

计及绿证-碳交易的源荷分布鲁棒优化调度

宋旭¹, 张新燕^{1,2}

(1.新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2.可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 针对电力系统面临风电消纳困难、调节能力短缺的问题,文章建立了计及绿证-碳交易的源荷分布鲁棒优化调度模型。首先,在电源侧引入绿色证书交易机制和碳交易机制以提升风电上网功率,在负荷侧引入高载能负荷以提高系统调节能力;其次,为了减小风电出力不确定的影响,采用数据驱动的分佈鲁棒方法,通过风电出力历史数据构建概率分布不确定集,进而寻找最恶劣的场景进行优化,利用列约束生成算法求解;最后,基于IEEE 39节点系统进行算例验证。结果表明,通过整合源荷双侧可调节资源进行协同优化,可以在促进风电消纳的同时保证电力系统具有良好的调节能力。

关键词: 风电消纳; 绿色证书交易机制; 碳交易机制; 高载能负荷; 分佈鲁棒

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)11-1527-09

0 引言

在“双碳”目标推进下,风电、光伏并网规模不断扩大,但由于风电、光伏的不确定性和波动性,导致电源侧调节能力下降,电力系统面临调节能力短缺^[1]。

将负荷侧可调节资源纳入系统调度已成为促进新能源消纳,改善系统调节能力的有效途径^[2]。高载能负荷用电占全社会用电比重较高,具有可观的调节容量,另外,高载能负荷一般分布较为集中,可迅速响应调度指令,便于管理^[3,4]。目前,国内外已在高载能负荷参与电网调度、辅助风电消纳等方面展开了相关研究。文献[5]将电熔镁负荷纳入电网调度中,建立了一个双层优化模型,以风电消纳量最大为上层模型目标,以系统运行成本最小为下层模型目标,实现风电有效消纳。文献[6]通过分析常规电源和高载能负荷在调节风电波动上的互补关系,建立了源荷互动两级协调控制策略,验证负荷响应可以有效实现风电消纳。然而,上述文献均是在确定性环境下进行的,未能考虑风电不确定性对电力系统调节能力的影响。

为了应对风电出力不确定性的影响,需要对风电出力特性进行模拟,目前运用较多的有随机优化方法和鲁棒优化方法^[7,8]。数据驱动的分佈鲁

棒方法是基于风电出力历史数据构建概率分布不确定集,包含了风电场景的真实概率分布,并在其中找出最恶劣的场景概率来求解最经济的调度方案。该方法综合随机优化和鲁棒优化的特点,调度结果也使得准确性和经济性更加均衡^[9],目前已在综合能源系统^[10]、无功优化^[11]等领域得到广泛应用。但是上述文献多是以电-热-气等各种能源耦合设备或者储能设备为对象进行调度来应对风电不确定性,未能在需求侧充分利用具有参与系统需求响应良好条件的高载能负荷。此外,能源政策越来越得到重视。绿色电力证书机制(以下简称绿证)和碳交易机制均是国家为了实现“双碳”目标,缓解新能源消纳困境而出台的激励措施。文献[12]将绿证和碳交易机制引入含风电的电力系统经济调度中,验证两种机制均可促进风电消纳,降低碳排放。文献[13]将绿证和碳交易机制纳入综合能源系统中,分析了不同可再生能源配额系数、不同绿证价格对系统运行成本和风电消纳的影响。文献[14]将绿证和碳交易机制纳入城市能源规划中,验证了两种机制均可减小投资成本,增加新能源装机量。以上文献均表明,绿证和碳交易机制可有效节能减排,促进新能源消纳,但都是通过优先考虑新能源发电或者限制常规电源出力来达到消纳新能源的目的,未能考虑高载能负荷在两种机

收稿日期: 2023-09-17。

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01C044); 国家自然科学基金项目(51667018)。

通信作者: 张新燕(1965-),女,博士,教授,研究方向为新能源并网技术。E-mail: xjcxzy@126.com

制激励下与电源侧双向互动协调优化的效果。

本文在上述文献的基础上,建立计及绿证-碳交易的源荷分布鲁棒优化调度模型。首先,将高载能负荷分为可离散调节负荷和可连续调节负荷,并分析了高载能负荷对风电消纳的积极作用;然后,综合考虑绿证-碳交易的能源政策,以系统总运行成本最小为目标,对确定性模型下源荷双侧资源进行协同优化;最后,在风电出力不确定性环境下建立基于数据驱动的源荷分布鲁棒调度模型,采用列约束生成(CCG)算法进行迭代求解,在算例中设置不同情形进行比较,验证文中所提模型的有效性。

1 高载能负荷参与调度消纳风电原理分析

1.1 高载能产业与新能源发电企业相结合的优势分析

我国西北地区矿产资源和风能容量丰富,但受节能减排等政策的约束,限制了高载能产业规模,同时新能源企业由于受到当地电网负荷水平、外送通道等因素的约束,也限制了其自身发展。因此,将高载能产业和新能源发电企业有机结合,可以实现新能源就地消纳、优化产业布局、减小电力外送的压力^[5]。本文选取具有代表性的电解铝、碳化硅、铁合金高载能负荷来参与电力系统的调度。

1.2 高载能负荷特性及模型

1.2.1 可离散调节负荷

电解铝和碳化硅两种高载能负荷具有相似的离散调节特性^[6]:①初始额定功率;②一定的调节容量;③一旦进行调节须保证负荷功率维持限定时间,并且有调节次数的限制,不能频繁调节。在调节过程中应考虑以下约束。

①可离散负荷调节容量约束

$$\begin{cases} P_{disc}^t = P_{disc}^{t-1} + \mu_{disc}^t P_{disc,adj}^t \\ P_{disc,min} \leq P_{disc}^t \leq P_{disc,max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{disc}^t 为 t 时刻可离散调节负荷用电功率; P_{disc}^{t-1} 为 $t-1$ 时刻可离散调节负荷用电功率; $P_{disc,adj}^t$ 为 t 时刻可离散调节负荷的调节功率; μ_{disc}^t 为 t 时刻可离散调节负荷功率调节标志,当 $P_{disc}^t \neq P_{disc}^{t-1}$ 时,取值为1,表示可离散负荷参与调节,当 $P_{disc}^t = P_{disc}^{t-1}$

时,取值为0,表示可离散负荷不参与调节; $P_{disc,min}, P_{disc,max}$ 分别为可离散调节负荷的功率下限、上限。

②调节特性约束

$$\begin{cases} \sum_{t=t+1}^{t+T_{disc,min}-1} \mu_{disc}^t = 0 \\ \sum_{t=t+1}^{t+T_{disc,max}-1} \mu_{disc}^t \geq 1 \\ \sum_{t=1}^T \mu_{disc}^t \leq L \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_{disc,min}$ 为可离散调节负荷功率稳定运行最小时长; $T_{disc,max}$ 为可离散调节负荷功率稳定运行最大时长; L 为离散负荷的最大调节次数。

1.2.2 可连续调节负荷

铁合金生产是采用高炉法、电热法等方法,利用电炉中的高温,辅以还原剂将金属矿石还原生成铁合金的过程。铁合金负荷的特性:①具有初始额定功率;②具有一定的调节容量;③调节一次后不需要保持一定功率稳定时间,可连续灵活响应调节需求^[7]。在调节过程中应考虑以下约束:

$$\begin{cases} P_{cont}^t = P_{cont}^{t-1} + \mu_{cont}^t P_{cont,adj}^t \\ P_{cont,min} \leq P_{cont}^t \leq P_{cont,max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{cont}^t 为 t 时刻可连续调节负荷用电功率; P_{cont}^{t-1} 为 $t-1$ 时刻可连续调节负荷用电功率; $P_{cont,adj}^t$ 为 t 时刻可连续调节负荷的调节功率; μ_{cont}^t 为可连续调节负荷功率调节标志,当 $P_{cont}^t \neq P_{cont}^{t-1}$ 时,取值为1,表示可连续负荷参与调节,当 $P_{cont}^t = P_{cont}^{t-1}$ 时,取值为0,表示可连续负荷不参与调节; $P_{cont,min}, P_{cont,max}$ 分别为可连续调节负荷的功率下限、上限。

1.3 高载能负荷提高系统调节能力、消纳风电原理分析

由于风电的随机性和反调峰特性给系统运行带来一定压力,当常规机组出力难以跟随风电波动时,也可以将负荷侧可调资源纳入电网调度中从而提高系统的灵活性。高载能负荷参与调节消纳风电原理如图1所示。图中等效负荷指的是系

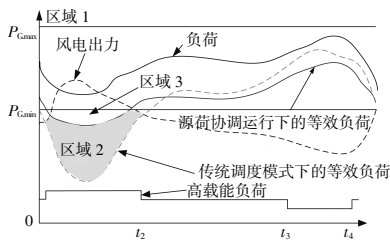


图1 高载能负荷参与消纳风电原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the principle of high energy load participating in the regulation of absorption of wind power

统常规负荷功率与风电功率的差值。

由图1可知,在传统调度模式下,高载能负荷不参与调节,在弃风时段($t_1 \sim t_2$)等效负荷较低,以至于常规电源最小出力远大于等效负荷功率,此时系统风电受阻量较大。在源荷互动模式下,高载能负荷参与调节,在弃风时段,高载能负荷功率进行上调,在常规负荷较高时段($t_3 \sim t_4$),高载能负荷功率进行下调,可有效减少风电受阻量,平滑系统等效负荷,缓解系统调节压力^[4]。

2 计及绿证-碳交易的源荷优化调度模型

2.1 绿证交易、碳交易成本模型

2.1.1 绿证交易成本

可再生能源配额制表示电力系统需要保证一定比例非水可再生能源的上网空间,如果发电企业消纳的可再生能源超过相应的指标,可将超出部分折算为一定数量绿证进行交易;如果未超过相应的指标,则须要购买一定数量的绿证,从而避免相关部门的罚款。风电是典型的可再生能源,风电企业通过出售绿证可获得收益。火电企业须要购买一定数量绿证,完成相应的消纳指标^[18],故绿证成本为

$$\begin{cases} F_{wg} = \frac{\sum_{t=1}^T P_w^t (1-\beta)}{E_g} \times C_g \\ F_{pg} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} P_{g,i}^t \times \beta}{E_g} \times C_g \\ F_{green} = F_{pg} - F_{wg} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_{wg} 为风电企业出售绿证获得的收益; F_{pg} 为火电企业购买绿证的成本; F_{green} 为绿证成本; C_g 为绿证交易单位价格,元/本; E_g 为风力发电量与单个绿证之间的换算系数; β 为可再生能源消纳责任权重系数; P_w^t 为 t 时刻风电的实际出力。

2.1.2 碳交易成本

我国目前碳交易机制规定可将碳排放权作为商品挂牌交易,各火电厂拥有基础碳排放额度,当火电厂实际碳排放量大于排放额度时,须要在碳交易市场购买所超出的部分,同理,当火电厂实际碳排放量小于排放额度时,可以将盈余配额在碳交易市场挂牌销售获得收益。碳交易成本为

$$\begin{cases} F_{carbon} = C_{carbon} (E_p - E_q) \\ E_p = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} \theta_i P_{g,i}^t \\ E_q = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} \sigma_i P_{g,i}^t \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_{carbon} 为碳交易成本; C_{carbon} 为单位碳排放权交易价格; E_p 为一个周期内系统的碳排放量; E_q 为一个周期内系统分配的碳排放额; θ_i 为机组单位有功出力碳排放强度; σ_i 为机组碳排放配额系数。

2.2 目标函数

本文以绿证-碳交易能源政策为基础,同时引入需求侧高载能负荷的响应模型,建立以系统综合运行成本最小的目标函数:

$$\begin{cases} \min F = (F_{gen} + F_{green} + F_{carbon} + F_{high_load} + F_{wind} + F_{yw}) \quad (6) \\ F_{gen} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} \mu_{g,i}^t [a_i (P_{g,i}^t)^2 + b_i P_{g,i}^t + c_i] + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} [k_{start,i} \mu_{g,i}^t (1 - \mu_{g,i}^{t-1}) + k_{stop,i} \mu_{g,i}^{t-1} (1 - \mu_{g,i}^t)] \\ F_{high_load} = \sum_{t=1}^T (\eta_{disc} |P_{disc,adj}^t| + \eta_{cont} |P_{cont,adj}^t|) \quad (7) \\ F_{loss} = \sum_{t=1}^T \omega_{loss} (P_{wind}^t - P_w^t) \\ F_{yw} = \sum_{t=1}^T \varphi_w P_w^t \end{cases}$$

式中: F_{gen} 为机组的发电成本,包含机组运行成本和启停成本; F_{high_load} 为高载能负荷调用成本; F_{wind} 为弃风成本; F_{yw} 为风电运维成本; T 为调度时段总数; N_g 为常规火电机组的台数; $\mu_{g,i}^t$ 为火电机组 i 在 t 时刻的启停状态变量,取1为启动状态,取0为停运状态; $P_{g,i}^t$ 为 t 时刻火电机组 i 的出力; a_i, b_i, c_i 为火电机组 i 的运行成本系数; $k_{start,i}, k_{stop,i}$ 分别为火电机组 i 单次启、停成本; η_{disc}, η_{cont} 分别为可离散负荷、可连续负荷调节成本系数; ω_{loss} 为风

电单位功率弃风惩罚成本; P_{wind}^t 为 t 时刻风电预测出力; φ_w 为风电单位功率维护成本系数。

2.3 约束条件

2.3.1 系统约束条件

①系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_g} \mu_{g,i}^t P_{g,i}^t + P_w^t = P_{load}^t + \mu_{disc}^t P_{disc,adj}^t + \mu_{cont}^t P_{cont,adj}^t \quad (8)$$

式中: P_{load}^t 为 t 时刻系统原有有功负荷, 包括高载能负荷的不可调节部分。

②系统旋转备用约束

$$\begin{cases} U_{GR+} = \sum_{i=1}^{N_g} \mu_{g,i}^t (P_{g,i,max} - P_{g,i}^t) \geq U_{SR+} \\ U_{GR-} = \sum_{i=1}^{N_g} \mu_{g,i}^t (P_{g,i}^t - P_{g,i,min}) \geq U_{SR-} \end{cases} \quad (9)$$

式中: U_{GR+} 和 U_{GR-} 分别为常规发电机组的正、负旋转备用容量; $P_{g,i,max}$ 和 $P_{g,i,min}$ 分别为常规机组 i 的输出功率上限、下限; U_{SR+} 和 U_{SR-} 分别为系统正旋转备用需求、负旋转备用需求。

2.3.2 常规机组约束条件

$$\begin{cases} \sum_{m=0}^{T_{on,i}-1} \mu_{g,i}^{t+m} \geq T_{on,i} (\mu_{g,i}^t - \mu_{g,i}^{t-1}) \\ \sum_{m=0}^{T_{off,i}-1} (1 - \mu_{g,i}^{t+m}) \geq T_{off,i} (\mu_{g,i}^{t-1} - \mu_{g,i}^t) \\ \mu_{g,i}^t P_{g,i,min} \leq P_{g,i}^t \leq \mu_{g,i}^t P_{g,i,max} \\ \mu_{g,i}^t P_{g,i}^t - \mu_{g,i}^{t-1} P_{g,i}^{t-1} \leq P_{g,i,up} \\ \mu_{g,i}^{t-1} P_{g,i}^{t-1} - \mu_{g,i}^t P_{g,i}^t \leq P_{g,i,down} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $T_{on,i}$, $T_{off,i}$ 分别为火电机组 i 的最小开机、停机时间; $P_{g,i,up}$, $P_{g,i,down}$ 分别为火电机组 i 的最大向上爬坡速度、最大向下爬坡速度。

2.3.3 风电出力约束

$$0 \leq P_w^t \leq P_{wind}^t \quad (11)$$

2.3.4 高载能负荷约束

可离散负荷调节容量约束见式(1), 调节特性约束见式(2), 可连续负荷调节容量约束见式(3)。

3 基于数据驱动的源荷分布鲁棒优化调度模型

3.1 风电出力场景概率不确定集的构建

基于数据驱动的分布鲁棒只须获取风电出力的历史数据, 不需要风电的真实概率分布, 通过构建含有风电场景概率信息的不确定集处理风电的不确定性, 可以避免概率分布函数选取不准确而

引起的偏差^[7], 因此在本文得到应用。首先, 选取 M 组风电出力历史数据, 通过聚类的方法得到 N 个离散典型场景, 描述可能的风电出力, 每个典型场景的初始概率 $P_{0,n}$ 等于其自身所包含的历史数据量除以总的历史数据量; 其次, 由于所得典型场景的初始概率与风电真实概率分布仍有偏差, 因此以初始概率分布为中心, 利用 1-范数和 ∞ -范数条件组成的综合范数不确定集对风电典型场景的真实发生概率进行约束, 其中: 1-范数将所有离散场景概率与初始概率的偏差之和进行约束, 从整体上对风电场景概率不确定性进行刻画; ∞ -范数是将每个典型场景概率与初始场景概率的最大偏差进行约束, 从最大波动程度上对风电场景概率不确定性进行刻画。故基于综合范数的概率分布不确定集为^[17]

$$\Omega = \left\{ P_n \mid \begin{cases} P_n \geq 0, n=1, 2, \dots, N \\ \sum_{n=1}^N P_n = 1 \\ \sum_{n=1}^N |P_n - P_{0,n}| \leq \theta_1 \\ \max_{1 \leq n \leq N} |P_n - P_{0,n}| \leq \theta_\infty \end{cases} \right\} \quad (12)$$

式中: θ_1 , θ_∞ 分别为 1-范数和 ∞ -范数下的距离容忍水平; P_n 为第 n 个风电出力场景的概率值。

基于文献[18]得到距离容忍水平与历史场景数量 M 、典型场景数量 N 、置信度 α_1 和 α_∞ 之间的关系为

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{N}{2M} \ln \frac{2N}{1-\alpha_1} \\ \theta_\infty = \frac{1}{2M} \ln \frac{2N}{1-\alpha_\infty} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 随着历史数据 M 的增大, 概率允许的距离容忍水平 θ_1, θ_∞ 趋于零, 这说明概率分布不确定集区间也越来越小, 风电场景的概率分布值也趋于真实概率, 故风电不确定性、保守度降低。

3.2 分布鲁棒模型建立

本文建立了源荷两阶段分布鲁棒调度模型, 第一阶段为日前调度阶段, 在确定性场景的前提下, 以综合运行成本最小为目标确定日前调度方案, 由于可离散调节负荷功率不能频繁变动, 所以只参与日前阶段调度; 第二阶段为实时调整阶段, 在风电不确定性环境下, 以各连续设备实时调整成本最小化为目标, 确定最优调整方案, 于是目标

函数转化为

$$\min \left\{ F_{\text{gen}} + F_{\text{green}} + F_{\text{carbon}} + F_{\text{high_load}} + F_{\text{wind}} + F_{\text{yw}} + \max_{\{p_n\} \in \Omega} \left[\sum_{n=1}^N P_n \min \left\{ \sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^J c_{j,t} \Delta P_{j,t,n} + \beta_t (P_{\text{wind},n}^t - P_{w,n}^t) \right] \right\} \right] \right\} \quad (14)$$

式中： Ω 为风电出力场景的概率可行域； J 为第二阶段连续设备中除风电外的个数； $c_{j,t}$ 为除风电外第 j 个连续设备的单位调节成本； $\Delta P_{j,t,n}$ 为第 n 个场景下第 j 个连续设备在 t 时刻的调整量； β_t 为 t 时刻风电实时弃风成本； $P_{\text{wind},n}^t$ 为第 n 个场景下风电在 t 时刻预测出力； $P_{w,n}^t$ 为第 n 个场景下风电在 t 时刻实际出力。

式(14)中的经济调度模型为min-max-min的三层两阶段优化问题,内部的max-min问题的含义:在最小化各连续设备进行出力调整而产生的调整成本基础上,求解风电出力场景的最恶劣概率分布;外部min问题的含义:在已知风电出力场景最恶劣的概率分布下求解最经济的两阶段调度方案。在求解内部第二阶段问题时,第一阶段得到的各设备开关状态和出力将作为确定的参数传递到第二阶段。第二阶段的约束条件包括机组、连续负荷、风电的实时出力必须满足功率等式约束,出力上、下限约束以及爬坡约束,其表达式与第一阶段约束对应,此处不再赘述。

3.3 分布鲁棒模型求解

CCG算法具有计算效率高、迭代次数少等优点,故本文采用CCG算法。将式(14)改写为

$$\begin{cases} \min_x a^T x + \max_{\{p_n\} \in \Omega} \sum_{n=1}^N P_n \min_{y_n \in Y(x, p_n)} b^T y_n + c^T \xi_n \\ \text{s.t. } Ax = d \\ Bx \leq e \\ Cy_n \leq D\xi_n \\ Ex + Fy_n = f \\ Gx + Hy_n \leq g \end{cases} \quad (15)$$

式中： x 为日前调度阶段的变量,包括常规机组的启停状态、出力,可离散调节负荷、可连续调节负荷的响应状态、出力； y_n 为第 n 个场景下的实时调度阶段变量,包括常规机组的调整量、可连续调节负荷的调整量、风电实时出力； ξ_n 为第 n 个场景下的风电预测出力向量； a, b, c 为目标函数(15)对应的成本系数； $a^T x$ 为日前调度成本； $b^T y_n$ 为实时

阶段调整成本； $c^T \xi_n$ 为实时阶段弃风成本； A, B 分别为日前调度阶段等式和不等式约束中与变量 x 对应的系数矩阵； d, e 分别为对应的系数向量； C 为第二阶段风电出力变量对应的系数矩阵； D 为风电典型场景预测系数矩阵； E, F, G, H 分别为两阶段调度等式和不等式约束中与变量 x, y_n 对应的系数矩阵； f, g 为对应的系数向量；式(15)中约束条件前两个为日前调度阶段等式和不等式约束,对应式(1)~(3),代表高载能负荷调节容量约束、调节特性约束,式(8)~(11)代表系统功率平衡约束、旋转备用约束、机组启停、爬坡、出力上、下限约束、风电出力约束；式(15)中约束条件后3个为实时调度阶段约束,具体表示:在日前调度阶段的基础上,各连续设备的调整量须要满足出力上、下限、爬坡以及功率平衡等式约束,与日前调度阶段约束条件对应。

4 算例分析

4.1 基本参数设定

本文基于IEEE 39节点系统进行算例分析,验证模型的有效性,系统结构如图2所示。在节点27处并入一个容量为900 MW的风电场。火电机组相关参数见表1。高载能负荷相关参数见表2。

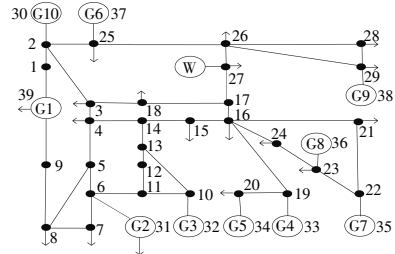


图2 IEEE 39节点系统拓扑结构

Fig.2 IEEE 39 node system topology

表1 火电机组相关数据

Table 1 Thermal power unit related data

火电机组	P_{max} MW	P_{min} MW	a 元/MW ² ·h	b 元/MW·h	c 元/h	σ t/(MW·h)
G1	570	300	0.152 4	38.537	786.798	0.98
G2	570	280	0.105 8	46.159	451.159	0.95
G3	440	280	0.028 0	40.396	1 049.997	0.93
G4	400	265	0.035 4	38.305	1 243.531	1.13
G5	343	260	0.021 1	36.327	1 658.569	1.15
G6	280	157	0.017 9	38.270	1 356.659	0.86
G7	230	150	0.012 1	36.510	1 450.704	0.68
G8	220	147	0.012 1	36.510	1 450.704	0.95
G9	180	120	0.109 0	39.580	1 455.605	1.32
G10	155	110	0.129 5	40.540	1 469.402	0.59

表 2 高载能负荷相关参数
Table 2 High energy load related parameters

负荷类型	额定功率	调节功率/MW		持续时间/h		价格 元/MW·h
	MW	上限	下限	最小	最大	
电解铝	700	70	35	4	8	60
碳化硅	200	40	8	4	8	80
铁合金	165	35	10			100

表 3 不同情形优化结果
Table 3 Optimization results of different scenarios

成本	情形 1	情形 2	情形 3	情形 4
运行成本/万元	339.308	328.810	326.695	333.785
绿证成本/万元		-10.970	-34.260	-35.512
碳交易成本/万元				-14.616
高载能负荷调度成本/万元			17.874	19.474
运维成本/万元	122.583	147.870	157.589	158.909
弃风成本/万元	52.821	22.476	10.812	9.228
实时调整成本/万元	11.551	12.523	10.560	10.446
总成本/万元	526.263	500.709	489.270	481.714
碳排放量/t	55 232	53 200	52 978	52 083

风电及常规负荷预测数据见图 3。

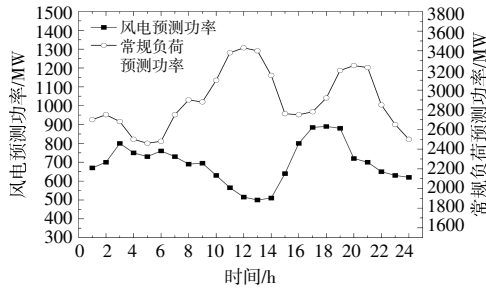


图 3 风电和负荷预测值

Fig.3 Wind power and load forecasts

本文设定单个绿证要求的可再生能源发电量为 1 MW,单本绿证价格为 200 元,可再生能源消纳权重系数取 25%,弃风成本设置为 120 元/(MW·h),风电单位成本维护系数取 100 元/(MW·h)。文中算例分析设定风电服从正态分布,以风电预测数据为均值,0.15 倍方差生成 1 000 组随机场景数据代表风电历史数据,通过聚类得到 10 组典型场景及初始概率,设定 1-范数为 0.5,∞-范数为 0.99^[9],构成综合范数概率分布不确定集。最后在 MATLAB 下调用高效求解器 cplex 进行求解。

4.2 运行结果分析

为了验证绿证-碳交易机制、高载能负荷参与需求响应的电力系统优化运行的有效性,设计 4 种情形进行对比分析。

情形 1:不考虑绿证和碳交易机制,高载能负荷不参与调节;情形 2:在情形 1 的基础上考虑绿证交易机制;情形 3:在情形 2 的基础上将高载能负荷参与调度;情形 4:在情形 3 的基础上考虑碳交易机制。

不同情形优化结果见表 3,风电出力见图 4。

由表 3 和图 4 可知:情形 1 的风电出力最小,弃风成本、碳排放量、总成本均最大;情形 2 相较于情形 1 弃风成本减小了 30.345 万元,并且绿证机制使系统获得收益 10.97 万元,使系统总成本

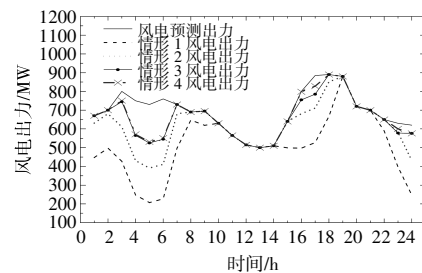


图 4 不同情形风电出力

Fig.4 Wind power output in different scenarios

减少 25.554 万元;此外,风能为清洁能源有助于碳减排,情形 2 碳排放量减少了 2 032 t,这表明绿证机制可促进风电出力,减少碳排放量;但是情形 2 的实时调整成本最大,这是由于绿证机制在促进风电出力的同时,挤占常规电源的空间,使常规电源的出力在较长时间里处于较低水平,因而调节能力最差。

图 5 为情形 3 高载能负荷功率响应曲线。

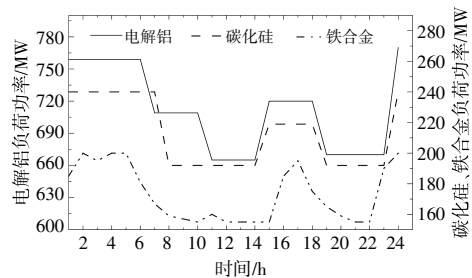


图 5 情形 3 高载能负荷功率响应曲线

Fig.5 Scene 3 high energy load power regulation curve

由图 5 可以看出:在绿证激励的作用下,高载能负荷在弃风较大的 1:00-7:00,15:00-18:00 功率均进行上调,由于夜间风电出力较高,常规负荷功率较小,因此在 1:00-7:00 高载能负荷上调幅度更大;在风电出力较小,常规负荷功率较大的

8:00-14:00,19:00-23:00,火电机组出力较高,为减小火电机组的调节压力,高载能负荷功率均进行下调;相较于可离散调节负荷,铁合金负荷由于没有功率稳定时长约束,因此可以在调节容量范围内实时追踪风电出力,灵活响应调节需求,从而提高电力系统调节能力。由于高载能负荷参与调度,情形3相较于情形2增加绿证收益23.29万元,减小弃风成本、实时调整成本、总成本分别为11.664万元,1.963万元,11.439万元,减少碳排放量为222t,这表明高载能负荷的引入可以更好地促进风电消纳,降低系统碳排放量。

图6为情形4高载能负荷调节响应曲线。图7为情形3、情形4两种情景下,10台不同机组(G1~G10)的出力。

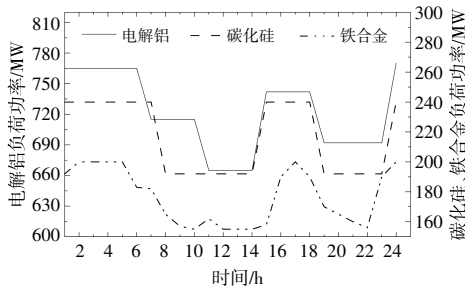


图6 情形4高载能负荷功率响应曲线

Fig.6 Scene 4 high energy load power regulation curve

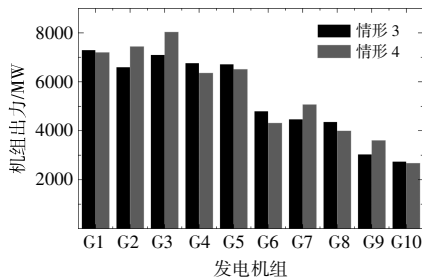


图7 情形3、情形4各火电机组出力

Fig.7 Scene 3,scene 4 of each thermal power unit output

由图6可知,在考虑碳交易机制后,高载能负荷的功率均进一步上调,在1:00-7:00,电解铝、碳化硅负荷已接近功率上限。由图7可知,情形4中机组G2,G3,G7,G9的出力明显增加,这是由于情形4中计及了碳交易机制,并且G2,G3,G7,G9的碳排放强度低于初始分配碳排放额度,使系统获得碳收益14.616万元,降低碳排放量895t,降低弃风成本1.584万元。这表明碳交易机制也能激发高载能负荷参与系统调节,并且在降低碳排放方面效果显著。因此,当综合考虑绿证和碳交

易机制时,系统风电消纳量最大,兼顾绿证收益与碳交易收益使系统总成本最优。

图8为情形2和情形4两种情形火电机组出力情况。

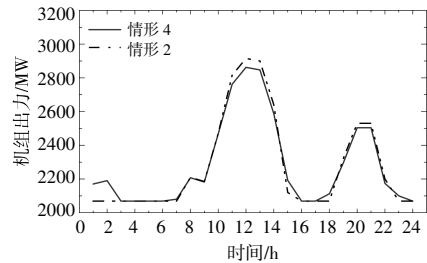


图8 情形2、情形4火电机组出力

Fig.8 Scene 2,scene 4 thermal power unit output

由图8可以看出:在风电出力较小、常规负荷功率较大的时段,情形4高载能负荷均下调功率,可以有效减小系统负荷高峰期的负荷峰值,避免火电机组运行在较高出力水平;情形2在1:00-7:00,16:00-18:00,23:00-24:00,常规电源均运行在最小出力,情形4由于高载能负荷在风电出力较大,常规负荷功率较小的时段均上调功率,故机组在3:00-6:00,16:00-17:00,24:00运行在最小出力,较情形1减少了5个时段,从而有效避免常规电源长时间处于最小出力附近。因此高载能负荷的投入可以在整体上平滑火电机组出力,提高电源调节能力,故情形4实时调整成本最低。

4.3 分布鲁棒优化效果及方法对比

4.3.1 不同置信度的影响

式(12)用综合范数约束条件下的概率分布不确定集来刻画风电出力典型场景实际发生的概率,在综合范数中, α_1 和 α_∞ 的取值不同会导致概率分布不确定集区间不同,进而影响优化结果。因此当历史数据个数为1000个时,设 α_1 的取值为[0.2,0.5,0.9], α_∞ 的取值为[0.2,0.5,0.99],得到的优化结果如表4所示。

表4 不同置信度的优化结果比较

Table 4 Comparison of optimization results with different confidence levels

优化结果/万元	$\alpha_\infty=0.2$	$\alpha_\infty=0.5$	$\alpha_\infty=0.99$
$\alpha_1=0.2$	477.894	479.156	480.345
$\alpha_1=0.5$	478.652	480.112	481.714
$\alpha_1=0.99$	478.913	481.105	482.674

从表4可以看出,随着 α_1 和 α_∞ 的增大,系统总成本也随之增大。这是因为当置信度 α_1 和 α_∞ 增大时,1-范数和 ∞ -范数下的距离容忍水平也

越大,使得概率分布不确定集变大,因此子问题会求解出更加恶劣的场景概率,使得风电不确定性增大,保守度更高,故经济成本也随之增大。

4.3.2 不同方法对比

将随机优化方法、鲁棒优化方法和本文所提的分布鲁棒方法进行对比,得到的计算结果如图9所示。

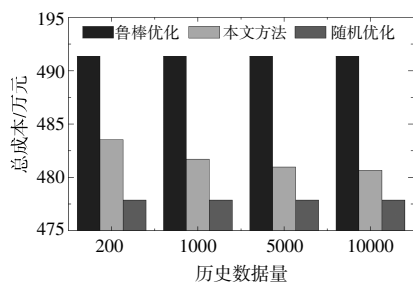


图9 不同方法的优化结果

Fig.9 Optimization results for different methods

由图9可知,分布鲁棒优化的总成本会随着历史数据的增加而不断降低。这是由于分布鲁棒优化基于风电出力历史数据构建概率分布不确定集,并在其中寻找最恶劣的场景概率进行优化,既考虑了风电历史信息,又具有一定的鲁棒性,故使得调度结果的鲁棒性和准确性均得到改善,并且随着历史数据的增加,降低了决策的保守度,因此具有更好的经济性。

5 结论

本文以促进风电消纳,提高电力系统调节能力为出发点,在考虑风电出力不确定性的基础上,提出计及绿证-碳交易的源荷分布鲁棒优化调度模型,通过算例分析,得到以下结论。

①高载能负荷具有参与系统调度的良好条件,通过安排不同特性的高载能负荷可以有效促进风电消纳,提高电力系统调节能力。

②绿证和碳交易机制在保证系统一定比例绿色电能时,降低机组的碳排放,合理调整机组出力,并且激励负荷侧资源充分参与电力系统调节,使系统总成本最优。

参考文献:

[1] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5506.
 [2] 张文军,胡浩,易善军,等.输电网新能源出力和负荷

调节特性协调调度策略[J].可再生能源,2022,40(7):959-965.
 [3] Hu Z, Duan B, Xu Y, et al. Demand response optimization of power generation and consumption in energy intensive enterprise [A].2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies -Asia [C].Bangkok:IEEE, 2015.1-6.
 [4] 吕良,刘文颖,吕思琦,等.高载能负荷参与调节消纳受阻风电的控制策略[J].电网与清洁能源,2017,33(6):103-110,115.
 [5] 张海亮,王艺博,蔡国伟,等.面向风电消纳与电熔镁高载能负荷调控的源荷协调优化策略[J].电工技术学报,2022,37(17):4401-4410.
 [6] 郭鹏,文晶,朱丹丹,等.基于源-荷互动的大规模风电消纳协调控制策略[J].电工技术学报,2017,32(3):1-9.
 [7] 吕泉,王海霞,陈天佑,等.考虑风电不确定性的热电厂蓄热罐运行策略[J].电力系统自动化,2015,39(14):23-29.
 [8] 李星辰,袁旭峰,李沛然,等.基于改进 QPSO 算法的主动配电网削峰填谷策略研究[J].电测与仪表,2022,59(2):120-125.
 [9] 沈方,邓鑫阳,张明理,等.多形态冷热负荷平抑风电不确定性的鲁棒优化方法[J].可再生能源,2019,37(1):85-91.
 [10] 陈光宇,张子祥,李庆,等.基于 Hausdorff 距离的电-热-气综合能源系统分布鲁棒优化调度[J].电网技术,2022,46(12):4906-4913.
 [11] 韩志永,张宇华,李兵.基于多场景技术的冷热电虚拟电厂两阶段优化调度 [J]. 电测与仪表,2022,59(3):174-180.
 [12] 赵国涛,钱国明,丁泉,等.基于区块链的可再生能源消纳激励机制研究[J].华电技术,2021,43(4):71-77.
 [13] 骆钊,秦景辉,梁俊宇,等.含碳-绿色证书联合交易机制的综合能源系统日前优化调度[J].电力自动化设备,2021,41(9):248-255.
 [14] 王馥珏,宋国涛.基于碳交易的城市能源系统规划方法研究[J].南京理工大学学报,2022,46(4):501-507.
 [15] 陈海鹏,周越豪,赵畅,等.考虑高载能负荷参与的多时间尺度风电消纳调度[J].东北电力大学学报,2022,42(6):39-51.
 [16] 李娟,王玲,孙康杰,等.考虑风电不确定性和有功无功联合调整的两阶段优化调度[J].东北电力大学学报,2023,43(3):72-81.
 [17] Zhao Chaoyue,Guan Yongpei. Data-driven stochastic unit commitment for integrating wind generation[J].IEEE

- Transactions on Power Systems,2016,31(4):2587-2596.
- [18] 杨宏基,周明,武昭原,等.含光热电站的电-热能源系统优化运行机制[J].电网技术,2022,46(1):175-185.
- [19] 税月,刘俊勇,高红均,等.考虑风电不确定性的电热综合系统分布鲁棒协调优化调度模型[J].中国电机工程学报,2018,38(24):7235-7247,7450.

Optimize the scheduling of the source and load of the blue rod taking into account the green certificate-carbon transaction

Song Xu¹, Zhang Xinyan^{1,2}

(1.School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2.Engineering Research of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology, Urumqi 830047, China)

Abstract: In response to the difficulties faced by the power system in wind power consumption and the shortage of regulation capacity, this article establishes a robust optimization scheduling model for source load distribution that takes into account green certificate carbon trading. Firstly, green certificate trading mechanism and carbon trading mechanism are introduced on the power supply side to enhance the grid connected power of wind power, and high load capacity is introduced on the load side to improve the system regulation capability; Secondly, in order to reduce the impact of uncertain wind power output, a data-driven distributed robust method is adopted to construct a probability distribution uncertainty set based on historical wind power output data, and then optimize the worst-case scenario using column constraint generation algorithm; Finally, based on the IEEE 39 node system, the verification results show that by integrating adjustable resources from both the source and load sides for collaborative optimization, it is possible to promote wind power consumption while ensuring good regulation capability of the power system.

Keywords: wind power consumption; green certificate trading mechanism; carbon emission trading mechanism; energy-intensive loads; distributionally robust