

风光储系统储能容量协调优化

刘丹¹, 刘方^{1,2}

(1.上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 200090;
2.新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192)

[摘要] 合理的储能容量配置可以充分发挥风光储系统互补特性, 基于 Modelica 非因果建模语言对含随机参数的风光储系统进行了动态描述, 分层优化风光储系统的储能容量。外层模型以储能系统的初始投资成本、储能运行维护成本、联络线功率波动惩罚成本最低为目标函数, 内层模型以联络线功率波动最小为目标函数; 然后利用运筹规划算法求解; 最后选取典型日算例数据, 结合分时电价确定储能系统运行方式。仿真结果验证了本文储能容量优化方法的有效性, 即优先考虑利用光伏与风力发电来满足负荷用电需求, 结合分时电价, 优先选择在 0:00—6:00 时间段内对蓄电池充电。

[关键词] 风光储系统; 储能容量; Modelica 语言; 动态描述; 分层优化模型; 分时电价

[中图分类号] TM61; TK02 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfid.202008206

[引用本文格式] 刘丹, 刘方. 风光储系统储能容量协调优化[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 54-59. LIU Dan, LIU Fang. Cooperative optimization of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 54-59.

Cooperative optimization of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system

LIU Dan¹, LIU Fang^{1,2}

(1. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: Reasonable storage capacity configuration can give full play to the complementary features of wind/PV/storage hybrid system. Based on Modelica noncausal modeling language, dynamic description of the wind/PV/storage hybrid system with stochastic parameters is performed. The two-stage model is adopted to optimize the energy storage capacity in the wind/PV/storage hybrid system. The outer model takes the initial investment cost of energy storage system, the operation and maintenance cost of energy storage, and the penalty cost of the fluctuation of the contact line power as the objective function. The inner model takes the minimum power fluctuation of the contact line as the objective function, and then uses the operational planning algorithm to solve the problem. Finally, a typical daily calculation example is selected to determine the operation mode of the energy storage system in combination with TOU price. The simulation results verify the effectiveness of the proposed energy storage capacity optimization method in this paper, namely, the photovoltaic and wind power generation are given priority in the 0:00~6:00 period in combination with the TOU price.

Key words: wind/PV/storage system, energy storage capacity, Modelica language, dynamic description, two-stage optimization model, TOU price

随着光伏、风电的大规模开发利用, 其输出功率的波动性对电网的冲击越来越严重^[1-4]。储能系统凭

借其可充可放的运行特性, 有效克服了光伏、风电输出功率的波动性, 提高了可再生能源的消纳^[5-6]。为

修回日期: 2020-10-03

基金项目: 上海市自然科学基金(19ZR1420400); 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)开放基金资助(NYB51202001608)

Supported by: Natural Science Foundation of Shanghai (19ZR1420400); Open Fund of State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute) (NYB51202001608)

第一作者简介: 刘丹(1990), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电系统, liudan934@163.com。

通信作者简介: 刘方(1974), 女, 汉族, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源系统优化、热力循环与系统优化, fangliu@shiep.edu.cn。

充分发挥风光储系统互补特性,进行合理的储能容量配置成为研究的热点问题。现有文献对风光储系统储能容量协调优化问题考虑不够全面,均未从源侧、负荷侧、储能侧综合考虑储能初始投资成本、储能运行维护成本、联络线功率波动惩罚成本以及分时电价对储能容量配置的影响。如文献[3-4]未考虑负荷侧波动对储能容量配置的影响。文献[5]未考虑源侧不确定性对风光储系统储能容量优化配置的影响。文献[6]提出一种考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储系统储能容量配置,未考虑分时电价对结果的影响。文献[7-8]仅从储能侧考虑系统中储能容量配置的经济性,忽略了源侧与负荷侧的影响。文献[9-15]仅考虑了储能初始投资成本及运行维护成本,局限于系统内部,未考虑外部联络线功率波动惩罚成本。

本文提出一种基于 Modelica 非因果建模语言对含随机参数的风光储系统进行了动态描述,建立了耦合光伏、风机、储能、测量与控制装置以及用户负荷的多时变特性联合仿真模型。采用分层优化风光储系统中储能容量:外层模型以储能系统的初始投资成本、储能运行维护成本、联络线波动惩罚成本最低为目标;内层模型以联络线功率波动最小为目标,同时兼顾风光储系统的稳定性与经济性。

1 风光储系统各部件模型

1.1 光伏发电模型

光伏发电功率 $P_{PV,t}$ 为

$$P_{PV,t} = A_{PV} \cdot \eta \cdot f_{act} \cdot \eta_{DC/AC} \cdot G_t \quad (1)$$

式中: A_{PV} 光伏板的有效面积, m^2 ; η 为光电转换效率; f_{act} 为光伏表面活性的分数; $\eta_{DC/AC}$ 为逆变器效率; G_t 为太阳总辐射, W/m^2 。

1.2 风力发电模型

风机发电功率

$$P_{WT,t} = P_t \cdot \eta_{DC/AC} \cdot l_{scale} \quad (2)$$

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A_{WT} \cdot V_{loc,t}^3 \quad (3)$$

$$V_{loc,t} = V_{ref,t} \cdot \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^y \quad (4)$$

式中, C_p 为风能利用系数, ρ 为空气密度(通常条件下 $20^\circ C$ 时,取 $1.205 kg/m^3$), A_{WT} 为风机扫风面积, l_{scale} 为风机的尺度参数, P_t 为当地风速对应发电机功率, h 为风力发电设备中风轮距离地面的高度, h_{ref} 为机组参考高度, y 为机组高度指数, $V_{ref,t}$ 为气象站参考风速。

1.3 储能模型

根据实际情况设定充放电过程电压恒定,充放电电流在 1 个优化时间步长内保持不变,且在 1 个调度周期内蓄电池性能不受外界温度、湿度等变化的影响。

充电状态模型:

$$S_{SOC,t+1} = S_{SOC,t}(1 - \delta_t) + \frac{P_{Bat,t} \cdot \eta_c \cdot \Delta t}{C_{Bat}} \quad (5)$$

$$P_{Bat,t} = \varphi \cdot I_{Bat,t,c} \cdot V_{Bat,c} \quad (6)$$

放电状态模型:

$$S_{SOC,t+1} = S_{SOC,t}(1 - \delta_t) - \frac{P_{Bat,t} \cdot \Delta t}{C_{Bat} \cdot \eta_d} \quad (7)$$

$$P_{Bat,t} = \varphi \cdot I_{Bat,t,d} \cdot V_{Bat,d} \quad (8)$$

式中: δ_t 为电量损耗系数,平均取值 $0.0002^{[16]}$; η_c 为充电效率; η_d 为放电效率; Δt 为时间间隔; P_{Bat} 为蓄电池充、放电功率, kW ; φ 为蓄电池功率因数; $I_{Bat,t,c}$ 为蓄电池充电电流; $I_{Bat,t,d}$ 为蓄电池放电电流; $V_{Bat,c}$ 为蓄电池充电电压; $V_{Bat,d}$ 为蓄电池放电电压; C_{Bat} 为蓄电池额定容量, kWh 。

2 目标函数及约束条件

本文采用分层优化思想,长时间尺度的风光储系统储能投资规划放在外层模型中描述,短时间尺度风光储系统优化放在内层模型中描述,综合考虑储能经济性与联络线功率波动。储能系统成本包括初始投资成本与运行维护成本^[12]。

2.1 外层模型

目标函数为

$$\min C = C_{pur} + C_{Bat-ma} + C_{line} \quad (9)$$

初始投资成本为

$$C_{pur} = c_1 P_{rated} + c_2 E_{rated} \quad (10)$$

运行维护成本为

$$C_{Bat-ma} = c_3 P_{Bat}(t) \quad (11)$$

备用容量成本为

$$C_{line} = \lambda P_{line} \quad (12)$$

式中: C_{pur} 为储能初始投资成本,元; C_{Bat-ma} 为储能维护成本,元; P_{rated} 为储能配置功率, kW ; E_{rated} 为储能配置容量, kWh ; c_1 为配置单位储能功率的费用,对于锂电池、铅酸等电池储能,主要指功率逆变器的单位购买费用,元/ kWh ; c_2 为配置单位储能容量的费用,元/ kWh ;时段 t 取值 $1, 2, \dots, N$; N 为

优化时间段内总的时段数; P_{Bat} 为储能充、放电功率, kW; c_3 为储能单位功率维护费用^[17-18], 包含了等日值系数与日固定维护成本系数, 元/kW; C_{line} 为风光储系统与电网之间联络线上因功率偏移所增加的电网备用容量成本, 元; λ 为惩罚系数, 元/kW。

约束条件为:

$$P_{\text{rated}} \leq P_{\text{max}} \quad (13)$$

$$E_{\text{rated}} \leq E_{\text{max}} \quad (14)$$

引入二进制变量:

$$0 \leq P_{\text{Bat, ch}}(t) \leq y(t)P_{\text{rated}} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{\text{Bat, dis}}(t) \leq [1 - y(t)]P_{\text{rated}} \quad (16)$$

$$E_{\text{min, rated}} \leq E_{\text{rated}}(0) + \eta_c \sum_{k=1}^t [P_{\text{Bat, ch}}(k)\Delta t] - \quad (17)$$

$$\frac{1}{\eta_d} \sum_{k=1}^t [P_{\text{Bat, dis}}(k)\Delta t] \leq E_{\text{max, rated}}$$

式中: P_{max} 、 E_{max} 分别为安装场地允许的最大储能功率和储能容量, kW、kW h; $P_{\text{Bat}}(t)$ 定义充电时大于 0, 放电时小于 0, 假定储能的充、放电效率在运行中保持不变; $y(t)$ 表示储能的充放电状态, $y(t)=0$ 时表示放电; $E_{\text{rated}}(0)$ 为储能初始时刻的容量, $E_{\text{max, rated}}$ 、 $E_{\text{min, rated}}$ 为储能充放电过程中的最大与最小剩余容量。约束式(17)是为了防止储能过充与过放, 保证蓄电池的使用寿命。

2.2 内层模型

以风光储系统与电网之间联络线上功率波动最低为目标, 目标函数为

$$\min P_{\text{line}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left[\left| P_{\text{grid}}(t) \right| - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| P_{\text{grid}}(t) \right| \right]^2 \quad (18)$$

式中, $P_{\text{grid}}(t)$ 定义为由电网供电时大于 0, 向电网供电时小于 0。

功率平衡约束为

$$P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{Bat}}(t) = P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{L}}(t) \quad (19)$$

储能容量与功率约束为:

$$S_{\text{SOC, min}} \leq S_{\text{SOC}}(t) \leq S_{\text{SOC, max}} \quad (20)$$

$$-P_{\text{d, max}} \leq P_{\text{Bat}}(t) \leq P_{\text{c, max}} \quad (21)$$

电网约束为

$$P_{\text{G0}} \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{L0}} \quad (22)$$

式中, P_{G0} 为联络线最大返送功率, P_{L0} 为联络线最大输送功率。

3 Dymola 仿真平台风光储系统建模

在风光联合发电系统中接入储能装置时, 不仅需要满足系统整体的接入要求, 还要满足集中互补

和统一调度的相关需求。因此, 公共连接点一般选取在系统交流母线上^[19]。以 Dymola 2018 仿真平台为依托, 建立风光储系统动态仿真模型, 仅需要对受不确定性因素影响较大的模块进行验证, 即源侧和负荷侧。

风光储系统主要组件是光伏阵列、风力发电机组、蓄电池、测量单元及其控制系统、用户负荷、区域电网和测量装置。风光储系统模型如图 1 所示。

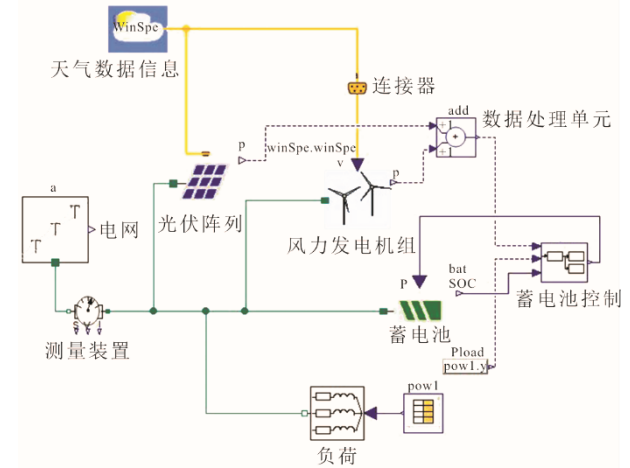


图 1 风光储系统模型

Fig.1 The model of wind/PV/storage hybrid system

4 算例分析

为了验证本文分层优化模型的有效性与其合理性, 选取某风光储系统, 风机装机容量 300 kW, 光伏总容量 350 kW, 最大负荷 600 kW。算例主要仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数

Tab.1 The simulation parameters

| 项目 | 数值 |
|-----------------------|-------|
| 风机装机容量/kW | 300 |
| 光伏总容量/kW | 350 |
| 最大负荷/kW | 600 |
| c_1 | 500 |
| c_2 | 2 500 |
| c_3 | 0.02 |
| λ | 0.3 |
| $S_{\text{SOC, max}}$ | 0.8 |
| $S_{\text{SOC, min}}$ | 0.2 |

本文风光储系统储能容量优化的目标函数与约束条件涉及混合整数线性 and 二次型问题, 算例采用运筹规划算法求解。基于 Dymola 仿真, 选取典型日光伏、风电发电量曲线与负荷曲线如图 2 所示。

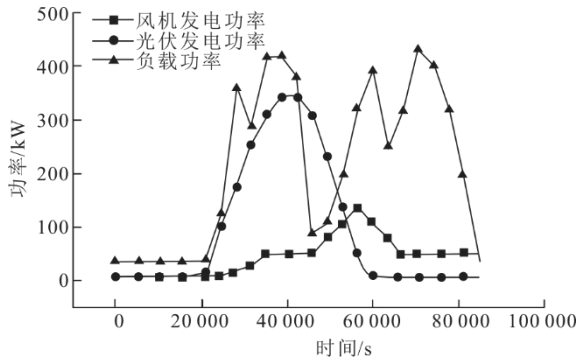


图 2 典型日功率曲线
Fig.2 The typical daily power curves

4.1 联络线不同功率限额对风光储系统的影响

不同联络线功率限额对应的储能额定功率、储能额定容量、储能系统成本与联络线波动惩罚成本见表 2。联络线允许交互功率越大，使得储能系统配置的功率与容量越小，储能系统成本减少，但联络线的功率波动变大(图 3)，联络线波动惩罚成本增多。储能系统成本与联络线波动惩罚成本相互制约。

表 2 不同联络线功率限额的储能配置

Tab.2 The energy storage configurations with different contact line power limits

| 联络线功率限额/kW | 储能功率/kW | 储能容量/(kW·h) | 储能系统成本/万元 | 联络线惩罚成本/万元 |
|------------|---------|-------------|-----------|------------|
| ±250 | 129.97 | 475.13 | 125.29 | 0.296 |
| ±300 | 82.35 | 237.17 | 63.42 | 0.360 |
| ±350 | 73.60 | 70.43 | 21.30 | 0.428 |

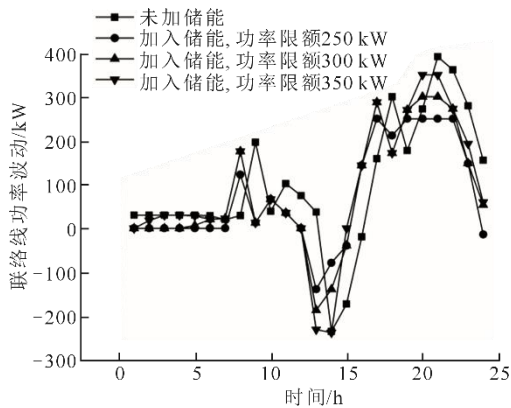


图 3 联络线功率
Fig.3 The contact line power

4.2 分时电价对风光储系统的影响

由上海市非居民两部制分时电价^[20]分布曲线可知，0:00—6:00 时间段内电价最低。考虑储能系统与联络线交互功率可控性强的特点，提出 2 种运行方式。

1) 方式 1 在考虑短时间风光储系统优化问题时，优先考虑利用光伏与风力发电来满足负荷用电

需求。将负荷功率与光伏、风力发电功率的差值记为 ΔP ，功率过剩($\Delta P > 0$)或者功率缺额($\Delta P < 0$)可通过储能系统充电或放电。此时，如果负荷功率仍有缺额，由电网向风光储微网系统供电，满足功率平衡约束。方式 1 储能系统控制策略流程如图 4 所示。

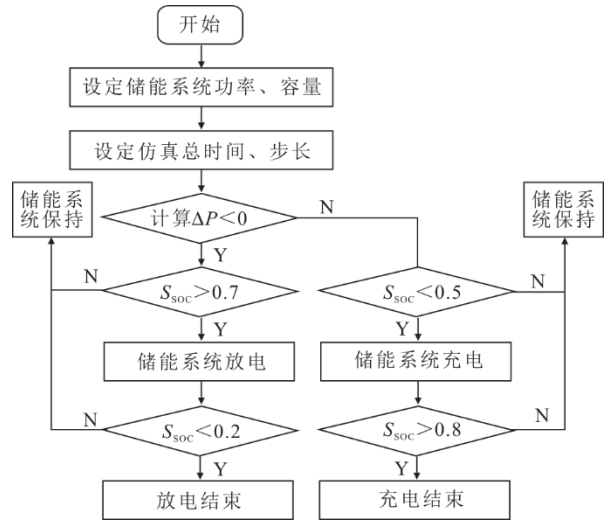


图 4 方式 1 控制策略流程
Fig.4 The flow chart of control strategy of method 1

2) 方式 2 优先考虑利用光伏与风力发电来满足负荷用电需求，结合分时电价，优先选择在 0:00—6:00 时间段内对蓄电池充电。当功率缺额较大且联络线功率达到限额功率时，蓄电池放电，保证联络线功率在要求范围内。方式 2 储能系统控制策略流程如图 5 所示。

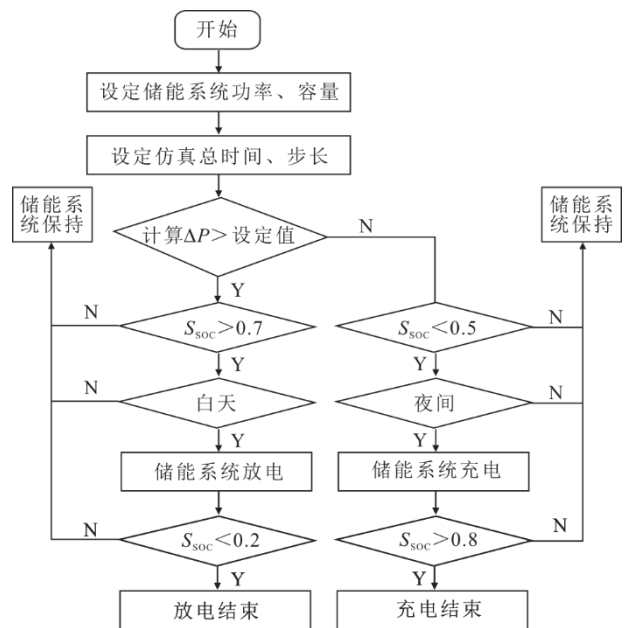


图 5 方式 2 控制策略流程
Fig.5 The flow chart of control strategy of method 2

基于 Dymola 仿真平台的动态仿真模型,选取联络线功率波动限额为 300 kW,储能额定功率为 82.35 kW,储能额定容量为 237.17 kW h,不同运行方式下联络线功率波动如图 6 所示。由图 6 可知,储能系统在方式 2 下运行时,联络线功率波动在限额以内。

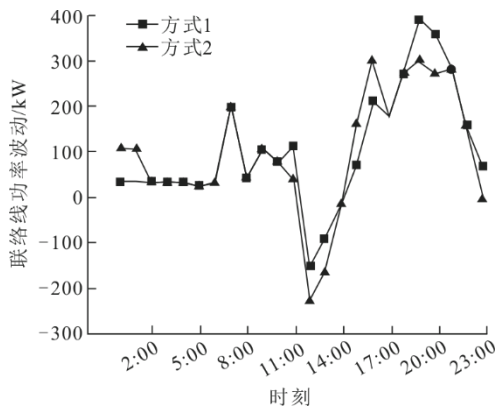


图 6 不同运行方式下联络线功率

Fig.6 The contact line power in different operation modes

不同方法经济性见表 3。由表 3 可见:方式 1 下联络线波动的惩罚成本是 3 556.38 元,方式 2 下联络线波动的惩罚成本是 3 034.55 元,方式 2 下运行更经济,可节省 521.83 元;方式 1 下向电网输送的最大功率为 160.97 kW,方式 2 下向电网输送的最大功率为 235.09 kW。相较于方式 1,方式 2 在分时电价较高时向电网售电较多,获取收益更大。

表 3 不同方法经济性对比

Tab.3 Economic comparison between different methods

| 方法 | 储能功率/kW | 储能容量/(kW h) | 联络线波动惩罚成本/元 | 向电网输送最大功率/kW |
|------|---------|-------------|-------------|--------------|
| 方式 1 | 82.35 | 237.17 | 3 556.38 | 160.97 |
| 方式 2 | 82.35 | 237.17 | 3 034.55 | 235.09 |

5 结 论

1) 本文基于 Modelica 非因果建模语言对含随机参数的风光储系统进行了动态描述,建立了耦合光伏、风机、储能、测量与控制装置以及用户负荷的多时变特性联合仿真模型。利用分层优化模型,从源侧、负荷侧、储能侧综合考虑风光储系统储能容量配置时,内层模型与外层模型的目标函数相互制约,即储能系统成本与联络线波动惩罚成本相互制约,应根据不同联络线功率限额确定储能系统最佳功率与容量。

2) 考虑结合分时电价储能系统在方式 2 下运

行更经济,即优先考虑利用光伏与风力发电来满足负荷用电需求,结合分时电价,优先选择在 0:00—6:00 时间段内对蓄电池充电。方式 2 联络线波动的惩罚成本降低了 521.83 元,且在分时电价较高时向电网售电较多,获取收益更大,兼顾了风光储系统的经济性与稳定性,实际应用中具有一定参考价值。

[参 考 文 献]

- [1] 李碧辉,申洪,汤涌,等.风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J].电网技术,2011,35(4):123-128.
LI Bihui, SHEN Hong, TANG Yong, et al. Impacts of energy storage configuration of HPWS to active power characteristics and its relevant indices[J]. Power System Technology, 2011, 33(4): 123-128.
- [2] 张歆萌,黄炜斌,王峰,等.大型风光水混合能源互补发电系统的优化调度研究[J].中国农村水利水电,2019(12):181-185.
ZHANG Xinshuo, HUANG Weibin, WANG Feng, et al. Research on the optimal scheduling of large wind-PV-hydro hybrid energy complementary power generation system[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(12):181-185.
- [3] 赖昌伟,黎静华,陈博,等.光伏发电出力预测技术研究综述[J].电工技术学报,2019,34(6):1201-1217.
LAI Changwei, LI Jinghua, CHEN Bo, et al. Review of photovoltaic power output prediction technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1201-1217.
- [4] 荆博,谭伦农,钱政,等.光伏发电短期预测研究进展综述[J].电测与仪表,2017,54(12):1-6.
JING Bo, TAN Lunnong, QIAN Zheng. An overview of research progress of short-term photovoltaic forecasts[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(12): 1-6.
- [5] 王成山,于波,肖峻,等.平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J].中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [6] BARTON J P, INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [7] MIRANDA I, SILVA N, LEITE H. A holistic approach to the integration of battery energy storage system to optimize wind power integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 775-785.
- [8] WANG Y L, YU H Y, WANG X H. Consideration of reliability and economy to capacity configuration of energy storage system: case study of a large scale wind power plant in the northwest China[J]. Energy Procedia, 2018, 152: 149-155.
- [9] 李建林,郭斌琪,牛萌,等.风光储系统储能容量优化配置策略[J].电工技术学报,2018,33(6):1189-1196.
LI Jianlin, GUO Binqi, NIU Meng, et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1189-1196.

- [10] 谢鹏, 蔡泽祥, 刘平, 等. 考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储微电网系统储能容量协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7126-7136.
XIE Peng, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Cooperative optimization of energy storage capacity for renewable and storage involved microgrids considering multi time scale uncertainty coupling influence[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (24): 7126-7136.
- [11] JIANG Y H, KANG L X, LIU Y Z. A unified model to optimize configuration of battery energy storage systems with multiple types of batteries[J]. Energy, 2019, 176: 552-560.
- [12] VANIKA S, MOHAMMED H. H, SYED M A. Energy cost minimization for net zero energy homes through optimal sizing of battery storage system[J]. Renewable Energy, 2019, 141: 278-286.
- [13] 唐忠, 田晨, 资容涛. 多微电网互联系统的储能容量配置[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 95-100.
TANG Zhong, TIAN Chen, ZI Rongtao. Energy storage capacity configuration of inter-connected multi-microgrids[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 95-100.
- [14] 冯磊, 杨淑连, 徐达, 等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 44-50.
FENG Lei, YANG Shulian, XU Da, et al. Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage considering wind power fluctuation[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48 (10): 44-50.
- [15] 丁明, 吴杰, 张晶晶. 面向风电平抑的混合储能系统容量配置方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3): 593-599.
DING Ming, WU Jie, ZHANG Jingjing. Capacity optimization of hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(3): 593-599.
- [16] YANG H X, LU L, ZHOU W. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system[J]. Solar Energy, 2007, 81(1): 76-84.
- [17] 孙振新, 刘汉强, 赵喆, 等. 储能经济性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊 1): 54-58.
SUN Zhenxin, LIU Hanqiang, ZHAO Zhe, et al. Research on economical efficiency of energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(Suppl.1): 54-58.
- [18] WANG Y L, WANG Y D, HUANG Y J, et al. Planning and operation method of the regional integrated energy system considering economy and environment[J]. Energy, 2019, 171: 731-750.
- [19] 庄雅妮, 杨秀媛, 金鑫城. 风光储联合发电运行技术研究[J]. 发电技术, 2018, 39(4): 296-303.
ZHUANG Yani, YANG Xiuyuan, JIN Xincheng. Study on Operation technology of wind-PV-energy storage combined power generation[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(4): 296-303.
- [20] 莫裘, 邓嘉欣, 刘方. 微电网动态调度模型[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(2): 293-298.
MO Qiu, DENG Jiixin, LIU Fang. Microgrid dynamic scheduling model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(2): 293-298.

(责任编辑 杨嘉蕾)