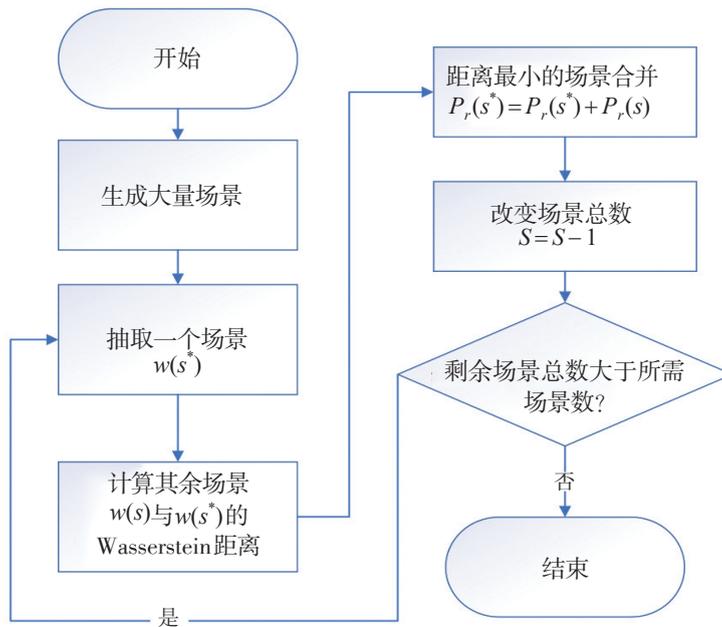


图2 同步回代消减法流程图

(三)初始碳排放权

碳排放权交易机制有助于降低减排成本,提高减排强度,促进技术创新和可持续发展。鉴于碳排放配额的初始分配是碳排放交易制度的首要环节,本文将基于合理性和公平性探讨初始碳排放权的分配方法(叶泽等,2018)。具体而言,碳排放总量固定,初始碳排放权的分配

取决于不同发电机组的自身特性, 根据不同机组的排放需求, 初始碳排放权的分配遵循优先分配发电量较大而排放量相对较少的机组。初始碳排放权分配主要有以下几种方法:

1. 比例法

$$e_f = \frac{c_f}{\sum_{f=1}^M c_f} E, 1 \leq f \leq M \quad (10)$$

其中, e_f 为第 f 台火电机组的初始碳排放权, c_f 为第 f 台火力发电机组碳排放索取权, E 是碳排放总量。因此, 整体碳排放索取权构成一个向量 $C=(c_1, c_2, \dots, c_M)'$, 所有火电机组的碳排放权采用比例法最终构成一个向量 $W_{pro}(M, E, C)=(e_1, e_2, \dots, e_M)'$ 。

2. 一致损失法

$$e_f = \max\{c_f - \mu, 0\}, 1 \leq f \leq M \quad (11)$$

其中, μ 为以下函数的最优解:

$$\sum_{f=1}^M \max\{c_f - \mu, 0\} = E \quad (12)$$

因此, 采用一致损失法对所有火电机组的全部碳排放权构成一个向量 $W_{ul}(M, E, C)=(e_1, e_2, \dots, e_M)'$ 。

3. 均匀收益法

$$e_f = \min\{\mu', c_f\}, 1 \leq f \leq M \quad (13)$$

其中, μ' 是以下函数的最优解:

$$\sum_{f=1}^M \max\{\mu', c_f\} = E \quad (14)$$

因此, 所有的火电机组的碳排放权通过均匀收益法可以得到一个向量 $W_{ug}(M, E, C)=(e_1, e_2, \dots, e_M)'$ 。

4. 塔木德准则

$$e_f = \begin{cases} W_{ug}^f(M, E, \frac{1}{2}C), E < \frac{1}{2} \sum_{f=1}^M e_f \\ \frac{1}{2}c_f + W_{ul}^f(M, E - \frac{1}{2} \sum_{f=1}^M e_f, \frac{1}{2}C), E \geq \frac{1}{2} \sum_{f=1}^M e_f \end{cases}, 1 \leq f \leq M \quad (15)$$

其中, W_{ug}^f 是 W_{ug} 的第 f 个元素, W_{ul}^f 是 W_{ul} 的第 f 个元素。

三、模型建立

为了使风电输出调整引起的总调整成本最小化, 有必要在多个发电输出情景中找到一些较差的极端场景, 因为这些极端场景的风电出力可能会导致系统成本显著增加。因此, 本文

在传统电力调度模型的基础上引入了自适应场景集的鲁棒思想,即满足极端场景组合风险最大时的经济成本最小化,建立了动态合作减排模式下的两阶段鲁棒优化调度模型,从而保证电力系统在受到不确定因素的干扰下,仍然能够稳健地运行。根据所建立模型利用 Matlab 中的 fminimax 工具箱进行求解,得到仿真结果见下文。

(一)目标函数

本文以火电机组计划出力和风电机组计划出力作为决策变量,总成本函数由火电机组燃料成本和风电机组出力的盈余或不足造成的惩罚成本两部分构成,成本以最小最大化的形式表示如下:

$$\min \max F = \max_{s \in \Omega_s} \left\{ \sum_{s=1}^{S'} P_r(s) \min \left\{ \sum_{t=1}^T \left[\sum_{f=1}^M C_f(T_{f,t}) + k_{penalty} |W_t - W_{t,s}| \right] \right\} \right\} \quad (16)$$

其中, Ω_s 是风电输出场景的可行解集, S' 是极端场景数, M 为火力发电机组数量, T 为时间间隔数, $k_{penalty}$ 为惩罚系数, $P_r(s)$ 为场景 s 的归一化概率, C_f 是第 f 个火电机组的成本函数, $T_{f,t}$ 是时段 t 内第 f 台火电机组的计划输出功率, W_t 是时段 t 内风力发电机的计划输出功率, $W_{t,s}$ 是时段 t 内场景 s 中实际风电输出功率。当实际风电出力大于计划风电出力时,盈余部分造成了浪费。相反,实际风电出力小于计划风电出力时,不足部分需要火电机组补全,从而增加了成本。因此,无论盈余还是不足都会导致成本的增加,所以本文设置惩罚函数为绝对值形式。

考虑阀点效应的火电机组燃料成本 C_f 的具体表达形式如下:

$$C_f(T_{f,t}) = a_f T_{f,t}^2 + b_f T_{f,t} + d_f + |g_f \sin(h_f(T_f^{\min} - T_{f,t}))|, 1 \leq f \leq M; 1 \leq t \leq T \quad (17)$$

其中, a_f , b_f , d_f , g_f 和 h_f 是第 f 台火电机组的成本系数, T_f^{\min} 是第 f 台火电机组的实际有功出力下限。

(二)约束条件

实际功率输出约束为:

$$T_f^{\min} \leq T_{f,t} \leq T_f^{\max}, 1 \leq f \leq M; 1 \leq t \leq T \quad (18)$$

其中, T_f^{\max} 为第 f 台火电机组的有功出力上限, T_f^{\min} 为第 f 台火电机组的有功出力下限。

电力系统包含系统网损的实际功率平衡约束如下:

$$\sum_{f=1}^M T_{f,t} + W_t = D_t + L_t, 1 \leq t \leq T \quad (19)$$

其中, D_t 为时段 t 内电力系统的总负荷需求, L_t 是时段 t 内输电线路损耗。

基于 Kron 损耗方程,式(19)中的传输损耗可表示为:

$$L = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M T_{i,t} B_{ij} T_{j,t} + \sum_{i=1}^M B_{i0} T_{i,t} + B_{00}, 1 \leq t \leq T \quad (20)$$

式(20)中, B_{ij} , B_{i0} , B_{00} 为电力网络传输功率损耗 B 中的损耗系数。

发电机组的爬坡率约束是每个机组在给定时间间隔内增加或阻断的功率输出:

$$T_{f,t} - T_{f,t-1} \leq UR_f \cdot T_{60}, 1 \leq f \leq M; 1 \leq t \leq T \quad (21)$$

$$T_{f,t-1} - T_{f,t} \leq DR_f \cdot T_{60}, 1 \leq f \leq M; 1 \leq t \leq T \quad (22)$$

其中, UR_f 和 DR_f 分别表示第 f 个火电机组的上、下爬坡率限制, T_{60} 为每个时段的时间间隔长短。

对于非合作模式, 碳排放权约束可表示为:

$$E_f(T_{f,t}) \leq e_f, 1 \leq f \leq M, 1 \leq t \leq T \quad (23)$$

其中, e_f 为第 f 台火电机组的初始碳排放权, E_f 为第 f 台火电机组的排放函数。具体来说, 火电机组的 CO_2 排放量可表示为二次函数和指数函数的叠加:

$$E_f(T_{f,t}) = \alpha_f T_{f,t}^2 + \gamma_f T_{f,t} + \lambda_f + \delta_f \exp(\tau_f T_{f,t}), 1 \leq f \leq M; 1 \leq t \leq T \quad (24)$$

其中 α_f , γ_f , λ_f , δ_f 和 τ_f 是第 f 个火电机组的污染物排放系数。此外, 总碳排放量必须满足具体的碳减排目标:

$$\sum_{f=1}^M \sum_{t=1}^T E_f(T_{f,t}) \leq (1-r)E, 0 \leq r \leq 1 \quad (25)$$

其中, r 是减排系数, E 是电力系统碳排放总量指标。

对于合作模式, 考虑到极端场景选取差异以及火电机组合作方式随机, 碳排放约束可以转换为以下形式:

$$\sum_{f \in \varphi_i} \sum_{t=1}^T E_f(T_{f,t}) \leq \sum_{f \in \varphi_i} e_f, \forall \varphi_i \in 2^{\Omega_c}, 1 \leq i \leq n \quad (26)$$

其中 $\varphi_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是有可能合作模式构成的集合 Ω_c 的划分集。

同样, 总碳排放量也需要满足式(25)的要求。

在非合作模式下, 根据整个电力系统的排放指标和计划减排力度, 每个机组的碳排放量限制在一定的范围内, 每个机组的碳排放量严格控制在排放指标之内, 每个火电机组的碳排放权不能自由分配。在合作模式下, 根据整个电力系统的排放指标和计划的减排力度, 各机组可以自由合作, 使合作机组的碳排放总量在合作机组的碳排放总量指标范围内, 其余未参与合作的机组碳排放严格控制在各机组碳排放指标范围内。碳排放权的重新分配进一步优化了电力系统的经济成本(Nwulu & Xia, 2015)。

四、算例分析

在以上论述中, 我们讨论了一个集成风力发电不确定性和碳排放权的分布式鲁棒优化模型, 以及与该模型相关的求解方法, 从而解决低碳电力调度问题。此外, 由于可以根据实际情

况确定不同的目标参数、约束条件、风电不确定性和碳排放权,因此该模型具有通用性和普适性。本文以碳减排和成本压缩程度为评价标准,确定风电的合理比例以应对其内部不确定性,选择合适的火电机组合作模式从而应对碳交易的不可预测性,最后在“双碳”背景下得到了电力系统调度管理策略。

(一)风电统计特征

为描述基于场景的风电特征,我们收集了江苏如东2009年11月—12月近一个月的风速数据^①。利用统计学中极大似然估计的方法对上文中的风速概率密度函数的参数进行估计,结果如表1所示:

表1 风速概率密度函数参数估计值

函数	形状参数	尺度参数		对数平均值	变量标准差
Weibull	3.071	1.625			
Gamma	2.404	1.138			
Rayleigh		2.308			
Log-normal				0.784	0.703
Burr	6.557	1.829	4.733		

通过参数可以对各种分布曲线进行拟合,考虑到曲线性质各有优劣,故结合多个分布通过线性加权法构造混合分布从而达到更好的风速拟合效果。由于风速分布具体分布形式事先未知,故采用核密度估计的非参数统计方法对风速曲线进行拟合。为了衡量各分布曲线拟合的贴近程度,通过引入欧氏距离计算各条曲线与核密度估计曲线之间的概率密度距离总和,从而判断曲线的拟合优度。单分布以及混合分布共31种情况计算得到的距离值如表2所示。

表2 距离值汇总

分布	Weibull	Gamma	Rayleigh	Log-normal	Burr
距离	0.144	0.135	0.329	0.212	0.146
分布	W_G_R	W_G	W_R	W_L	W_B
距离	0.162	0.127	0.190	0.102	0.139
分布	W_G_L	G_R_L	G_R	G_L	G_B
距离	0.110	0.156	0.174	0.142	0.139
分布	W_G_B	G_R_B	R_L_B	R_L	R_B
距离	0.133	0.158	0.154	0.164	0.190
分布	W_R_L	G_L_B	W_R_L_B	G_R_L_B	L_B
距离	0.144	0.133	0.258	0.150	0.136
分布	W_R_B	W_G_R_L	W_G_R_B	W_G_L_B	W_G_R_L_B
距离	0.176	0.142	0.158	0.117	0.141
分布	W_L_B				
距离	0.112				

注:表中混合分布均为缩写,例如W_G是Weibull和Gamma混合分布。

① 数据来源于中国地面气象站逐小时观测资料(<http://data.cma.cn>)。

从表2中可以看出,构造混合分布有利于提高模型的拟合优度。此外,W_L混合分布的距离值最小,即Weibull和Log-normal两种分布加权混合的方式风速拟合效果最好,其构造分布形式如下:

$$f = \theta \left[\frac{1}{v\lambda\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln v - \eta)^2}{2\lambda^2} \right) \right] + (1 - \theta) \left[\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \right] \quad (27)$$

根据表1中相关数据可知 $k=3.071$, $c=1.625$, $\mu=0.784$, $\sigma=0.703$,从而结合频率分布直方图根据线性加权的方式得到 $\theta=0.591$ 。混合分布的拟合效果图如图3所示:

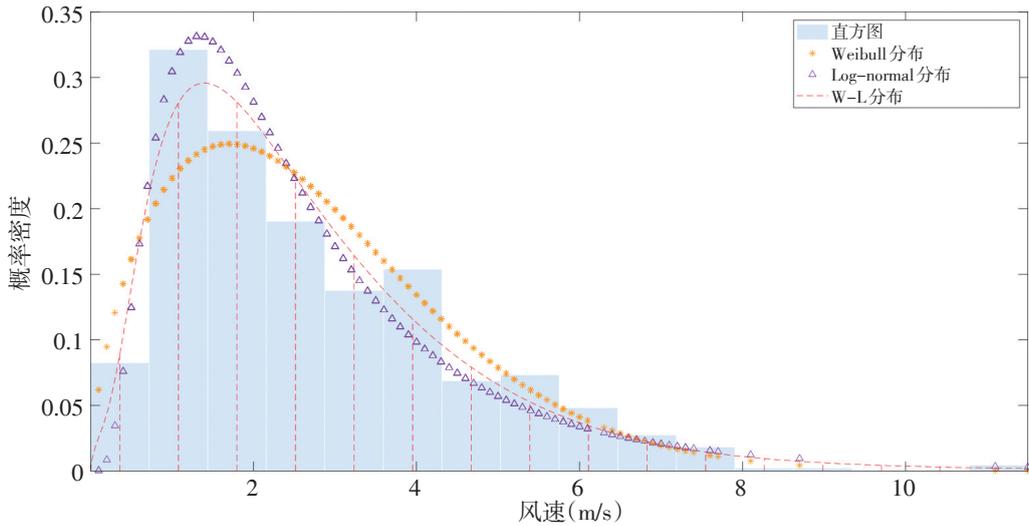


图3 混合前后风速拟合效果对比图

从图3中可以看出混合分布拟合曲线综合了Weibull和Log-normal分布的优势,拟合效果比单一分布更好。此外,本文通过Kolmogorov-Smirnov的非参数方法对风速数据是否服从混合分布进行检验。假设 H_0 : 风速 v 服从混合分布; H_1 : 风速 v 不服从混合分布。通过计算得到检验的P值为0.14145,故接受原假设,认为风速 v 服从混合分布。

根据风速特性及风电与风速的关系,将风电输出的运行范围细分为16个不同的小区间(详见附录表1)。为了简化计算,通过同步回代消减法将生成的场景缩减为5个场景,对应风能和概率如表3所示,削减后场景如图4所示。此外,采用比例法确定初始碳排放权的分配(详见附录表2)。

表3 场景压缩统计特征

场景序号	区间(m/s)	风能(MW)	概率 $P_r(s)$
1	(0, 1.25)	0	0.21
2	(1.25, 2.5)	0	0.338
3	(2.5, 3.75)	17.85714	0.218
4	(3.75, 6.25)	285.7143	0.177
5	(6.25, 20)	1000	0.057

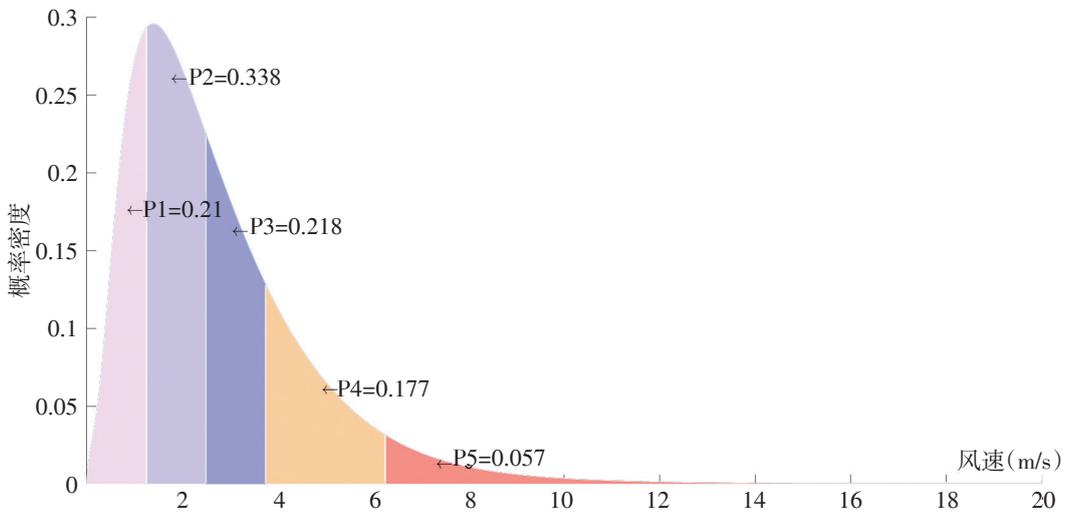


图4 场景压缩图

(二) 基于两阶段优化的合作减排鲁棒调度优化

为了解决碳交易的不可预测性对电力系统的影响问题,本文以6台火电机组(CG_1, CG_2, \dots, CG_6)和1台风电机组(WG)为例,分别探究合作和非合作两种模式下碳交易应对碳减排压力方面的影响。理论上,由于风力发电机组的零排放,上述模式仅限于火力发电机组。在给定一定负荷需求下,对6台火电机组和风电机组出力情况以及6台火电机组通过碳交易分摊的减排比例进行计算。

由于合作模式的多样性,通过穷举法可知6台火电机组的组合方式多达57种。为了简化计算,应根据发电机的排放特性选择一些有代表性的方案。本文通过6台机组在出力相同时比较单位碳排放量,优先选取排放量大的机组进行合作。如图5所示,6台机组的单位碳排放

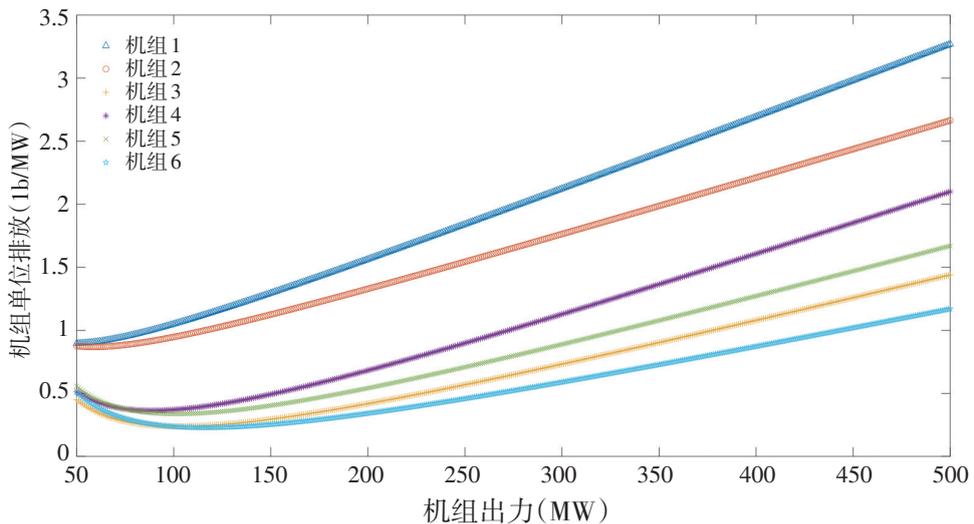


图5 火电机组单位排放对比图

量排序依次为: 机组 1>机组 2>机组 4>机组 5>机组 3>机组 6。因此, 将合作模式简化为 5 种方式: 机组 1, 机组 2 合作(模式 2); 机组 1, 机组 2, 机组 4 合作(模式 3); 机组 1, 机组 2, 机组 4, 机组 5(模式 4); 机组 1, 机组 2, 机组 3, 机组 4, 机组 5 合作(模式 5); 机组 1, 机组 2, 机组 3, 机组 4, 机组 5, 机组 6 合作(模式 6)。将非合作模式记为模式 1。

由于合作减排电力调度的减排系数 r 和极端场景个数 s' 可根据实际减排目标和风电场供电能力进行调控。故本文分别探讨不同减排系数 r 和不同极端场景个数 s' 对合作和非合作模式的经济性、环保性以及鲁棒性的影响。

首先, 对于动态模型的特殊形式, 将 24 小时作为整体得到静态两阶段鲁棒电力调度模型, 设定惩罚因子 $k_{penalty}=100$, 电力系统负荷值 $D=1731.5\text{MW}$, 电力系统排放指标 $E=800\text{lb}$ 。火电机组参数以及排放指标详见附录表 3。设定减排系数 $r=0$, 即系统定额减排。分别在 $s'=1, 2, \dots, 5$ 下计算各种模式机组的总运行成本、风电出力以及总碳排放量, 对比结果如图 6 所示:

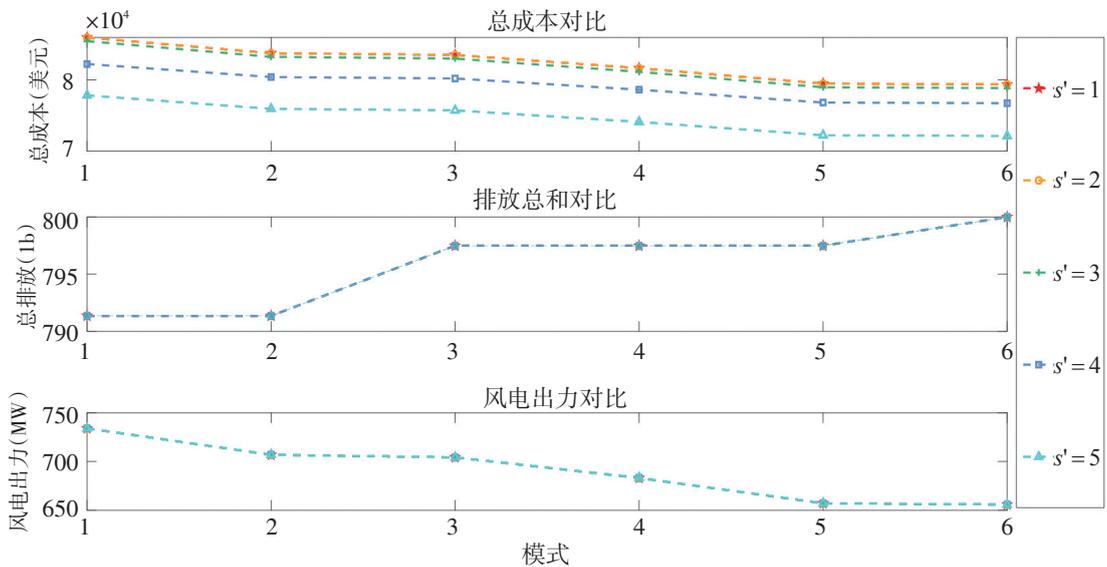


图6 $r=0$ 各模式对比图

从图 6 中可以看出无论 s' 取何值, 随着合作的机组数量增加, 经济成本和风电的比例在不断下降, 碳排放量略有上升。从量级来看, 总成本以 10^4 量级减少仅需要以 10^1 为量级的碳减排量为代价。因此, 机组之间的合作可以进一步优化电力系统的经济成本。

设定 $s'=2$, 即固定极端场景个数, 计算不同减排系数 r 对各种模式减排力度的影响, 如图 7 所示。从图中可以看出, 减排初期, 火电机组数量较多的模式总成本相对较少且风电出力所占比例相对较低。减排后期, 当排放指标达到峰值时, 所有模式下的成本和风电比例趋

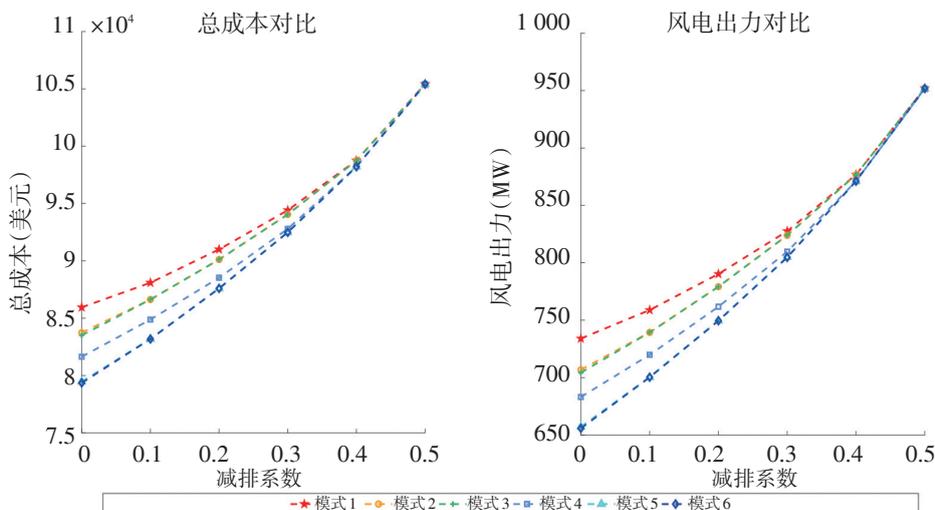


图7 $s'=2$ 各模式对比图

于相同。出现这种情况是因为火电机组减排能力达到极限,这时电力系统的动力主要由风电机组提供。为了更详细地刻画各种模式下火电机组出力和风电机组出力的配比情况,我们在 $s'=2$ 时,对各种模式随减排系数 r 的出力情况进行了详细划分(详见附录表4),如图8所示:

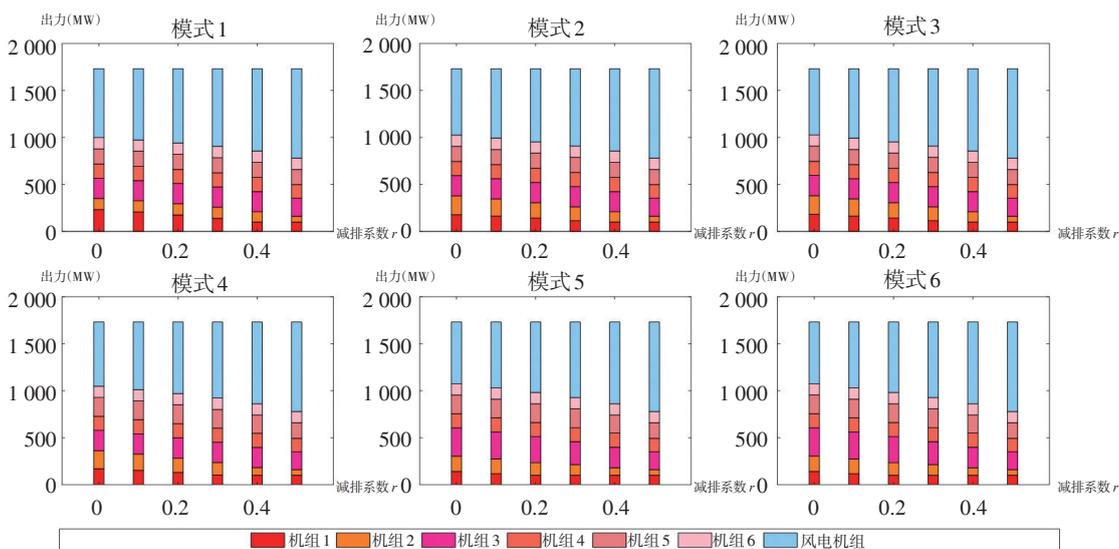


图8 $s'=2$ 各模式机组出力对比图

从图8中可以看出无论哪种模式下,随着碳减排系数的增大,风电机组出力的比例不断升高,火电机组出力不断减少,与整体的变化一致。

对于动态合作减排模型,同样首先固定减排系数 $r=0$,考虑 s' 取值不同时对系统运行成本和排放的影响。

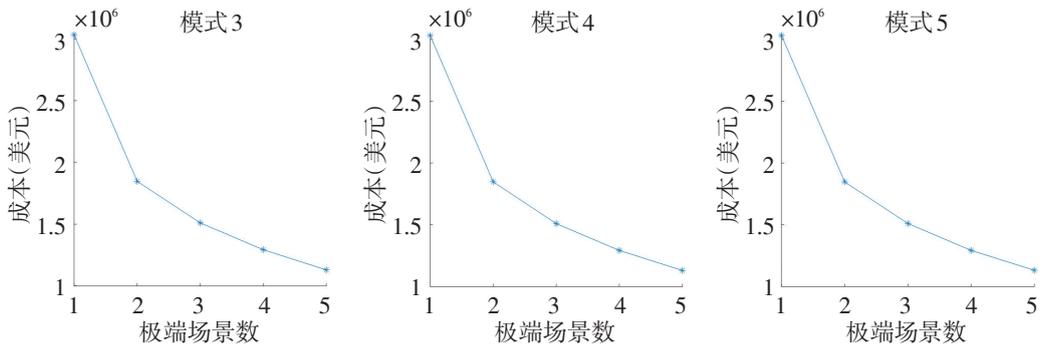


图9 r=0 不同模式的成本比较

从图9中可以看出无论哪种合作模式,分布式鲁棒优化模型($s'=2, 3, 4$)的运行成本都处于传统鲁棒优化模型($s'=1$)和一般环境经济电力调度模型($s'=5$)的中间位置。出现这种情况是因为一般环境经济调度方法计算了所有不同风电出力情境下的预期成本,其决策结果以经济性为重点。而鲁棒性方法是寻找最坏风电输出场景下的总成本,其决策结果具有鲁棒性。综合考虑多个较差场景的分布式鲁棒优化模型,可以较好地兼顾电力系统的经济性、环保性和鲁棒性。

对于固定极端场景个数 s' , 首先对传统鲁棒优化模型($s'=1$)随减排系数 r 提高, 研究在模式1情况下火电机组的运行成本和碳排放量变化情况, 结果如表4所示:

表4 传统火电机组运行成本和碳排放

r	0	0.05	0.1	0.11
成本(美元)	147303624.05	147303806.13	147373381.21	147440334.43
碳排放(lb)	56570.61	56400.01	54000.23	53400.31

通过仿真模拟得到低碳电力调度在碳减排比 r 达到0.11前均可以找到可行解。从表4中可以看出,随着 r 在0~0.11之间不断提高,运行成本从147303624.05美元增加到147440334.43美元,而碳排放量从56570.61lb减少到53400.31lb。也就是说,在 r 取值较高的情况下,传统的火电系统单靠自身的力量难以实现碳减排目标,同时由于火电成本较高,其运行成本也相对较高。

随着风电在电力系统中的比例越来越大,风电一体化的作用也越来越突出。为了定量地刻画这一现象,我们基于分布式鲁棒优化模型($s'=2$)比较了传统火电机组和风电机组的运行成本、碳排放和出力情况。随着减排系数 r 的提高,火电机组的运行成本碳排放量情况如表5和表6所示:

表5 $s'=2$ 不同模式总成本对比 (单位:美元)

r	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
模式1	1847601.3	1847205.9	1847939.0	1846911.8	1846816.1	1846982.1
模式2	1847821.9	1846969.7	1846950.4	1846348.0	1847225.8	1847608.4
模式3	1847004.0	1846865.3	1846718.4	1846910.4	1847193.5	1847758.6
模式4	1847937.9	1846934.8	1846884.9	1847095.2	1846654.1	1846803.4
模式5	1846923.2	1848410.4	1846846.7	1847999.6	1846862.1	1846914.2
模式6	1847179.9	1846143.2	1846914.3	1847639.3	1846290.5	1847085.2

表6 $s'=2$ 不同模式碳排放总量对比 (单位:lb)

r	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
模式1	21550.8	21310.3	21188.1	21383.1	21402.5	21336.8
模式2	21446.1	21352.7	21394.2	21413.8	21201.5	21302.2
模式3	21399.4	21432.3	21414.1	21398.0	21341.2	21513.4
模式4	21371.6	21358.4	21418.3	21377.0	21419.8	21368.1
模式5	21376.4	20966.1	21398.8	21338.6	21432.7	21400.1
模式6	21405.7	21413.5	21431.2	21250.9	24122.8	21409.1

相对于表4,从表5和表6中可以看出,风电的接入使得低碳电力调度的进程得到了优化,在模式1中,成本和碳排放均显著降低,并且远优于表4中传统火电系统的性能。此外, r 在 $0 \sim 0.5$ 之间变化时,运行成本从 1847601.3 美元降低至 1846982.1 美元,相应碳排放也从 21550.8lb 降至 21336.8lb。因此,有必要研究风电在电力系统中的接入比例。图10分别在3种不同减排策略 ($r=0.1、0.3、0.5$) 下,给出了24小时模式1的各台机组出力情况。

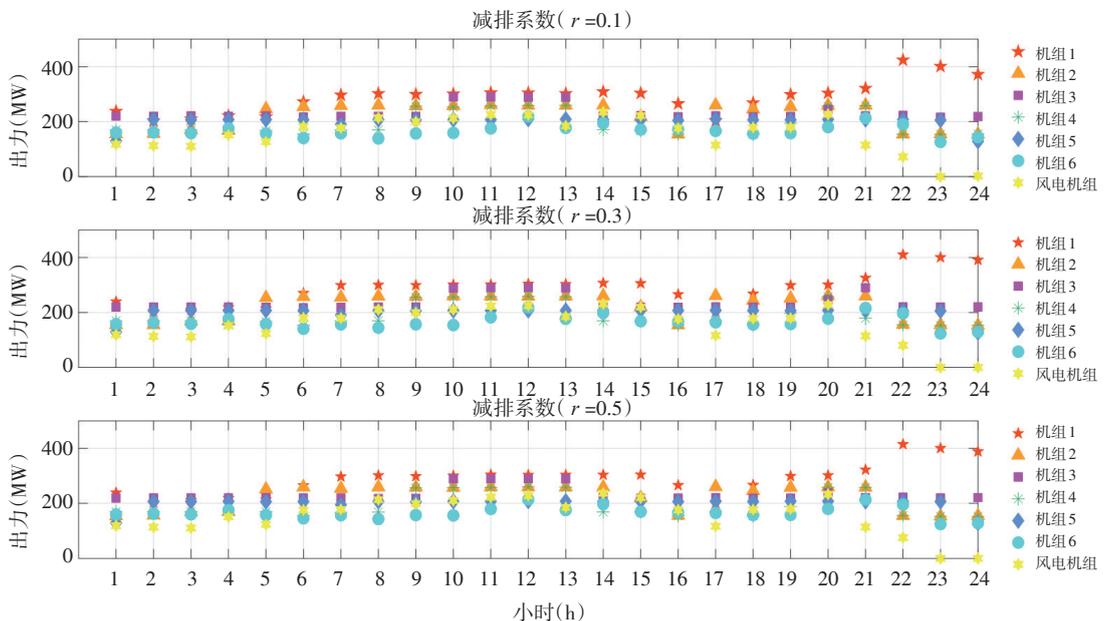


图10 不同减排策略 r 下模式1(非合作)机组每小时出力对比

如图 10 所示,随着减排系数 r 的增大,电力系统的碳减排压力增大,发电成本较低的机组 1、机组 3 和机组 4 承担较多的计划出力,而成本相对较高的机组 2、机组 5、机组 6 则承担较少的计划出力。同时,风力发电机承担的计划出力约占总体计划出力的 15%~20%。对于所有机组在 $s'=2$ 时随不同排放系数和不同模式的具体出力情况如图 11 所示:

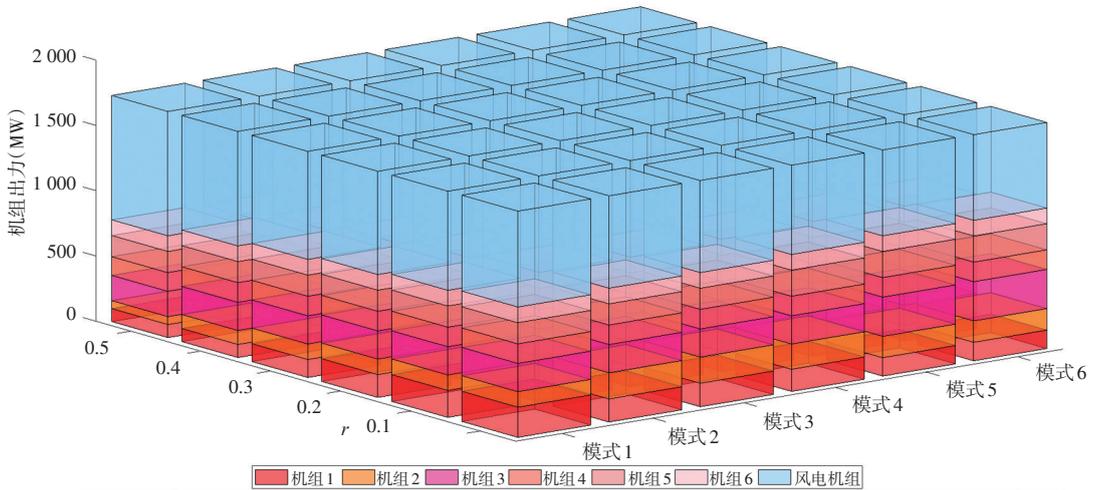


图 11 $s'=2$ 不同模式下机组随减排系数变化的计划出力

结合表 5 和表 6 中数据,可以看出在运行成本和碳排放量方面,并不是所有的合作模式都优于非合作模式,因为基于系统鲁棒性的考虑,为合作模式选择了碳减排性能较差的单元。但有代表性的合作模式的运营成本均显著低于非合作模式,碳排放量也相对较低。因此,风电的接入和碳交易中的合作减排模式确实是有利的减碳方式。

五、结论

本文以电力行业低碳化进程中的电力调度模式为研究对象,以应对低碳方式(风电接入、碳交易机制)的导入为切入点,通过建立调度模型、开发优化算法,确定了合理的风电比例和合适的煤电合作减排模式以应对风电不确定性及碳交易的不可预测性,进而归纳出了低碳电力调度管理策略。主要研究成果体现在以下三个方面:

(1)在模型合理性方面,本文建立的基于场景分析的分布式鲁棒调度模型,与一般的环境经济调度模型相比,在处理风电不确定性方面具有更好的鲁棒性;而传统的鲁棒优化模型相比,在保证鲁棒性的同时兼顾了经济性与环保性。

(2)在风电接入对碳减排的影响方面,风电并网有助于电力系统以更低的运行成本和更低的碳排放量实现碳排放控制目标。具体来说,对于传统的鲁棒优化调度,随着碳减排系数的不断提高,虽然碳排放量从 56570.611b 减少到 53400.311b,但运行成本却从 147303624.05

美元增加到 147440334.43 美元。然而,分布式鲁棒优化模型不仅碳排放总量从 21550.8lb 降至 21336.8lb,并且还将运行成本从 1847601.3 美元降低至 1846982.1 美元。此外,随着碳减排要求的变化,风电出力占总体发电比例约为 15%~20%,在有效降低碳排放量的同时,一定程度上保证了电力系统的可靠性。

(3)在碳交易对碳减排的影响方面,虽然不是所有的合作减排模式在运行成本和碳排放量方面都优于非合作减排模式,但是一些具有代表性的合作模式的运营成本均显著低于非合作模式,碳排放量也相对较低。因此,碳交易是一种十分有效的低碳方式,可以挖掘火电机组的碳减排潜力。本研究可以为相关部门制定“双碳”背景下的电力调度政策提供科学方法与理论支撑,并为检验或评价政策的合理性提供模拟工具。

附录:

表 1 风速场景统计特征

区间序号	区间(m/s)	风能(MW)	概率 $P_r(s)$
1	(0, 1.25)	0	0.21
2	(1.25, 2.5)	0	0.338
3	(2.5, 3.75)	17.85714	0.218
4	(3.75, 5)	196.4286	0.118
5	(5, 6.25)	375	0.059
6	(6.25, 7.5)	553.5714	0.028
7	(7.5, 8.75)	732.1429	0.013
8	(8.75, 10)	910.7143	0.007
9	(10, 11.25)	1 000	0.004
10	(11.25, 12.5)	1 000	0.002
11	(12.5, 13.75)	1 000	0.001
12	(13.75, 15)	1 000	0.001
13	(15, 16.25)	1 000	0.001
14	(16.25, 17.5)	1 000	0
15	(17.5, 18.75)	1 000	0
16	(18.75, 20)	1000	0

表 2 初始碳排放权分配

机组	1	2	3	4	5	6
e_f (lb)	32000	22000	5000	10000	5000	6000
E (lb)	80000					

表3 火电机组参数

机组	1	2	3	4	5	6
T_f^{\min} (MW)	100	50	80	50	50	50
T_f^{\max} (MW)	500	200	300	150	200	120
a_f (美元/(MW) ²)	0.0070	0.0095	0.0090	0.0090	0.0080	0.0075
b_f (美元/MW)	7	10	8.5	11	10.5	12
d_f (美元)	240	200	220	200	220	190
g_f (美元)	130	110	120	110	120	100
h_f (Rad/MW)	0.0315	0.0300	0.0450	0.0300	0.0400	0.0052
α_f (lb/(MW) ²)	0.00583	0.00461	0.00381	0.00513	0.00419	0.00319
γ_f (lb/MW)	0.32767	0.32767	-0.54551	-0.54551	-0.51116	-0.51116
λ_f (lb)	13.85932	15.85932	40.2669	40.2669	42.89553	42.89553
UR_f (MW)	80	50	65	50	50	50
DR_f (MW)	120	90	100	90	90	90

表4 $s'=2$ 各模式机组出力情况 (单位: MW)

r	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
模式1						
机组1	230.79	205.96	174.53	137.24	100.00	100.00
机组2	118.91	118.91	118.91	118.91	107.01	60.47
机组3	215.82	215.82	215.82	215.82	215.82	193.78
机组4	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	143.29
机组5	161.94	161.94	161.94	161.94	161.94	161.94
机组6	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
风电机组	734.05	758.88	790.30	827.59	876.73	952.02
模式2						
机组1	176.88	160.98	140.96	112.22	100.00	100.00
机组2	200.00	183.37	163.55	147.56	107.01	60.47
机组3	215.82	215.82	215.82	215.82	215.82	193.78
机组4	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	143.29
机组5	161.94	161.94	161.94	161.94	161.94	161.94
机组6	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
风电机组	706.86	739.39	779.23	823.95	876.73	952.02

续表 4

$s'=2$ 各模式机组出力情况

(单位:MW)

r 模式 3	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
机组 1	179.43	160.98	140.96	112.22	100.00	100.00
机组 2	200.00	183.37	163.55	147.56	107.01	60.47
机组 3	215.82	215.82	215.82	215.82	215.82	193.78
机组 4	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	143.29
机组 5	161.94	161.94	161.94	161.94	161.94	161.94
机组 6	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
风电机组	704.31	739.39	779.23	823.95	876.73	952.02
r 模式 4	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
机组 1	169.64	151.79	129.18	101.98	100.00	100.00
机组 2	192.92	174.01	154.72	133.95	80.20	59.32
机组 3	215.82	215.82	215.82	215.82	215.82	191.76
机组 4	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	142.20
机组 5	200.00	200.00	200.00	200.00	194.45	166.42
机组 6	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
风电机组	683.12	719.88	761.78	809.74	871.03	951.80
r 模式 5	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
机组 1	140.88	117.66	101.23	100.00	100.00	100.00
机组 2	163.48	154.03	132.88	113.69	78.44	59.32
机组 3	300.00	289.44	277.83	243.05	219.63	191.76
机组 4	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	142.20
机组 5	200.00	200.00	200.00	200.00	192.31	166.42
机组 6	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
风电机组	657.14	700.37	749.56	804.76	871.12	951.80
r 模式 6	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
机组 1	141.55	117.66	101.23	100.00	100.00	100.00
机组 2	164.12	154.03	132.88	113.69	78.44	59.32
机组 3	300.00	289.44	277.83	243.05	219.63	191.76
机组 4	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	142.20
机组 5	200.00	200.00	200.00	200.00	192.31	166.42
机组 6	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
风电机组	655.83	700.37	749.56	804.76	871.12	951.80

参考文献:

- [1] 陈启鑫,康重庆,夏清,周意诚,横山隆一. 电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J]. 电力系统自动化,2009,33(15):18-23.
- [2] 陈启鑫,康重庆,夏清, Daniel Kirschen. 低碳电力调度方式及其决策模型[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):18-23.
- [3] 崔杨,周慧娟,仲悟之,李鸿博,赵钰婷. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):85-93.
- [4] 崔承刚,郝慧玲,杨宁,奚培锋. 基于优化 Kriging 代理模型的场景分析法求解机组组合问题[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(22):49-56.
- [5] 樊迪. 基于电力系统经济运行的电网经济调度分析[J]. 电气时代,2020,(03):76-77.
- [6] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术,2009,33(02):1-7.
- [7] 黄华,常湧,王洪江,陈立,桂俊平. 计及多种低碳因素联合作用的电力系统优化调度[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(12):1086-1092.
- [8] 李慧,孙宏斌,张芳. 风电场风速分布模型研究综述[J]. 电工电能新技术,2014,33(08):62-66.
- [9] 马赛,褚福磊. 风速时间序列模拟的模型有效性验证及代表性风场实例分析[J]. 振动与冲击,2019,38(15):73-79.
- [10] 王锐,朱超,张帅. 考虑风电接入的电力系统动态随机环境/经济调度[J]. 电工电气,2017,(04):10-16+60.
- [11] 新华网. 习近平在气候雄心峰会上发表重要讲话[EB/OL]. (2020-12-12)[2022-02-07]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-12/12/c_1126853599.htm.
- [12] 徐浩. 考虑新能源接入的输电网规划研究[D]. 山东:山东大学,2019.
- [13] 叶泽,何姣,周鑫,刘思强. 发电行业碳排放权初始配额分配的双层规划模型[J]. 系统工程,2018,36(11):140-146.
- [14] Jin, J. L., X. Y. Zhang, and Q. L. Wen. Impacts of Carbon Trading and Wind Power Integration on Carbon Emission in the Power Dispatching Process[J]. Energy Reports, 2021, 7(2): 3887-3897.
- [15] Nwulu, N. I. and X. Xia. Implementing a Model Predictive Control Strategy on the Dynamic Economic Emission Dispatch Problem with Game Theory Based Demand Response Programs[J]. Energy, 2015, 91: 404-419.

Research on Scheduling Management of New Energy Power Generation System with Carbon Trading : Taking Wind Power as an Example

Wen Qinglan, Cheng Siqi, Qiu Yaru, Zhang Xianyu, Jin Jingliang
(School of Science, Nantong University)

Abstract: Under the background of "dual carbon", it is of great practical and strategic significance to develop low-carbon electricity and realize low-carbon transition of power dispatching. In order to solve the scheduling and management problem of wind-containing power system with carbon trading, based on the traditional power dispatch-

ing model, this paper introduces the robust idea of adaptive scenario set, and establishes a two-stage robust optimization scheduling model considering carbon trading and wind power access. Firstly, economic cost is taken as the objective function, and penalty factor is added to deal with the uncertainty of wind power effectively. Secondly, the carbon emission right is taken as the constraint condition to limit the carbon emission of coal power, the cooperative emission reduction mode is designed to promote the clean and efficient utilization of coal power, and the carbon emission right is shared through the distribution and trading of the initial carbon emission right. Moreover, further optimize the economic cost of the power system, respectively in the static cooperative emission reduction and dynamic cooperative emission reduction mode, to achieve the economic cost minimization under the maximum risk. Then, the rationality of the model is verified based on the simulation results. Finally, a reasonable proportion of wind power and an appropriate coal-power cooperative emission reduction model are determined through the model to cope with the uncertainty of wind power and the unpredictability of carbon trading, and then the low-carbon power dispatching management strategy is summarized. The research conclusions of this paper can provide scientific methods and theoretical support for relevant departments to formulate power dispatching policies under the "dual carbon" background, and provide a simulation tool for testing or evaluating the rationality of policies.

Keywords: Power Dispatch; Wind Power Integration; Carbon Trading; Cooperation in Carbon Reduction; Robustness

JEL Classification: C61, O21, Q56, Q58

(责任编辑:朱静静)