

碳市场背景下考虑差异化电能质量服务的 工业用户决策模型

张逸, 向梦如, 郑宗华

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建省 福州市 350108)

Industrial User Decision Model Considering Differentiated Power Quality Services in the Context of Carbon Market

ZHANG Yi, XIANG Mengru, ZHENG Zonghua

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian Province, China)

ABSTRACT: For high energy-consuming industrial users, making reasonable decisions in the power carbon market trading is a matter of urgency. At the same time, how to ensure the users' power quality when accessing distributed new energy is a practical problem. Therefore, this paper proposes a user decision model considering differentiated power quality services in the context of carbon market. Firstly, the impact of the installation of distributed new energy on the user's power quality and carbon emissions is analyzed. The carbon emissions from different power quality service choices are calculated. Secondly, a user decision model is established in the context of the carbon market, considering differentiated electricity quality services and the coupling constraint of electricity quality and carbon emissions. The objective function for the model aims to maximize profit during the user's participation in dual market transactions. Finally, a steel production enterprise is taken as an example for analysis. The calculation results show that the model proposed in this article can achieve coordinated optimization of monthly electricity purchase and carbon quota trading volume for industrial users. By reasonably arranging the access capacity of distributed new energy devices and improving the power quality level, it can obtain greater profits with less carbon emission.

KEY WORDS: carbon markets; electricity market; industrial users; power quality; distributed new energy

摘要: 如何在分布式新能源接入的同时保证电能质量, 并在

电-碳市场交易中做出合理决策, 是高耗能工业用户亟待解决的现实问题。为此, 提出一种碳市场背景下考虑差异化电能质量服务的用户决策模型。首先, 分析安装分布式新能源对用户电能质量和碳排放量的影响, 并计算用户选取不同电能质量服务时的碳排放量; 其次, 以用户参与双市场交易履约期利润最大为目标函数, 计及电能质量-碳排放量耦合约束, 建立碳市场背景下考虑差异化电能质量服务的用户决策模型; 最后, 以某钢铁生产企业为算例进行分析。结果表明, 所提模型可以实现工业用户月度购电与碳配额交易量的协调优化, 通过合理部署分布式新能源和提升电能质量等级, 能使其减少碳排放量的同时获取更大收益。

关键词: 碳市场; 电力市场; 工业用户; 电能质量; 分布式新能源

0 引言

随着碳市场发展的稳步推进和能源消费模式的深度转型, 工业部门将进入高质量发展新阶段^[1-2]。售电侧放开背景下, 优质电力及增值服务成为电力市场发展的必然趋势^[3], 电力供应的多元化和高质量发展也将深刻影响高耗能工业用户参与电-碳市场的决策行为。研究高耗能工业用户参与电-碳市场的决策行为对实现企业高效低成本减碳, 推动电力系统绿色低碳发展具有重大意义。

当前对于市场主体参与电-碳市场的决策研究, 主要侧重于发电侧市场成员^[4-11]。而对于用户侧决策模型的研究尚处于起步阶段, 已有部分文献对于用电侧主体参与电-碳市场的重要影响^[12-14]及策略性行为^[15-17]进行研究。上述研究为开展工业用户决策行为分析提供了有益参考, 但没有考虑到工业用户优质供电需求。大多数工业用户自身既有非线性

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777035); 宁夏回族自治区自然科学基金项目(2023AAC03834); 福建省科技计划引导性项目(2020H0009)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51777035); Natural Science Foundation of Ningxia Hui Autonomous Region(2023AAC03834); Science and Technology Plan Guiding Project of Fujian Project (2020H0009).

性、冲击性的大型用电设备,又有易受电能质量问题影响的生产过程^[18-19]。电能质量问题会对工业用户造成巨额生产经济损失,产生的额外电能损耗和工业废品,不仅会提高购电成本,还将导致工业用户碳排放量增加,影响其参与碳市场的收益。随着《电能质量管理办法(暂行)》的发布^[20],鼓励各方对电能质量有特殊要求的用户提供有偿增值服务,更有必要在工业用户参与电-碳市场的决策研究中考虑电能质量因素。

电力市场环境下,已有许多学者在差异化电能质量服务定价和决策方面展开研究。文献[21]将风险管理机制引入电能质量市场,通过基本电价叠加电能质量保险费的价格形成机制,解决了不同质量等级电能的定价问题;文献[22]分析实行电能按质定价所要求的市场环境和技术条件,在此基础上对电能质量的定价过程提出基本设想,包括用户申报、市场分割、差别定价、价格选择等步骤;文献[23]重点针对不同层级电力用户意愿支付函数和微网运营方的利润函数进行深入研究,提出一种计及质量保险的微网电能按质定价模型;文献[24-26]把电能质量差别定价视为用户和供电企业之间的博弈问题,将博弈论的方法运用到用户电能质量等级决策与供电企业电能质量电价决策中。上述文献仅在电力市场背景下研究用户对差异化电能质量服务等级的选择行为,没有考虑碳市场交易对用户决策的影响。

为了提高在碳市场中的收益,越来越多工业用户安装了分布式新能源以减少电力碳排放量。但分布式新能源通过电力电子装置并网后会对电网注入谐波,其出力也具有随机性和波动性,引起用户的电能质量下降^[27-28]。受到电能质量恶化的影响,工业用户附加电能损耗和次品率会随之增加,可能导致其产生更多的碳排放量,降低其参与碳市场的收益。因此,分布式新能源的综合降碳效果与其接入后电能质量的恶化程度相关。选择合适的差异化电能质量服务是工业用户提升能源利用率,推动分布式新能源发展,减少碳排放量的有效措施。工业用户应当统筹考虑两个市场发展趋势及自身的电能质量需求,在碳市场背景下考虑选择差异化电能质量服务,以实现参与双市场总收益的最大化。但工业用户如何在电-碳市场环境下,统一考虑分布式新能源接入、电能质量及碳排放量三者影响,进行设备投入及双市场交易联合决策,目前还

缺乏深入研究。

针对上述问题,本文以一年的碳市场交易履约期和差异化电能质量服务合约期作为优化决策周期,提出一种碳市场背景下考虑差异化电能质量服务的用户决策模型。首先,量化分析工业用户分布式新能源接入、电能质量与碳排放量之间的关系,从附加电能损耗和产品的次品率两方面计算不同电能质量等级下的用户碳排放量;其次,将决策模型分为年前决策和年内决策两部分,采用年前预评估-年内实测修正的方式降低用户电能质量等级决策风险;最后,以某钢铁生产企业为算例进行分析,验证本文所提方法的合理性和可行性。

1 工业用户参与电-碳市场决策框架设计

1.1 市场机制

我国碳市场分为一级市场和二级市场,交易产品是碳排放配额(carbon emission allowance, CEA)^[29]。本文根据工业用户在一级市场中分配得到的免费初始配额,以二级市场交易为主要研究对象。

在电力市场环境下,售电公司能够为工业用户提供多个等级的电能质量服务^[26]。根据国家标准对电能质量指标限值的规定^[30-34]并参考文献[35]对电能质量等级的划分方法,本文按照电能质量优劣划分为5个等级,即优秀 Q_3 、良好 Q_2 、中等 Q_1 和合格 Q_0 和不合格 Q_{-1} ,其中售电公司所提供的差异化电能质量服务包含合格 Q_0 以上的4个等级。不同电压等级下的电能质量评价指标及其分级界限表见附录A。

售电公司制定的差异化电能质量服务电价由基本电价和电能质量电价两部分组成,即:

$$p_m = p_{ba} + p_m^{PQ} \quad (1)$$

式中: p_m 为差异化电能质量服务电价; p_{ba} 为基本电价; p_m^{PQ} 为电能质量电价,体现电能质量增值服务价值,若用户仅购买合格电能,则 $p_m^{PQ} = 0$ 。其中,基本电价由电力市场出清决定,售电公司可提供年前基本电价的预测值给工业用户;电能质量电价遵循“优质高价”原则,其价格为固定值,由售电公司制定。工业用户可以根据自身需求向售电公司购买相应的电能质量服务并签订合约,在合约中约定年度服务等级及电价。

1.2 分布式新能源接入、电能质量及碳排放量三者联系

分布式新能源接入、电能质量及碳排放量三者

之间的关系如图 1 所示。工业用户可以装设风电、光伏等分布式新能源减少外购电力，降低电力碳排放量。但分布式电源通过电力电子装置并网后会造成谐波污染，输出功率受到温度、光照等外界因素的影响，具有不确定性，也易造成电压波动、电压偏差等电能质量问题。工业用户电能损耗和次品率会随之增加，间接导致其电力、热力、生产过程及燃料燃烧等碳排放量上升。因此，分布式新能源接入、电能质量及碳排放量三者是存在联系的，本模型中的具体量化过程在 2 节进行分析。

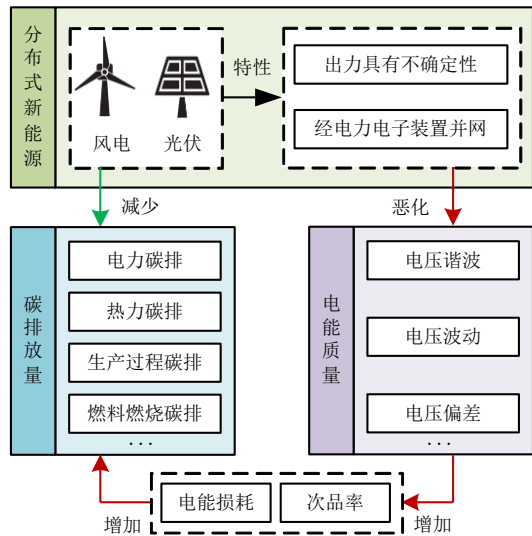


图 1 分布式新能源接入、电能质量及碳排放量关系
Fig. 1 Distributed new energy access, power quality and carbon emission relationship

1.3 决策框架

工业用户需要制定合理的策略，在减少自身碳排放量的同时保证电能质量，并在电-碳市场交易中获得最大收益。为保证差异化电能质量服务和和碳市场在履约时间尺度上的一致性，设定工业用户购买电能质量服务的合约周期为 1 年。本文所提的碳市场背景下考虑差异化电能质量服务的用户决策框架如图 2 所示。

年前决策部分，工业用户根据不同电能质量等级下的生产参数，单位容量分布式新能源发电量、电价及碳价年前预测值，并考虑分布式新能源接入对电能质量的影响，按照购买电能质量服务后的预评估等级，以履约期收益最大建立目标函数，决策年度电能质量服务等级、分布式新能源的装设容量、各月购电量及碳配额交易量。以此为依据，与售电公司签订年度电能质量服务合约，安装分布式新能源并进行 1 月份的购电及碳配额交易年内决策部分，以 1 个月作为滚动优化尺度，工业用户于每

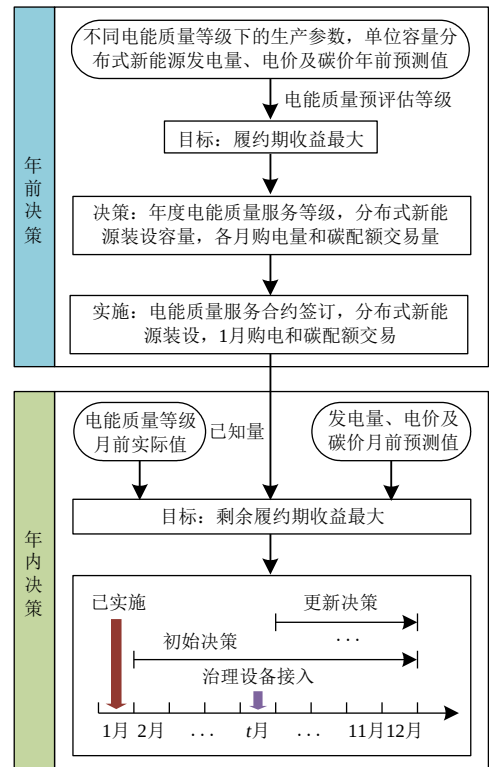


图 2 考虑差异化电能质量服务的用户决策框架
Fig. 2 Consider the user decision process for differentiated power quality services

月的月前进行优化决策。在初始决策中，工业用户根据电能质量等级月前实际值，结合最新的分布式新能源发电量和市场交易信息，重新预测未来各月的发电量、电价和碳价，以剩余履约期收益最大建立目标函数，滚动决策安装电能质量治理设备的容量、剩余各月购电量及碳配额交易量。以此为依据，实施次月的设备安装计划、购电量及碳配额交易量。当电能质量治理设备接入后，工业用户电能质量在剩余履约期内可提升至相应的等级。在更新决策中，只需要滚动决策并实施次月购电量及碳配额交易量直至履约期结束。

2 分布式新能源接入、电能质量及碳排放量三者关系量化分析

2.1 分布式新能源接入对电能质量的影响

工业用户与售电公司签订年度电能质量合约后，售电公司根据工业用户的需求通过定制电力技术为其提供相应等级的电能质量服务。当工业用户未安装分布式新能源时，其自身的非线性、冲击性负荷对电能质量的影响已经被售电公司设计规划差异化电能质量供电模式时考虑在内^[22,25]，可以认为用户内部负荷所使用的电能质量等级与售电公司提供的等级相同。

在清洁转型发展形势下,工业用户利用闲置土地和屋顶建设分布式风电和光伏已成为新的趋势,由于光伏发电的资源分布更为广泛,本文仅考虑用户接入分布式光伏的情况。当工业用户购买 Q_m 等级的电能质量服务时,计及分布式光伏接入对电能质量水平的降低作用,年前预评估工业用户内部负荷所使用的电能质量等级为 Q_{m-1} 。分布式光伏接入以后,由于光伏出力具有波动性,工业用户月度实际电能质量等级可能低于预评估值,年内再根据月度电能质量实际等级进行滚动决策。

2.2 分布式新能源接入对碳排放量的影响

安装分布式光伏后,用户所使用的电能由两部分组成,一部分来自于光伏发电,另一部分由售电公司提供。光伏发电量主要取决于该地区光伏发电效率和光伏的装机容量,计算公式如下:

$$q_{PV,i}^{Pre} = S_{PV} \cdot q_{PV,i}^{Un} \quad (2)$$

式中: S_{PV} 为分布式光伏装机容量, kW; $q_{PV,i}^{Un}$ 为所在地区第 i 月单位容量光伏的发电量; $q_{PV,i}^{Pre}$ 为第 i 月光伏总发电量预测值。

根据碳市场核算政策,工业用户的碳核算范围主要包括化石燃料燃烧排放、工业生产过程排放、净购入电力和热力产生的排放等^[36]。当工业用户使用光伏发电时不产生电力碳排,仅外购电能折算的碳排放量纳入碳市场核算范围,计算公式表示为:

$$E_{PV,i} = 0 \quad (3)$$

$$E_{buy,i} = q_{buy,i} \cdot E_{tc} \quad (4)$$

式中: $E_{PV,i}$ 为第 i 月使用分布式光伏发电量折算的碳排放量; $E_{buy,i}$ 为第 i 月购入电量折算的碳排放量; $q_{buy,i}$ 为第 i 月的购入电量; E_{tc} 为所在地区的电网碳排放因子。

2.3 电能质量对碳排放量的影响

电能质量问题会降低用户的能源利用效率进而增加能源消耗,导致用户碳排放量提高。

关于复合电能质量扰动下的附加电能损耗计算,已有部分文献进行研究^[37-38]。工业用户第 i 月供电网络附加电能损耗所折算的额外电力碳排放量为

$$E_{mp,i} = (P_m / P^{To}) \cdot E_{tc} \cdot q_{buy,i} \quad (5)$$

式中: $E_{mp,i}$ 为 Q_m 级电能质量下第 i 月供电网络附加电能损耗所折算的额外电力碳排放量; P_m 为 Q_m 级电能质量下的附加损耗功率; P^{To} 为工业用户用电

功率。式(5)表明,工业用户仅使用外购电力时的附加电能损耗会产生电力碳排放量,而使用光伏发电时的附加电能损耗不产生电力碳排放量。

当所需合格产品数量一定时,工业用户使用不同等级电能质量时的次品率不同,其生产单位合格产品耗电量可表示为

$$q_m^{Un} = q_m^{Un} / (1 - u_m) \quad (6)$$

式中: q_m^{Un} 为 Q_m 级电能质量下生产单位合格产品耗电量; u_m 为 Q_m 级电能质量下的次品率; q^{Un} 为生产单位产品耗电量。

工业用户第 i 月生产产品所折算的碳排放量为

$$E_{mu,i} = E_{av} \cdot (q_{m,i}^{Pr} / q^{Un}) - q_{PV,i} \cdot E_{tc} \quad (7)$$

式中: $E_{mu,i}$ 为 Q_m 级电能质量下第 i 月生产产品所折算的碳排放量; E_{av} 为不考虑新能源接入下的工业用户生产单位产品碳排放量; $q_{m,i}^{Pr}$ 为 Q_m 级电能质量下第 i 月生产产品耗电量; $q_{PV,i}$ 为第 i 月光伏发电的实际用电量。式(7)表明,工业用户生产产品仅使用外购电力时会产生电力碳排放量,而使用光伏发电时的不产生电力碳排放量,应将这部分碳排放量扣除。

通过式(6)、(7)及 3 节的合格产品数量约束式(22)、(35)将不同电能质量等级下的次品率与生产产品所折算的碳排放量建立联系,能够考虑到包含电力碳排放量在内的各种类型碳排放量,为不同行业工业用户提供一个较为通用的计算方法,同时又能体现出工业用户使用分布式新能源发电的降碳作用。

综上,当工业用户使用 Q_m 级电能质量时,第 i 月实际碳排量 $E_{m,i}$ 可表示为

$$E_{m,i} = E_{pm,i} + E_{um,i} \quad (8)$$

3 碳市场背景下考虑差异化电能质量服务的用户决策模型

3.1 年前决策模型

3.1.1 目标函数

以工业用户履约期收益最大为决策目标,建立目标函数:

$$W_1 = \sum_{i=1}^{12} [\sum_{m=1}^3 y_m (w_{m-1} q_{m,i} - p_{m,i} q_{buy,i})] - \sum_{i=1}^{12} (p_{c,i} q_{c,i}^{Bu} - p_{c,i} q_{c,i}^{Se}) - C_{PV} \quad (9)$$

式中: $q_{m,i}$ 为 Q_m 级电能质量服务下第 i 月用电量;

y_m 为 0-1 变量, 表示工业用户对 Q_m 级电能质量服务的选择, 选择该等级时为 1, 不选择为 0, 工业用户在年度差异化电能质量服务合同中只能选定一种等级的电能质量, 即 $\sum_{m=1}^3 y_m = 1$; w_{m-1} 为 Q_{m-1} 级电能质量下, 单位用电量对应的产能收入; $p_{m,i}$ 为第 i 月 Q_m 级电能质量服务电价; $p_{c,i}$ 为第 i 月碳价; $q_{c,i}^{\text{Bu}}$ 为第 i 月购入碳配额的数量; $q_{c,i}^{\text{Se}}$ 为第 i 月卖出碳配额的数量; C_{PV} 为分布式光伏年等值投资成本。

其中, $q_{m,i}$ 包括附加损耗电量和产品耗电量之和, 计算公式如下:

$$\begin{cases} q_{m,i} = q_{m,i}^{\text{Ad}} + q_{m,i}^{\text{Pr}} \\ q_{m,i}^{\text{Ad}} = q_{m,i}^{\text{Pr}} \cdot (P_m / P^{\text{To}}) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $q_{m,i}^{\text{Ad}}$ 为第 i 月用户供电网络附加损耗电量。

C_{PV} 包括年等值安装成本和年运维成本^[39], 计算公式如下:

$$\begin{cases} C_{\text{PV}} = C_{\text{op}} + C_{\text{in}} \\ C_{\text{op}} = \left[\frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \right] c_{\text{PV}} S_{\text{PV}} \\ C_{\text{in}} = c_{\text{in}} S_{\text{PV}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: C_{op} 为光伏年等值安装成本; C_{in} 为年运维成本; r 为贴现率, 通常取 7%; Y 为光伏运行年限, 取 25 年; c_{PV} 为单位容量光伏的安装成本, 取 4000 元/kW; c_{in} 为单位容量光伏的运维成本, 取年均 70 元/kW。

3.1.2 约束条件

1) 碳配额买入卖出约束。

工业用户月度买入碳配额不能超过初始碳配额的一定比例, 卖出碳配额不能超出当前所持有的碳配额总量。

$$u_i^{\text{Bu}} + u_i^{\text{Se}} \leq 1, \quad i = 1, \dots, 12 \quad (12)$$

$$u_i^{\text{Bu}} q_c^{\min} \leq q_{c,i}^{\text{Bu}} \leq u_i^{\text{Bu}} E_c \cdot \gamma, \quad i = 1, \dots, 12 \quad (13)$$

$$u_i^{\text{Se}} q_c^{\min} \leq q_{c,i}^{\text{Se}} \leq u_i^{\text{Se}} E_c, \quad i = 1 \quad (14)$$

$$u_i^{\text{Se}} q_c^{\min} \leq q_{c,i}^{\text{Se}} \leq u_i^{\text{Se}} [E_c + \sum_{t=1}^{i-1} (q_{c,t}^{\text{Bu}} - q_{c,t}^{\text{Se}})], i = 2, \dots, 12 \quad (15)$$

式中: u_i^{Bu} 为第 i 月买入碳配额的 0-1 变量, 取 1 表示该月买入碳配额, 取 0 表示不买入; u_i^{Se} 为第 i 月卖出碳配额的 0-1 变量, 取 1 表示该月买入碳配额, 取 0 表示不卖出; $q_c^{\min}$ 为碳配额单笔最小交易量, 通常为 1 t; E_c 为初始碳配额; γ 为月度碳配额买入上限系数, 由监管机构确定。

2) 碳配额持有量约束。

为避免工业用户过度投机行为, 其持有的碳配额数量不得超过规定的限额。

$$E_c + \sum_{t=1}^i (q_{c,t}^{\text{Bu}} - q_{c,t}^{\text{Se}}) \leq \varepsilon E_c, \quad i = 1, \dots, 12 \quad (16)$$

式中 ε 为碳配额持有系数, 由监管机构确定。

3) 光伏安装容量约束。

考虑工业用户屋顶光伏安装条件, 可装设的光伏容量应小于饱和装机容量^[40]。

$$\begin{cases} f_{\text{ro}} = k_{\text{ro}} f_{\text{bu}} \\ f_{\text{PV}} = k_1 f_{\text{ro}} \\ S_{\text{PV}}^{\text{Sa}} = f_{\text{PV}} \eta_{\text{PV}} \\ 0 \leq S_{\text{PV}} \leq S_{\text{PV}}^{\text{Sa}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: f_{ro} 为建筑物屋顶的投影面积; k_{ro} 为建筑物的屋顶比例; f_{bu} 为建筑物的基底面积; f_{PV} 为光伏可安装面积最大值; k_1 为建筑物屋顶的光伏可利用系数; $S_{\text{PV}}^{\text{Sa}}$ 为光伏饱和装机容量; η_{PV} 为光电转换效率。

4) 发、购、用电量约束。

工业用户月度用电量受到其生产能力的制约, 光伏用电量应小于其发电预测值, 购电量与光伏用电量之和等于总用电量。

$$0 \leq q_{m,i} \leq q_e^{\max}, \quad i = 1, \dots, 12 \quad (18)$$

$$\eta_{\text{buy}} q_{m,i} \leq q_{\text{buy},i} \leq q_{m,i}, \quad i = 1, \dots, 12 \quad (19)$$

$$0 \leq q_{\text{PV},i} \leq q_{\text{PV},i}^{\text{pre}}, \quad i = 1, \dots, 12 \quad (20)$$

$$q_{\text{buy},i} + q_{\text{PV},i} = q_{m,i}, \quad i = 1, \dots, 12 \quad (21)$$

式中: $q_e^{\max}$ 为工业用户每月最大的用电量, 其值受用电设备功率及工作时间等因素的限制; η_{buy} 为考虑光伏出力不确定性所设置的月度购电量在总用电量中的占比下限系数。

5) 合格产品数量约束。

工业用户应保证其年度合格产品数量满足其销售需求。

$$\sum_{i=1}^{12} (q_{m,i}^{\text{Pr}} / q_m^{\text{Un}}) = A \quad (22)$$

式中 A 为所需合格产品数量。

6) 电能质量-碳排放量耦合约束。

在碳市场履约期结束进行碳配额清缴时, 工业用户所持有的碳配额应当大于其实际产生的碳排放总量。

$$E_c + \sum_{i=1}^{12} (q_{c,i}^{\text{Bu}} - q_{c,i}^{\text{Se}}) \geq \sum_{i=1}^{12} E_{m,i} \quad (23)$$

3.2 年内决策模型

3.2.1 目标函数

年前决策后,工业用户与售电公司约定电能质量服务等级 Q_a 及电价 p_a ,分布式光伏装机容量 S_{PV} 和1月份碳交易计划均已实施。考虑到分布式光伏投入运行后,工业用户实际电能质量等级可能与预评估值不同,年内还需要对是否安装电能质量治理设备及容量进行决策。

年内初始决策中,根据工业用户实际电能质量等级 Q_b ,单位容量分布式光伏发电量、电价及碳价月前预测值,以剩余履约期内利润最大为决策目标。第 $t-1$ 月($t \geq 2$)滚动决策并实施 t 月的治理设备安装计划和交易计划,目标函数如下:

$$W_2 = \sum_{i=t}^{12} [(\sum_{n=b}^3 z_n w_n q_{n,i}) - p_{a,i} q_{buy,i}] - \sum_{i=t}^{12} (p_{c,i} q_{c,i}^{Bu} - p_{c,i} q_{c,i}^{Se}) - \sum_{n=b}^3 z_n C_{b,n}^{Go} \quad (24)$$

式中: z_n 为0-1变量,表示工业用户选择治理电能质量至 Q_n 级,选择该等级时为1,不选择为0, $\sum_{n=b}^3 z_n = 1$; w_n 为 Q_n 级电能质量下,单位用电量对应的产能收入; $p_{a,i}$ 为第 i 月 Q_a 级电能质量服务电价; $C_{b,n}^{Go}$ 为电能质量等级从 Q_b 提升到 Q_n 时,工业用户所需的治理设备年等值投资成本。

其中, $C_{b,n}^{Go}$ 包括治理设备的购置成本和维修成本^[26]。计算公式如下:

$$\begin{cases} C_{b,n}^{Go} = C_{b,n}^{Bu} + C_{b,n}^{Re} \\ C_{b,n}^{Bu} = [\frac{r(1+r)^{Y_1}}{(1+r)^{Y_1} - 1}] c_{bu} S_{b,n} \\ C_{b,n}^{Re} = c_{re} S_{b,n} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $C_{b,n}^{Bu}$ 为电能质量治理设备的年等值购置成本; c_{bu} 为单位容量购置成本,取4000元/(kV·A); $S_{b,n}$ 为电能质量等级从 Q_b 提升到 Q_n 时,工业用户所需的治理容量; Y_1 为电能质量治理设备的使用年限,取5年; $C_{b,n}^{Re}$ 为电能质量治理设备的年维修成本; c_{re} 为单位容量年维修成本,取年均70元/(kV·A)。

年内更新决策中,第 $k-1$ 月($k \geq 2$)经过决策安装了电能质量治理设备,工业用户实际电能质量为 Q_d 级。此后,工业用户只需滚动决策剩余履约期月度购电量和月度碳交易配额,目标函数如下:

$$W_3 = \sum_{i=k}^{12} (w_d q_{d,i} - p_{a,i} q_{buy,i}) - \sum_{i=k}^{12} (p_{c,i} q_{c,i}^{Bu} - p_{c,i} q_{c,i}^{Se}) \quad (26)$$

式中: w_d 为 Q_d 级电能质量下,单位用电量对应的

产能收入; $q_{d,i}$ 为 Q_d 级电能质量下第 i 月用电量。

3.2.2 约束条件

目标函数 W_2 对应的约束条件为式(27)~(36)。

1) 碳配额买入卖出约束。

$$u_i^{Bu} + u_i^{Se} \leq 1, \quad i = 2, \dots, 12 \quad (27)$$

$$u_i^{Bu} q_c^{\min} \leq q_{c,i}^{Bu} \leq u_i^{Bu} E_c \cdot \gamma, \quad i = 2, \dots, 12 \quad (28)$$

$$u_i^{Se} q_c^{\min} \leq q_{c,i}^{Se} \leq u_i^{Se} [E_c + \sum_{t=1}^{i-1} (q_{c,t}^{Bu} - q_{c,t}^{Se})], i = 2, \dots, 12 \quad (29)$$

2) 碳配额持有量约束。

$$E_c + \sum_{t=1}^i (q_{c,t}^{Bu} - q_{c,t}^{Se}) \leq \varepsilon E_c \quad i = 2, \dots, 12 \quad (30)$$

3) 发、购、用电量约束。

$$0 \leq q_{n,i} \leq q_e^{\max} \quad i = 2, \dots, 12 \quad (31)$$

$$\eta_{buy} q_{n,i} \leq q_{buy,i} \leq q_{n,i} \quad i = 2, \dots, 12 \quad (32)$$

$$0 \leq q_{PV,i} \leq q_{PV,i}^{Pre} \quad i = 2, \dots, 12 \quad (33)$$

$$q_{buy,i} + q_{PV,i} = q_{n,i} \quad i = 2, \dots, 12 \quad (34)$$

$$\sum_{i=1}^{t-1} (q_{b,i}^{Pr} / q_b^{Un}) + \sum_{i=t}^{12} (q_{n,i}^{Pr} / q_n^{Un}) = A \quad (35)$$

式中: $q_{b,i}$ 、 $q_{n,i}$ 分别为 Q_b 、 Q_n 级电能质量下第 i 月用电量; q_b^{Un} 、 q_n^{Un} 分别为 Q_b 、 Q_n 级电能质量下生产单位合格产品耗电量; $q_{b,i}^{Pr}$ 、 $q_{n,i}^{Pr}$ 分别为 Q_b 、 Q_n 级电能质量下第 i 月生产产品耗电量。

4) 电能质量-碳排放量耦合约束。

$$E_c + \sum_{i=1}^{12} (q_{c,i}^{Bu} - q_{c,i}^{Se}) \geq \sum_{i=1}^{t-1} E_{b,i} + \sum_{i=t}^{12} E_{n,i} \quad (36)$$

目标函数 W_3 对应的约束条件与式(27)~(36)相类似,此处不再赘述。

3.3 模型求解方法

由于目标函数 W_1 和 W_2 中均包含二进制变量与连续变量的乘积项,因此该模型为混合整数非线性规划模型。本文通过大 M 法^[41]对其进行线性化处理,将其转化为混合整数线性规划模型,具体计算过程见附录B。目标函数 W_3 仅含线性项,无需进行线性化处理。采用MATLAB中的YALMIP工具箱进行仿真,并调用GRUOBI求解器的分支定界算法(branch-and-bound)进行模型求解。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文以某钢铁企业为研究对象进行算例分析,所用数据来自现有文献和钢铁企业调研。结合电能

质量电价^[25]和基本电价预测值^[6]得到各月差异化电能质量服务电价预测值。月度碳配额价格^[6]、单位容量(1 kW)光伏发电量^[42]和电能质量服务电价预测值见图 3，具体数值见附录 C。同时，假设预测值与实际值之差服从标准差随时间提前量增大而增大的正态分布^[6]。

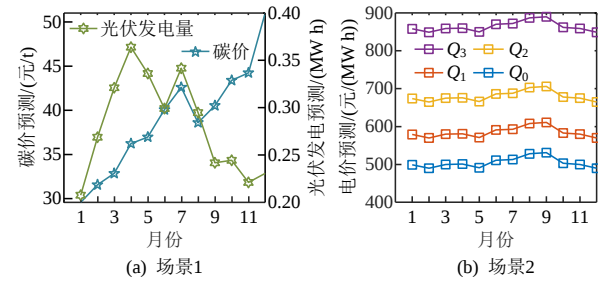


图 3 月度碳价、单位容量光伏发电量及电价年前预测值
Fig. 3 Monthly carbon price, unit PV power generation and electricity price forecast

参考文献[17]，设置钢铁企业初始碳配额为 1 214 117 t，区域电网碳排放因子取 0.58 t/(MW·h)，年度所需生产合格产品数量为 770 760 t。不同电能质量等级下钢铁企业次品率及单位用电量对应的产能收入见表 1。

表 1 各电能质量等级下的钢铁企业生产参数 Table 1 Production parameters of iron and steel enterprises under each power quality grade		
等级	次品率/%	产能收入/(元/(MW·h))
Q_3	5	1 020
Q_2	7	880
Q_1	9	785
Q_0	11	718
Q_{-1}	13	676

不同等级电能质量所需的治理容量 $S_{b,n}$ 用相应等级的换算系数 δ 与负荷功率 S_L 的乘积来表示^[26]，各等级换算系数如表 2 所示。参考文献[26,43-44]，设置电能质量治理设备的单位容量购置成本为 4 000 元/(kV·A)。

表 2 各电能质量等级下的换算系数 Table 2 Conversion factors for each power quality level				
初始等级	提升至 Q_0	提升至 Q_1	提升至 Q_2	提升至 Q_3
Q_2	—	—	—	1
Q_1	—	—	0.8	1.8
Q_0	—	0.4	1.2	2.2
Q_{-1}	0.3	0.6	1.4	2.4

根据附录 A 中的电能质量评价指标及其分级界限表，并结合附录 C 中的钢铁企业负荷供电网络，参考文献[37,45]计算得到各电能质量等级下的

附加电能损耗如表 3 所示。

表 3 各电能质量等级下的钢铁企业附加电能损耗 P_m
Table 3 Additional electrical energy losses P_m of steel enterprises at different levels of electrical energy quality

等级	附加电能损耗/kW
Q_3	102.71
Q_2	221.32
Q_1	357.82
Q_0	514.2
Q_{-1}	695.45

4.2 决策结果分析

应用本文模型，对该企业一年内的电能质量服务等级、分布式新能源的装设容量、电能质量治理设备的安装计划、各月购电量及碳配额交易量进行决策。

经过年前模型求解，该企业年前应购买的电能质量服务等级为 Q_2 ，实施安装分布式光伏的容量为 58.14 MW，1 月份的购电量为 249 271.23 MW·h，1 月份买入碳配额为 364 233.99 t。

考虑到不同地区地理位置和光资源具有差异性，分布式光伏发电量较高的月份及光伏发电的稳定性会有所不同，年内实际电能质量可能在不同月份跌落，低于预评估值 Q_2 。为此，本文设置以下 2 种场景对年内决策的有效性进行分析：

场景 1：年内实际电能质量等级从 2 月份开始由预评估等级 Q_1 降为 Q_0 。

场景 2：年内实际电能质量等级从 5 月份开始由预评估等级 Q_1 降为 Q_0 。

经过年内模型求解，两种场景下的电能质量治理设备安装决策、月度用电及碳配额交易决策分别如图 4—6 所示。

由图 4 可以看出，场景 1 中，该企业在 2 月决策出应于 3 月投入电能质量治理设备，治理后剩余履约期内的电能质量等级为 Q_1 级，治理成本为

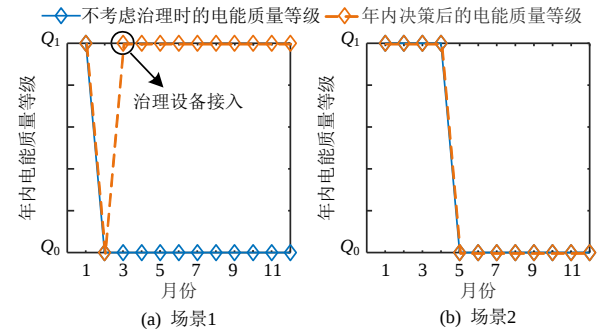


图 4 两种场景下的电能质量治理设备安装决策及效果
Fig. 4 Power quality control equipment installation decision and effect under two scenarios

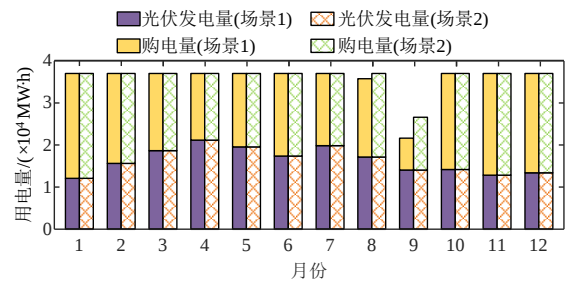


图 5 两种场景下的用电决策

Fig. 5 Power consumption decision under two scenarios

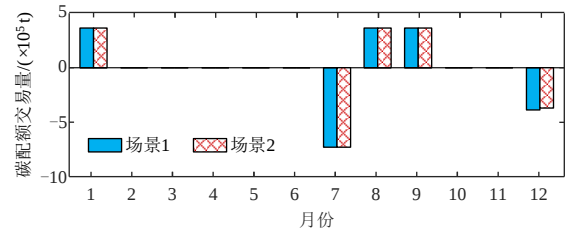


图 6 两种场景下的碳配额交易决策

Fig. 6 Carbon cap-and-trade decision under two scenarios

2 067.29 万元；场景 2 中，该企业决策出无需安装电能质量治理设备。两种场景下，治理设备安装决策不同的主要原因在于，场景 2 电能质量等级低于 Q_1 的起始时间节点比场景 1 晚 3 个月，治理设备投入的年等值成本无法在履约期内回收，因此场景 2 不安装电能质量治理设备更加经济。

由图 5 可以看出，场景 1 中，该企业 9 月份用电量最低，其次是 8 月份，其余各月的用电量均达到该企业月度用电量上限；场景 2 中，仅 9 月份用电量小于月度用电量上限。原因在于，该企业的用电决策主要受价格驱动，9 月份电价最高因而购电量最低，当 9 月份购电量削减至约束边界时，剩余月份中电价最高的 8 月份购电量开始下降，同时，为满足该电能质量等级下合格产品的年度用电量需求，其余各月的用电量均达到上限。场景 1 与场景 2 相比用电量更少，这是由于装设电能质量治理设备之后，场景 1 整体电能质量高于场景 2。

由图 6 可以看出，两种场景下，该企业首先在 1 月份低价买入碳配额；其次，考虑到碳配额持有量和买入卖出约束，在 7 月份碳价年中峰值进行碳配额抛售，随后在 8 月和 9 月份再次低价购入碳配额；最后，在满足碳配额履约要求的前提下，于 12 月份高价卖出剩余碳配额。场景 1 与场景 2 相比，该企业 1—11 月份的碳配额交易策略相同，但由于场景 1 接入治理装置，电能质量等级提高，该企业的碳排放量减少，可以在 12 月售出的碳配额数量比场景 2 更多。

两种场景下，该企业收益对比如表 4 所示。

表 4 两种场景下该企业收益结果
Table 4 Industrial user revenue results under two scenarios

场景	总收益/ 万元	碳市场 收益/万元	年总用电量 /(MW·h)	碳排放量/t
场景 1	14 265.95	1 116.93	427 373.38	1 191 592.38
场景 2	14 690.46	1090.21	433 598.35	1 208 497.29

由表 4 可知，两种场景下，企业碳排放量均小于初始碳配额，且能在碳市场中通过合理地买卖碳配额获得收益。其中，场景 2 的年总用电量和碳排放量均高于场景 1，但场景 2 总体收益比场景 1 多。这是因为，与场景 2 相比，场景 1 不考虑治理时的整体电能质量等级更低，虽然通过安装电能质量治理设备提高了剩余履约期的电能质量等级和该场景下的总收益，但其仍需要付出高额的治理设备安装成本。

综合上述分析，验证了本文模型可以为工业用户购买电能质量服务等级、安装分布式新能源及安排各月的购电和碳配额交易提供决策。同时，能够合理决策年内是否安装电能质量治理设备，以及安装的时间节点和提升等级。可见，电能质量预评估等级的准确性不会影响模型最终的决策效果，年内决策的重要作用之一就在于当电能质量等级预评估值与实际值有出入时进行电能质量等级提升措施的再决策。

4.3 与传统用户决策模型对比分析

为说明本文所提模型的优越性，与文献[17]中的传统用户决策模型(不考虑装设分布式光伏，也不考虑电能质量因素)进行对比分析。经过模型求解，得到两种模型下该企业收益结果见表 5，月度用电及碳配额交易决策如图 7 和 8 所示。由于本文模型年内电能质量实际等级可能有多种场景，表中和图中仅展示场景 1 中 3 月接入电能质量治理后的计算结果。

从表 5 可以看到，该企业采用本文模型可以获得更好的经济性，与传统模型相比，总收益增加 4 527.34 万元，碳市场收益提高 725.36 万元，分别

表 5 两种模型下该企业收益结果

模型	总收益/ 万元	碳市场 收益/万元	年总用电量 /(MW·h)	碳排 放量/t
传统模型	9 738.61	391.57	437 515.71	1 333 716.31
本文模型	14 265.95	1 116.93	427 373.38	1 191 592.38

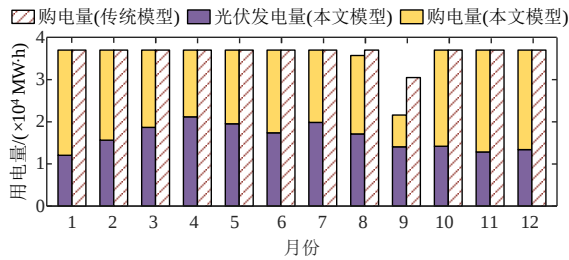


图 7 两种模型下的用电决策

Fig. 7 Power consumption decision under two models

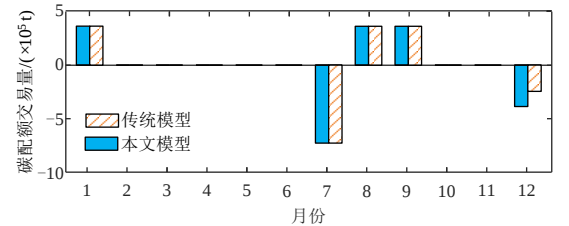


图 8 两种模型下的碳配额交易决策

Fig. 8 Carbon cap-and-trade decision under two models

提升了 46.49%和 185.24%。采用传统模型产生的碳排放量超出初始碳配额 119 599.31 t，而采用本文模型产生的碳排放量比初始碳配额减少 22 524.63 t。同时，本文模型总用电量也比传统模型减少 10 142.33 MW·h，降低了 2.32%。

分析上述现象，主要有以下 2 点原因：

1) 由于传统模型未计及电能质量因素，该企业全年使用 Q_0 级电能质量，与本文模型相比，电能损耗和次品率较高，需要使用更多的电能以满足生产要求。

2) 由于传统模型不考虑装设分布式新能源，虽然降低了电能质量下降的风险，但该企业的用电量全部来自外购电力，与本文模型相比，碳排放量明显增加且超出初始碳配额，需从碳市场买入缺额，降低了碳市场收益。

4.4 治理设备成本对年内决策的影响

单位容量购置成本 c_{bu} 是影响电能质量治理设备成本的关键因素，本节分析不同 c_{bu} 下的决策结果。未来随着技术的进步， c_{bu} 将有所下降，以场景 2 为例，对不同 c_{bu} 下的电能治理设备安装情况进行决策，计算结果如图 9 所示。不同 c_{bu} 下该企业收益如表 6 所示。

由图 9 和表 6 可知，当 c_{bu} 下降为 3 800 元/(kV·A) 时，工业用户仍无需安装电能质量治理设备，因此其收益不变。当 c_{bu} 下降为 3 400 元/(kV·A) 时，工业用户在 1 月决策出应于 2 月投入电能质量治理设备，治理成本为 3 292.94 万元，治理后剩余履约期内的电能质量等级为 Q_2 。与不治理时相比，总收增

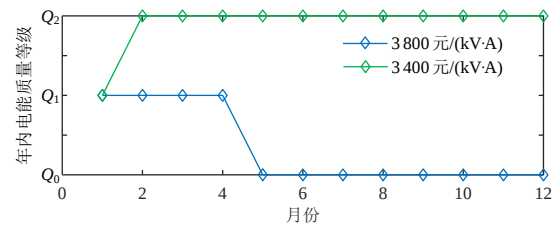


图 9 不同 c_{bu} 下电能质量治理设备安装决策

Fig. 9 Power quality control equipment installation decision under different c_{bu}

表 6 不同 c_{bu} 下该企业收益

Table 6 Industrial user benefits under different c_{bu}

$c_{bu}/$ (元/(kV·A))	收益/ 万元	碳市场 收益/万元	年总用电量 /(MW·h)	碳排 放量/t
3 800	14 690.46	1 090.21	433 598.35	1 208 497.29
3 400	16 996.08	1 298.73	417 137.43	1 163 185.58

加 2 305.62 万元，碳市场收益提高 208.52 万元，分别提升了 15.69%和 19.13%。年总用电量降低 16 260.92 MW·h，碳排放量减少 45 311.71 t，分别下降了 3.80%和 3.75%。

根据上述分析，工业用户年内安装电能质量治理设备的决策与治理设备成本有关。随着技术升级，单位容量购置成本下降程度越大，工业用户电能质量提升意愿越强烈，能获得的收益也越大。

5 结论

本文提出一种碳市场背景下考虑差异化电能质量服务的用户决策模型，通过算例验证，可以得到以下结论：

1) 本文模型可实现工业用户获得最大利润的同时减少碳排放量。所提的电能质量年前预评估-年内实测修正方法，能使工业用户决策更具有经济性且更加灵活。为了确保模型决策的准确性，工业用户还应当加强自身电能质量监测分析，并结合技术成本发展趋势合理配置电能质量治理设备。

2) 高品质的电能可以提高能源利用效率，促进分布式新能源的投资和建设，降低工业用户碳排放量，使其在碳市场中获得更多的交易机会和竞争优势。

3) 本文模型在当前市场条件下具有可行性，并且能够适应未来电力市场的发展，为工业用户面临多样化电能质量服务提供决策方案。虽然现阶段我国电力市场尚未提供差异化电能质量服务，工业用户年前只能选择合格等级电能，在应用时简化了年前决策模型该部分功能。但随着《电能质量管理办法(暂行)》的实施和电力市场改革的进一步深化，

多样化的电能质量增值服务即将涌现,本文模型的潜力可以被充分挖掘。未来,售电公司还可以推出各种形式的电能质量套餐供工业用户选择。

参考文献

- [1] 蓝虹,陈雅函. 碳交易市场发展及其制度体系的构建[J]. 改革, 2022(1): 57-67.
LAN Hong, CHEN Yahan. Development and system construction of carbon trading market[J]. Reform, 2022(1): 57-67(in Chinese).
- [2] PAN Xiaofeng, PU Chenxi, YUAN Sai, et al. Effect of Chinese pilots carbon emission trading scheme on enterprises' total factor productivity: the moderating role of government participation and carbon trading market efficiency[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 316: 115228.
- [3] 肖先勇, 马愿谦, 莫文雄, 等. 售电侧放开背景下电网公司优质电力增值服务模式[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 4-10.
XIAO Xianyong, MA Yuanqian, MO Wenxiong, et al. Premium power based value-added service model for power supply company under the opening electricity retail side[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 4-10(in Chinese).
- [4] 孙晓聪, 丁一, 包铭磊, 等. 考虑发电商多时间耦合决策的碳-电市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 1-11.
SUN Xiaocong, DING Yi, BAO Minglei, et al. Carbon-electricity market equilibrium analysis considering multi-time coupling decision of power producers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 1-11(in Chinese).
- [5] WANG Lin, LI Ke. Research on renewable energy consumption and emission reduction in power market based on bi-level decision making in China[J]. Energy, 2022, 260: 125119.
- [6] 邓盛盛, 陈皓勇, 肖东亮, 等. 发电商参与碳市场与电力中长期市场联合决策模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 1-10.
DENG Shengsheng, CHEN Haoyong, XIAO Dongliang, et al. A joint decision making model for power generators to participate in the carbon market and the medium-and long-term power markets[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 1-10(in Chinese).
- [7] 彭春华, 易泰洵, 孙惠娟, 等. 基于多智能体深度确定性策略梯度的电碳耦合市场发电商均衡竞价策略[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4229-4236.
PENG Chunhua, YI Taixun, SUN Huijuan, et al. Power generator balanced bidding based on multi-agent deep deterministic strategy gradient in electricity-carbon coupling market[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4229-4236(in Chinese).
- [8] 尚楠, 陈政, 冷媛. 电碳市场背景下典型环境权益产品衔接互认机制及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2558-2577.
SHANG Nan, CHEN Zheng, LENG Yuan. Mutual recognition mechanism and key technologies of typical environmental interest products in power and carbon markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2558-2577(in Chinese).
- [9] 卫子杰, 荆朝霞, 季天瑶. 基于多时间尺度耦合建模的电力市场与碳市场联动均衡机制研究[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1447-1458.
WEI Zijie, JING Zhaoxia, JI Tianyao. Research on the linkage equilibrium mechanism between power market and carbon market based on multi-timescale coupling modeling[J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1447-1458(in Chinese).
- [10] 王晔, 王胜彩, 张少华. 电-碳-绿证交易耦合下新能源发电商参与投标竞争的多市场博弈分析[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4125-4138.
WANG Xian, WANG Shengcai, ZHANG Shaohua. Game analysis of coupled electricity-carbon-green certificate markets with strategic bidding of renewable generators [J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4125-4138(in Chinese).
- [11] 董馨月, 杨金鹏, 张金良. 碳市场政策对发电企业碳排放量及利润的影响: 基于多主体模拟的分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8049-8060.
DONG Xinyue, YANG Jinpeng, ZHANG Jinliang. Impact of carbon market policies on carbon emissions and profits of power generation enterprises using an agent-based approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8049-8060(in Chinese).
- [12] 杨威, 龚学良, 曾智健, 等. 碳排放交易市场机制对电力市场的影响: 基于碳价需求响应的电力市场用户行为分析[J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 59-67.
YANG Wei, GONG Xueliang, ZENG Zhijian, et al. Impacts of ETS mechanism on electricity market: behavior analysis of market customers based on carbon-oriented demand response[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(8): 59-67(in Chinese).
- [13] 庞腊成, 吉斌, 徐帆, 等. 面向电-碳市场协同的负荷响应机制与效益分析初探[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 62-71.
PANG Lacheng, JI Bin, XU Fan, et al. Preliminary study on mechanism and benefit analysis of load response for electricity-carbon market collaboration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 62-71(in Chinese).
- [14] YANG Meng, LIU Yisheng. Research on multi-energy

- collaborative operation optimization of integrated energy system considering carbon trading and demand response [J]. *Energy*, 2023, 283: 129117.
- [15] 尚楠, 冷媛, 陈政, 等. 考虑现货电能量交易的发用电主体碳排放权交易决策模型[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(21): 36-46.
- SHANG Nan, LENG Yuan, CHEN Zheng, et al. Decision-making model of carbon emission trading for power generators and consumers considering electricity spot trading[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(21): 36-46(in Chinese).
- [16] 刘阳, 刘继春, 杨语嫣. 考虑欧盟碳边境调节机制的碳-电融合市场各主体决策行为研究[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3111-3120.
- LIU Yang, LIU Jichun, YANG Yuyan. Decision-making behavior of various entities in carbon-electricity integration market considering EU carbon border adjustment mechanism[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3111-3120(in Chinese).
- [17] 孙啸天, 杨争林, 任涵钰, 等. 基于平均场博弈的钢铁生产企业电-碳市场非合作博弈均衡分析[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3058-3068.
- SUN Xiaotian, YANG Zhenglin, REN Hanyu, et al. Non-cooperative equilibrium for iron and steel enterprises in electricity and carbon emission permission market based on mean-field game theory[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3058-3068(in Chinese).
- [18] 张逸, 李渴, 邵振国, 等. 基于数据关联性分析的工业用户电能质量特征识别[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(13): 3512-3526.
- ZHANG Yi, LI Ke, SHAO Zhengguo, et al. Power quality characteristics identification of industrial users based on data correlation analysis[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(13): 3512-3526(in Chinese).
- [19] 张逸, 陈书畅, 刘必杰, 等. 基于盲源分离的工业谐波源负荷分类识别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10): 3850-3861.
- ZHANG Yi, CHEN Shuchang, LIU Bijie, et al. Industrial harmonic source load classification and identification method based on blind source separation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10): 3850-3861(in Chinese).
- [20] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 《电能质量管理暂行办法(暂行)》[EB/OL]. (2023-12-27). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/fzggwl/202401/t20240110_1363202.html.
- National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. The power quality management approach(interim)[EB/OL]. (2023-12-27). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/fzggwl/202401/t20240110_1363202.html(in Chinese).
- [21] 金广厚, 李庚银, 周明. 风险管理机制在电能质量市场中的应用[J]. *电网技术*, 2005, 29(4): 70-75.
- JIN Guanghou, LI Gengyin, ZHOU Ming. Application risk management in power quality market[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(4): 70-75(in Chinese).
- [22] 杨进. 计及电能质量因素的电能定价方法研究[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2006.
- YANG Jin. Electricity pricing method considering power quality factors[D]. Baoding: North China Electric Power University(Hebei), 2006(in Chinese).
- [23] 翁国庆, 王强, 戚军, 等. 电能质量可用户定制微网的按质定价方法[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(S1): 384-392.
- WENG Guoqing, WANG Qiang, QI Jun, et al. A novel microgrid electricity pricing method with featured customizable power quality control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(S1): 384-392(in Chinese).
- [24] 向悦萍, 杨健维, 臧天磊, 等. 计及电能质量的电力市场多主体博弈模型[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3383-3393.
- XIANG Yueping, YANG Jianwei, ZANG Tianlei, et al. Multi-agent game model in electricity market considering power quality[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3383-3393(in Chinese).
- [25] 陈杰. 售电侧放开环境下差异化电能质量购售电策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- CHEN Jie. Research on the strategy of differentiated power quality purchase and sale under the opening electricity retail side[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021(in Chinese).
- [26] 董海艳, 陈杰, 贾清泉, 等. 考虑敏感用户需求的电能质量分级与购售电策略[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(2): 201-209.
- DONG Haiyan, CHEN Jie, JIA Qingquan, et al. Power quality gradation and power purchase and sale strategy considering sensitive users' demand[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(2): 201-209(in Chinese).
- [27] 张逸, 阮正鑫, 邵振国, 等. 面向分布式电源并网的多谐波源责任划分[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(2): 56-64.
- ZHANG Yi, RUAN Zhengxin, SHAO Zhengguo, et al. Contribution determination of multiple harmonic sources for distributed generations connected to grid [J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2022, 34(2): 56-64(in Chinese).
- [28] 金卓勃, 向铁元, 陈红坤, 等. 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法[J]. *电力系统保护与控制*,

- 2017, 45(9): 1-8.
- JIN Zhuoqing, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, et al. Planning method of distributed photovoltaic power generation considering power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 1-8(in Chinese).
- [29] 中华人民共和国生态环境部. 碳排放权交易管理办法(试行)[EB/OL]. 北京: (2020-12-31). https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk02/202101/t20210105_816131.html.
- Ministry of Ecology and Environment, People's Republic of China. Measures for the administration of carbon emission trading will be tried out[EB/OL]. Beijing: (2020-12-31). https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk02/202101/t20210105_816131.html(in Chinese).
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Power quality-deviation of supply voltage: GB/T 12325—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009(in Chinese).
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 电压波动和闪变: GB/T 12326—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Power quality-voltage fluctuation and flicker: GB/T 12326—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009(in Chinese).
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Power quality—three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009(in Chinese).
- [33] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 电力系统频率偏差: GB/T 15945—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Power quality—frequency deviation for power system: GB/T 15945—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008(in Chinese).
- [34] 国家技术监督局. 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Quality of electric energy supply—harmonics in public supply network: GB/T 14549—1993 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1994(in Chinese).
- [35] 林才华, 张逸, 邵振国, 等. 基于模糊 DEA 的长时间尺度电能质量综合评估[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1751-1758.
- LIN Caihua, ZHANG Yi, SHAO Zhenguo, et al. Comprehensive evaluation of power quality on long-time scale based on fuzzy DEA[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1751-1758(in Chinese).
- [36] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委办公厅关于印发首批 10 个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL]. 北京: (2013-10-15). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html.
- National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Notice of the General Office of the National Development and Reform Commission on Issuing the First Batch of Greenhouse Gas Emission Accounting Methods and Reporting Guidelines for Enterprises in 10 Industries(for Trial Implementation) (Climate [2013]2526, Development and Reform Office) [EB/OL]. Beijing: (2013-10-15). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html(in Chinese).
- [37] 李琼林, 刘书铭, 温佳静, 等. 计及电能质量影响的 10kV 配电网损耗计算模型及其实验验证[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 212-220.
- LI Qionglin, LIU Shuming, WEN Jiajing, et al. Calculation model of 10 kV distribution network loss considering power quality impact and its experimental verification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 212-220(in Chinese).
- [38] 蒋利民, 孟珺遐, 张静, 等. 复合电能质量扰动下低压配电网中关键设备附加损耗的解耦分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 59-66.
- JIANG Limin, MENG Junxia, ZHANG Jing, et al. Decoupling analysis of additional loss of key equipment in low voltage distribution network under complex power quality disturbance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 59-66(in Chinese).
- [39] 孙玲玲, 李海滨, 贾清泉, 等. 面向用户侧分布式光伏资源集群开发的博弈策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 26-37.
- SUN Lingling, LI Haibin, JIA Qingquan, et al. Game strategy for cluster development of user-side distributed photovoltaic resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 26-37(in Chinese).
- [40] 吴璐阳, 辛洁晴, 王承民. 计入用户从众心理的分布式

- 光伏装机容量预测[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 83-92.
- WU Luyang, XIN Jieqing, WANG Chengmin. Installed capacity forecasting for distributed photovoltaic considering herd mentality of users[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 83-92(in Chinese).
- [41] 吴晗, 欧阳森, 梁炜焜. 计及储能循环寿命的柔性配电网优化运行及效益均衡策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 99-109.
- WU Han, OUYANG Sen, LIANG Weikun. Optimal operation and benefit balance strategy for flexible distribution network considering cycle life of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 99-109(in Chinese).
- [42] 听固德威光伏发电曲线背后的故事[EB/OL]. (2018-09-18). https://www.sohu.com/a/254502956_100111268.
- Listen to the story behind Gudewei's photovoltaic power generation curve[EB/OL]. (2018-09-18). https://www.sohu.com/a/254502956_100111268(in Chinese).
- [43] 王建勋, 张逸, 张嫣, 等. 面向现代工业园区的电压暂降综合防治方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 156-163.
- WANG Jianxun, ZHANG Yi, ZHANG Yan, et al. Comprehensive prevention and control scheme for voltage sag in modern industrial park[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 156-163(in Chinese).
- [44] 张逸, 张妍, 张嫣, 等. 缓减电压暂降影响的电气综合能源系统储气装置选址定容方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 37-44.
- ZHANG Yi, ZHANG Yan, ZHANG Yan, et al. Location and constant volume method of gas storage device in integrated electricity-gas energy system for mitigating voltage sag effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 37-44(in Chinese).
- [45] 同向前, 王海燕, 尹军. 基于负荷功率的三相不平衡度的计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 24-30.
- TONG Xiangqian, WANG Haiyan, YIN Jun. Calculation method of three-phase unbalance factor based on load power[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2011, 23(2): 24-30(in Chinese).

附录

<http://nps.epri.sgcc.com.cn/djgxcb/CN/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240372>



张逸

在线出版日期: 2024-05-18。

收稿日期: 2024-02-14。

作者简介:

张逸(1984), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量、主动配电网及电力数据分析等, zhangyi@fzu.cn;

向梦如(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析, xiangmengru0@163.com;

郑宗华(1984), 男, 博士, 讲师, 研究方向为无线电能传输技术, 微波/毫米波集成电路设计与应用, zhengzh0706@fzu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华, 邱丽萍)