

考虑碳减排需求的微电网低碳经济运行策略研究

闫林芳¹, 范国晨¹, 赵杨阳¹, 张利², 周恒¹, 翁凯斌¹, 周咏¹, 金颀¹

(1. 国网(苏州)城市能源研究院, 江苏 苏州 215000; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010)

摘要:在国内双碳目标以及国际碳关税、新电池法等绿色贸易壁垒影响下,用户侧碳减排需求急剧提升。微电网作为新型电力系统与用电负荷连接的重要桥梁,既能有效平衡本地分布式能源出力,同时可以推动用户侧绿色低碳转型,满足用户碳减排需求。为此,开展考虑碳减排需求的微电网经济运行策略研究。首先,构建了含风电光伏、绿电交易、储能、电动汽车、柔性负荷在内的微电网运行模型;然后,综合考虑碳排放成本、绿色电力交易和系统运行成本建立优化模型;最后,基于CPLEX求解工具对算例展开分析,结果表明所提方法能够适应新能源出力波动、电价变化以及碳价变化,显著降低系统碳排放量,满足微电网内用户碳减排需求,提升系统低碳经济运行水平。

关键词:微电网;碳减排;绿电交易;柔性负荷;国际绿色贸易壁垒

Low carbon economic operation strategy of microgrids considering carbon reduction requirements

YAN Linfang¹, FAN Guochen¹, ZHAO Yangyang¹, ZHANG Li², ZHOU Heng¹,
WENG Kaibin¹, ZHOU Yong¹, JIN Ting¹

(1. State Grid (Suzhou) City Energy Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215000, China; 2. State Grid Tianjin Electric Power Co., Ltd., Tianjin 300010, China)

Abstract: Under the influence of domestic dual carbon targets, international green trade barriers, the demand for carbon reduction on the user side has sharply increased. As an important bridge connecting new power systems and electricity loads, microgrids can effectively balance local distributed energy output and promote green and low-carbon transformation on the user side, meeting their carbon reduction needs. The economic operation strategy of microgrids considering the demand for carbon reduction is mainly studied. Firstly, a microgrid operation model that includes wind and solar power, energy storage, electric vehicles, and flexible loads is constructed. Then carbon emission costs and system operation costs are comprehensively considered to construct an optimization model. Finally, based on the CPLEX solving tool, the results show that the proposed method can adapt to fluctuations in new energy output, changes in electricity prices, and changes in carbon prices, meet the carbon reduction needs of users within the microgrid, and significantly improve the low-carbon economic operation level of the system.

Key words: microgrid; carbon reduction; green electricity trading; flexible load; international green trade barriers

0 引言

为主动应对全球气候变化,保障能源供应安全,2020年我国提出了“碳达峰,碳中和”国家战略目标^[1]。2021年10月,国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》,新型电力系统加快构建成为十四五期间的重要目标^[2]。微电网作为新型电力系统关键组成部分,高效集成可再生能源、新型储能、多元负

荷,能够实现新能源的有效利用及电力用户节能减排需求^[3-5]。2024年2月29日,中共中央政治局第十二次集体学习提出推进电网基础设施智能化改造和智能微电网建设,在国内高度重视节能减碳的同时,近年来国际上也不断形成以碳排放为主要议题的绿色贸易壁垒,如欧盟碳关税、新电池法等,对我国相关产业及上游供应链产品竞争力产生显著影响,为保订单、稳发展,企业碳减排需求激增。

在碳减排背景下,许多学者对微电网优化运行进行了研究。文献[6]首先对日趋丰富、渐成体系的国内外微能源网优化调度研究进行综述。文献[7]考虑碳交易机制和全生命周期碳计量,构建了微电

收稿日期:2024-04-20;修回日期:2024-06-23

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(1400-202312333A-1-1-ZN)

网系统碳排放计量和碳交易机制。文献[8]同样建立微网内设备全寿命周期内碳足迹计算模型,应用随机模拟的粒子群优化算法寻找微网自身碳足迹最小化方法。文献[9]则进一步构建了碳交易机制下考虑综合需求响应微能源网优化运行模型。文献[10]建立了一种基于负荷侧灵活性资源的微电网低碳优化调度模型,将低碳效益作为微电网优化运行的子目标之一。文献[11]在并网模式下微电网环境下使用粒子群优化实现微电网经济调度。文献[12]则进一步将研究对象从单个微网扩充到配网-微网协同优化,建立了配电网-微电网群低碳经济调度主从博弈模型。文献[13]在考虑微电网碳排放特性和需求响应潜力的基础上,构建了多微网P2P能源交易模型,量化微电网内部购售电和储能充放电碳排放。

考虑到当前全国碳市场仅包含发电企业,多数微网用户受到的刚性碳排约束主要来自绿色贸易壁垒或供应链约束,本文区别于上述文献,以微网内用户为主,在分布式能源基础上考虑市场化购电的多样性,用户可以选择购买绿电以应对碳排放要求。同时用户需求响应时并不会降低总体用电量以保障生产。基于以上分析,本文首先构建了含分布式新能源发电及多元负荷在内的微电网运行模型,然后综合考虑用户碳减排需求、绿电交易等因素设定优化目标,最终使用CPLEX求解工具对模型在不同场景下的运行策略进行求解,验证了所提方法有效性。

1 微电网系统模型

本文以典型微电网模型为主要研究对象^[12],源侧包括多类分布式能源(燃气轮机、光伏、风电)以及电网购电,负荷侧则是以柔性可平移负荷作为主要微网用户。此外,作为重要的灵活性资源,系统中同样考虑了储能和新能源汽车。

1.1 燃气轮机

燃气轮机模型如下所示

$$C_{\text{gas},t} = a_{\text{gas}} P_{\text{gas},t} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{gas},t}$ 为 t 时段燃气轮机燃料成本; a_{gas} 为燃气轮机燃料成本系数; $P_{\text{gas},t}$ 为 t 时段燃气轮机输出功率。

1.2 光伏/风电模型

光伏、风机等可再生能源成本模型如下所示

$$C_{\text{pv},t} = a_{\text{pv}} P_{\text{pv},t} \quad (2)$$

$$C_{\text{wt},t} = a_{\text{wt}} P_{\text{wt},t} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{pv},t}$ 为 t 时段光伏运行维护成本; $C_{\text{wt},t}$ 为 t 时段风电运行维护成本; a_{pv} 、 a_{wt} 分别为光伏、风电运

行维护成本系数; $P_{\text{pv},t}$ 、 $P_{\text{wt},t}$ 分别为 t 时段光伏、风电发电功率。

1.3 储能/电动汽车运行模型

储能、电动汽车充放电成本模型如下式所示

$$C_{\text{es},t} = a_{\text{es}}^{\text{dch}} \frac{P_{\text{es},t}^{\text{dch}}}{\eta_{\text{es}}^{\text{dch}}} + a_{\text{es}}^{\text{ch}} P_{\text{es},t}^{\text{ch}} \eta_{\text{es}}^{\text{ch}} \quad (4)$$

$$C_{\text{ev},t} = a_{\text{ev}}^{\text{dch}} \frac{P_{\text{ev},t}^{\text{dch}}}{\eta_{\text{ev}}^{\text{dch}}} + a_{\text{ev}}^{\text{ch}} P_{\text{ev},t}^{\text{ch}} \eta_{\text{ev}}^{\text{ch}} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{es},t}$ 为 t 时段储能充放电成本; $C_{\text{ev},t}$ 为 t 时段电动汽车充放电成本; $a_{\text{es}}^{\text{ch}}$ 、 $a_{\text{es}}^{\text{dch}}$ 分别为储能充电、放电成本系数; $P_{\text{es},t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{es},t}^{\text{dch}}$ 分别为 t 时段储能充电、放电功率; $\eta_{\text{es}}^{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{es}}^{\text{dch}}$ 分别为储能充电、放电效率; $a_{\text{ev}}^{\text{ch}}$ 、 $a_{\text{ev}}^{\text{dch}}$ 分别为电动汽车充电、放电成本系数; $P_{\text{ev},t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{ev},t}^{\text{dch}}$ 分别为 t 时段电动汽车充电、放电功率; $\eta_{\text{ev}}^{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{ev}}^{\text{dch}}$ 分别为电动汽车充电、放电效率。

1.4 柔性负荷模型

柔性负荷可通过一定的激励引导其提供需求响应,实现负荷平移,有效协助微电网降低削峰填谷和碳排放成本^[12],激励成本计算公式如下

$$C_{\text{lt},t} = a_{\text{lt}} |P_{\text{lt},t} - P_{\text{lt}}^e| \quad (6)$$

式中: $C_{\text{lt},t}$ 为 t 时段负荷平移激励成本; a_{lt} 为负荷激励成本系数; $P_{\text{lt},t}$ 、 P_{lt}^e 分别为 t 时段负荷实际功率和原始负荷功率需求。

1.5 微网购电模型

本文微电网主要通过代理购电和购买绿电两种电力交易方式以满足微电网负荷用电需求。

(1) 代理购电成本

$$C_{\text{br},t} = a_{\text{br}} P_{\text{br},t} \quad (7)$$

式中: $C_{\text{br},t}$ 为 t 时段微电网非绿电电量购买成本; a_{br} 为非绿电购电电价; $P_{\text{br},t}$ 为 t 时段购电功率。

(2) 购买绿电成本

$$C_{\text{gr},t} = a_{\text{gr}} P_{\text{gr},t} \quad (8)$$

式中: $C_{\text{gr},t}$ 为 t 时段微电网绿电购买成本; a_{gr} 为绿电购电电价; $P_{\text{gr},t}$ 为 t 时段购买绿电功率。

1.6 碳排放模型

本文微电网碳排放成本主要考虑燃气轮机发电碳排放成本以及代理购电碳排放成本。

(1) 燃气轮机碳排放成本

$$C_{\text{gas},t}^{\text{CO}_2} = \gamma_{\text{CO}_2} \varphi_{\text{gas}}^{\text{CO}_2} P_{\text{gas},t} \quad (9)$$

式中: $C_{\text{gas},t}^{\text{CO}_2}$ 为 t 时段燃气轮机碳排放成本; γ_{CO_2} 为碳价; $\varphi_{\text{gas}}^{\text{CO}_2}$ 为燃气轮机发电碳排放因子。

(2) 代理购电碳排放成本

$$C_{\text{gr},t}^{\text{CO}_2} = \gamma_{\text{CO}_2} \varphi_{\text{gr}}^{\text{CO}_2} P_{\text{gr},t} \quad (10)$$

式中: $C_{gr,t}^{CO_2}$ 为 t 时段代理购电碳排放成本; $\varphi_{gr}^{CO_2}$ 为代理购电碳排放因子。

2 微电网低碳运行优化模型

2.1 目标函数

由于用户碳减排需求一般指企业期望在产量不变情况下通过低成本方式降低自身碳排放量。为综合考虑微网整体经济运行和用户碳减排需求,本文所搭建优化模型的目标函数设置为微电网总体成本最小,包含微电网各设备运行成本、柔性负荷激励成本、微电网购电成本以及碳排放成本,如下所示

$$\min f(C) = \sum_{t=1}^T C_{gas,t} + C_{pv,t} + C_{wt,t} + C_{es,t} + C_{ev,t} - C_{l,t} + C_{br,t} + C_{gr,t} + C_{gas,t}^{CO_2} + C_{gr,t}^{CO_2} \quad (11)$$

式中: T 为总时段数。

2.2 约束条件

本文所搭建的优化模型约束条件包括微电网设备运行约束、微电网购电量约束以及微电网功率平衡约束。

(1) 燃气轮机约束条件

燃气轮机约束条件包括出力上下限约束以及爬坡约束

$$P_{gas,min} \leq P_{gas,t} \leq P_{gas,max} \quad (12)$$

$$0 \leq P_{gas,t} - P_{gas,t-1} \leq P_{gas,max}^{up} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{gas,t-1} - P_{gas,t} \leq P_{gas,max}^{down} \quad (14)$$

式中: $P_{gas,max}$ 、 $P_{gas,min}$ 分别为燃气轮机有功功率上、下限; $P_{gas,max}^{up}$ 为燃气轮机最大爬坡功率; $P_{gas,max}^{down}$ 为燃气轮机最大滑坡功率。

(2) 光伏/风电约束条件

光伏与风电的约束条件主要为出力上下限约束

$$P_{pv,min} \leq P_{pv,t} \leq P_{pv,max} \quad (15)$$

$$P_{wt,min} \leq P_{wt,t} \leq P_{wt,max} \quad (16)$$

式中: $P_{pv,max}$ 、 $P_{pv,min}$ 分别为光伏发电功率上、下限; $P_{wt,max}$ 、 $P_{wt,min}$ 分别为风力发电功率上、下限。

(3) 储能约束条件

储能约束条件主要包括充放电功率约束与电池容量约束

$$0 \leq P_{es,t}^{ch} \leq o_{es,t}^{ch} P_{es,max}^{ch} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{es,t}^{dch} \leq o_{es,t}^{dch} P_{es,max}^{dch} \quad (18)$$

$$o_{es,t}^{ch} + o_{es,t}^{dch} \leq 1 \quad (19)$$

$$E_{es,t+1} = E_{es,t} + (P_{es,t}^{ch} \eta_{es}^{ch} - \frac{P_{es,t}^{dch}}{\eta_{es}^{dch}}) \quad (20)$$

$$\rho_{es,min} E_{es,n} \leq E_{es,t} \leq \rho_{es,max} E_{es,n} \quad (21)$$

式中, $P_{es,max}^{ch}$ 、 $P_{es,max}^{dch}$ 分别为储能最大充电、放电功率; $o_{es,t}^{ch}$ 、 $o_{es,t}^{dch}$ 分别为 t 时段储能充电、放电状态; $E_{es,t}$ 为 t 时段储能容量; $E_{es,n}$ 为储能额定容量; $\rho_{es,max}$ 、 $\rho_{es,min}$ 分别为储能最大、最小容量状态。

(4) 电动汽车约束条件

电动汽车约束条件主要包括充放电功率约束与电池容量约束,与储能相比电动汽车的充放电时长及结束充电时的电量需达到最大电池容量

$$0 \leq P_{ev,t}^{ch} \leq o_{ev,t}^{ch} P_{ev,max}^{ch} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{ev,t}^{dch} \leq o_{ev,t}^{dch} P_{ev,max}^{dch} \quad (23)$$

$$o_{ev,t}^{ch} + o_{ev,t}^{dch} \leq 1 \quad (24)$$

$$E_{ev,t+1} = E_{ev,t} + (P_{ev,t}^{ch} \eta_{ev}^{ch} - \frac{P_{ev,t}^{dch}}{\eta_{ev}^{dch}}) \quad (25)$$

$$\rho_{ev,min} E_{ev,n} \leq E_{ev,t} \leq \rho_{ev,max} E_{ev,n} \quad (26)$$

$$E_{ev,t_d} = \rho_{ev,max} E_{ev,n} \quad (27)$$

式中: $P_{ev,max}^{ch}$ 、 $P_{ev,max}^{dch}$ 分别为微电网电动汽车总最大充电、放电功率; $o_{ev,t}^{ch}$ 、 $o_{ev,t}^{dch}$ 分别为 t 时段电动汽车充电、放电状态; $E_{ev,t}$ 为 t 时段电动汽车总电池容量, $E_{ev,n}$ 为电动汽车额定容量; $\rho_{ev,max}$ 、 $\rho_{ev,min}$ 分别为电动汽车最大、最小电池容量状态。同时,限制电动汽车充放电时段为晚 23:00 至次日早晨 07:00,且电动汽车结束充电时 E_{ev,t_d} 应达到最大电池容量。

(5) 柔性负荷约束

柔性负荷约束主要包括负荷总量约束与负荷可平移量约束。式(28)表明在需求响应后,用户的总用电量不会减少,以保障微网用户的基本生产

$$\sum_{t=1}^T P_{l,t} \geq \sum_{t=1}^T P_{l,t}^e \quad (28)$$

$$P_{l,t}^{min} \leq P_{l,t} \leq P_{l,t}^{max} \quad (29)$$

式中: $P_{l,t}^{max}$ 、 $P_{l,t}^{min}$ 分别为 t 时段负荷最大、最小用电需求。

(6) 微电网购电量约束

$$0 \leq P_{gr,t} \leq P_{gr,max} \quad (30)$$

$$0 \leq P_{gr,t} \leq P_{gr,max} \quad (31)$$

式中: $P_{gr,max}$ 、 $P_{gr,max}$ 分别为 t 时段微电网最大代理购电、最大购买绿电功率。

(7) 微电网功率平衡约束

$$P_{l,t} = P_{gas,t} + P_{pv,t} + P_{wt,t} + P_{es,t}^{ch} - P_{es,t}^{dch} + P_{ev,t}^{ch} - P_{ev,t}^{dch} + P_{br,t} + P_{gr,t} \quad (32)$$

3 算例分析

3.1 算例设置

(1) 参数设置

本文算例中设备运行参数包括燃气轮机、储

能、电动汽车基本参数,此外光伏、风电出力上下限依据典型出力曲线确定,如图1所示。

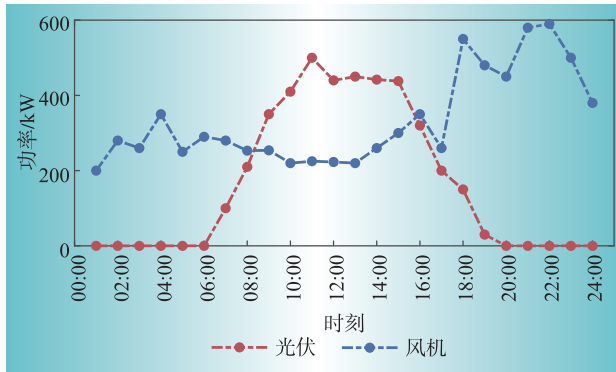


图1 风电光伏出力

Fig. 1 Operation curves of power generation equipment

微电网期望负荷依据微电网典型负荷曲线确定。其中燃气轮机取自文献[12],最大最小功率分别400 kW、100 kW;风电、光伏以及负荷基本曲线取自文献[10];储能按2 h充满考虑,额定容量为100 kWh;电动汽车则按5~6 h充满考虑,总容量为80 kWh。微电网负荷最大、最小用电需求分别设置为当前期望负荷的1.1倍与0.9倍,设备运行参数如表1所示。

表1 设备运行参数

Table 1 Parameters of the microgrid

参数	设定值	参数	设定值
$P_{gas,max}/kW$	400	η_{es}^{ch}	0.95
$P_{gas,min}/kW$	100	η_{es}^{dis}	0.95
$P_{gas,max}^{up}/kW$	300	$P_{ev,max}^{ch}/kW$	15
$P_{gas,max}^{down}/kW$	300	$P_{ev,max}^{dis}/kW$	15
$P_{es,max}^{ch}/kW$	50	E_{ev}/kWh	80
$P_{es,max}^{dis}/kW$	50	$\rho_{es,max}$	0.9
$E_{es,n}/kWh$	100	$\rho_{es,min}$	0.2
$\rho_{es,max}$	0.9	η_{es}^{ch}	0.95
$\rho_{es,min}$	0.2	η_{es}^{dis}	0.95

非绿电购电价格取自江苏省典型峰谷电价,如表2所示。

表2 电价参数

Table 2 Electricity price parameters

	峰时段	平时段	谷时段
时间	08:00—11:00、 17:00—22:00	11:00—17:00、 22:00—24:00	00:00—08:00
电价/ (元·kWh ⁻¹)	1.254 4	0.750 3	0.339 0

绿电购电价格包含电能量价格和绿电环境权益价格。本文中绿电价格中电能量部分与非绿电保持一致,绿电环境权益价格设定为0.05 元/kWh。

燃气轮机燃料成本系数取1.20 元/kWh,光伏、风电维护成本分别取0.08 元/kWh与0.10 元/kWh,储能、电动汽车充放电成本依据电价制度与电力流向综合确定,负荷激励成本取0.25 元/kWh^[12]。

燃气轮机碳排放因子取0.56 kgCO₂/kWh^[14];普通购电排放因子根据2024年4月生态环境部发布的公告确定为0.594 2 kgCO₂/kWh,绿电排放因子为0。

(2) 算例设置

本文重点关注在考虑用户碳减排需求下的微电网内各单元的运行效果,为充分验证所提低碳经济优化模型和方法的有效性,本文设置对比情景如下:

情景1:设定碳价为0.1 元/kgCO₂,绿电环境价格根据电力平均排放因子折算碳成本为0.084 元/kgCO₂,此时碳价高于绿电环境权益价格,用户碳减排成本较高,观察微电网整体运行情况。

情景2:设定碳价为0.01 元/kgCO₂,此时碳排放成本约束较为宽松,对应用户碳减排成本较低,观察微电网整体运行情况。

3.2 微电网优化运行分析

本节主要展示在情景1下微电网内储能、电动汽车、柔性负荷以及电网购电情况。储能运行情况如图2所示。储能需从电网充电,并通过放电支撑微电网负荷用电需求以节省购电及碳排放成本,因此储能将在电价较低的谷时段和平时段进行充电,并在电价较高的峰时段(08:00—11:00、17:00—22:00)进行放电,一定程度上可补充微电网发电设备缺额,并提高微电网运行效益。电动汽车运行情况如图3所示,主要集中在晚间电价谷时段充电。区别于储能装置,为降低用户里程焦虑,电动汽车需要在

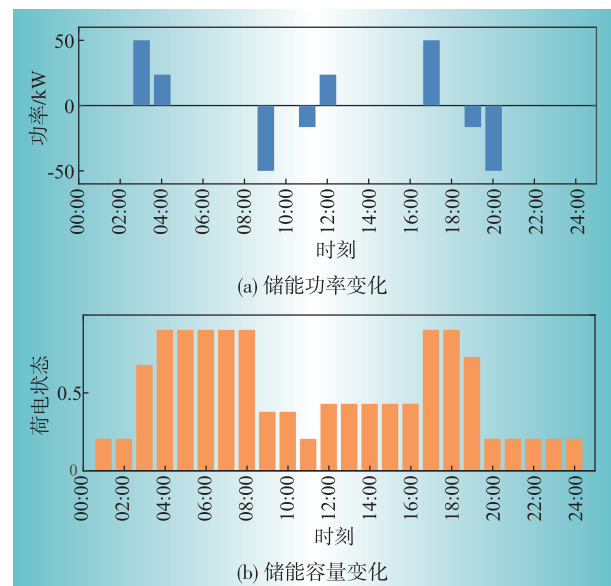


图2 储能优化运行

Fig. 2 Energy storage operation

出发前保持较高电量,因此调节空间较小。柔性负荷曲线如图4所示。通过给予一定负荷调节激励,柔性负荷可在满足当前时刻微电网基础用电需求且保证负荷总量不减少的情况下,实现柔性负荷由峰时段向谷时段进行一定程度平移,以降低微电网运行成本。以上结果表明所提优化模型能够引导微电网内各单元正确动作以实现低碳经济运行。

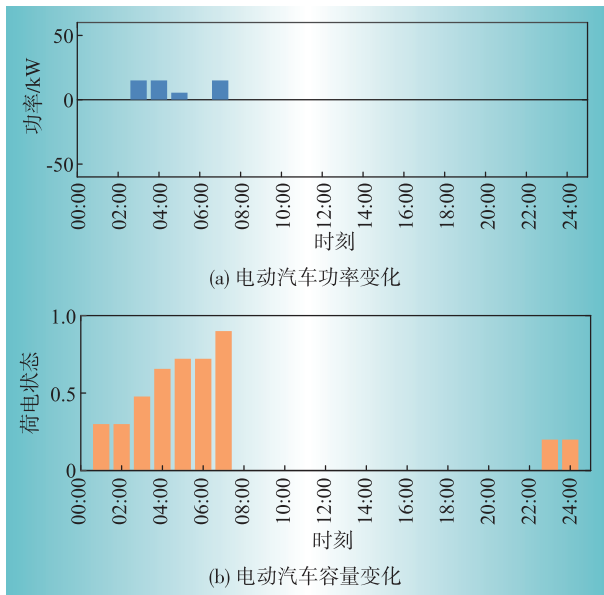


图3 电动汽车优化运行
Fig. 3 Electric vehicle operation

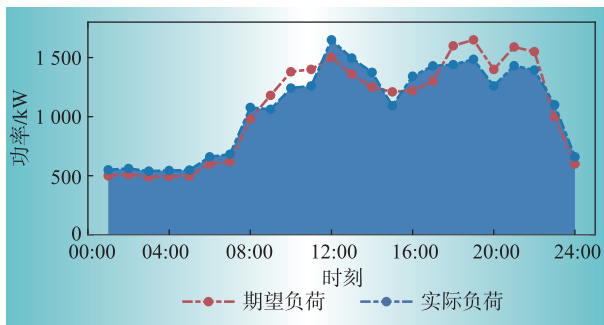


图4 柔性负荷调控曲线
Fig. 4 Operation curve of flexible load

3.3 碳价影响分析

通过比较情景1与情景2中系统运行成本、碳排放量以及绿电购入情况分析碳价对用户碳减排行为的影响,其中设定绿电购入比例上限为30%,下限为10%。情景1和情景2中购电总量和绿电购入量结果分别如图5、图6所示。图5表明在碳价成本高于绿电环境权益价格时,用户通过购买绿电降低碳排放量更具优势,绿电购买比例达到限幅值30%。而在碳成本约束较为宽松时,用户为追求收益并不会为绿电支付更多额外环境权益价格,因此绿电购买量较少。

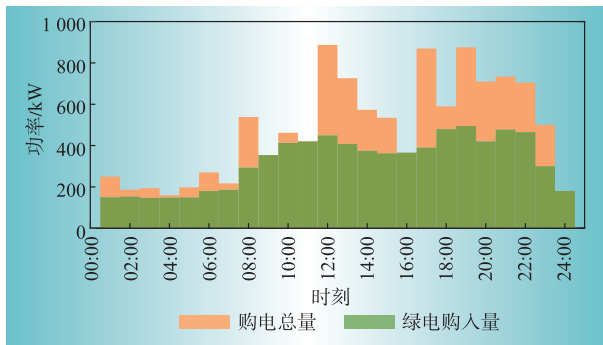


图5 情景1电力购入情况
Fig. 5 Purchasing electricity of scheme 1

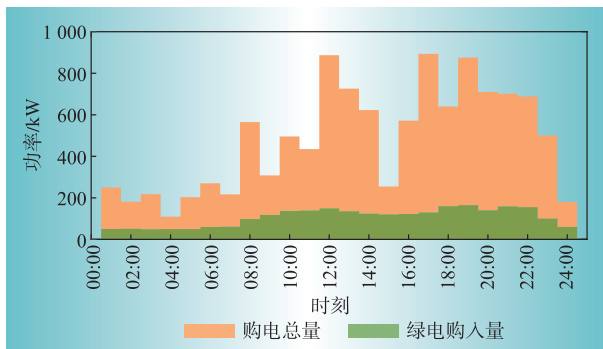


图6 情景2电力购入情况
Fig. 6 Purchasing electricity of scheme 2

在两种情境下所提方法的优化结果如表3所示。可以看出在情景1下由于碳排放成本较高,因此总体优化结果比情景2增加了4%。同时碳排放量显著下降,从6 641.05 kg下降至3 565.12 kg,下降幅度达46%。即本文所提方法能够为用户在不同市场环境综合下综合考虑减排成本来制定最优的碳减排措施,从而满足用户的碳减排需求。

表3 优化结果对比
Table 3 Comparison of different schemes

情景	总成本/ 元	碳排放量/ kg CO ₂	绿电购入量/ kWh
情景1	14 354.47	3 565.12	7 764.90
情景2	13 805.04	6 641.05	2 588.30

4 结束语

本文主要研究面向碳减排需求的微电网低碳经济优化运行方法。首先考虑多类发电能源、储能、电动汽车、柔性负荷以及绿电交易和普通电力交易等因素,构建了微电网系统运行模型。然后综合考虑微电网经济运行和微电网内用户碳减排需求,以碳成本与系统运行成本最低为目标构建了低碳经济运行优化模型。仿真结果表明,在所提运行策略下,各可控单元均能根据新能源出力波动、电价变

化调整出力,实现成本最优。同时,所提算法能够正确反映绿电的环境权益价格和减碳效益之间的博弈关系,为用户提供最优的碳减排方式。在绿电环境权益价格成本低于碳排放成本时,用户将采取多购买绿电降低碳排放量,在总成本增加4%的情况下减碳幅度可达46%。D

参考文献:

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(003).
XI Jinping. Statement at the General Debate of the 75th Session of the United Nations General Assembly [N]. People's Daily, 2020-09-23(003).
- [2] 国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. (2021-10-24)[2024-04-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
The State Council. Circular of the State Council on Printing and Issuing the Action Plan for Carbon Dioxide Peaking Before 2030[EB/OL]. (2021-10-24)[2024-04-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [3] 王一, 马子明, 谭跃凯, 等. 广东日前电力市场方案设计与市场仿真[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 10-14.
WANG Yi, MA Ziming, TAN Yuekai, et al. Day-ahead power market design and market simulation in Guangdong province [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 10-14.
- [4] 魏小曼, 余昆, 陈星莺, 等. 基于 Affinity propagation 和 k-means 算法的电力大用户细分方法分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 15-19, 35.
WEI Xiaoman, YU Kun, CHEN Xingying, et al. Analysis of power large user segmentation based on Affinity propagation and k-means algorithm [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 15-19, 35.
- [5] 周磊, 吴辉, 嵇文路, 等. 微电网脆弱性预评估方法[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 20-24.
ZHOU Lei, WU Hui, JI Wenlu, et al. Vulnerability pre-assessment method for microgrid [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 20-24.
- [6] 朱继忠, 董瀚江, 李盛林, 等. 基于分布式新能源集群的微电网优化调度综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-22. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230544>.
ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of optimal dispatching or the aggregation of micro-energy grids based on distributed new energy [J]. Proceedings of the CSEE, 1-22. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230544>.
- [7] 王佳旭, 苗世洪, 姚福星, 等. 考虑全生命周期碳计量和碳交易机制的多目标微电网系统容量优化配置研究[J/OL]. 现代电力, 1-10[2024-04-10]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0106>.
WANG Jiaxu, MIAO Shihong, YAO Fuxing, et al. Multi-objective capacity optimization configuration in microgrid considering life cycle carbon metering and carbon trading mechanism[J]. Modern Electric Power, 1-10 [2024-04-10]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0106>.
- [8] 牛耕, 季宇, 杨安男, 等. 基于改进碳交易机制的多能微电网低碳经济调度[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 107-116.
NIU Geng, JI Yu, YANG Annan, et al. Low-carbon economic dispatch of multi-energy microgrid based on improved carbon trading mechanism [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10): 107-116.
- [9] 王江磊, 樊小朝, 史瑞静, 等. 碳交易与综合需求响应下的微能源网优化调度[J]. 电气传动, 2023, 53(7): 39-48.
WANG Jianglei, FAN Xiaochao, SHI Ruijing, et al. Optimal scheduling of micro energy grid under carbon trading and comprehensive demand response [J]. ELECTRIC DRIVE, 2023, 53(7): 39-48.
- [10] 康家乐, 周勋甜, 张志刚, 等. 计及负荷侧灵活性资源的微电网低碳优化调度[J]. 电气传动, 2023, 53(8): 37-42.
KANG Jiale, ZHOU Xuntian, ZHANG Zhigang, et al. Low carbon optimal dispatch of microgrid based on load side flexible resources [J]. ELECTRIC DRIVE, 2023, 53(8): 37-42.
- [11] 马宽, 何国锋, 董燕飞, 等. 基于多策略改进 PSO 算法的微电网优化调度研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 23-29, 45.
MA Kuan, HE Guofeng, DONG Yanfei, et al. Microgrid optimal scheduling based on multi-strategy improved PSO algorithm [J]. Smart Power, 2023, 51(8): 23-29, 45.
- [12] 刘运鑫, 姚良忠, 赵波, 等. 考虑灵活组群的配电网-微电网群低碳经济调度方法[J/OL]. 电力系统自动化, 1-23 [2024-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240207.2136.002.html>.
LIU Yunxin, YAO Liangzhong, ZHAO Bo, et al. Low carbon economic scheduling of distribution network-microgrid group considering flexible group behavior[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-23 [2024-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240207.2136.002.html>.
- [13] 赵杰, 王聪, 李冠冠, 等. 考虑需求响应的多微网 P2P 能源交易低碳运行策略[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 54-65.
ZHAO Jie, WANG Cong, LI Guanguan, et al. Low-carbon operation strategy for P2P energy trading among multiple microgrids considering demand response [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 54-65.
- [14] 丁雨昊, 吕干云, 刘永卫, 等. 考虑碳排放目标约束和需求侧响应的综合能源系统日前优化调度[J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 1-11.
DING Yuhao, LYU Ganyun, LIU Yongwei, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission target constraints and demand side response [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(8): 1-11.

作者简介:

闫林芳(1994), 男, 河南林州人, 博士, 研究方向为新型电力系统、碳资产管理、碳减排、碳交易等。

(责任编辑 王蕊)