

基于绿电和自愿减排量交易的 园区低碳电力运营优化

刘秋华¹, 刘鑫², 郑亚先³, 杨圣城²

(1.南京工程学院 经济管理学院, 江苏 南京 211167; 2.南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167;
3.中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 为保证园区电力运营经济性,提高清洁电能的使用比例,文章提出了一种基于绿电和自愿减排量交易的园区低碳电力运营优化模型。该模型综合考虑了绿电和火电的购电成本、光伏发电成本及自愿减排量收益,以总运营成本最小为目标函数,结合随机概率约束,分中长期、日前和实时三阶段对绿电、火电电量以及光伏发电量进行优化。以南京市某企业园区的数据为基础,在自愿减排量价格合理的前提下,该优化模型可小幅降低园区总运营成本,并且显著提高了清洁电能的使用比例和园区应对扰动的能力。另外,就自愿减排量价格以及置信度取值对优化结果的影响进行了分析。

关键词: 绿电; 自愿减排量; 低碳电力运营; 随机概率约束

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)02-0233-08

0 引言

园区是能源消费碳排放的主要来源之一,为实现“碳达峰”和“碳中和”的目标,需要鼓励园区购买绿电,深化园区与碳排放权交易市场和电力交易市场的联系,促进园区电力低碳化发展^[1-3]。

随着园区低碳排放成为趋势,国内外学者对此进行了研究。文献[4]依据碳排放流理论建立了园区碳排放模型,并对园区碳流分布进行优化,降低碳排放。文献[5-7]通过耦合电转气技术充分利用园区的弃风弃光,从而减少非清洁能源使用量,降低园区碳排放水平。文献[8]将园区可再生能源发电产生的碳减排量折算成国家核证自愿减排量,并在碳排放权交易市场上出售,使园区在获得碳收益的同时提高了碳排放权交易市场的活跃度。上述文献主要围绕降低园区碳排放量展开。此外,对如何促进园区消费绿电的研究也逐渐增多。文献[9]基于竞价关系提出了考虑绿色能源消费偏好的电力交易优化模型,算例表明,随着园区绿色能源偏好的增加,园区电能结构不断优化。文献[10]基于清洁能源的时序性建立了绿电指数评价指标,通过提高园区绿电指数,实现园区低碳运行与电网清洁能源消纳的统一。文献[9,10]主要通过建立评价指标促使园区消费绿电。文献[11]从

用电成本角度出发,提出多微网间电能可信自治交易方法,通过合理量化分布式可再生能源绿色属性的经济价值,激发园区消纳绿电的积极性。

现有研究虽然对园区碳减排收益以及绿电消纳做了积极探索,但是忽略了因使用绿电而获得自愿减排量收益的潜力。因此,为提高清洁电能消纳量,本文基于绿电和自愿减排量交易提出了园区低碳电力运营优化模型。首先,对园区参与电力市场和碳排放权交易市场的运营模式进行分析,并建立购电成本和碳交易收益模型;其次,根据园区使用的清洁电量计算园区可出售自愿减排量;再次,以总运营成本最小为目标,结合随机概率约束优化园区各阶段绿电、火电电量及光伏发电量;算例分析表明,自愿减排量收益合适时,该优化模型可显著提高园区清洁电能使用比例和应对扰动的能力,且园区电力运营经济性也稍有提升;最后,讨论自愿减排量价格对绿电购电量和总运营成本的影响,并给出参考指标下置信度的取值建议。

1 园区参与电力市场及碳排放权交易市场的运行模式

1.1 园区参与电力市场及碳排放权交易市场方式
园区能源供应者是园区所有企业的代表,作

收稿日期: 2023-06-17。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52107099)。

作者简介: 刘秋华(1963-),女,博士,教授,研究方向为电力市场。E-mail:njtlqh@126.com

为电力市场的用户参与电力交易。主要交易内容包括与发电商或售电公司签订中长期电力合约,并在电力现货市场上购买缺额电量或售出剩余电量。同时,园区能源供应者代表园区参与自愿减排量交易,获得使用绿电以及自建光伏的碳交易收益。本文假设火电发电商与绿电发电商均同时参与电力市场中长期交易和现货交易,园区参与电力市场及碳排放权交易市场的框架如图 1 所示。

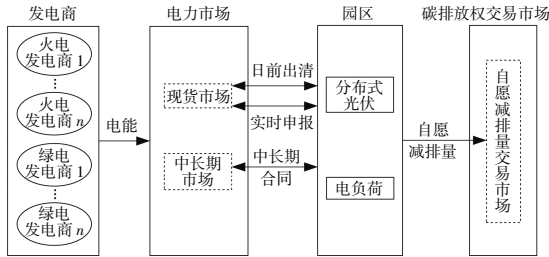


图 1 园区参与电力市场及碳排放权交易市场的框架

Fig.1 Framework of industrial park participating in electricity market and carbon trading market

1.2 电力市场购电成本模型

国内现行电力现货市场试点通常采用差价合约机制,结合中长期合约的偏差考核机制,形成涉及实时、日前和中长期市场的电量及电价差额结算规则^[12]。参考结算规则,园区电费为

$$C_{\text{fee}} = C_{\text{fee}}^{\text{CES}} + C_{\text{fee}}^{\text{TE}} + C_{\text{LP}} \quad (1)$$

$$C_{\text{fee}}^i = \sum_{t=1}^T Q_{L,t}^i p_{L,t}^i + \sum_{t=1}^T (Q_{D,t}^i - Q_{L,t}^i) p_{D,t}^i + \sum_{t=1}^T (Q_{R,t}^i - Q_{D,t}^i) p_{R,t}^i + C_{R,t}^i \quad (2)$$

$$C_{\text{LP}} = \sum_{t=1}^T [(Q_{L,t}^{\text{CES}} - Q_{D,t}^{\text{CES}}) + (Q_{L,t}^{\text{TE}} - Q_{D,t}^{\text{TE}})] p_{\text{LD}} \quad (3)$$

式中: C_{fee} 为园区总购电成本; $C_{\text{fee}}^{\text{CES}}$ 为购买绿电成本,CES表示绿电; $C_{\text{fee}}^{\text{TE}}$ 为购买火电成本,TE表示火电; C_{LP} 为折算到当日的中长期合约偏差考核成本; i 为外购电量电源类型, $i \in \{\text{CES}, \text{TE}\}$; $Q_{L,t}^i$ 为园区签订的中长期合约分解到 t 时段的电量; $p_{L,t}^i$ 为 t 时段的中长期电价; $Q_{D,t}^i$ 为 t 时段园区在日前市场购电量; $p_{D,t}^i$ 为 t 时段的日前出清电价; $Q_{R,t}^i$ 为 t 时段园区在实时市场的购电量; $p_{R,t}^i$ 为 t 时段现货市场的实时电价; p_{LD} 为偏差电量惩罚价格; $C_{R,t}^i$ 为

t 时段的偏差差价收益,表示园区返还给售电公司的允许偏差外的实时市场与日前市场分时价格的价差收益。

当 $Q_{D,t}^i > Q_{R,t}^i (1+\delta)$ 且 $p_{R,t}^i > p_{D,t}^i$ 时,有:

$$C_{R,t}^i = \sum_{t=1}^T [Q_{D,t}^i - Q_{R,t}^i (1+\delta)] (p_{R,t}^i - p_{D,t}^i) \quad (4)$$

当 $Q_{D,t}^i < Q_{R,t}^i (1-\delta)$ 且 $p_{R,t}^i < p_{D,t}^i$ 时,有:

$$C_{R,t}^i = \sum_{t=1}^T [Q_{R,t}^i (1-\delta) - Q_{D,t}^i] (p_{D,t}^i - p_{R,t}^i) \quad (5)$$

式中: δ 为允许偏差范围。

1.3 碳交易收益模型

国内碳排放权交易市场试点的交易品类主要为碳配额与国家核证自愿减排量。园区可参与自愿减排量交易,以市场价格出售国家核证自愿减排量,获得的碳交易收益为

$$E_{\text{env}} = p_{\text{CCER}} ER \quad (6)$$

式中: E_{env} 为碳交易收益; p_{CCER} 为国家核证自愿减排量的交易价格; ER 为园区可出售国家核证自愿减排量。

2 园区电力运营可出售自愿减排量模型

2.1 分布式光伏发电模型

屋顶光伏具有投资成本低、建设快和绿色可再生的特点,在园区电力系统中应用广泛^[13]。本文假设园区分布式光伏仅发自用,分布式光伏发电功率为

$$P_t^{\text{PV}} = \begin{cases} S_{\text{PV}} \frac{I_t}{I}, & 0 \leq I_t < I \\ S_{\text{PV}}, & I_t \geq I \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_t^{PV} 为 t 时段光伏发电功率; S_{PV} 为光伏机组的配置容量; I_t 为 t 时段的光照强度; I 为额定光照强度。

则 t 时段的光伏发电量为

$$Q_t^{\text{PV}} = P_t^{\text{PV}} \Delta t \quad (8)$$

式中: Q_t^{PV} 为 t 时段光伏发电量; Δt 为 t 时段的时间间隔。

2.2 国家核证自愿减排量交易模型

国家核证自愿减排量是指由可再生能源、林业碳汇和甲烷利用等项目产生且经过国家核证的温室气体减排量。绿电和分布式光伏均属于可再生能源项目,对应的国家核证自愿减排量为

$$ER_j = BE_j - PE_j - L_j \quad (9)$$

$$ER_j = \left(\sum_{t=1}^T Q_t^j \right) EF \quad (10)$$

式中: j 为产生自愿减排量的电源类型, $j \in \{CES, PV\}$, PV 为分布式光伏; ER_j 为该电源产生的总自愿减排量; BE_j 为采用 j 类清洁能源发电减少的碳排放; PE_j 为 j 类清洁能源发电产生的碳排放, 对本文而言, $PE_j = 0$; L_j 为 j 类清洁能源泄漏引起的碳排放, 对本文而言, $L_j = 0$; Q_t^j 为 t 时段 j 类清洁能源电量; EF 为基准线排放因子, 表示使用清洁能源生产单位电能对应可减少的碳排放, 其表达式为

$$EF = \omega_{OM} EF_{OM} + \omega_{BM} EF_{BM} \quad (11)$$

式中: ω_{OM} 为电量边际排放因子的权重, 默认值为 50%; EF_{OM} 为电量边际排放因子, 表示该区域电网中除低运行成本电厂和必须运行电厂外所有发电资源的单位发电量平均碳排放; ω_{BM} 为容量边际排放因子的权重, 默认值为 50%; EF_{BM} 为容量边际排放因子, 表示选定的若干个新增机组的单位发电量平均碳排放。

2.3 园区可出售自愿减排量模型

本文假设园区获得的国家核证自愿减排量全部参与自愿减排量交易, 可出售自愿减排量为绿电以及光伏发电产生的自愿减排量之和, 即:

$$ER = ER_{CES} + ER_{PV} \quad (12)$$

3 园区参与电力市场及碳排放权交易市场优化模型

基于上述分析, 本文提出如下电力运营优化策略: 园区在中长期、日前和实时购电阶段, 均综合考虑购电成本和碳交易收益, 以总运营成本最小为目标, 结合园区负荷和光伏的预测值或实际值, 求得当前阶段最佳的绿电、火电电量; 在中长期和日前优化中引入随机概率约束, 减小负荷和光伏预测误差的影响。

3.1 目标函数

本文以某 1 d 园区电力运营的总运营成本最小为目标, 按照园区参与电力交易的 3 个阶段分别优化绿电和火电的中长期合约电量、日前申报电量以及实际购电量。总运营成本由购电成本、碳交易收益和光伏发电成本 3 部分构成:

$$\min C = C_{fee} - E_{env} + \sum_{t=1}^T Q_t^{PV} c_{PV} \quad (13)$$

式中: C 为总运营成本; c_{PV} 为园区分布式光伏运维成本。

3.2 约束条件

3.2.1 电功率平衡约束

园区电力系统须时刻保持电功率平衡:

$$P_t^{PV} + P_t^{CES} + P_t^{TE} = P_t^{Load} \quad (14)$$

式中: P_t^{CES} 为 t 时段绿电功率; P_t^{TE} 为 t 时段火电功率; P_t^{Load} 为 t 时段园区电负荷功率。

3.2.2 外部网络交换功率约束

园区电力系统与配电网直接相连, 考虑到电网运行安全性和可靠性, 其功率约束为

$$0 \leq \left| P_t^{CES} + P_t^{TE} \right| \leq P_{tran}^{max} \quad (15)$$

式中: P_{tran}^{max} 为外部网络交换功率上限。

3.2.3 随机概率约束

考虑到园区负荷和光伏预测偏差对前两个优化阶段购电决策的影响, 采用随机概率约束对绿电和火电电量进行裕度设置, 将式(14)进行转化得到概率约束为

$$\Pr \left\{ P_t^{CES} + P_t^{TE} \geq P_t^{Load} - P_t^{PV} \right\} \geq \alpha \quad (16)$$

式中: $\Pr\{\}$ 为条件 $\{\}$ 成立的概率; α 为概率约束成立的置信度。

假设负荷与光伏预测误差服从正态分布, 则式(16)可转化为

$$P_t^{CES} + P_t^{TE} \geq \mu_{P_t^{Load}} - \mu_{P_t^{PV}} + z_\alpha \sqrt{\sigma_{Load}^2 + \sigma_{PV}^2} \geq \alpha \quad (17)$$

式中: $\mu_{P_t^{Load}}, \sigma_{Load}^2$ 分别为负荷的预测功率和正态分布方差; $\mu_{P_t^{PV}}, \sigma_{PV}^2$ 分别为光伏的预测功率和正态分布方差; z_α 为服从标准正态分布的 α 分位数。

4 算例分析

4.1 基础数据

选取南京市某企业园区作为算例, 分析验证本文提出的园区电力运营优化策略的合理性。该园区配备 13 MW 光伏机组, 与外部电网共同组成园区电负荷的电源, 园区电力网络拓扑结构如图 2 所示。

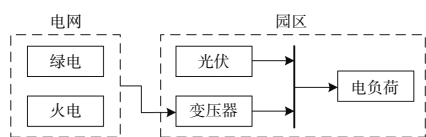


图2 园区电力网络拓扑结构

Fig.2 Topology of park power network

额定光照强度取 1 kW/m^2 ，分布式光伏运维成本取 $0.1 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。不同优化阶段下园区光照强度曲线如图3所示。

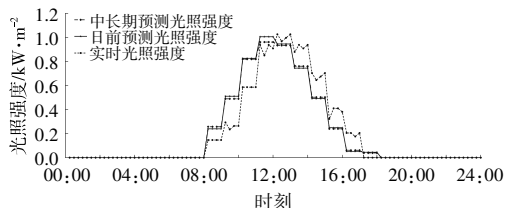


图3 不同阶段园区典型光照强度曲线

Fig.3 Typical light intensity curve of the park in different stages

本文电量边际排放因子取 $0.792 \text{ tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ ，容量边际排放因子取 $0.387 \text{ tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ ，碳排放权交易市场核证自愿减排量成交价取 $60 \text{ 元}/\text{tCO}_2$ 。依据园区所在地区的实际情况，现货市场价差收益允许偏差取 100% ，偏差电量惩罚价格取 $0.02 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，外部网络交换功率上限取 70 MW ，根据中长期预测负荷量的 90% 确定中长期合约电量。不同优化阶段火电及绿电的电价曲线如图4,5所示。

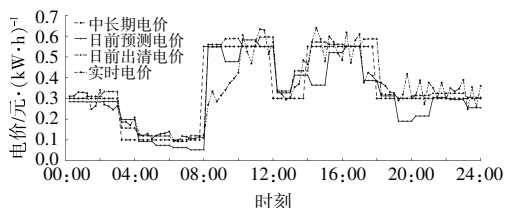


图4 不同阶段火电电价曲线

Fig.4 Power price curve of thermal power in different stages

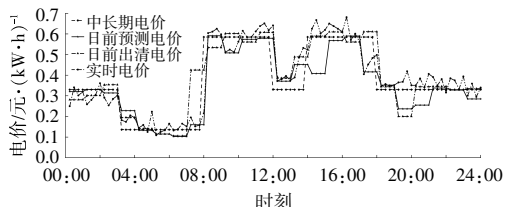


图5 不同阶段绿电电价曲线

Fig.5 Green electricity price curve in different stages

4.2 分阶段优化结果分析

根据前文所述优化模型，设置情景1：园区电源类型为火电、绿电及光伏，并考虑随机概率约

束。采用改进粒子群算法求解优化模型，设置初始种群数量为 500 ，迭代次数为 100 ，随机概率约束置信度为 0.95 ，求解得到园区各优化阶段绿电、火电电量和光伏发电量。

4.2.1 中长期优化阶段

在中长期优化阶段，园区以绿电的中长期峰谷电价及光伏的运维成本为基础，结合碳交易收益分别算得两类电源的综合用电成本，其中火电的综合用电成本为火电中长期峰谷电价。根据中长期预测负荷和光照强度，按照综合用电成本低者优先原则，求得园区与发电商或售电公司签订的绿电总合约功率和火电总合约功率。按中长期负荷预测曲线分解总合约功率后，园区各时刻绿电、火电合约功率和光伏预测功率如图6所示。

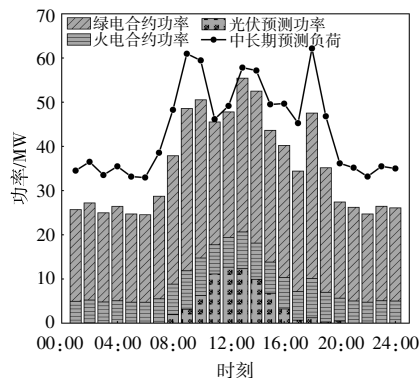


图6 中长期阶段优化计算结果

Fig.6 Optimized calculation results in medium and long stage

在 $11:00-14:00$ ，由于各时刻中长期预测负荷相对较高，使得分解至各时刻的合约功率较高，且该时段光伏预测功率也处在较高水平。因此，在上述时段，各时刻中长期预测负荷与总功率的差值较小。其余时刻，总功率均明显小于对应时刻的中长期预测负荷。

4.2.2 日前优化阶段

在日前申报阶段，由于日前出清电价还未发布，园区根据日前预测电价计算次日的绿电和火电申报功率。申报功率以中长期合约功率为基础，结合日前预测电价下各类电源的综合用电成本调整电源功率，园区各时刻日前申报功率及光伏预测功率如图7所示。

根据日前预测负荷、光伏预测功率以及中长期合约功率，算得日前缺额功率。日前缺额功率由日前综合用电成本较低的电源补充，并且在随机概率约束作用下补充的电能略高于对应时刻的

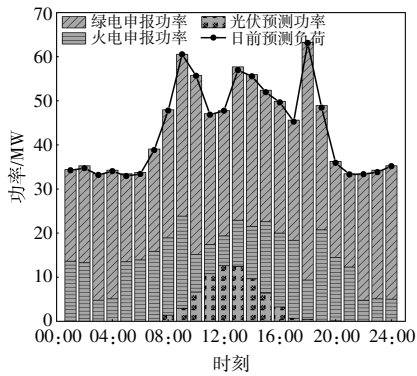


图7 日前阶段优化计算结果

Fig.7 Optimized calculation results in day-ahead stage

日前缺额功率,以降低实时阶段负荷与光伏功率偏差对运营经济性的影响。

4.2.3 实时优化阶段

在实时优化阶段,园区购电量及分布式光伏功率如图8所示。

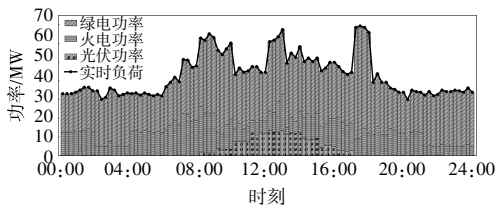


图8 实时阶段优化计算结果

Fig.8 Optimized calculation results in real-time stage

园区实际分时功率以日前市场申报的分时功率为基础,结合园区实际供电需求,调整绿电和火电功率。在日前申报功率不足的时刻,园区以实时电价下综合用电成本较低的电源补充;在日前申报功率过剩的时刻,园区根据实时电价下两类电源的售电收益大小,优先削减收益较大的电源电量。园区实际消纳绿电和光伏电量约 768.31 MW·h,占总用电量的 73.76%。

4.3 对比分析

针对所述算例进行如下对比分析:①与园区现行电力运营模式对比,验证优化模型在提高园区清洁电能使用比例方面的有效性;②与无随机概率约束的优化方法对比,验证随机概率约束在提高园区应对扰动能力方面的优越性。

4.3.1 与现行电力运营模式对比分析

基于园区现行电力运营模式,设置情景2:园区电源类型仅为火电及光伏,并考虑随机概率约束。其他建模与计算步骤与情景1完全相同,优化结果如表1所示。

表1 情景1和2园区电力运营结果比较
Table 1 Comparison of park power operation results in case 1 and 2

情景	清洁电能使用比例/%	购电成本/元	光伏发电成本/元	碳交易收益/元	总运营成本/元
1	73.76	375 576.97	6 609.52	27 177.33	355 009.17
2	6.34	352 708.38	6 608.16	2 337.99	356 979.91

由表1可以看出,相较于仅购买火电的情景2而言,购买绿电以及火电的情景1,园区购电成本以及碳交易收益均较高,而总运营成本较低。在购电成本上,情景1比情景2高出 22 868.59 元,其主要构成部分为中长期市场和日前市场购买高价绿电支出的购电费用。情景1的碳收益约为情景2的 11.62 倍,其中使用绿电产生的碳收益占情景1总碳收益的 91.4%。总运营成本方面,情景1的总运营成本在情景2的基础上减少了 1 970.74 元,占情景2总运营成本的 0.55%。另外,由于情景1消纳大量绿电,使得园区清洁电能使用比例提高了 67.42%。综合而言,在园区电力运营中引入电价较高的绿电,并计及合适的自愿减排量收益,可在小幅提高园区电力运营经济性的同时,显著提升园区清洁电能的使用比例。

4.3.2 与无随机概率约束的优化方法对比分析

为分析随机概率约束在正常情况与大扰动情况下对园区电力运营的影响,体现考虑随机概率约束的优越性,本文增设以下3个情景:情景3的电源类型为火电、绿电及光伏,未考虑随机概率约束,其余设置均与情景1一致;情景4的电源类型为火电、绿电及光伏,并考虑随机概率约束,实际光照强度为零;情景5的电源类型为火电、绿电及光伏,未考虑随机概率约束,实际光照强度为零。情景4与情景5以预测为晴天,实际为阴雨天为例进行模拟,其他建模与计算步骤与情景1完全相同,优化结果如表2,3所示。

表2 情景1,3,4和5电量优化结果对比
Table 2 Comparison of power optimization results in case 1, 3, 4 and 5

优化阶段	电量/MW·h	情景1	情景3	情景4	情景5
中长期	火电合约电量	150.33	143.03	150.33	143.03
	绿电合约电量	630.96	603.23	631.93	603.23
日前	火电申报电量	284.84	295.20	284.23	295.20
	绿电申报电量	696.61	678.79	697.24	678.79
实时	火电购电量	273.31	288.33	313.77	329.42
	绿电购电量	702.21	687.19	727.85	712.20
	光伏发电量	66.10	66.09	0.00	0.00

表3 情景3,4和5园区电力运营结果比较
Table 3 Comparison of park power operation results in case 3, 4 and 5

情景	清洁电能使用比例/%	购电成本/元	光伏发电成本/元	碳交易收益/元	总运营成本/元
3	72.32	375 744.07	6 608.55	26 646.07	355 707.52
4	69.88	409 567.44	0.00	25 746.09	383 821.35
5	68.37	409 766.68	0.00	25 192.54	384 574.14

结合情景1的优化结果和表2,3的优化结果可知,考虑随机概率约束的情景1和情景4,其总运营成本均小于对应未考虑随机概率约束的情景3和情景5。情景4与情景5的总运营成本也比对应正常情况下的情景1与情景3有所增加。在清洁电能使用比例方面,情景1与情景4均高出对应的情景3和情景5约1.5%。与情景3相比,情景1园区的中长期合约电量多35.03 MW·h,为园区在日前市场节省了11 060.16元购电成本。从总运营成本看,情景1比情景3下降了698.35元,约占情景3总运营成本的0.2%。与情景5相比,情景4园区在日前市场多申报电量7.47 MW·h,为园区节约了8.31%的实时市场购电支出,总运营成本节省了752.79元,约占情景5总运营成本的0.2%,与情景1节省的总运营成本比例相近。综合而言,考虑随机概率约束为园区在电能供给上留出一定裕度,既可以节约园区日前购电成本,还可以减少扰动导致的实时购电成本。在两类情况下,考虑随机概率约束所减少的总运营成本比例相近,能够稳定提高园区应对扰动的能力,削弱扰动对园区电力运营总成本的影响。

4.4 自愿减排量价格影响分析

基于情景1,研究不同自愿减排量价格对绿电购电量比例和园区总运营成本的影响,运行结果如图9所示。

由图9可知,当自愿减排量价格低于50元/tCO₂时,随着价格的升高,绿电购电量比例略有提升,总运营成本小幅下降。当自愿减排量价格高于65元/tCO₂时,绿电购电量比例由85%缓慢增至99%,总运营成本随自愿减排量价格升高迅速降低。在自愿减排量价格由50元/tCO₂向65元/tCO₂变化的过程中,绿电购电量比例由10%迅速增至85%,原因在于,绿电均价通常高出火电均价0.03~0.05元/(kW·h)。计及略大于价差的自愿减排量收益后,绿电综合用电成本优于火电,绿电

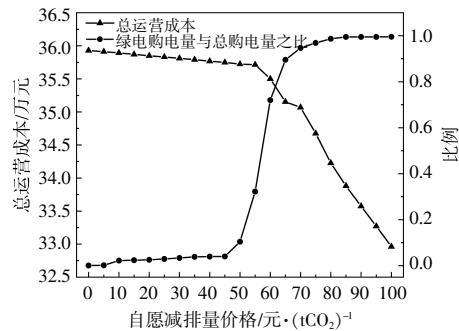


图9 不同自愿减排量价格下绿电购电量比例和总运营成本

Fig.9 Proportion of green electricity purchase and total operating cost under different voluntary emission reduction prices

购电量大幅增加。同时,绿电购电量比例较高时,园区可产生自愿减排量收益的电能占比较高,随着自愿减排量价格的变化,总运营成本的变化较为明显。综上所述,当自愿减排量价格能合理体现绿电的环境溢价时,园区绿电购电量比例上涨较快。绿电购电量比例较高,园区总运营成本对自愿减排量价格的变化较为敏感;绿电购电量比例较低,总运营成本下降较为平缓。

4.5 置信度对优化模型的影响分析

为研究不同置信度取值对所提园区电力运营优化模型的影响,本文作了如下算例分析:首先,在置信度取值为0.05~0.99下,按情景1分别进行优化求解,得到不同置信度下优化结果;其次,与无随机概率约束相比,有随机概率约束在不同置信度下,清洁电能使用比例上升率和总运营成本降低率如图10所示。

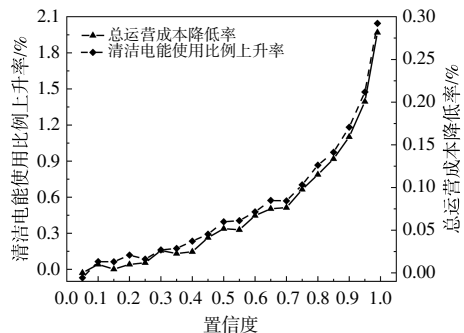


图10 置信度对清洁电能使用比例和总运营成本影响曲线

Fig.10 Influence curve of confidence on the use proportion of clean electric energy and total operating cost

由图10可知,随着置信度的增加,清洁电能使用比例上升率和总运营成本降低率均逐步提

高,置信度取值大于 0.7 后,两者的上升速率较快。相较而言,清洁电能使用比例上升率受置信度影响的程度要大于总运营成本降低率。另外,综合考虑清洁电能使用比例上升幅度和电力运营经济性,置信度选取 0.99 对前文所述算例是最佳的。

5 结论

为提升园区清洁电能使用比例,本文将绿电和自愿减排量交易引入园区电力运营中,建立包含购电成本、光伏发电成本和碳交易收益的园区电力运营多阶段优化模型,以总运营成本最小为目标函数,结合随机概率约束分三阶段优化园区绿电、火电电量以及光伏发电量。通过仿真实验得出以下结论:①在园区电力运营中使用绿电与光伏发电并取得合适的自愿减排量收益,可在小幅提升园区电力运营经济性的同时有效提高园区清洁电能的使用比例;②运用随机概率约束少量增加园区购电量可为实时供电留出一定裕度,能够稳定降低园区总运营成本,增强园区应对扰动的能力;③当自愿减排量价格能合理体现绿电的环境溢价时,园区绿电购买量增长速度较快。绿电购电量比例不同,园区总运营成本对自愿减排量价格变化的敏感程度不同。

另外,就置信度取值对优化结果的影响进行了分析,以总运营成本降低率和清洁电能使用比例上升率作为置信度取值的参考指标,给出了置信度取值的建议。

参考文献:

- [1] 舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径 [J]. 中国电机工程学报,2023,43(5): 1663-1672.
- [2] 黄景光,熊华健,李振兴,等.基于生命周期法和碳权交易的综合能源系统低碳经济调度 [J]. 电测与仪表, 2022,59(3):82-91.
- [3] 宋永华,张洪财,陈戈.智慧城市能源系统迈向碳中和的典型路径研究为以澳门为例[J].中国科学院院刊, 2022,37(11):1650-1663.
- [4] 杨毅,易文飞,王晨清,等.基于碳排放流理论的园区综合能源系统低碳经济调度 [J]. 电力建设,2022,43 (11):33-41.
- [5] 李欣,刘立,黄婧琪,等.含耦合 P2G 和 CCS 的园区级综合能源系统优化调度 [J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(4):18-25.
- [6] 曹翠.含 P2G 的微电网多时间尺度能量管理策略研究 [D].保定:华北电力大学,2021.
- [7] 张兴平,张又中.计及 P2G 和 CCS 的园区级电-热-气综合能源系统多目标优化 [J]. 电力建设,2020,41 (12):90-99.
- [8] 陈锦涛,杨苹,陈滢,等.基于综合需求侧响应策略的园区多能源系统优化运行 [J]. 可再生能源,2021,39 (2):222-228.
- [9] Fan M,Li Z S,Ding T,et al.Uncertainty evaluation algorithm in power system dynamic analysis with correlated renewable energy sources [J].IEEE Transactions on Power Systems,2021,36 (6):5602 - 5611.
- [10] 黄家晖,次仁欧珠,周欢,等.基于绿电指数的园区常态化低碳运行机制 [J]. 高电压技术,2022,48(7): 2554-2562.
- [11] 王栋,李达,冯景丽,等.考虑绿色属性的多微网间电能可信自治交易方法 [J]. 电力系统自动化,2022,46 (23):1-10.
- [12] 马辉,陈雨果,陈晔,等.南方(以广东起步)电力现货市场机制设计[J].南方电网技术,2018,12(12):42-48.
- [13] 李鹏,杨莘博,魏澄宙,等.计及能源政策的园区综合能源系统鲁棒随机优化模型 [J]. 中国电力,2022,55 (11):109-120.
- [14] 丁泉,窦晓波,钱国明,等.电力现货市场环境下游园区型综合能源系统多阶段联合优化运行[J].电力自动化设备,2021,41(9):56-63.

Low carbon power operation optimization in the park based on green power and voluntary emission reduction trading

Liu Qiuhua¹, Liu Xin², Zheng Yaxian³, Yang Shengcheng²

(1.School of Economics and Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2.School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 3.China Electric Power Research Institute Co. LTD, Nanjing 210003, China)

Abstract: To ensure the economy of power operation in parks and increase the proportion of clean electric energy, an optimization model of low-carbon power operation in parks based on green power and voluntary emission reduction transactions is proposed. This model comprehensively considers the purchase cost of green power and thermal power, the cost of photovoltaic power generation, and the income from voluntary emission reductions. The objective function is to minimize the total operating cost, and green electricity, thermal power generation and photovoltaic power generation are optimized with combination of random probability constraints in three stages: medium-and long-term, day-ahead and real-time. Based on the data of an enterprise park in Nanjing, the analysis results show that under the reasonable price of voluntary emission, the optimization model can slightly reduce the total operating cost of the park, and significantly improve the use ratio of clean electric energy and the park's ability to cope with disturbances. In addition, the impacts of the voluntary emission reduction price and confidence value on the optimization results are analyzed.

Keywords: green electricity; voluntary emission reductions; low-carbon power operation; stochastic probability constraints