

考虑多主体互动的光储充微电网运行模式分析

魏梅芳¹, 黎跃龙¹, 胡国峰², 钟俊杰², 龙敏¹, 李勇²

(1. 国网湖南省电力有限公司技术技能培训中心, 湖南长沙, 410000; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙, 410082)

摘要:传统微电网存在用户间缺乏互动性、可再生能源利用率低等问题。本文考虑不同气候条件下光伏出力及智能楼宇内储能的运行模式, 提出基于多主体互动的微电网运行模式, 用于优化微电网的用户用能成本, 同时提升可再生能源的消纳能力。首先, 对比分析微电网经典运行模式及多主体互动运行模式, 研究各主体在不同模式下的用能行为; 然后, 灵活制定合约电价, 提升智能楼宇运营商与电动汽车充电站运营商在微电网内电能互动的效率, 并进一步分析多主体互动模式下微电网内部的能量流动情况; 最后, 考虑环境因素对光伏出力的影响, 分析不同运行模式下微电网内用户的用能成本以及微电网消纳可再生能源的能力。仿真结果表明, 在采用多主体互动模式时, 在光照条件充足时, 可再生能源消纳率从经典运行模式的 67.83% 提高到了 100%, 同时减少了智能楼宇运营商及充电站运行商的用能成本。

关键词:微电网; 可再生能源消纳; 多主体互动; 分时电价

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.015 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2023)02-0133-08

Analysis of operating mode of photovoltaic-energy storage-charging station microgrid considering multi-agent interaction

WEI Meifang¹, LI Yuelong¹, HU Guofeng², ZHONG Junjie², LONG Min¹, LI Yong²

(1. The Technical Skills Central Training Department of State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410000, China;

2. College of Electrical And Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Traditional microgrids have problems such as lack of interaction among users and low utilization rate of renewable energy. Considering the operation mode of photovoltaic (PV) output and energy storage (ES) in smart buildings under different climatic conditions, this paper proposes a micro-grid operation mode based on multi-agent interaction to optimize the user's energy cost of the micro-grid and improve the ability to absorb renewable energy simultaneously. First, this paper compares and analyzes the classic operation mode of microgrid and the multi-agent interactive operation mode, and studies the energy consumption behavior of each agent in different modes; Then, the contract price is set flexibly to improve the efficiency of the energy interaction between the smart building operators and the electric vehicle (EV) charging station (CS) operators in the microgrid, and the energy flow inside the microgrid under the multi-agent interaction mode is analyzed; Finally, considering the impact of environments on PV output, the energy cost of users in the microgrid under different operating modes and the microgrid's capacity of renewable energy consumption are analyzed. The simulation results show that the multi-agent interaction mode of the microgrid increases the consumption rate of renewable energy from 67.83% of the classic operation mode to 100% when the light conditions are sufficient, and at the

收稿日期: 2019-10-06; 修回日期: 2020-01-06

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216AP20000D)

通信作者: 龙敏(1992—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事新能源、电子与通信工程研究; E-mail: longm@cseptic.net

same time optimizes the energy cost of smart building operators and CS operators.

Key words: microgrid; renewable energy consumption; multi-agent interaction; time of use

能源问题自20世纪末以来一直受世界各国重视^[1-2]。大到发展生产力,小到饮食起居都离不开能源的充分供应。微电网在提高能源生产/利用效率、消纳可再生能源方面扮演着重要角色,在社会经济发展、环保、能源高效利用等方面具有显著优势^[3-4]。微电网主要包含各项负荷、分布式电源、各类智能控制器与开关、通信及控制系统等,是一个可以实现自我管理、保护以及控制的自治系统^[5-6],将可再生能源、储能、可控负荷等有机结合,能够同时协调多种能量的供应与消耗,且能够独立自治运行或并网运行,相较于传统电网而言,微电网集成了更多的发电资源,既为其内部各用户提供了良好的交互体验^[7],也提高了新能源的消纳水平,更协调了各用户间及其与电网间的互动关系,间接提高了电力市场的管理效率^[8-9]。

在微电网运行与调度方面,文献[10]考虑了可再生能源出力不确定性,采用区块链技术在多微电网间进行经济调度,文献[11]以各微电网利益最大化为目标建立了市场交易双层优化模型;但上述文献并未关注微电网对可再生能源的消纳及其内部能量流向;文献[12]建立了一个计及不确定性的综合能源系统多目标调度模型;文献[13]从碳交易市场的角度分析了微电网内分布式能源对降低碳排放的贡献,展示了微电网在节能减排方面的潜力;文献[14]展示了一个将部分由可再生能源、存储系统和负载组成的电网转换为微电网的实验案例,提高了微电网内部各设施的效率及可控性,以产消者的视角展示了微电网的运行逻辑;文献[15-16]研究了微电网中分布式能源的P2P交易,关注产消者的收益,但没有研究主体间电能交易在电网层面的优点。微电网作为能源高效利用的重要自治主体,在消纳分布式能源、引导多主体自主互动方面具有天然优势,需要研究其消纳可再生能源的能力及调节主体互动的机理。

为探究微电网对消纳可再生能源的潜力,本文在微电网运行模式内设置合约电价激励微电网内主体间进行电能互动,考虑含光伏、储能的智能楼宇、电动汽车充电站、电网间的电能互动模式建立

多主体互动模式下的微电网运行模式,使得智能楼宇方能够考虑储能的实时荷电状态对充电站方进行报价以消耗富余电能,并针对不同光照条件下的光伏出力进行算例分析。

1 微电网运行模式分析

1.1 传统运行模式

对于传统的多能源微电网,各类能源、负荷之间缺乏协调互动,没有充分发挥协同特性,降低了能源利用效率^[17-18]。对于光储充微电网而言,智能楼宇运营商及充电站运营商作为微电网中的两大主体,能否协同运行,对于提升微电网能量利用率及促进光伏消纳至关重要。

图1所示为湖南长沙某光储充微电网,其中包含智能楼宇及充电设施。智能楼宇含有分布式光伏、储能、中央空调、智能照明等多种设施,且包含数据采集与处理系统。

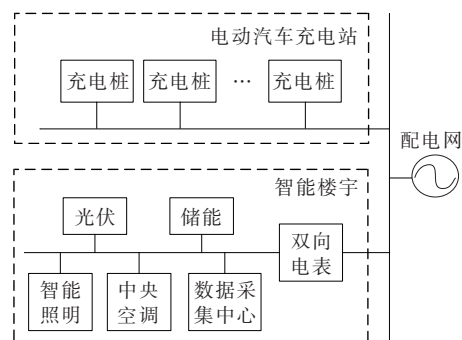


图1 光储充微电网结构

Figure 1 Structure of PV-ES-CS microgrid

如图2所示,在经典运行模式下,智能楼宇通过光伏发电与电网供电,配合楼宇内的储能满足自身能耗。当楼宇判断自身净功率溢出时,则向电网反向送电,充电站从电网取电满足充电负荷。电网以分时电价,为智能楼宇及充电站供电。

由此可知,经典运行模式对于微电网内各主体并非最优选择。对于智能楼宇而言,光伏的产出随时间及气候波动幅度较大,而智能楼宇受储能容量限制,在自身能耗较低而光伏产量大时,以较低

体在合约执行中的决策行为,这同样也会影响合约电价。

2 光储充微电网模型

本文针对湖南长沙某光储充微电网,开展多主体互动模式下微电网运行模式研究,系统结构见图1。在该微电网示范平台中,电能可在电网与智能楼宇间双向流动。充电站运营商既可以选择向电网购电,也可以选择从智能楼宇获取电能。智能楼宇包含光伏、储能,可依据当前电价、储能的容量、楼宇内负荷情况,降低运行成本,并与电网及充电站进行电能互动。

2.1 目标函数

智能楼宇运营商与电动汽车充电站作为微电网主要电能互动主体,其目标函数均为自身运行成本最小。

$$\begin{cases} \min OF_B = \sum \lambda_t^r P_{B,r} - \lambda^s P_s \\ \min OF_C = \sum \lambda_t^r P_{C,r} \end{cases} \quad (2)$$

式中, OF_B 与 OF_C 分别为楼宇及充电站的运营成本; $P_{B,r}$ 、 $P_{C,r}$ 分别为楼宇及充电站对电网的购电量; P_s 智能楼宇返送回电网的电量; λ_t^r 为电网的分时电价; λ^s 为楼宇向电网售电的电价。

在引入多主体电能互动后,成本函数变为

$$\begin{cases} \min OF_B = \sum \lambda_t^r P_{B,r} - \lambda^s P_s - \lambda_{con} P_{con} \\ \min OF_C = \sum \lambda_t^r P_{C,r} + \lambda_{con} P_{con} \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_{con} 、 λ_{con} 分别为智能楼宇以合约电价出售给充电站的电量及合约电价。

2.2 光伏产电模型

光伏的发电功率与温度和光强有关,受天气情况影响较大,光伏阵列输出功率^[20]为

$$\begin{cases} P_{VT}(t) = P_{STC} \frac{G(t)}{G_{STC}} [1 + k(T(t) - T_{STC})] \\ T(t) = T_1 + \frac{3G(t)}{100} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P_{VT}(t)$ 为光强为 $G(t)$ 时的输出功率; G_{STC} 为标准测试条件下的光强; P_{STC} 为标准测试条件下的最大输出功率; k 为功率温度系数; $T(t)$ 为 t 时的表面温度,可通过环境温度 T_1 和光照强度 $G(t)$ 求出。

光伏出力近似服从Beta分布^[20],其概率密度函数为

$$f(x|\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{x}{x_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

式中, x 为给定时间段内的太阳辐射率; x_{max} 为其最大值; α 及 β 为调节Beta分布形状的参数; Γ 函数及参数具体表达式如下:

$$\begin{cases} \Gamma(z) = \int_0^{+\infty} t^{z-1} e^{-t} dt, z > 0 \\ \alpha = \frac{\mu^2 - \mu^3}{\sigma^2} - \mu \\ \beta = \frac{\mu(1-\mu)^2}{\sigma^2} - 1 + \mu \end{cases} \quad (6)$$

其中, μ 与 σ 分别为所选时段光照辐射的均值与方差。由Beta分布的概率密度特性可知,光伏出力PV的期望 E 与方差 Ω 为

$$\begin{cases} E(P_{PV}) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} P_{PVmax} \\ \Omega(P_{PV}) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)} P_{PVmax}^2 \end{cases} \quad (7)$$

本文设置了晴、阴、雨3种天气条件下的光伏输出,具体见算例分析。

2.3 储能模型

智能楼宇内配置了容量为12 kW·h的储能电池,其荷电状态模型为

$$\begin{cases} S_{OC}(t) = S_{OC}(t-1) - \frac{H_{dch}\Delta t}{\eta_{dch}} \\ S_{OC}(t) = S_{OC}(t-1) + H_{ch}\Delta t\eta_{ch} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $S_{OC}(t)$ 为储能当前时刻荷电状态; H_{ch} 、 H_{dch} 分别为储能的充放电功率; η_{ch} 、 η_{dch} 为储能的充放电效率。

智能楼宇内储能运行时满足充放电约束及容量约束:

$$\begin{cases} H_{dch}^{min} \leq H_{dch} \leq H_{dch}^{max} \\ H_{ch}^{min} \leq H_{ch} \leq H_{ch}^{max} \\ S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \end{cases} \quad (9)$$

式中, S_{max} 与 S_{min} 分别表示储能内电量的上下界,一般而言上界取储能容量的最大值,下界取零。

2.4 智能楼宇模型

智能楼宇运行时,由光伏产电、储能供电、电网

供电共同满足自身消耗。其约束如下:

$$P_r + H_{dch} + P_{PV} = P_B + H_{ch} + P_s \quad (10)$$

式中, H_{dch} 、 H_{ch} 分别为储能的每小时充放电功率; P_{PV} 为光伏产电量; P_B 为楼宇自身能耗; P_s 为智能楼宇返送回电网的电量。

当微电网处于多主体运行模式时,由于引入了智能楼宇与充电站间的电能交易,楼宇成本及电能平衡约束修改为

$$P_r + H_{dch} + P_{PV} = P_B + H_{ch} + P_s + P_{con} \quad (11)$$

式中, H_{dch} 、 H_{ch} 分别为储能的每小时充放电功率; P_{PV} 为光伏产电量; P_B 为楼宇自身能耗; P_s 为智能楼宇返送回电网的电量; P_{con} 为智能楼宇方以合约电价售出的电量。

3 算例分析

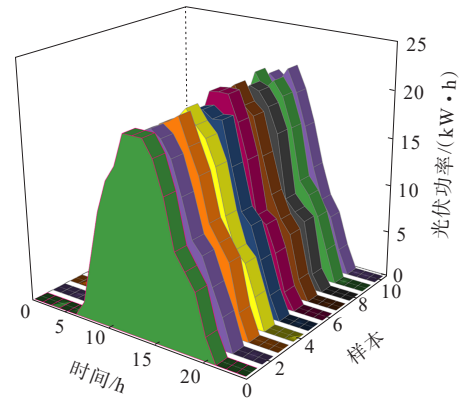
智能楼宇配备的光伏板额定功率为 $20 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 储能最大容量为 $12 \text{ kW} \cdot \text{h}$; 充电站包含 3 台直流快充 ($30 \times 2 + 20$) $\text{kW} \cdot \text{h}$ 及 2 台交流慢充 (7×2) $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。合约电价系数 a 取 0.97, b 取 7.34; 电网采用的分时电价如表 1。

表 1 分时电价

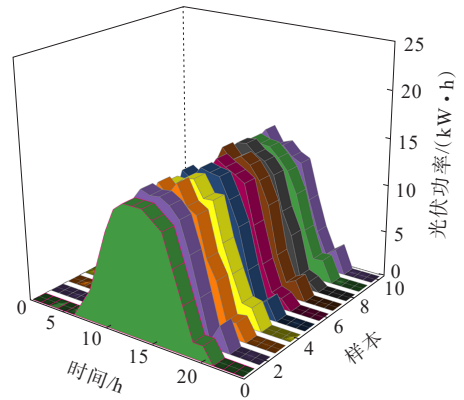
Table 1 Time-of-use price

时段	电价/(kW·h/元)
尖峰(19:00—22:00)	0.930 3
高峰(8:00—11:00,15:00—19:00)	0.830 3
平段(7:00—8:00,11:00—15:00,22:00—23:00)	0.680 3
谷时(23:00—7:00)	0.480 3

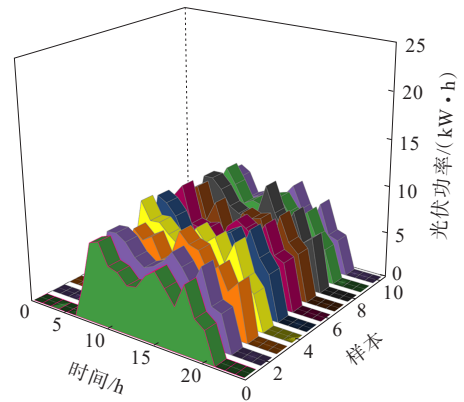
本文选取晴天、阴天、雨天 3 种典型气候条件下光伏的出力情况,并依据式(7)计算其各时段光伏出力的期望与方差;再从中选出 10 组数据,使其每个时段的出力情况的期望与方差尽可能贴近实测数据的期望与方差,以此模拟真实情况下光伏的日出力曲线。仿真时从样本库中抽调数据,以模拟各种光照条件下系统的运行状态,样本库如图 5 所示。其中, x 轴与 y 轴分别表示光伏出力数据所属的时间段及样本库编号, z 轴表示该样本当前时段的光伏输出功率。



(a) 晴天



(b) 阴天



(c) 雨天

图 5 不同天气条件下光伏出力样本
Figure 5 PV output samples under different weather conditions

3.1 光伏消纳能力

图 6 为各光照条件下光伏的出力及消纳曲线,其中,折线为光伏的出力功率,柱状图为两种运行模式下微电网对其内部光伏产电的消纳情况。可以看出,在光照条件充足的晴天,以经典模式运行的微电网有大量电能能在光伏发电高峰期被返送回电网,以午休时间最甚。此时太阳光辐射强度大,光伏产电能力远强于楼宇消耗,经典运行模式下的微电网无法消纳此部分溢出电能。

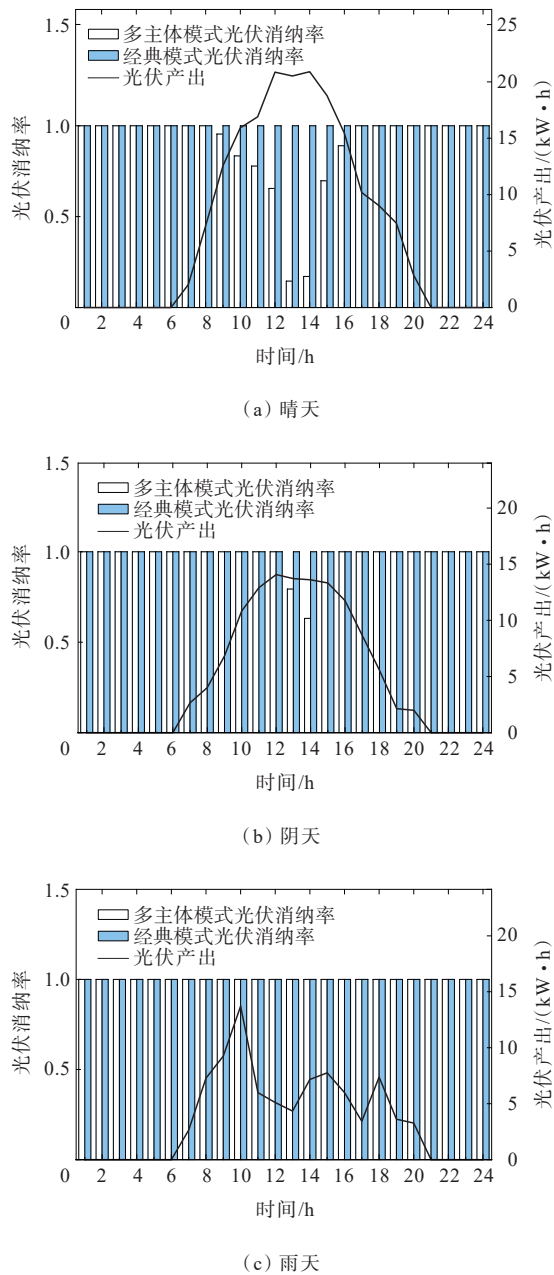


图6 各天气条件下光伏出力及消纳情况

Figure 6 PV output and consumption under various weather conditions

在阴天条件下,光伏所产电能大部分由楼宇消耗,仅在午休时段有少部分电能被返送电网;而在光照条件匮乏的雨天,由于光伏产电量不足以满足楼宇能耗需求,此时光伏产电完全由楼宇消纳,没有电能被返送。在多主体运行模式下,无论何种天气条件,所有光伏产电均由微电网内部消耗,没有电能被返送回电网,两种运行模式的光伏消纳率如表2所示。

表2 两种模式下微电网的光伏消纳率
Table 2 PV consumption rate of smart microgrid in two modes

模式	不同气候下光伏消纳率		
	晴	阴	雨天
经典	67.83	93.56	100.00
多主体	100.00	100.00	100.00

3.2 智能楼宇及电动汽车充电站运行成本

由上述分析可知,当天气为阴天或者雨天时,光照条件不充分,光伏所产电量大部分由智能楼宇消纳,两种运行模式下楼宇及充电站成本无明显变化。因此,本文主要分析晴天条件不同运行模式下智能楼宇及充电站运行成本。

图7和图8为晴天条件下智能楼宇每小时运行成本及储能运行状态。可以看出,在合约电价的作用下,当光伏发电量大于楼宇自身能耗时,经典模式中本应返回电网的电能转而输向了充电站,既提高了楼宇的售电收益,也降低了电网的调控压力,降低了充电站的用能成本。值得指出的是,由两种模式下智能楼宇内储能荷电状态可知,微电网在采用经典运行模式时,将光伏额外产电量返回电网是经济收益较低的选择,因此在8~17 h智能楼宇选择优先将储能充满以供之后时段使用,而不是将其售向电网。而在多主体运行模式下,将电能以合约电价售予充电站能获得更高的收益。

表3及表4为智能楼宇日总运行成本及多主体模式下充电站日节约用电成本。可以看出,只有光照条件充分时,光伏发电量充足,多主体运行模式相较于经典运行模式才有优势,否则光伏产电的大部分将被智能楼宇自身消耗,因此无法参与与充电站间的电能互动。

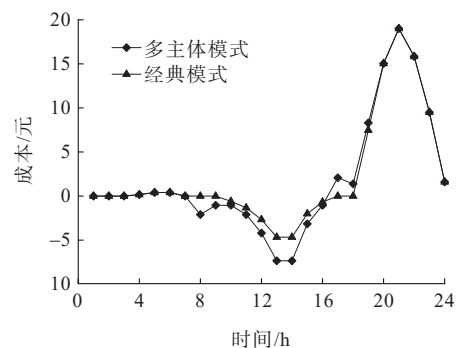


图7 各模式下智能楼宇每小时成本

Figure 7 Hourly cost of smart buildings in each mode

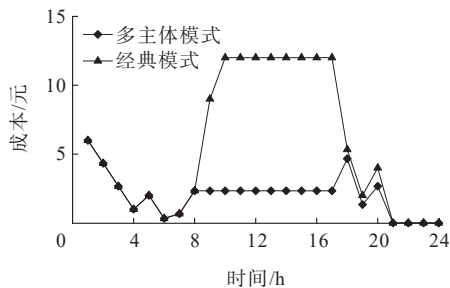


图 8 不同模式下智能楼宇储能运行状态

Figure 8 ES status of smart buildings in each mode

表 3 智能楼宇日总运行成本

Table 3 Total daily cost of smart buildings 元

模式	不同气候下智能楼宇成本		
	晴	阴	雨
经典	52.82	84.53	109.47
多主体	44.38	82.15	109.08

表 4 多主体模式下充电站日成本节约百分比

Table 4 Percentage of daily cost savings of CS in multi-agent mode %

气候	充电站成本节约百分比
晴	7.70
阴	2.50
雨	0.34

4 结语

本文基于某湖南长沙某光储充微电网,分析多主体用能行为及交互模式。通过合理制定合约电价,促进微电网内各主体间电能互动的效率。研究表明:在光照条件较好时,多主体互动运行模式能高效消纳微电网分布式光伏发电,在提升智能楼宇售电收益的同时,降低了电动汽车充电站的运营成本。

微电网内各主体间的电能互动收益主要受系统内光伏产量影响。当光伏产量较低时,其发电量仅能满足智能楼宇自身消耗,没有额外电能可供微电网内多主体互动,各主体运行接近经典模式中的独立运行;当光照条件充分时,智能楼宇所产的额外电能参与微电网多主体互动,降低智能楼宇与充电站的运行成本。

值得注意的是,智能楼宇配置的储能容量在很

大程度上决定了智能楼宇运营商与充电站运营商的议价能力。如何在智能楼宇配置适当容量的储能,以优化楼宇运行成本,促进与分布式光伏和电动汽车负荷的互动,将是后续进一步开展的工作。

参考文献:

- [1] 谭玉东,李杨,邓有月,等.基于智能合约的“光伏—充电站”交易互动场景研究[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):3-10.
TAN Yudong, LI Yang, DENG Youyue, et al. Research on scenes of “PV-charging station” transaction based on smart contract[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):3-10.
- [2] 马一鸣,周夕然,董鹤楠,等.考虑电转气与冷热负荷惯性的综合能源系统优化调度[J].电网与清洁能源, 2021, 37(8):118-127+138.
MA Yiming, ZHOU Xiran, DONG Henan, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering power-to-gas and load inertia[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8):118-127+138.
- [3] 徐明宇,郝文波,王盼宝,等.基于动态随机模型的微电网群能量管理方法[J].电力工程技术, 2022, 41(5):140-148.
XU Mingyu, HAO Wenbo, WANG Panbao, et al. Energy management method of multi-microgrids based on dynamic stochastic model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):140-148.
- [4] 杨晓辉,袁志鑫,肖锦扬,等.考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J].电力系统保护与控制,2023,51(4):22-31.
YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. Power system Protection and Control, 2023, 51(4):22-31.
- [5] 龚钢军,张心语,张哲宁,等.基于区块链动态合作博弈的多微网共治交易模式[J].中国电机工程学报,2021,41(3):803-818.
GONG Gangjun, ZHANG Xinyu, ZHANG Zhening, et al. Multi-microgrid co-governance transaction model based on dynamic cooperation game of blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3):803-818.
- [6] 陆永耕,李建刚,黄禹铭,等.高渗透率分布式电源控制方法[J].发电技术, 2021, 42(1):103-114.
LU Yonggeng, LI Jiangan, HUANG Yuming, et al. High-permeability distributed power control method[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1):103-114.

- [7] 随权,林湘宁,魏繁荣,等.一种考虑网络攻击风险的智能微网新型调度策略[J].中国电机工程学报,2021,41(15):5179-5188.
SUI Quan, LIN Xiangning, WEI Fanrong, et al. A novel scheduling strategy for smart microgrids considering cyber attack[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5179-5188.
- [8] 王雪纯,陈红坤,陈磊.提升区域综合能源系统运行灵活性的多主体互动决策模型[J].电工技术学报,2021,36(11):2207-2219.
WANG Xuechun, CHEN Hongkun, CHEN Lei. Multi-player interactive decision-making model for operational flexibility improvement of regional integrated energy system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(11): 2207-2219.
- [9] 代琼丹,邓昕,吴雪妍,等.能源互联网下综合能源服务商业模式综述[J].高压电器,2021,57(2):135-144.
DAI Qiongdan, DENG Xin, WU Xueyan, et al. Overview on integrated energy service business model under energy internet[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 135-144.
- [10] 邸剑,臧齐齐,王桂兰,等.基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(21):99-107.
DI Jian, ZANG Qiqi, WANG Guilian, et al. A distributed economic scheduling strategy based on blockchain and gradient correction method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 99-107.
- [11] 赵毅,陈雨婷,孙文瑶.多微网配电系统区间调度方法与市场交易策略研究[J].电网技术,2022,46(1):47-56.
ZHAO Yi, CHEN Yuting, SUN Wenyao. Region dispatch method and market trading strategy for multi-microgrid distribution system[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 47-56.
- [12] 吕振华,李强,韩华春,等.计及源荷不确定性和多类储能响应的园区IES多目标优化调度模型[J].电力科学与技术学报,2021,36(2):40-50.
LÜ Zhenhua, LI Qiang, HAN Huachun, et al. Multi-objective optimal scheduling model for IES in parks considering source and load uncertainties and multiple type of energy storage responses[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 40-50.
- [13] 贾德香,柳占杰,高骞,等.计及碳-电一体化交易的虚拟电厂竞价策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(2): 89-97.
JIA Dexiang, LIU Zhanjie, GAO Qian, et al. Bidding strategy of the virtual power plant based on the consideration of carbon-electricity integration trading in auxiliary service market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 89-97.
- [14] IZQUIERDO-MONGE O, PEÑA-CARRO P, VILLAFILA-ROBLES R, et al. Conversion of a network section with loads, storage systems and renewable generation sources into a smart microgrid[J]. Applied Sciences, 2021, 11(11): 5012.
- [15] 刘杨,刘天羽.基于区块链和动态定价模型的微电网P2P能源交易[J].智慧电力,2022,50(3):30-36.
LIU Yang, LIU Tianyu. P2P energy trading in microgrid based on blockchain and dynamic pricing model[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 30-36.
- [16] ZHANG C H, WU J Z, ZHOU Y, et al. Peer-to-Peer energy trading in a microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 220: 1-12.
- [17] 戚艳,尚学军,聂靖宇,等.基于改进多目标灰狼算法的冷热电联供型微电网运行优化[J].电测与仪表,2022, 59(6):12-19.
QI Yan, SHANG Xuejun, NIE Jingyu, et al. Optimization of CCHP micro-grid operation based on improved multi-objective grey wolf algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 12-19+52.
- [18] 黄宗龙,江修波,刘丽军.低碳化背景下配电网“源—储—荷”多目标优化配置[J].电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 36-45.
HUANG Zonglong, JIANG Xiubo, LIU Lijun. Multi-objective optimal allocation of "generation- storage-load" under the low-carbon background[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 36-45.
- [19] 余雪莹,李华强,杨龙杰,等.兼顾企业综合成本与用户体验的微电网双层优化配置[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):38-45.
YU Xueying, LI Huaqiang, YANG Longjie, et al. Bi-level programming method for optimal sizing of grid-connected DC microgrid system based on economic efficiency of enterprises and customer electricity experience[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 38-45.
- [20] 李崎勇,张伟斌,赵新哲,等.改进鲸鱼算法优化支持向量回归的光伏最大功率点跟踪[J].电工技术学报,2021, 36(9):1771-1781.
LI Jiyong, ZHANG Weibin, ZHAO Xinzhe, et al. Global maximum power point tracking for PV array based on support vector regression optimized by improved whale algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1771-1781.