

DOI: 10.19666/j.rlfd.202402040

考虑分时电价的风光储系统技术经济性研究

王来增¹, 冯璐², 张新敬³

(1.中国电力国际发展有限公司, 北京 100080;

2.天津电气科学研究院有限公司, 天津 300171; 3.中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190)

[摘要] 基于分时上网电价和风光储系统成本对源-网-荷-储系统的技术经济性开展了研究。首先, 提出了一种集成可再生能源和储能的微电网系统模型, 该系统包括光伏、风电、储能、电网和用户负荷; 然后, 在满足对负荷可靠供电的前提下, 根据负荷数据、辐照数据、风速数据、分时电价数据以及系统各单元的成本, 以系统经济性最优为目标建立了源-网-荷-储系统的优化模型; 最后, 通过算例详细分析了某地区配置风光储系统的最优容量以及系统的经济性。分析结果表明, 储能系统通过在低电价时储能, 在高电价时释能, 从而避免用户在高电价时从电网购电, 进而降低用户从电网的购电成本。

[关键词] 可再生能源; 储能技术; 容量优化; 分时电价

[引用本文格式] 王来增, 冯璐, 张新敬. 考虑分时电价的风光储系统技术经济性研究[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 66-71.
WANG Laizeng, FENG Lu, ZHANG Xinjing. Economic study on wind-solar-storage systems technology considering time-of-use electricity prices[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 66-71.

Economic study on wind-solar-storage systems technology considering time-of-use electricity prices

WANG Laizeng¹, FENG Lu², ZHANG Xinjing³

(1.China Power International Development Limited, Beijing 100080, China;

2.Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300171, China;

3.Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the time-of-use electricity price and the cost of wind-PV-energy storage system, technical and economic research of source-grid-load-storage system is studied. Firstly, a microgrid system model integrating renewable energy and energy storage system is proposed, which includes PV, wind power, energy storage system, grid, and load. Then, under the premise of ensuring reliable power supply to the load, an optimization model of the source-grid-load-storage system is established with the goal of optimizing the system economy based on load data, irradiation data, wind speed data, time-of-use electricity price data, and the costs of each unit of the system. Finally, the optimal capacity and economic feasibility of configuring a wind-PV-storage system in a certain region are analyzed in detail through a numerical example. The analysis results indicate that, the energy storage systems store energy at low electricity prices and release energy at high electricity prices, thereby avoiding users from purchasing electricity from the grid at high electricity prices and reducing the cost of purchasing electricity from the grid. The configuration of a wind-PV-energy storage system can effectively reduce the annual cost of purchasing electricity from the grid.

Key words: renewable energy; energy storage technology; capacity optimization; time-of-use electricity price

可再生能源近年来发展迅速, 在应对全球气候变化、保障电力供应安全和确保经济社会持续快速发展方面具有重要意义^[1]。但由于其自身具有随机性、波动性和间歇性的特点, 大规模接入电网会对

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52376040); 北京市科技新星计划(20230484479)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52376040); Beijing Nova Program (20230484479)

第一作者简介: 王来增(1981), 男, 高级工程师, 主要研究方向为新能源, lzwang@cpibj.com.cn。

通信作者简介: 张新敬(1981), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为大规模压缩空气储能技术研发、储能与可再生能源耦合系统分析与实验研究, zhangxinjing@iet.cn。

电力系统运行产生不利影响。通过构建大规模耦合储能的可再生能源系统,利用储能系统对可再生能源存储和释放来平抑可再生能源的波动性和间歇性,提高可再生能源并网率并促进可再生能源的发展^[2]。加入储能系统将增加投资成本,为了降低成本,有必要开展储能与可再生能源耦合系统的优化研究^[3]。文献[4]指出增加储能系统可以最大限度地减少分布式可再生能源发电规模,并降低整个系统的投资成本。文献[5]考虑了 ESS 投资和运营年份对产能分配的影响,结果表明储能成本的降低和储能寿命的延长将提高系统的最优配置能力。文献[6]提出了一种基于可再生能源并网的分布式发电系统,通过仿真确定最优光伏和风电机组容量,以最小化分布式发电系统的生命周期成本,结果表明当平均风速在 4.8 m/s 以上时,利用风力发电机组作为可再生能源发电机组具有较好的经济效益。文献[7]考虑到太阳辐射和风速的不确定性,应用混合整数线性规划(MILP)来解决工业分时电价(TOU)用户 BESS 的最优调度问题。文献[8]和文献[9]分别以系统年投资最小和年电力收入最大为优化目标,优化了具有耦合储能的可再生能源系统的容量。文献[10]提出了生产过程中单机生产调度能耗成本最小化的数学模型,采用遗传算法来获得最优解,结果表明通过避免高能源价格时期生产可以显著降低能源成本。文献[11]以可再生能源和电池耦合系统并网的电力成本最小为优化目标,对风电和电池容量进行了敏感性分析,结果表明在分时电价下,夏季典型日电费可降低 54.0%,而在冬季典型日电费可降低 0.7%,通过优化调度每年可节省 28.1%的电力成本。文献[12]为了使 BESS 的综合效益最大化,建立了同时考虑 BESS 容量配置和运行调度的多目标双层优化模型,采用基于信息熵法和二阶锥松弛法的多目标粒子群优化算法求解优化问题。规划和运行问题在风光储系统的优化配置中具有相互影响的作用,可通过将系统的容量配置模型和调度模型相结合进行优化^[13]。文献[14]利用粒子群优化算法研究了可再生能源和电池系统耦合的优化运行策略,以最小化能源成本,结果表明在不同的电价方案下,该运营框架能够降低 12.1%~58.3%的能源成本。文献[15]建立了 PV 时移和套利模型,在低电价时储能系统从光伏发电场或电网充电,在高电价时储能系统向电网放电,储能系统通过储释能电价差获得收益。

目前,大部分研究仅针对典型日的负荷数据、电价数据、风速数据和辐照数据进行分析,研究结果具有局限性;且仅对电价套利下储能系统的容量优化和技术经济性进行了研究;或是仅针对风光储微电网系统进行容量优化配置。针对以上问题,本文建立了一种将分布式风电、分布式光伏、锂电池储能系统和电网集成的源-网-荷-储模型;在保证储能系统充放电功率约束、储能系统荷电状态约束、风电和光伏发电功率约束的前提下,分析了风光储系统的经济效益;并在综合考虑风光储系统的投资成本、从电网购电成本及当地可再生能源资源和用户负荷等因素的影响,以风光储系统全生命周期年综合成本最低为优化目标,建立了源-网-荷-储系统优化模型和储能系统的充放电过程运行控制策略。

1 源-荷-储-网系统结构

图 1 为本文提出的源-荷-储-网系统结构,该系统包含分布式风电、分布式光伏、锂电池储能系统、储能电力控制系统(PCS)以及用户负荷。目前,用户通过从电网购电来满足负荷需求,本研究通过给用户配置风光储系统来降低电网的购电成本,提高系统的经济性。源-荷-储-网系统工作过程为:白天低电价时,光伏系统、风电系统和电网共同给负荷供电,光伏系统、风电系统多余的电储存在储能系统中;白天高电价时,光伏系统、风电系统和储能系统共同给负荷供电,降低高电价时从电网的购电成本;晚上高电价时,储能系统储存的多余电能和风电系统、电网共同给负荷供电。

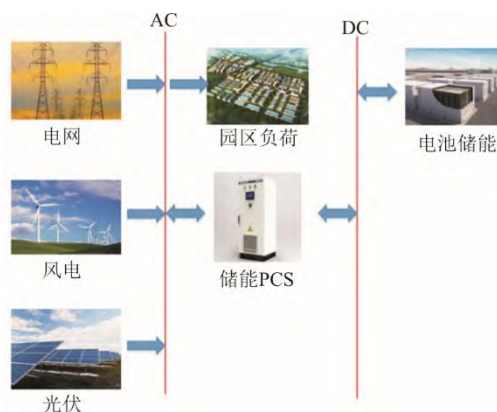


图 1 源-荷-储-网系统模型

Fig.1 The source-load-storage-grid system model

2 系统成本分析

2.1 风光储系统初始投资年成本

风光储系统总成本折合年度成本的计算方法为:

$$C_{\text{cap},a} = f_{\text{wind},\text{cr}} P_{\text{wind},\text{rate}} C_{\text{wind}} + f_{\text{pv},\text{cr}} P_{\text{pv},\text{rate}} C_{\text{pv}} + f_{\text{ba},\text{cr}} (E_{\text{ba},\text{rate}} C_{\text{ba},\text{c}} + P_{\text{ba},\text{rate}} C_{\text{ba},\text{p}}) \quad (1)$$

$$f_{\text{cr}} = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{wind},\text{rate}}$ 为风电功率, kW; C_{wind} 为风电的单位成本, 元/kW; $f_{\text{wind},\text{cr}}$ 为风电的折旧系数; $P_{\text{pv},\text{rate}}$ 为光伏功率, kW; C_{pv} 为光伏的单位成本, 元/kW; $f_{\text{pv},\text{cr}}$ 为光伏的折旧系数; $E_{\text{ba},\text{rate}}$ 为电池的容量, kW·h; $C_{\text{ba},\text{c}}$ 为电池的容量成本, 元/(kW·h); $P_{\text{ba},\text{rate}}$ 为电池的功率, kW; $C_{\text{ba},\text{p}}$ 为电池的功率成本, 元/kW; $f_{\text{ba},\text{cr}}$ 为电池的折旧系数; i 为折现率; T 为系统的运行年限, 年^[16-19]。

2.2 风光储系统运行维护年成本

系统运行维护年成本按初始投资成本的 2% 计算^[19]。

$$C_{\text{O\&M},a} = 0.02 \times (P_{\text{wind},\text{rate}} C_{\text{wind}} + P_{\text{pv},\text{rate}} C_{\text{pv}} + E_{\text{ba},\text{rate}} C_{\text{ba},\text{c}} + P_{\text{ba},\text{rate}} C_{\text{ba},\text{p}}) \quad (3)$$

2.3 风光储系统替换年成本

$$C_{\text{R},a,j} = f_{\text{cr}} \cdot \sum_{i=1}^r (1+i)^{-r\tau} \cdot C_{\text{R},j} \quad (4)$$

$$C_{\text{R},a} = \sum_{j=1}^J C_{\text{R},a,j} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{R},j}$ 为设备 j 替换 1 次的费用, 元; $C_{\text{R},a,j}$ 为设备 j 折算到每年的替换费用, 元/a; r 为设备 j 的替换次数; τ 为替换间隔, 年。

2.4 从电网购电年成本

电价低谷时, 储能系统存储来自电网, 年购电成本为:

$$C_{\text{grid},a} = \sum_{i=1}^k (P_i \times \delta \times EP_i) \quad (6)$$

式中: P_i 为风光储系统在第 i 时段从电网的取电功率, kW; δ 为时间步长, 取 1 h; EP_i 为第 i 时段的上网电价, 元/(kW·h)。

3 系统优化

3.1 优化目标函数

源-荷-储-网系统的成本包括风光储系统的初始投资成本、运行维护成本、替换成本, 以及从电网的购电成本。以源-荷-储-网系统年综合成本最

小为目标函数对系统进行优化。优化目标函数为:

$$C_a = C_{\text{cap},a} + C_{\text{O\&M},a} + C_{\text{R},a} + C_{\text{grid},a} \quad (7)$$

3.2 相关约束

1) 实时功率平衡约束

$$P_{l,t} = P_{w,t} + P_{pv,t} + P_{ba,t} + P_{\text{grid},t} \quad (8)$$

式中: $P_{l,t}$ 、 $P_{w,t}$ 、 $P_{pv,t}$ 、 $P_{ba,t}$ 、 $P_{\text{grid},t}$ 分别为时刻 t 下负荷需求功率、风力发电功率、光伏发电功率、储能系统充放电功率(放电功率为正, 充电功率为负)以及从电网取电功率, kW。

2) 释能过程功率约束

$$P_{\text{si},t}^d \leq U_{\text{si},t}^d \overline{P_{\text{si}}^d} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{si},t}^d$ 为储能系统在时段 t 的释能功率, kW; $\overline{P_{\text{si}}^d}$ 为释能过程最大释能功率, kW; $U_{\text{si},t}^d$ 为释能时的运行状态, 释能时取 1, 否则取 0。

3) 释能过程荷电状态约束

$$E_{\text{si},t-1} - 1/\eta_{\text{si}}^d \times t \times P_{\text{si},t}^d \geq \underline{E_{\text{si}}} \quad (10)$$

式中: $E_{\text{si},t}$ 为储能系统在时段 t 已存储的容量, kW·h; $\underline{E_{\text{si}}}$ 为储能系统最小存储容量, kW·h; η_{si}^d 为释能效率, %。

4) 储能过程功率约束

$$P_{\text{si},t}^c \leq U_{\text{si},t}^c \overline{P_{\text{si}}^c} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{si},t}^c$ 为储能系统在时段 t 的储能功率, kW; $\overline{P_{\text{si}}^c}$ 为储能过程最大储能功率, kW; $U_{\text{si},t}^c$ 为储能时的运行状态, 储能时取 1, 否则取 0。

5) 储能过程荷电状态约束

$$E_{\text{si},t-1} + \eta_{\text{si}}^c \times t \times P_{\text{si},t}^c \leq \overline{E_{\text{si}}} \quad (12)$$

式中: $\overline{E_{\text{si}}}$ 为储能系统最大存储容量, kW·h; η_{si}^c 为储能效率, %。

4 优化结果及分析

本研究根据某地区的历史负荷数据、历史辐照数据、历史风速数据、分时电价数据以及系统各设备的单价, 在满足对负荷可靠供电的前提下, 通过对系统进行优化配置使系统经济性最优。系统运行策略主要是储能系统通过在低电价时储能, 在高电价时释能来降低用户的电量电费, 可根据该地区现行的工商业分时电价和用户的实际用电情况确定。

4.1 分时电价数据

储能系统可以在低电价时储存电能, 在高电价时释放电能, 通过储释能电价差来获得收益。表 1 列出了该地分时电价情况。从表 1 可见, 尖峰与低

谷电价差值为 0.892 元/(kW·h)。根据表 1 中分时电价时段, 1 天中储能系统根据电价差可以进行 2 次储释能循环。尖峰电价时段都在白天, 通过配置风-光系统, 可以减少尖峰时段从电网购电, 降低用户的用电成本。

表 1 该地分时电价
Tab.1 The time-of-use electricity prices in the area

时段	电价/(元·(kW·h) ⁻¹)
00:00—08:00	0.374
08:00—09:00	0.870
09:00—11:00	1.266
11:00—13:00	0.374
13:00—17:00	1.266
17:00—22:00	0.870
22:00—24:00	0.374

图 2 给出了全年不同时刻的电价变化。从图 2 可见: 1 天中有 3 段时间为低电价, 分别为 00:00—08:00、11:00—13:00 和 22:00—24:00; 有 2 段时间为高峰电价, 分别为 08:00—09:00 和 17:00—22:00; 有 2 段时间为尖峰电价, 分别为 09:00—11:00 和 13:00—17:00。

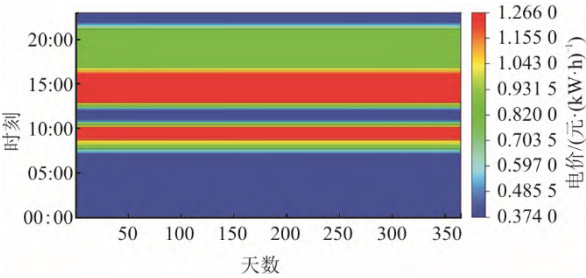


图 2 全年不同时刻的电价数据
Fig.2 Electricity price at different times throughout the year

4.2 可再生能源数据

1) 光伏资源

根据国际可再生能源实验室的数据, 得到该地区全年辐照度数据如图 3 所示。经计算, 年平均每天辐照度为 4.08 (kW·h)/m²。

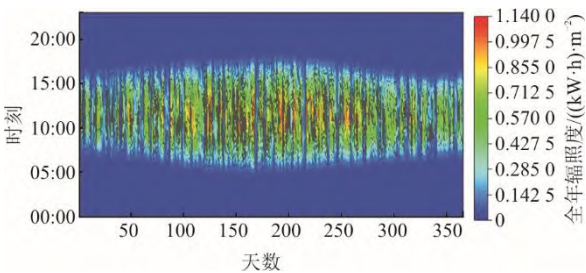


图 3 全年辐照度
Fig.3 Annual irradiance data

2) 风能资源

根据国际可再生能源实验室的数据, 得到该地区全年风速数据如图 4 所示。经计算, 年平均风速为 5.5 m/s。

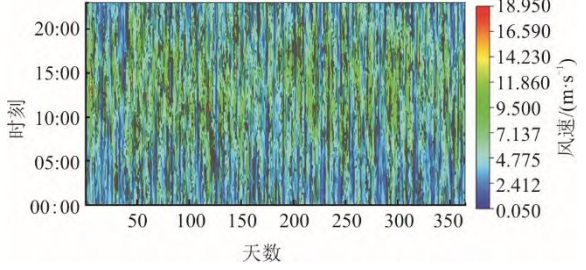


图 4 全年风速数据
Fig.4 Annual wind speed data

4.3 风光储系统参数

表 2 列出了系统各部分的成本、寿命和效率。光伏系统(包括逆变器)的成本为 4 000 元/kW, 风电机组的成本为 6 500 元/kW, 储能变流器的成本为 200 元/kW, 锂电池储能的成本为 1 500 元/(kW·h)。系统规划使用年限为 20 年, 光伏逆变器效率为 98%, 储能变流器储、释能效率都为 98%, 锂电池储、释能效率都为 95%^[20-25]。

表 2 系统各单元参数
Tab.2 Parameters of each unit in the system

项目	数值	项目	数值
风电系统单价/(元·kW ⁻¹)	6 500	锂电池充电效率/%	95
风电系统寿命/a	20	锂电池放电效率/%	95
光伏系统单价/(元·kW ⁻¹)	4 000	锂电池寿命/a	20
光伏逆变器效率/%	98	储能 PCS 单价/(元·kW ⁻¹)	200
光伏系统寿命/a	20	储能 PCS 充电效率/%	98
光伏系统容配比	1.1	储能 PCS 放电效率/%	98
锂电池单价/(元·(kW·h) ⁻¹)	1 500	储能 PCS 寿命/a	20
系统规划年限/a	20		

4.4 负荷数据

用户的典型日历史负荷功率曲线如图 5 所示。从图 5 可见, 峰值负荷为 7 366 kW。为了模拟全年的负荷波动情况, 将日间负荷变化率设为 1%, 日内负荷变化率设为 1%。图 6 为用户全年小时级的负荷功率数据。

4.5 优化结果分析

优化后系统各部分的最优配置容量见表 3。

1) 系统成本分析

图 7、表 4 给出了系统年总成本的构成。未配置光伏、风电和储能的情况下, 每年从电网购电成

本为 2 634.69 万元；配置光伏、风电和储能以后，每年从电网购电成本为 618.66 万元，每年购电成本降低 2 016.03 万元。

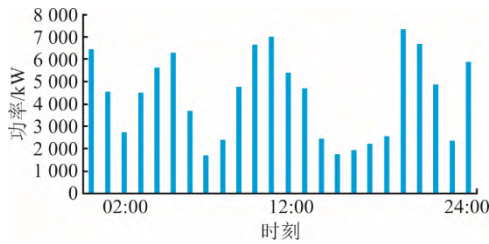


图 5 日基准负荷
Fig.5 Daily benchmark load

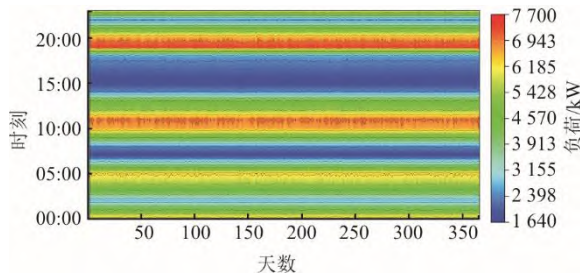


图 6 全年负荷波动
Fig.6 Annual load fluctuation

表 3 优化结果
Tab.3 Optimization results

组成部分配置容量	数值
光伏部分配置容量/ kW	4 600
风电部分配置容量/ kW	12 000
锂电池储能部分配置容量/(kW·h)	24 000
储能 PCS 部分配置容量/ kW	7 000

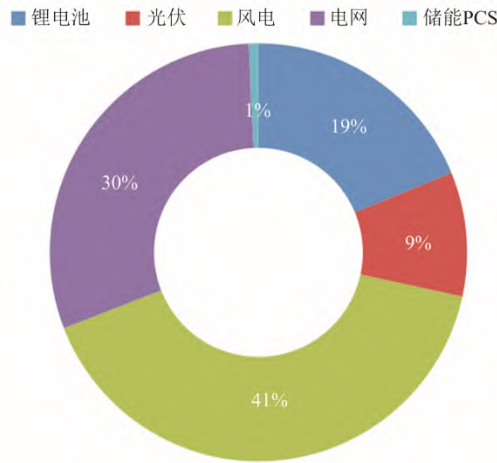


图 7 系统各单元年总成本占比
Fig.7 Annual cost proportion of each unit in the system

2) 系统发电量分析

图 8、表 5 给出了光伏、风电、电网的发电量和占比情况。其中，电网年发电量占比为 22.4%，

光伏年发电量占比为 11.2%，风电年发电量占比为 66.4%。

表 4 系统年总成本构成 单位：万元/a
Tab.4 Annual cost composition of the system

系统组成	初始投资 年成本	运行维护 年成本	购电 年成本	年总成本
锂电池	313.2	72.0		385.2
光伏	160.1	36.8		196.9
风电	678.6	156.0		834.6
电网			618.7	618.7
储能 PCS	12.2	2.8		15.0
合计	1 164.1	267.6	618.7	2 050.3

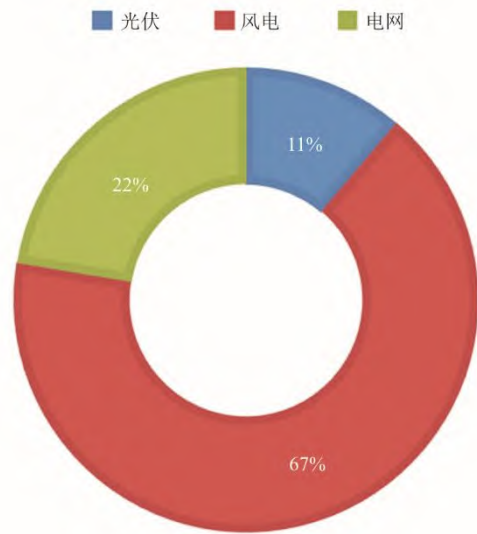


图 8 系统各单元年发电量占比
Fig.8 Annual power generation proportion of each unit in the system

表 5 系统各单元年发电量及其占比
Tab.5 Annual power generation and its proportion of each unit in the system

系统构成	年发电量/(kW·h·a ⁻¹)	占比/%
光伏	5 714 785	11.2
风电	33 935 452	66.4
电网	11 467 213	22.4
合计	51 117 451	100.0

5 结 论

本文建立了一种集成光伏、风电、储能、电网和用户负荷的微电网模型，在保证用户可靠供电的前提下，根据负荷数据、辐照数据、风速数据、分时电价数据以及系统各单元的成本，对系统应用经济性进行优化分析。以源-网-荷-储系统的经济性最优为目标，综合考虑系统的实时功率平衡约束、

储能系统的功率约束和荷电状态约束,建立了系统的优化模型。

1) 增加风光储系统以后,一方面可以降低从电网的购电量;另一方面储能系统通过在低电价时储能,在高电价时释能,从而避免用户在高电价时从电网购电,进而降低用户从电网购电成本。

2) 算例中未配置光伏、风电和储能的情况下,每年从电网购电成本为 2 634.69 万元;增加风光储系统以后,系统的年成本为 2 050.33 万元,用户每年的用电成本可降低 584.36 万元。

【参考文献】

- [1] EGLI F, STEFFEN B, SCHMIDT T S. Learning in the financial sector is essential for reducing renewable energy costs[J]. *Nature Energy*, 2019, 4(10): 835-836.
- [2] GALLAGHER K S, ZHANG F, ORVIS R, et al. Assessing the policy gaps for achieving China's climate targets in the Paris Agreement[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1256.
- [3] ZHANG X, QIN C, XU Y, et al. Integration of small-scale compressed air energy storage with wind generation for flexible household power supply[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 37: 102430.
- [4] FARES R L, WEBBER M E. The impacts of storing solar energy in the home to reduce reliance on the utility[J]. *Nature Energy*, 2017, 2(2): 1-10.
- [5] 严干贵, 冯晓东, 李军徽, 等. 用于松驰调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(28): 27-35.
YAN Gangui, FENG Xiaodong, LI Junhui, et al. Optimization of energy storage system capacity for relaxing peak load regulation bottlenecks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(28): 27-35.
- [6] VILLARREAL S, JIMENEZ J A, JIN T, et al. Designing a sustainable and distributed generation system for semiconductor wafer fabs[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 16-26.
- [7] ALHARBI H, BHATTACHARYA K. Stochastic optimal planning of battery energy storage systems for isolated microgrids[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 9(1): 211-227.
- [8] BRAFF W A, MUELLER J M, TRANCIK J E. Value of storage technologies for wind and solar energy[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(10): 964-969.
- [9] DENG K, TANG X, LEI J, et al. The capacity optimization of the energy storage system used for peak load shaving[C]//*Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 192: 1-8.
- [10] SHROUF F, ORDIERES J, GARCIA A, et al. Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 67: 197-207.
- [11] ZHANG H, CAI J, FANG K, et al. Operational optimization of a grid-connected factory with onsite photovoltaic and battery storage systems[J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 1538-1547.
- [12] JIANG X, JIN Y, ZHENG X, et al. Optimal configuration of grid-side battery energy storage system under power marketization[J]. *Applied Energy*, 2020, 272: 115242.
- [13] XIONG P, SINGH C. Optimal planning of storage in power systems integrated with wind power generation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 232-240.
- [14] LI X, WEN J, MALKAWI A. An operation optimization and decision framework for a building cluster with distributed energy systems[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 98-109.
- [15] ZUCKER A, HINCHLIFFE T. Optimum sizing of PV-attached electricity storage according to power market signals: a case study for Germany and Italy[J]. *Applied Energy*, 2014, 127: 141-155.
- [16] 林申力, 王子璇. 供电局储能系统经济性分析[J]. *电工技术*, 2019(7): 28-32.
LIN Shenli, WANG Zixuan. Economic analysis of energy storage systems invested by a power supply bureau[J]. *Electrical Technology*, 2019(7): 28-32.
- [17] 桑丙玉, 杨波, 李官军, 等. 分布式发电与微电网应用的锂电池储能系统研究[J]. *电力电子技术*, 2012, 46(10): 57-59.
SANG Bingyu, YANG Bo, LI Guanjun, et al. Distributed generation and microgrid application of lithium battery energy storage system[J]. *Power Electronics*, 2012, 46(10): 57-59.
- [18] 周琳. 我国陆上风电度电成本分析与展望[J]. *中国电力企业管理*, 2019(19): 73-74.
ZHOU Lin. Cost analysis and prospect of onshore wind power in China[J]. *China Power Enterprise Management*, 2019(19): 73-74.
- [19] GUINOT B, CHAMPEL B, MONTIGNAC F, et al. Techno-economic study of a PV-hydrogen-battery hybrid system for off-grid power supply: impact of performances' ageing on optimal system sizing and competitiveness[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(1): 623-632.
- [20] FENG L, ZHANG X, LI X, et al. Performance analysis of hybrid energy storage integrated with distributed renewable energy[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 1829-1838.
- [21] FANG J, XU Q, TANG R, et al. Research on demand management of hybrid energy storage system in industrial park based on variational mode decomposition and Wigner-Ville distribution[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 42: 103073.
- [22] BARELLI L, BIDINI G, CIUPAGEANU D A, et al. Integrating hybrid energy storage system on a wind generator to enhance grid safety and stability: a leveled cost of electricity analysis[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 34: 102050.
- [23] 冯璐, 李斌, 张新敬, 等. 考虑需求侧响应的风储系统容量配置优化分析[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40: 222-231.
FENG Lu, LI Bin, ZHANG Xinjing, et al. Capacity allocation optimization of energy storage system considering demand side response[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40: 222-231.
- [24] JAFARI M, BOTTERUD A, SAKTI A, et al. Decarbonizing power systems: a critical review of the role of energy storage[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 158: 112077.
- [25] JAVED M S, MA T, JURASZ J, et al. Economic analysis and optimization of a renewable energy based power supply system with different energy storages for a remote island[J]. *Renewable Energy*, 2021, 164: 1376-1394.

(责任编辑 杨嘉蕾)