文章编号：1674-0629(2026)09-0119-11 中图分类号：TM44 文献标志码：A
DOI：10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2026.09.011

考虑边际碳排放因子不确定性的低碳需求响应技术

关哲[1]，杨晨[2]，冯皓然[2]，陈丽萍[1]，岑海凤[1]，李姚旺[2]，杜尔顺[2]，张宁[2]
（1. 广东电网有限责任公司广州供电局，广州 510620；2. 清华四川能源互联网研究院，成都 610213）

摘要：在实现“双碳”目标的过程中，电力在终端能源消费的占比将逐步提高，该特征使得电力行业低碳转型成为全社会降碳减排的基本前提。电力系统中的灵活性负荷可以通过需求响应技术来减少系统运行过程中的碳排放量，但现有电力需求响应技术和基于动态碳排放因子的低碳需求响应技术均不能让用户直观感受用电变化带来的减碳效益。针对此问题，提出了基于边际碳排放因子的低碳需求响应技术，该技术直接以各节点边际碳排放因子为引导信号，告知用户在当前状态下增减用电量带来的碳排放变化，从而引导用户自发采取措施降低系统碳排放。此外，分析了新能源出力不确定性对用户采取低碳需求响应措施偏好程度的影响，并基于修改的PJM5节点系统开展了仿真验证，实验结果验证了所提方法的有效性。

关键词：边际碳排放因子；低碳需求响应；新能源不确定性；低碳优化运行；电力系统碳减排

Low-Carbon Demand Response Technology Considering the Uncertainty of the Marginal Carbon Emission Factor

GUAN Zhe[1], YANG Chen[2], FENG Haoran[2], CHEN Liping[1], CEN Haifeng[1], LI Yaowang[2], DU Ershun[2], ZHANG Ning[2]
（1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China；2. Sichuan Energy Internet Research Institute Tsinghua University, Chengdu 610213, China）

Abstract: In the process of achieving the "dual carbon" goal, the proportion of electricity in terminal energy consumption will gradually increase, which makes the low-carbon transformation of the power industry a basic prerequisite for carbon reduction and emission reduction in the whole society. The flexible load in power system can reduce carbon emissions during system operation through demand response technology, but existing power demand response technology and low-carbon demand response technology based on dynamic carbon emission factors cannot allow users to intuitively capture the carbon reduction benefits through electricity consumption changing. In response to this issue, a low-carbon demand response technology based on marginal carbon emission factors is proposed. This technology directly uses the marginal carbon emission factors of each node as a guiding signal, which can inform users of the changes in carbon emissions caused by increasing or decreasing electricity consumption in the current state, thereby guiding users to take spontaneous measures to reduce system carbon emissions. In addition, the impact of uncertainty in new energy output on user preference for low-carbon demand response measures is also analyzed, and simulation verification is conducted based on the modified PJM-5 system. The experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: marginal carbon emission factor; low-carbon demand response; uncertainty of the new energy; low-carbon optimal operation; power system carbon reduction

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52107228)。
Foundation item: Supported by the Youth Science Fund Project of the National Natural Science Foundation of China (52107228).

0 引言

近年来，气候变暖问题已受到世界各国政府和组织的重视，控制以二氧化碳为主的温室气体排放已成为国际共识。电力行业作为我国单一行业碳排放占比最高的行业，其碳排放占整个能源领域碳排放的40 %以上[1]。同时，电能作为被广泛使用的二次能源，在工业、交通、建筑等生产与生活活动中占据重要地位，且在“碳达峰、碳中和”的过程中，电能这一终端能源消费的占比会逐渐提升[2]。因此，行业的低碳转型成为实现“双碳”目标的重要支撑。

面向电力行业低碳转型的迫切需求，不少学者已经从能源结构规划层面和系统运行调度层面开展了相关探索。在长期能源结构规划层面，文献[3]选取了电力行业双碳目标不同年份实现下的多类场景，并深入对比了不同场景下电源和电网规划结果，从各大区域间的电力输送情况和风光水资源禀赋情况分析了清洁低碳电源发展趋势。文献[4]同样以电力行业的碳排放为约束条件，构建了电力行业长期规划与短期运行联合优化模型，为电力行业低碳转型提供了可再生能源扩张、煤电提前退出、碳捕集技术应用等一系列措施。文献[5-6]在构建电网低碳规划模型时，重点考虑了需求侧可调节负荷的响应作用，能够缓解供需压力，以此在保证电网整体规划发展需求的情况下尽量减少电源的建设成本。文献[7]针对传统火力发电厂投资回报率低和高碳排效率这两个特征，结合我国具体的自然资源分布和不同地区绿证分配情况，构建了适用于火力发电厂发展路径的规划模型，求解出能够减少火力发电碳排、增加投资收益的规划方案。文献[8]以发电企业低碳转型为视角，构建了计及技术、经济、环境等多维影响因素的发电企业低碳转型规划模型，通过模型求解，为发电企业低碳转型提供了推高储能技术及资源储备、退役火电机组改造和装加碳捕集装置等技术手段的建议。以上研究从源侧出发，解决了考虑电力系统碳排目标的发电能源结构规划问题。

在短期系统运行调度层面，不少学者从统一调度角度出发，对电力系统低碳优化运行进行了研究。文献[9]以区域型综合能源系统位研究对象，通过需求响应、电动汽车等灵活性资源的调节能力，改善综合能源系统中燃气机组的碳排放，从而减少系统运行碳排。文献[10-11]针对含碳捕集装置的多能互补发电系统为研究对象，构建了发电系统在日前调度时的发电侧低碳优化运行模型。同样文献[12-13]以储能作为减碳要素，通过构建优化运行模型的技术手段为高比例新能源基地提供低碳运行决策方案，以提升系统的低碳、经济及可靠性。文献[14-15]针对需求侧电力负荷的灵活用电行为，构建了建筑物内不同负荷如照明、空调等的电能消耗模型，进一步利用优化技术来实现整个系统的用能成本和碳排放量的减少。文献[16-17]均利用碳排放流理论，将网络系统各环节的碳排放信息与潮流信息耦合在一起，进而分别构建了考虑网络损耗对应碳排放量的电力系统和能源系统的低碳-经济优化运行模型，实现系统最优低碳运行。上述研究是在确定的电力系统组成下通过优化运行电源侧、负荷侧以及全网来实现降碳减排，该方式能够在已有的电网结构下通过尽量减少经济成本方式实现电力系统减少碳排放。

尽管已有较多研究从低碳规划和低碳运行两个角度为电力系统低碳转型提供了较多方法与结论参考，但目前主流研究仍以源侧减少化石能源出力为切入点，从系统整体管控层面通过统一模型优化源侧所计算出的碳排放来减少系统碳排放，而忽视了负荷侧对于用电行为关联碳排放水平的感知，该类方法在实际操作过程中不能调动用户减碳的积极性，因此难以深度完成碳减排。目前已有相关研究直接从减少碳排放的角度出发，利用用户侧接收碳排放因子信号这一手段，激励用户改变用电行为，进而对源侧发电碳排放水平进行影响，从而实现电力系统的碳减排，该技术被称为“低碳需求响应技术”[18]。该技术通过向用户发布预测的碳排放因子曲线，用户可以在根据动态碳排放因子知晓自己的低碳用电时段和高碳用电时段，进而采取电量转移的用电措施改变用电的碳排放水平。该机制与传统的统一管理用户侧资源有所不同，能够让用户清晰感知自身减碳前后的碳排放水平，因此能够在实际操作中进行推广和应用[19]。

然而，在现有基于动态碳排因子的低碳需求响应技术下，用户仅能感知变化前系统静态的碳排放因子数据，对比不同时段用电碳排放水平的高低，而不能合理刻画用户用电行为改变后系统/源侧碳

排放的变化。比如碳排因子较低时刻新能源可能已经满发，与此同时，用户在该机制引导下会多用电，系统新增的出力需求反而来自于非清洁能源，不能真正实现降碳减排的引导。因此，有学者提出了边际碳排放因子的概念，能够刻画负荷单位电量变化对于系统碳排放的影响，对于分析电网中碳排放因子动态变化具有很好的指导作用[20]。有学者利用边际碳排放因子(marginal carbon emission factor，MCEF)刻画节点功率变化情况下的系统碳排变化，以更加合理地评估系统/源侧碳排变化情况[21]。

因此，面向用户侧减碳引导激励，针对当前低碳需求响应技术不能清晰地让用户感受到用电电量变化带来碳排放量变化影响的问题，本文利用MCEF技术刻画各负荷节点电量波动对于系统整体碳排的影响，从而更为真实地刻画响应后系统减碳情况。本文基于MCEF进一步构建负荷侧低碳用能优化模型，并考虑了新能源预测误差情对边际碳排放因子的影响。最后，利用改进的PJM-5节点算例对本文所提考虑边际碳排放因子不确定性的低碳需求响应技术进行了验证。

1　基于边际碳排放因子不确定性的低碳需求响应机制

文献[18]在参考电力需求响应机制[22-23]的基础上，以多时段动态平均碳排放因子为信号引导用户降碳减排，解决了碳减排无法以经济激励的方式进行引导的问题。

本文区别于已有低碳需求响应研究采取动态碳排放因子作为减碳引导信号，选取MCEF能够使用户获得更大的参与程度。尽管两种引导信号都是从多个时段体现碳排放水平的差异性，但在执行减碳的过程中，仍存在一定的差异。两者的区别表现为：动态碳排放因子能够让用户知晓一天内各时段高碳排时段和低碳排时段，用户可以根据自身用电量计算碳排放量，进一步明确什么时段用电更为清洁，从而在电能清洁的时段多用电。而边际碳排放因子不会计算用电碳排放量，但是会告知用户多用一度电或者少用一度电系统碳排放如何变化。因此，从帮助用户减碳角度而言，边际碳排放因子更为直观和高效，也更能体现系统碳排放由于用户用电行为改变而变化的情况。本文通过分析MCEF不确定性，为用户进一步提供更为细致的结果参考。

由此可以明确基于边际碳排放因子信号的减碳引导机理如图1所示。

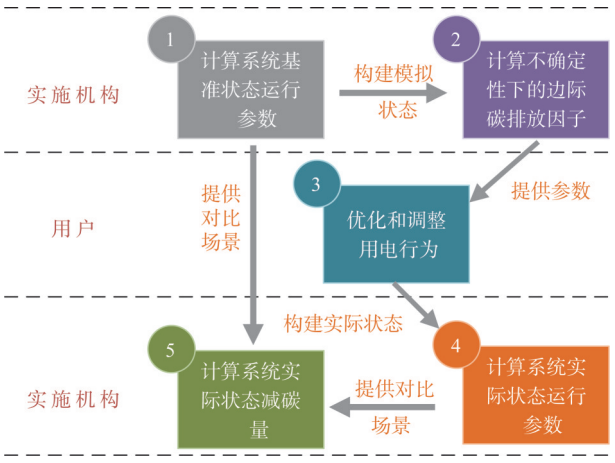


图1　基于边际碳排放因子的低碳需求响应机制示意图

Fig. 1　Sketch diagram of low-carbon demand response mechanism based on marginal carbon emission factor

如图1所示，基于边际碳排放因子不确定性的低碳需求响应机制主要由5个步骤构成。

1)计算系统基准状态运行参数：低碳需求响应实施机构通过所预测电力负荷进行运行模拟，计算出最优经济性下系统各机组功率数据，进而计算系统整体碳排放信息，成为基准状态碳排放信息。

2)计算不确定性下的MCEF：实施机构引入新能源不确定状态，并模拟系统负荷在发生变化时，重新计算最优经济性下的系统各机组功率数据和系统的碳排放信息，与步骤1)计算出来的碳排放信息作差，得到考虑不确定因素的基准状态下系统的MCEF，并下发给各用户。

3)优化和调整用电行为：用户知晓各时段下MCEF，则可以优化自身用电计划，采取调节灵活性负荷的措施，计算得到系统预期减碳量，并根据不确定性因素选择偏好措施。

4)计算系统实际状态运行参数：实施机构根据用户用电行为调整后的负荷，重新进行最优调度，得到电网变化后的实际运行状态，并计算出实际碳排放信息，称之为实际状态碳排放信息。

5)计算系统实际状态减碳量：根据系统基准状态和实际状态碳排放量计算出系统基于MCEF实施的减碳量。

此处对传统的电力需求响应(electricity demand response，EDR)、基于动态碳排放因子的低碳需求

响应(low-carbon demand response based on dynamic carbon emission factor，CDR-DCEF)和基于MCEF的低碳需求响应(low-carbon demand response based on MCEF，CDR-MCEF)3种能够实现减碳的需求侧响应机制进行对比，结果如表1所示。

表1 3种需求侧响应方法减碳差异

Tab. 1 Differences in carbon reduction among three demand response methods

响应方法	EDR	CDR-DCEF	CDR-MCEF
响应控制方式	统一调度/自我调节	自我调节	自我调节
是否减少用电量	可不减少(统一调度模 式)，需减少(自我调节模式)	可不减少	可不减少
减碳首要目的	系统减碳(统一调度模式)，系统和用户减碳(自我调节模式)	用户减碳	系统减碳
能否精确预估减碳量	精确计算(统一调度模式)，不精确(自我调节模式)	不太精确	比较精确
实现难度	较困难(统一调度模式)，较简单(自我调节模式)	较简单	较简单

如表1所示，CDR在响应控制方式、减少用电量方面比EDR自由度更高，实现难度更低。同时CDR-MCEF比CDR-DCEF能够更加精确预估减碳量。由此可见本文所提CDR-DCEF机制对于电力系统降碳减排具有更好的适用性。

2 考虑不确定性的边际碳排放因子计算

2.1 节点边际碳排放因子计算方法

如前文所述，节点边际碳排放因子主要表征某节点负荷变化引起的系统整体碳排放变化情况，根据定义可以表示节点边际碳排放因子如下：

$$\delta_{i,t}=\frac{\partial E_{\mathrm{sys},t}}{\partial P_{\mathrm{L},i,t}} \tag{1}$$

式中：$\delta_{i,t}$为节点i在时刻t的边际碳排放因子；$\partial E_{\mathrm{sys},t}$为在节点负荷变化情况下系统的碳排放微分变化量；$\partial P_{\mathrm{L},i,t}$为节点$i$的负荷微分变化量。而系统的碳排放量变化$\Delta E_{\mathrm{sys},t}$可以由式(2)求得：

$$\Delta E_{\mathrm{sys},t}=\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{G}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G,mar},t}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0},t}) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{G}}$为常规机组的燃料排放因子行向量；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G,mar},t}$和$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0},t}$分别为系统机组在模拟运行状态(负荷功率变化计算边际碳排放因子)下的发电功率和基准状态下的发电功率。

考虑到系统在最优经济性模式下运行，在节点负荷变化前和节点负荷变化后，系统运行状态的相关参数都应由经济调度模型求解，此处以最小化系统运行成本为目标函数，构建系统优化运行模型：

$$\min\sum_{t\in T}\boldsymbol{c}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G},t} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G,min}}\leqslant\boldsymbol{P}_{\mathrm{G},t}\leqslant\boldsymbol{P}_{\mathrm{G,max}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{e}_{\mathrm{G}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G},t}+\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{R},t}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{R},t}^{-})=\boldsymbol{e}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{D},t} \tag{5}$$

$$-\boldsymbol{P}_{\mathrm{line,max}}\leqslant\boldsymbol{F}\times[\boldsymbol{J}_{\mathrm{G},t}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G},t}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{R},t}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{R},t}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{R},t}^{-})-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D},t}]\leqslant\boldsymbol{P}_{\mathrm{line,max}} \tag{6}$$

$$-\boldsymbol{R}_{\mathrm{G}}\leqslant\boldsymbol{P}_{\mathrm{G},t}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{G},t-1}\leqslant\boldsymbol{R}_{\mathrm{G}} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{c}_{\mathrm{G}}$为常规机组运行成本系数构成的行向量；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G},t}$为元素$P_{\mathrm{G},k,t}$构成的列向量，表示第$k$个常规机组在时段$t$的出力；T为一天总时段。式(3)表示整个系统运行的目标函数为经济性最优。式(4)—(7)约束了机组的发电功率。其中式(4)约束了机组出力，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G,max}}$和$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G,min}}$分别为机组最大出力和最小出力向量。式(5)为源荷平衡约束，其中$\boldsymbol{e}_{\mathrm{G}}$、$\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}$和$\boldsymbol{e}_{\mathrm{D}}$均为单位行向量，元素个数为对应的发电机组、新能源发电单元和负荷个数。$\boldsymbol{P}_{\mathrm{R},t}$和$\boldsymbol{P}_{\mathrm{R},t}^{-}$分别为新能源出力矩阵和弃电向量，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{D},t}$为负荷向量。式(6)为线路传输功率约束，矩阵$\boldsymbol{F}$为功率转移分布因子矩阵，旨在将各节点的注入功率分配在支路上。$\boldsymbol{J}_{\mathrm{G},t}$和$\boldsymbol{J}_{\mathrm{R},t}$为常规机组和新能源机组在系统中节点位置索引的矩阵。$\boldsymbol{P}_{\mathrm{line,max}}$为线路允许传输功率的最大值。式(7)为爬坡约束，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{G}}$为机组爬坡率。

2.2 考虑新能源不确定性的节点边际碳排放因子计算方法

电力系统的基准状态、模拟状态和实际状态，均在最优经济调度模型下运行[24-27]。对于具有不确定性的新能源出力，本文采取抽样的思想，对多种不确定新能源出力场景下的系统运行状态进行模拟。新能源出力不确定性可用以下场景进行模拟：

$$P_{\mathrm{W},\omega,t}=P_{\mathrm{W,pre},t}+x_{\mathrm{W},\omega,t},\ t=1,\cdots,T \tag{8}$$

$$P_{\mathrm{PV},\xi,t}=P_{\mathrm{PV,pre},t}+x_{\mathrm{PV},\xi,t},\ t=1,\cdots,T \tag{9}$$

式中：$P_{\mathrm{W},\omega,t}$为风力发电在场景ω下的出力取值，$x_{\mathrm{W},\omega,t}$为该场景下风力发电预测误差随机变量的抽样值，抽样方法为随机抽样，所抽样的分布可以由文献[28]的方法获得；$P_{\mathrm{PV},\xi,t}$和$x_{\mathrm{PV},\xi,t}$分别为太阳能发电在场景ζ下的出力取值和预测误差随机变量的抽样值；$P_{\mathrm{W,pre},t}$和$P_{\mathrm{PV,pre},t}$分别为风力发电和太阳能发电预测出力取值。若系统中风力发电和光伏发电的

日出力曲线场景数量分别为n_{w}和n_{PV}，则系统新能源日出力曲线场景数为两者的组合即$n_{\mathrm{w}}\times n_{\mathrm{PV}}$。

将不同的不确定性出力场景转换为系统经济调度的确定输入，进行模型的重复求解。图2为考虑新能源出力不确定性的边际碳排放因子计算流程。

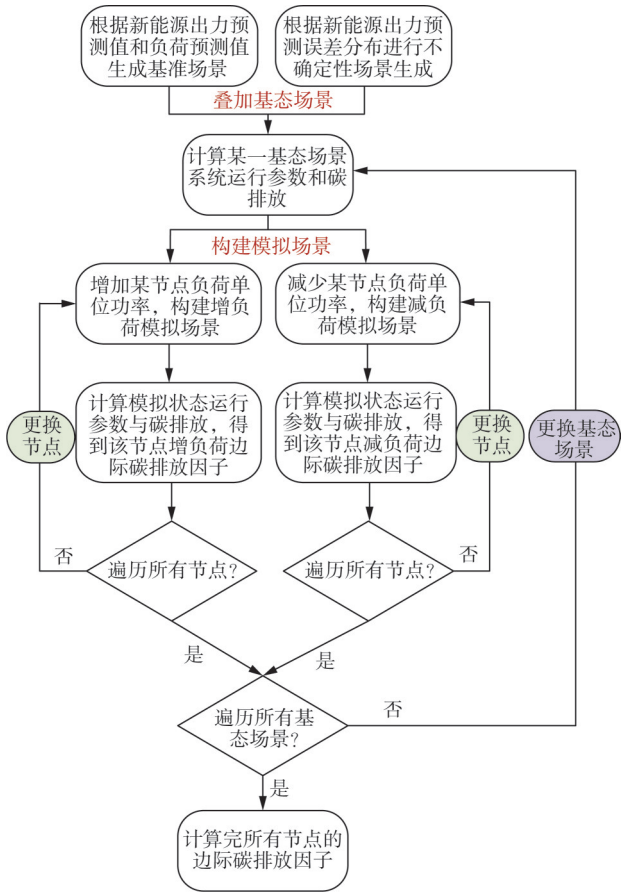


图2　考虑不确定性的边际碳排放因子计算流程

Fig. 2　Calculation process for marginal carbon emission factors considering uncertainty

由图2所示，将新能源预测值所构建的基准场景和考虑预测误差的不确定场景进行叠加，能够得到多个基态场景，分别针对基态场景进行所有节点增/减负荷边际碳排放因子计算，并遍历所有基态场景，最终能够计算出整个系统考虑新能源出力不确定性下的边际碳排放因子，其中每一次运行状态下的参数由2.1节所构建的经济调度模型求解。

3　基于边际碳排放因子的用能优化模型

用户接收边际碳排放因子引导信号之后，可以根据自身的情况制定不同的应对策略，本文拟通过优化模型求解得出最优的降碳减排的策略，探究通过边际碳排放因子能够产生将碳减排的效益。当前电力系统中主要的灵活性资源有电力用户负荷和储能两种类型，因此本文分别构建了两种灵活性资源在参与低碳需求响应时的最优运行模型。

3.1　电力用户负荷低碳用能优化模型

电力用户参与低碳需求响应主要有两大类，一类是普通生活生产用电，该类用电行为的变化特征是电能的使用与固定的生产活动用电关联程度较高，用电行为相对刚性，难以大幅跨时段调整。因此在考虑用电舒适度的情况下，负荷响应只能往相邻时段进行，即电量只能在相邻时段转移，相应模型构建如下。

$$\max \sum_{t\in T}(\delta^{-}_{i,t}\Delta P^{-}_{\mathrm{D},i,t}-\delta^{+}_{i,t}\Delta P^{+}_{\mathrm{D},i,t})p_{\mathrm{cp}} \tag{10}$$

$$-\lambda_{\mathrm{D}}P_{\mathrm{D},i,t}\leqslant\Delta P^{-}_{\mathrm{D},i,t}\leqslant 0 \tag{11}$$

$$0\leqslant\Delta P^{+}_{\mathrm{D},i,t}\leqslant\lambda_{\mathrm{D}}P_{\mathrm{D},i,t+1}+\lambda_{\mathrm{D}}P_{\mathrm{D},i,t-1} \tag{12}$$

$$\mathrm{sgn}\,(-\Delta P^{-}_{\mathrm{D},i,t})+\mathrm{sgn}\,(\Delta P^{+}_{\mathrm{D},i,t})\leqslant 1 \tag{13}$$

$$\sum_{t\in T}-\Delta P^{-}_{\mathrm{D},i,t}+\Delta P^{+}_{\mathrm{D},i,t}=0 \tag{14}$$

式中：$\delta^{+}_{i,t}$和$\delta^{-}_{i,t}$分别为增/减负荷情况下的节点边际碳排放因子；p_{cp}为碳配额价格，旨在针对需要付出碳成本的企业构建最大化减碳收益的目标函数，对于非收益导向的用户，可以置p_{cp}为1，目标函数变为最大化减碳量。为了表示区分，将增减负荷情况下的负荷变化量均取为正数，因此$\delta^{+}_{i,t}$取值为正，$\delta^{-}_{i,t}$取值为负。$\Delta P^{+}_{\mathrm{D},i,t}$和$\Delta P^{-}_{\mathrm{D},i,t}$分别为负荷的增加量和减少量。式(10)表示最大化系统的减碳量。式(11)中λ_{D}为调节系数，表明能调节负荷占当前负荷的百分比式(11)约束了负荷减少量。式(12)表示某时段增加的负荷不能超过相邻两时段转移进来的负荷之和。式(13)表示同一时段负荷不能既增加又减少。式(14)表示同一天内负荷总量不变。

另一类负荷如电动汽车等，其在一个周期内充电行为调整的灵活程度较大，大规模充电汽车负荷曲线调整不必受到相邻时段转移的限制，允许部分电力负荷全天内进行转移，因此电量调节约束如下。

$$-\lambda_{\mathrm{D}}P_{\mathrm{D},i,t}\leqslant\Delta P^{-}_{\mathrm{D},i,t}\leqslant 0\leqslant\Delta P^{+}_{\mathrm{D},i,t}\leqslant\lambda_{\mathrm{D}}P_{\mathrm{D},i,t} \tag{15}$$

至此，式(10)、(13)—(15)即可构成第二类电力用户负荷参与边际碳排放因子引导的低碳用能优化模型。

3.2　储能减碳优化运行模型

储能可以通过自身的充放电行为，增加系统负

荷整体对清洁能源的消纳，从而实现降碳减排，其用能优化模型如下：

$$\max \sum_{t \in \mathrm{T}} (-P_{\mathrm{ES,disch},t}\delta^{-}_{i,t} - P_{\mathrm{ES,ch},t}\delta^{+}_{i,t})\, p_{\mathrm{cp}} \tag{16}$$

$$0 \leqslant P_{\mathrm{ES,ch},t} \leqslant (1 - M_t P_{\mathrm{ESmax}}) \tag{17}$$

$$0 \leqslant P_{\mathrm{ES,disch},t} \leqslant M_t P_{\mathrm{ESmax}} \tag{18}$$

$$E_{\mathrm{ES},t} + \eta_{\mathrm{ES}} E_{\mathrm{ES,ch},t} - \frac{1}{\eta_{\mathrm{ES}}} P_{\mathrm{ES,disch},t} = E_{\mathrm{ES},t+1}) \tag{19}$$

$$\mathrm{S}_{\mathrm{ES,min}} \leqslant E_{\mathrm{ES},t} \leqslant \mathrm{S}_{\mathrm{ES,max}} \tag{20}$$

$$E_{\mathrm{ES},0} = E_{\mathrm{ES},24} \tag{21}$$

式中：$P_{\mathrm{ES,disch},t}$和$P_{\mathrm{ES,ch},t}$分别为储能的放电和充电功率，式(16)表明储能减碳优化运行的目标函数为尽可能地减少充电过程给系统增加的碳排放，尽可能地增加放电过程中为系统减少的碳排放。P_{ESmax}为储能的最大充放电功率，M_t为限制储能充放电状态的二进制变量。式(17)—(18)表明储能不能同时处于放电状态和充电状态。式(19)为相邻时段储能荷电状态约束。式(20)约束了储能电量只能位于允许的最大值和最小值之间。式(21)表明一个充放电周期结束后，储能的荷电状态保持不变。

至此，用户侧不同类型负荷参与边际碳排放因子引导下的用能优化模型构建完毕。

4 算例分析

4.1 参数设定

本文选取修改的PJM-5节点系统作为演算算例，该系统包含5台常规机组、一座风电场、一座光伏电站和一座储能电站。其中储能电站充放电效率为0.9，最小和最大允许的荷电状态分别为1 MWh和9 MWh，最大充放电功率为2 MW。常规机组参数如表2所示[21]。

该系统的示意图和线路传输容量有功限制如图3所示。

表2 修改的PJM-5节点系统常规机组参数

Tab. 2 Related parameters of the modified PJM-5 system

机组编号	机组类型	最大出力/MW	成本/(元·MWh^{-1})	碳排放因子/($tCO_2 \cdot MWh^{-1}$)
G1	燃气	40	300	0.4
G2	燃气	170	350	0.38
G3	煤电	520	140	0.77
G4	煤电	200	150	0.8
G5	煤电	600	100	0.72

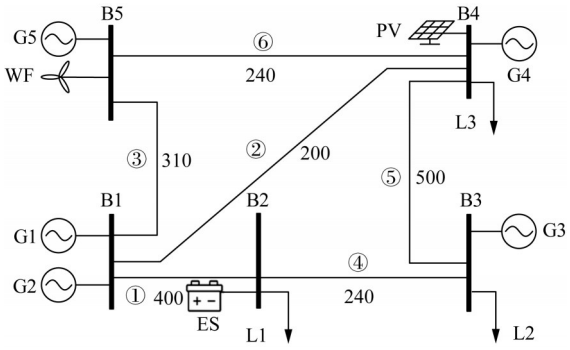


图3 修改的PJM-5节点系统图

Fig. 3 Diagram of the modified PJM-5 system

风力发电、太阳能发电以及各节点负荷功率曲线如图4所示。

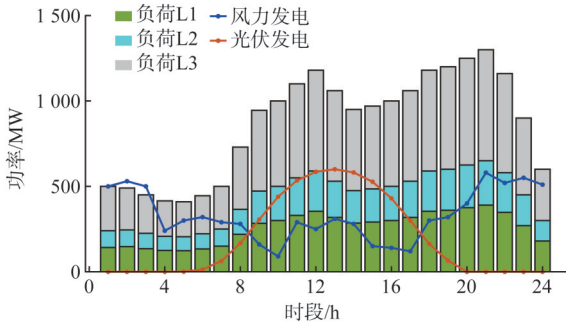


图4 新能源出力及负荷功率数据

Fig. 4 Output of the new energy and load data

储能电站在基准状态下的充放电行为受市场电价引导，具体电价数据及充放电功率可以参考文献[29]。

4.2 边际碳排放因子引导下的低碳需求响应效果分析

本节先针对不考虑确定性情况下的碳排因子进行计算，并以此作为引导信号，对各类负荷及储能实施低碳需求响应。考虑到调节模型的可实现性，将L2作为第一种负荷类型(不可跨时段调节，调节系数0.05)，将L1和L3设定为第二种负荷类型(可跨时段调节，调节系数0.1)，计算出该系统基准状态的边际碳排因子如图5所示。

如图5所示，在不同时段边际碳排放因子呈现出不同的特征。边际碳排放因子数据在0~0.85区间内。大部分时段，不同负荷节点功率变化所引起的系统碳排放量变化是一致的，说明在此类情况下，增加或者减少出力的发电机源自同一台，且传

输线路功率未达到允许上限。为了更进一步分析边际碳排放因子，此处结合有功功率达到线路允许上线的支路和各机组出力进行分析。

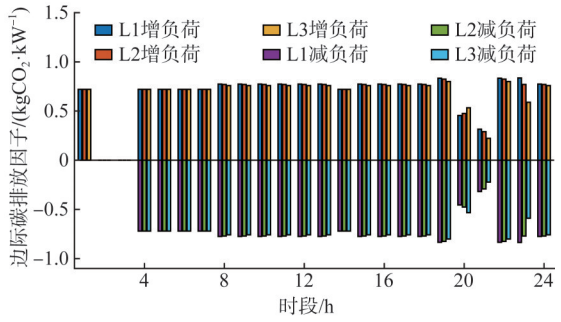


图 5　修改的 PJM-5 节点系统边际碳排放因子

Fig. 5　Marginal carbon emission factors of the modified PJM-5 system

结合图 4—7 可知，在 0—1 时间段，增负荷的边际碳排放因子大于 0，减负荷的边际碳排放因子为 0，因为在该时段，风电完全支撑系统负荷需求，且未有弃电。因此此时负荷减少用电量，则减少的零碳电源出力，故减负荷时边际碳排放因子为 0。而增负荷时需要常规机组进行增发出力，该特征与 3—7 时段一致，因此 3 种负荷的增负荷边际碳排放因子保持一致，等于成本最低的常规机组 G5 发电排放因子，且由于支路③未到达容量限制，因此 G5 能够将电能传输出来。在 19—21 时间段，边际碳排放因子显著低于其他时间段，得益于该时间段 G1 机组成为了边际运行机组，而 G1 机组的碳排放比较低，因此该时段的边际碳排放因子也较低。

此处针对 7—8 时间段和 19—20 时间段两种典型的 3 种负荷边际碳排放因子有差异的情况进行更

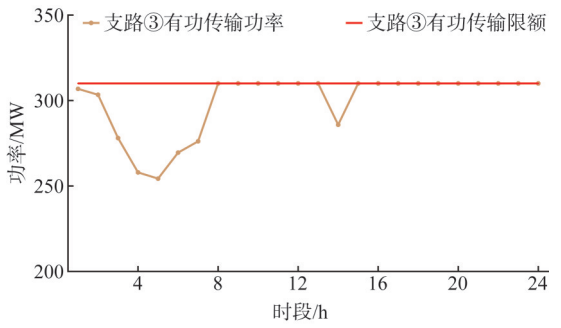


图 6　支路③(节点 5→1)传输有功功率及其限额

Fig. 6　Active power transmission and limitation of the branch ③ (from bus 5 to 1)

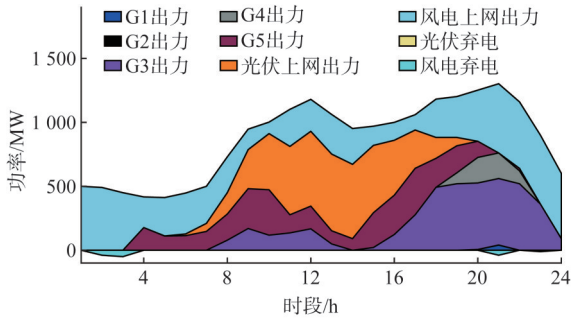


图 7　各机组发电功率及新能源弃电功率

Fig. 7　Power generation and curtailment of each new energy unit

进一步的分析，结果如图 8—9 所示。

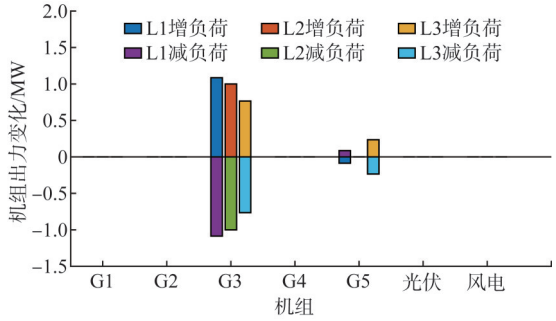


图 8　7—8 时间段边际机组出力变化情况

Fig. 8　Power variation of marginal units from 7 to 8

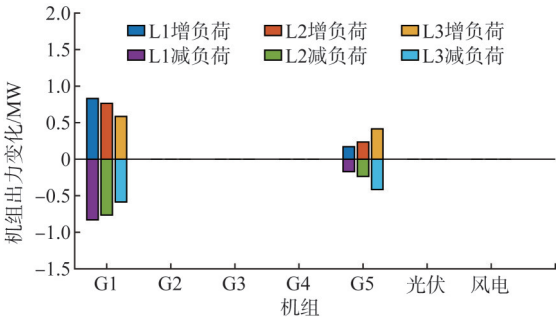


图 9　19—20 时间段边际机组出力变化情况

Fig. 9　Power variation of marginal units from 19 to 20

在 7—8 时间段，负荷 L1 和 L3 的边际机组为 G3 和 G5，但两台边际机组的功率变化方向不同，同时 L2 的边际机组只有 G3。在 19—20 时间段，G1 和 G5 均作为边际机组，但 G1 占比更大，因此其低发电排放因子使得 L1 的边际排放因子更小。从上述可以看出，不同时段、不同负荷在发生变化时，系统的边际机组不同。

以下对于用户优化用能减碳行为进行分析，下图展示了不同负荷类型原始用能曲线和优化用能负

荷曲线的结果。

从图 10 可以看出，相较于可以跨时段转移电量的响应负荷(第二类负荷，如 L1、L3)来说，相邻时段转移电量的响应负荷(第一类负荷，如 L2)优化后的用能曲线更为贴近原用能曲线，而 L2 则会较明显更改原曲线波动趋势。同时，两类负荷与图 11 中储能对于增减用电量的时间点大致相同。且储能在系统原本发生新能源弃电的时段进行了更大容量的充电。经过负荷调节、储能充放电管理，该系统预计减碳 206.4 t(3.3 %)，实际减碳 176.9 t(2.9 %)，尽管实际减碳相对于预计减碳量有所出入，该偏差来源于边际碳排因子本身线性化过程带来的误差。但仍能说明本文所采取的边际碳排因子对于引导消纳清洁能源、减少系统碳排放的积极引导作用。

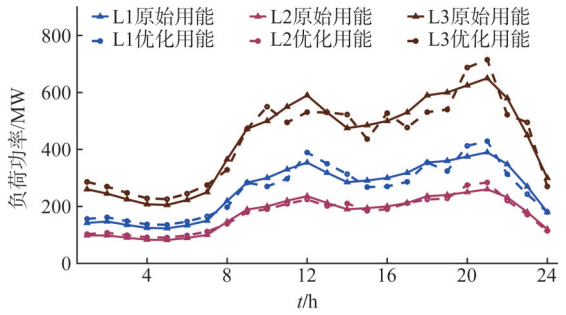


图 10 基于边际碳排放因子的用户侧负荷低碳需求响应

Fig. 10 Low-carbon demand response of the user-side load based on the marginal carbon emission factor

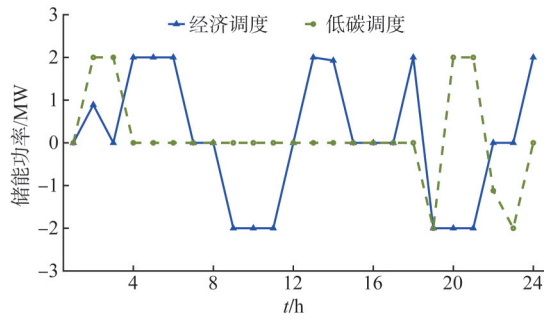


图 11 基于边际碳排放因子的储能低碳需求响应

Fig. 11 Low-carbon demand response of the energy storage based on the marginal carbon emission factor

针对企业通过边际碳排放因子引导开展低碳需求响应实现的减碳效益分析，本文在负荷 L1 处设定一工厂负荷，工厂响应前后负荷曲线以及不同碳配额价格下的减碳效益如表 3 所示(其中碳配额价格选自欧洲 2021—2024 年碳配额波动价格[30])。

结合图 12 和表 3 可知，工厂负荷在 1 MW 左右，通过工厂减碳响应，在不同的碳配额价格下可实现单日 110~220 元的减碳收益。通过所提模型，该工厂可以减少约 5 %碳成本，具有不错的减碳效益，能够从经济角度调动企业用户降碳减排的积极性。

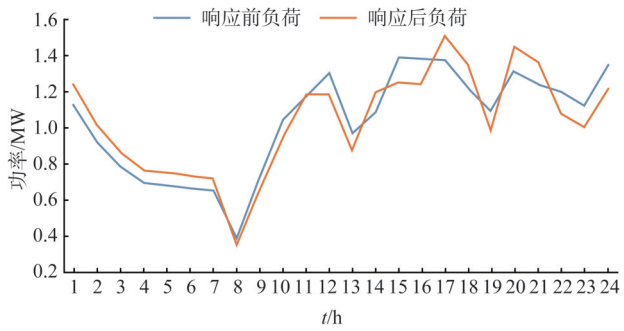


图 12 某工厂响应前后负荷曲线

Fig. 12 Load curves before and after response of the factory

表 3 不同碳配额价格下工厂减碳效益

Tab. 3 Carbon reduction benefits of the factory under different carbon permit prices

碳配额价格(元·t^{-1})	400	500	600	700	800
减碳效益/元	111.6	139.5	167.4	195.2	223.1

4.3 考虑不确定性的边际碳排放因子分析

采取第二节的方法对新能源出力的不确定性进行分析，设定新能源预测误差概率密度函数均值参数为 0，标准差为 0.1 倍的功率值。其中风电出力和光伏发电出力场景均为 10 个，组合场景为 100 个，对各种场景的边际碳排放因子求解，得到如图 13 所示的分布图，下文以 L1 处边际碳排因子分布图和采取增减负荷的场景数占比为例，说明不确定性的影响。

如图 13 所示，在不确定性因素下，边际碳排放因子分布呈现出了比较明显的特征。其中，大部分边际碳排放因子位于 0.7~0.8 之间，说明在不确定性因素下，L1 的负荷增减主要由煤电机组进行功率平衡，因此这部分碳排放因子较为集中的特征能够使得用户更加准确地预估自身的减碳效益。同时在 6—18 时段，边际碳排放因子超过了 1，说明此类情况需要多台机组的接入，对用户参与低碳需求响应影响的表现为，用户在该时段对待增加负荷

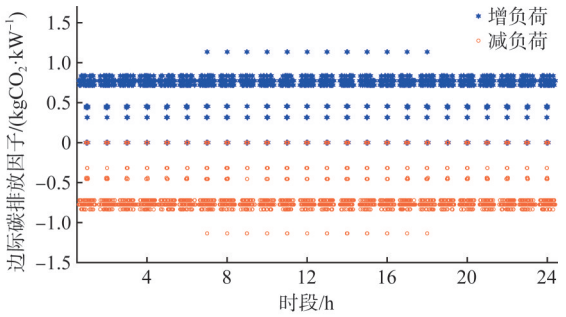


图 13　考虑不确定性因素下 L1 边际碳排放因子分布图

Fig. 13　Distribution map of L1 marginal carbon emission factors considering uncertainty factors

应更加谨慎，以避免极端情况导致的实际碳排放量增加过多。结合图 14 所示，在新能源出力不确定情况下，用户在不同时段采取增负荷或减负荷的概率不同，如在凌晨 0—7 时段，无论在何种不确定场景下，用户均在该时段选取了增负荷的措施，因此该时段增负荷的概率为 1。同理，在 10—11 以及 18—19 时段，用户减负荷的概率为 1。此外，用户在部分时段采取增/减负荷能够实现电力系统减碳的概率从 0~1 分布，该分布结果能够更好地指导用户进行针对性的降碳减排。

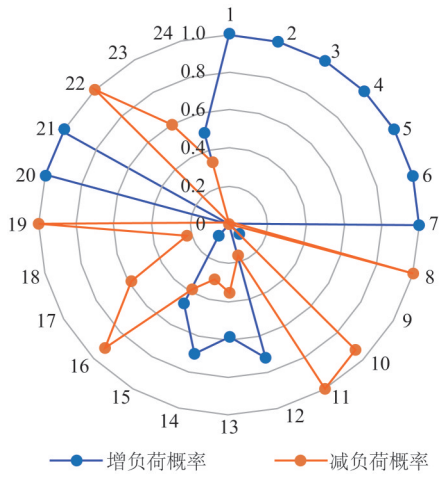


图 14　考虑不确定性因素下 L1 需求响应概率图

Fig. 14　Probability diagram of L1 demand response considering uncertainty factors

5　结论

本文针对当前电力需求响应和基于动态碳排放因子的低碳需求响应方法难以刻画用户用电行为调整对系统碳排放影响的问题，提出了基于边际碳排放因子的低碳需求响应方法，并考虑了新能源出力不确定性对边际碳排放因子的影响。通过本文的仿真演算工作，主要得出以下结论。

1）边际碳排放因子作为直接体现负荷变化对于系统碳排放影响的重要参数，能够用于引导用户侧负荷进行低碳需求响应，积极消纳零碳低碳能源，实现用户侧主动参与模式下的电力系统低碳优化运行。

2）本文所构建的基于边际碳排放因子的低碳需求响应模型及算法能够比较实际地考虑系统中由于机组出力限制、线路潮流阻塞等因素所引起的边际机组变化情况，能够更精准地量化碳排变化情况，实现更优的减碳效果。

3）在边际碳排放因子计算的过程中，引入对新能源出力不确定性进行分析，能够更加全面地把控系统减碳所面临的不确定性，通过提供随即场景下需求响应措施的概率分布，能够为用户采取减碳措施提供针对性的建议。

本文所提考虑边际碳排放因子不确定性的低碳需求响应技术，对于电网而言：可以作为现有清洁能源消纳技术和低碳调度技术的补充，能够在不改变用电量前提下和既有系统结构下实现电力系统低碳优化运行；对于用户而言：可以帮助其在不影响自身用电总需求的情况下减少间接碳排放，进而减少碳成本，实现低碳化生产生活。通过本文所提研究技术的实施，可以从技术层面和机制层面助力电力行业低碳转型和支撑我国“双碳”目标的实现。

基于本文所提技术，未来可以在用户响应模型，电碳市场耦合场景等方面进一步完善用户侧低碳响应技术和机制研究，以提升方法的适用性。

参考文献

[1]　代贤忠. 碳中和对能源领域的影响[EB/OL]. [2021－06－18]. https://baijiahao. baidu. com/s?id=1702895338045951179&wfr=spider&for=pc.

[2]　辛保安. 为美好生活充电 为美丽中国赋能[EB/OL]. [2022－08－05]. https://www.nea.gov.cn/2022－08/05/c_1310650397.htm.

[3]　ZHUO Z, DU E, ZHANG N, et al. Cost Increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3172.

[4]　李政，陈思源，董文娟，等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(12)：3987－4001.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission

constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987 – 4001.

[5] 赵伟, 熊正勇, 潘艳, 等. 计及碳排放流的电力系统低碳规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 23 – 33.
ZHAO Wei, XIONG Zhengyong, PAN Yan, et al. Low-carbon planning of power system considering carbon emission flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 23 – 33.

[6] 程耀华, 张宁, 康重庆, 等. 考虑需求侧管理的低碳电网规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 61 – 69.
CHENG Yaohua, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Low carbon transmission expansion planning considering demand side management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 61 – 69.

[7] ZHANG Y, YANG J, HU W, et al. On a low-carbon thermal energy power planning model based on green certificate allocation mechanism[J]. International Journal of Heat and Technology, 2021, 39(6), 1991 – 1999.

[8] 严新荣, 王静, 郑文广, 等. 发电企业低碳转型路径优化方法及应用[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(10): 1487 – 1497.
YAN Xinrong, WANG Jing, ZHENG Wenguang, et al. Optimization methods and application of low-carbon transition pathways of power [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2025, 59(10): 1487 – 1497.

[9] 高瑞阳, 王新宝, 高娴, 等. 考虑灵活性资源和多能共享的低碳区域综合能源系统联盟-配电网博弈优化调度[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 77 – 88.
GAO Ruiyang, WANG Xinbao, GAO Xian, et al. Optimal dispatching of low-carbon regional integrated energy system alliance and distribution network game considering flexible resources and multi energy sharing[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 77 – 88.

[10] 范红雨. 多能互补发电系统联合碳捕集机组的日前优化调度研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.

[11] GUO X, LOU S, WU Y, et al. Low-carbon operation of combined heat and power integrated plants based on solar-assisted carbon capture[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(5): 1138 – 1151.

[12] 何耿生, 陈晖, 张世旭, 等. 储能提升高比例新能源基地低碳-经济-可靠性能的效益分析[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 120 – 129.
HE Gengsheng, CHEN Hui, ZHANG Shixu, et al. Benefit analysis of energy storage to improve low carbon, economy and reliability performance of high proportion renewable energy base[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 120 – 129.

[13] WEI X, LIU D, YE S, et al. Optimal sizing of energy storage in generation expansion planning of new power system with high penetration of renewable energies [J]. Energy Reports, 2023(9): 1938 – 1947.

[14] ALI S, REHMAN A U, WADUD Z, et al. Demand response program for efficient demand-side management in smart grid considering renewable energy sources[J]. IEEE Access, 2022(10): 53832 – 53853.

[15] HOU L, LIN H, YANG X, et al. Low-carbon demand response strategy of buildings considering load rebound [J]. Energy Reports, 2023(10): 3599 – 3607.

[16] LI J, HE X, LI W, et al. Low-carbon optimal learning scheduling of the power system based on carbon capture system and carbon emission flow theory [J]. Electric Power Systems Research, 2023(218): 109215.

[17] CHENG Y, ZHANG N, ZHANG B, et al. Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1037 – 1318.

[18] 李姚旺, 张宁, 杜尔顺, 等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2830 – 2842.
LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow[J]. Proceeding of the CSEE, 2022, 42(8): 2830 – 2842.

[19] 清华大学电机工程与应用电子技术系. 清华大学与国网江苏省电力有限公司联合发布全国首个电力系统全景碳排放流分析平台与“eCarbon+”智慧碳服务品牌[EB/OL]. [2022 – 04 – 26]. https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/5085.htm.

[20] RUIZ P A, RUDKEVICH A. Analysis of marginal carbon intensities in constrained power networks [C]//2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, January 05 – 08, 2010, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE, 2010: 1 – 9.

[21] 谢一, 李姚旺, 刘昱良, 等. 减碳型用户侧云储能模式初探: 运行模型和效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 138 – 150.
XIE Yi, LI Yaowang, LIU Yuliang, et al. Preliminary exploration of carbon reduction demand side cloud energy storage model: operation model and benefit analysis[J]. Proceeding of the CSEE, 2025, 45(1): 138 – 150.

[22] 范帅, 危怡涵, 何光宇, 等. 面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 1 – 12.
FAN Shuai, WEI Yihan, HE Guangyu, et al. Discussion on demand response mechanism for new power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 1 – 12.

[23] 党东升, 韩松, 周珏, 等. 需求响应参与系统调峰研究综述[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(5): 13 – 17.
DANG Dongsheng, HAN Song, ZHOU Yu, et al. Review of demand response participating in power system peak shifting [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(5): 13 – 17.

[24] 魏春晖, 单林森, 胡大栋, 等. 面向需求响应的园区虚拟电厂优化调度策略[J]. 中国电力, 2025, 58(6): 112 – 121.
WEI Chunhui, SHAN Linsen, HU Dadong, et al. Optimal scheduling strategy of park-level virtual power plant for demand response[J]. Electric Power, 2025, 58(6): 112 – 121.

[25] 于万水, 易俊, 杨文丽, 等. 考虑边际碳排放和需求响应的用户侧动态碳责任核算方法[J]. 中国电力, 2025, 58(12): 86 – 95.
YU Wanshui, YI Jun, YANG Wenli, et al. User-side dynamic carbon responsibility accounting method considering marginal carbon emissions and demand response [J]. Electric Power, 2025, 58(12): 86 – 95.

[26] 张妍, 冷媛, 尚楠, 等. 考虑碳排放需求响应及碳交易的电力系统双层优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 94 – 104.
ZHANG Yan, LENG Yuan, SHANG Nan, et al. Bi-level optimal scheduling of power system considering carbon demand response and carbon trading [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 94 – 104.

[27] 孙笑天, 卫志农, 陈胜, 等. 考虑碳流需求响应的园区低碳经济运行策略[J]. 电力建设, 2025, 46(5): 84 – 95.

SUN Xiaotian，WEI Zhinong，CHEN Sheng，et al. Strategy for low-carbon economic operation in industrial parks considering carbon flow demand response[J]. Electric Power Construction，2025，46(5)：84－95.

[28] 杨晨. 考虑风光荷预测误差的虚拟电厂参与日前市场的优化调度研究[D]. 重庆：重庆大学，2022.

[29] ZHANG Y，XU D，YANG C，et al. Economic analysis based on virtual power plant′s optimal bidding strategy[C]//2021 6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)，September 17－20，2021，Shanghai，China. New York：IEEE，2021.

[30] TRADING ECONOMICS. EU Carbon Permits [EB/OL]. [2024－9－27]. https://tradingeconomics. com/commodity/carbon.

收稿日期：2024-10-11；**网络首发日期**：2024-12-13

作者简介：

关哲(1991)，男，工程师，硕士，研究方向为微能源网、微电网等技术及示范应用；

杨晨(1997)，男，通信作者，工程师，硕士，研究方向为低碳电力技术、电力系统优化运行，yangchen@tsinghua-eiri. org；

冯皓然(1996)，男，工程师，硕士，从事低碳电力技术等研究。

（上接第 118 页 Continued from Page 118）

XIAO Bai，YANG Shiwei，WANG Xiaoya，et al. GRA-TOPSIS-BS comprehensive evaluation of power quality based on game theory combined weighting[J]. Electrotechnical Application，2024，43(1)：77－85.

[28] 贺春光，檀晓林，周兴华，等. 基于博弈论组合赋权的智能配电网项目投资效益评价[J]. 电力科学与技术学报，2022，37(1)：161－167.

HE Chunguang，TAN Xiaolin，ZHOU Xinghua，et al. Investment benefit evaluation of intelligent distribution network project based on game theory combination weighting [J]. Journal of Eiectric Power Science and Technology，2022，37(1)：161－167.

[29] 谢文婷，徐聪. 基于KJ-AHP-VIKOR集成法的老年智能厨电产品设计研究[J]. 包装工程，2024，45(22)：411－419.

XIE Wenting，XU Cong. Design of intelligent kitchen appliances for the elderly based on KJ-AHP-VIKOR integration method[J]. Packaging Engineering，2024，45(22)：411－419.

[30] 韩彰，高丽，欧斌，等. 基于VIKOR算法的土石堤坝漫顶防护方案评估模型[J]. 水电能源科学，2025，43(1)：169－171，159.

HAN Zhang，GAO Li，OU Bin，et al. An assessment model of flood protection schemes for earth rock dyke based on VIKOR algorithm[J]. Water Resources and Power，2025，43(1)：169－171，159.

收稿日期：2024-10-15；**网络首发日期**：2025-03-22

作者简介：

陈露东(1986)，男，工程师，学士，研究方向为配电网规划、新型电力系统，ljj_143@163. com；

陈果(2000)，男，硕士研究生，研究方向为配电网规划评估，2824539574@qq. com；

陆之洋(1976)，男，通信作者，副教授，硕士，研究方向为电力系统规划、电力市场，853514893@qq. com。