

本文引用格式: 张红伟,邹相国.出力波动影响下的风电储能优化调度技术[J].自动化与信息工程,2023,44(4):7-12;27.

ZHANG Hongwei, ZOU Xiangguo. Optimal dispatching technology of wind power energy storage under the influence of output fluctuation[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(4):7-12;27.

出力波动影响下的风电储能优化调度技术

张红伟 邹相国

(湖北省电力规划设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 针对现有风电储能调度技术受出力波动影响较大, 导致风电储能调度目标与实际调度结果误差较大的问题, 提出一种优化调度技术。首先, 分析出力波动对风电储能的影响过程, 获得判断波动特征量; 然后, 建立出力波动影响下的风电储能调度尺度模型; 接着, 优化风电储能调度目标函数, 实现出力波动变量的全局优化, 提升风电储能调度精准度, 增强调度参量对出力波动影响系数的抗扰定力; 最后, 通过数据调试进一步证明了该优化调度技术的有效性与可实现性。

关键词: 风电出力波动; 风电储能; 调度技术; 调度尺度模型; 调度目标函数

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2023)04-0002-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2023.04.002

Optimal Dispatching Technology of Wind Power Energy Storage under the Influence of Output Fluctuation

ZHANG Hongwei ZOU Xiangguo

(Power China Hubei Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing wind energy storage dispatching technology is greatly affected by output fluctuations, resulting in a large error between the wind energy storage dispatching goals and actual dispatching results, an optimized dispatching technology is proposed. Firstly, analyze the impact process of output fluctuations on wind power energy storage, and obtain the characteristic quantities for judging fluctuations; Then, establish a scale model for wind energy storage dispatching under the influence of output fluctuations; Next, optimize the objective function of wind energy storage dispatching, achieve global optimization of output fluctuation variables, improve the accuracy of wind energy storage dispatching, and enhance the anti-interference ability of dispatching parameters on the coefficient of output fluctuation; Finally, the effectiveness and feasibility of the optimized dispatching technology were further demonstrated through data debugging.

Keywords: fluctuation output of wind power; wind power energy storage; dispatching technology; dispatching scale model; dispatching objective function

0 引言

为保障电网安全稳定地运行, 我国积极推动风电并网。目前, 全国累计装机容量超过 3.4 亿瓦^[1]。随着我国电网对电力系统调峰调频能力要求的不断提高, 风电接入电力系统后的调峰调频也成为当前的研究热点。风电接入电力系统后的调峰调频存在不稳定、制约较大等风险。为降低以上风险, 一般利用储能系

统调节风电出力波动性, 即出力波动影响下的风电储能优化调度技术。

针对出力波动影响下的风电储能优化调度技术, 现有的研究主要从电力系统安全稳定运行的角度考虑, 如在考虑风电预测误差的基础上, 设计电-热系统混合时间尺度调度方法^[2]; 提出考虑风光出力季节性波动的储能容量配置方法^[3]; 建立考虑风电预测误差的柔性负荷日内调度模型^[4]; 设计基于平抑风光出力

波动的主动配电网优化调度方法^[5]等，但上述方法调度效果与设计预期存在较大差距。为此，将多目标优化问题转化为多目标函数模型，对发电计划模型进行改进，取得了良好的效果。

基于此优化思路，本文充分考虑风电出力波动影响下的调度目标，在分析出力波动影响过程的基础上，提出一种新的优化调度技术，以获得较好的调度优化效果。

1 优化调度技术的实现

1.1 出力波动影响过程分析

根据风电储能特征可知，电能存储速率与天气密切相关^[6-7]。在风力资源充足的状态下，电能存储速率的时间序列和存储信号均处于低频状态；而出力波动对应的随机扰动序列为高频随机出力，需对其进行分离滤波处理，以获得更精准的出力波动影响。但考虑到高频随机出力在滤波过程中电能存储存在不规则湍流运动^[8-9]，需要先进行独立滤波，提取高频随机出力分布区域的序列轮廓，再根据风电储能波动的幅度与宽度（持续时间）的差值，获取最终的出力波动影响。滤波前后的高频随机出力分布区域的序列轮廓，如图 1 所示。

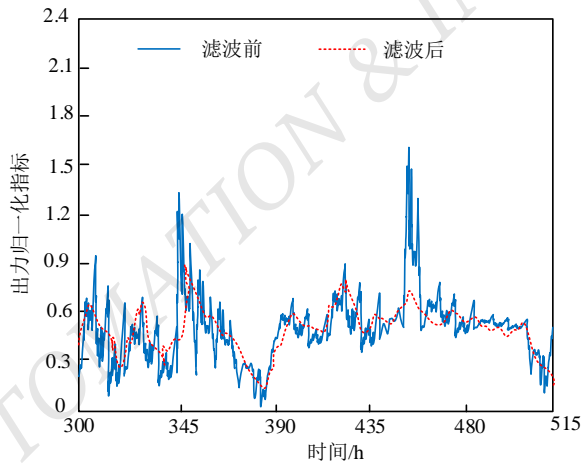


图 1 滤波前后的高频随机出力分布区域的序列轮廓

由图 1 可知，滤波后的高频随机出力分布区域相对稳定，为后续更好地分析高频随机出力的波动特征奠定了基础。出力波动影响下的高频随机出力分布区

域的序列轮廓对应的时间量为多个不同起伏变化的波动量构成的时间序列。若将其中某一个时间波动值放大至最大值，再将其缩小至最小值，且对应到下一个波动出力位置，则这一过程可视为一次出力波动影响下的风电储能波动，该过程可通过数学模型表达为

$$W\{P_j\} = \begin{cases} P_1 & P_n \in \{P_{\min}\} \\ P_k \in \{P_{\max}\} & 1 < k < n \\ P_j \in \{P\} & j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\{P\}$ 为多个不同起伏变化的波动量构成的时间序列， $W\{P_j\}$ 为储能波动序列， $\{P_{\max}\}$ 为 $\{P\}$ 中某一波动最大系数的序列， $\{P_{\min}\}$ 为 $\{P\}$ 中某一波动最小系数的序列，假设风电出力波动由 n 个序列组成，则 P_1 、 P_n 分别为该波动的初始点、终点，由此可以得到由多个时间序列构成的风电储能波动过程。

由于每个风电储能波动都可以看作为一个出力个体，因此在分析出力波动影响的过程中，无法将其中的一个波动过程作为判定特征。为了更精准地分析出力波动对风电储能波动过程的影响，根据风电储能波动的幅度与宽度的差值^[10]，将出力波动影响等级分为激烈波动、常规波动、小幅度波动和微弱波动 4 种^[11-12]。将高频随机出力影响下的风电储能波动定义为微弱波动，此时由风电储能过程中波动的峰值来判断出力波动影响等级可知，波动峰值不得大于 ε ($\varepsilon = 0.03$)^[13]。至此，可得到激烈波动、常规波动、小幅度波动 3 种波动的判断波动特征量 C 为

$$C = [T_L, W_{\max}, W_{\min}] \quad (2)$$

式中： T_L 为判断波动特征量消耗的时间， W_{\max} 为最大波动值， W_{\min} 为最小波动值。

通过判断波动特征量 C 的值，可以对激烈波动、常规波动、小幅度波动 3 种波动类型进行描述和分类。当 $0.3 < C \leq 1$ 时，表示小幅度波动；当 $1 < C \leq 5$ 时，表示常规波动；当 $C > 5$ 时，表示激烈波动。

1.2 出力波动影响下的风电储能调度尺度模型

根据上述储能波动序列 $W\{P_j\}$ 和波动特征量 C 分析得到出力波动的影响过程，以此建立出力波动影响下的风电储能调度尺度模型，并以风电储能平滑性为基础，对其关联的出力波动调度尺度进行模型构建。定义出力波动影响下的风电储能出力变化趋势特征为

$$P_R = \frac{P(t+1) - P(t)}{P_N} \quad (3)$$

式中： $P(t)$ 为 t 时间风电储能调度的出力系数总值， P_N 为风电储能总容量。

假设 P_R 的密度函数为出力波动的正态分布，通过对其历史数据的拟合分析，发现该假设存在局部储能调度偏差（如图 2 所示），因此本文采用高斯拟合来构建出力波动影响下的风电储能调度尺度模型。

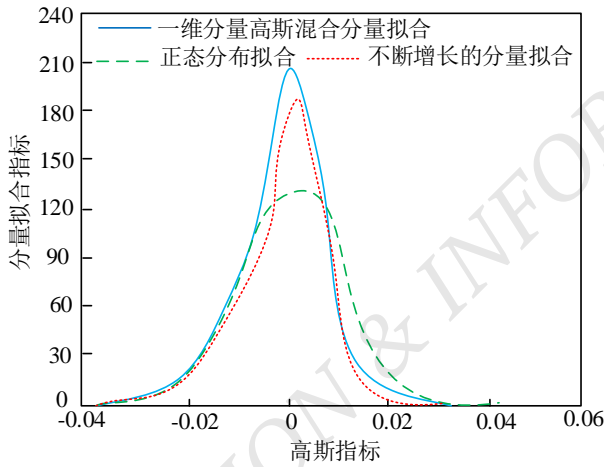


图 2 风电储能设备高斯分量拟合效果

出力波动影响下的风电储能调度高斯拟合属于一维高斯混合模型，其表达式为

$$f(x) = \sum_{j=1}^n \alpha_j N(\mu_j, \sigma_j^2) \quad (4)$$

$$N(\mu_j, \sigma_j^2) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_j} e^{-\frac{1}{2\sigma_j^2}(x-\mu_j)^2} \quad (5)$$

公式(4)中的一维高斯混合模型 $f(x)$ ^[14] 可视为

一维空间下出力波动密度函数的正态分布。因此可通过最大期望 (expectation maximization, EM) 算法^[15] 对其最大似然函数的期望值进行优化，提升出力波动影响下的风电储能调度尺度模型的可实现性。

出力波动影响下的风电储能调度尺度模型以 8 组风电储能设备调度数据为基础，修改其中任意一组风电储能设备的分量系数，得到的拟合效果如图 2 所示。

由图 2 可知，一维分量高斯混合的拟合效果最好。

因此，一维分量高斯混合可以更好地实现风电储能调度尺度拟合，以此构建一维高斯混合拟合后的风电储能调度尺度模型为

$$f(x) = \alpha_1 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right) + \alpha_2 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (6)$$

式中： α_i 为风电储能 i 时间的调度尺度权重。

1.3 风电储能调度优化目标函数

对出力波动影响下的风电储能调度尺度模型的调度函数进行目标优化。根据风电储能效果与时间分布之间的特征，将调度优化目标函数的时间量划分为 24 个时段。

基于 24 个优化目标时间量，可得到出力波动影响下相同调度尺度风电储能调度的初始目标函数为

$$\min C \sum_{i=1}^{24} [CS(P_{s,i}) + CR(P_{r,i}) + CT(P_{t,i}) + CF(P_{f,i}) + CE(P_{ce,i})] \quad (7)$$

式中： $CS(P_{s,i})$ 为 i 时间风电储能单元的调度系数， $CR(P_{r,i})$ 为 i 时间风电储能出力波动分量对调度系数的影响， $CT(P_{t,i})$ 为 i 时间高斯混合拟合系数下的调度系数， $CF(P_{f,i})$ 为 i 时间微弱波动出力补偿优化系数， $CE(P_{ce,i})$ 为 i 时间调度常规损耗。

为保护风电储能单元，在调度目标函数优化的过程中，需对出力波动影响下的电能调度状态进行约束。约束函数的计算公式为

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC_i \leq SOC_{\max} \\ SOC_i = SOC_{i-1} + \frac{P_{s,i}}{S} \\ P_{s,\min} \leq P_{s,i} \leq P_{s,\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中： SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 、 SOC_i 分别为风电储能单元的最小、最大调度系数及*i*时间的调度状态指标； $P_{s,i}$ 为*i*时间风电储能单元的调度量；当风电调度与风电储能同时进行且调度系数为正值时， S 为风电储能单元的最大容量； $P_{s,\min}$ 、 $P_{s,\max}$ 分别为风电储能单元在出力波动影响下的最小与最大调度系数。

出力波动影响下的风电储能调度目标的综合优化函数为

$$CS(P_{s,i}) = a_s P_{s,i}^2 \quad (9)$$

式中： a_s 为综合优化函数系数。

调度过程中的有功系数平衡关系函数为

$$P_{\text{load},i} + P_{f,i} = P_{t,i} + P_{\text{net},i} \quad (10)$$

式中： $P_{\text{load},i}$ 为*i*时间风电储能调度的额定调度量， $P_{f,i}$ 为*i*时间风电储能调度的微弱波动调度值， $P_{t,i}$ 为*i*时间风电储能调度的基础波动损耗， $P_{\text{net},i}$ 为*i*时间风电储能综合调度平衡下的函数出力。

关联环境时间因素，整理得到风电储能波动调度目标函数的出力约束为

$$\begin{cases} P_{\text{net},i} = P_{r,i} - P_{s,i} \\ -8\% P_{RPA} \leq P_{\text{net},i} - P_{\text{net},i-1} \leq 8\% P_{RPA} \end{cases} \quad (11)$$

考虑到多个拟合分量之间的约束融合关系，可得到

$$\begin{cases} \begin{cases} P_{r,\max,i} - 8\% P_{RPA} - P_{s,\max} > 0 \\ P_{r,i} = 8\% P_{RPA} + P_{s,\max} \end{cases} \\ \begin{cases} P_{r,\max,i} - 8\% P_{RPA} - P_{s,\max} > 0 \\ P_{r,i} = P_{r,\max,i} \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $P_{r,\max,i}$ 为*i*时间风电储能分量拟合的最大调度系数， $P_{r,i}$ 为*i*时间风电储能单元的实际调度系数， P_{RPA} 为分量优化下风电储能单元的调度优化总量。

经过整理计算，得到最终的调度优化目标函数为

$$CR(P_{r,i}) = K_r (P_{r,\max,i} - P_{r,i})^2 \quad (13)$$

式中： K_r 为出力波动影响下风电储能分量优化后的目标函数系数。

2 应用测试

为验证本文提出的出力波动影响下的风电储能优化调度技术的可行性，进行仿真测试。为保证测试的客观准确，引入基于波动特性的风电储能调度模型

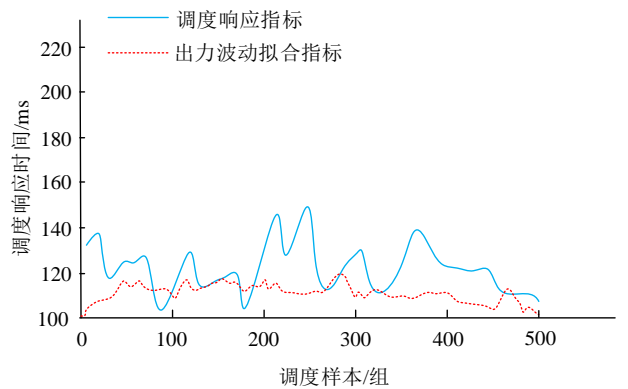
（对比方法 1）、基于出力时间序列风电储能调度方法（对比方法 2）作为对比方法。在设定的测试条件下，对比不同指标差异，并加以分析得出测试结论。

2.1 测试数据

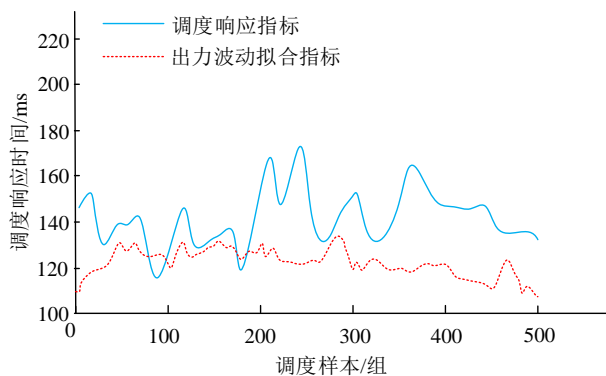
采用 2021 年 6~10 月某风电储能数据作为测试数据。在 MATLAB 仿真环境下完成测试数据的自动化配置与测试流程的执行、分析。测试数据样本量与执行量均采用随机的方式产生，测试内容为调度响应测试、出力波动抗扰性能测试与调度误差测试 3 项。

2.2 调度响应测试

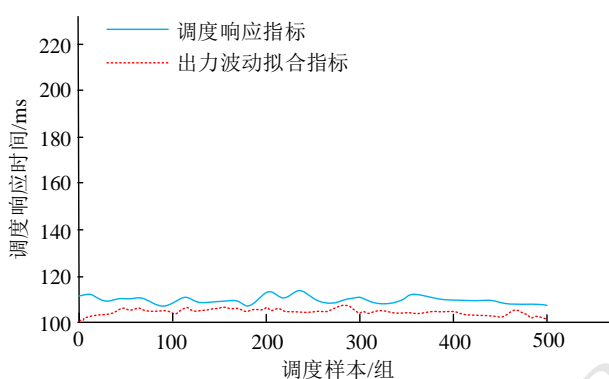
基于 MATLAB 仿真环境，在风电储能数据库中随机抽取 500 组数据样本，掺杂出力波动扰动数据后，生成测试样本信号。通过 MATLAB 工具将测试样本信号发送至对比方法 1、对比方法 2、本文方法进行调度处理，由 MATLAB 工具中数据统计模块对调度响应指标进行记录统计，并生成图 3 所示曲线。



(a) 对比方法 1 出力波动影响下调度响应测试结果



(b) 对比方法2出力波动影响下调度响应测试结果



(c) 本文方法出力波动影响下调度响应测试结果

图3 3种调度方法在出力波动影响下的风电储能调度响应测试结果

对比图3可知：图3(a)中风电储能调度响应曲线的响应值域范围为103~158 ms，随着调度样本的增加，波动变得越发激烈，结合出力波动拟合曲线可以发现，其受到出力波动拟合不足的影响，说明对比方法1存在局部调度响应延迟的现象，结合风电储能的调度特征，该调度响应结果不满足调度响应指标要求；图3(b)中风电储能调度响应曲线整体波动较为剧烈，根据出力波动拟合曲线分析，调度过程受到激烈波动的影响，其响应值域范围为113~170 ms，调度响应时间区间偏大，易出现调度偏差；图3(c)中风电储能调度响应曲线相对平稳，出力波动的拟合效果与调度响应指标达到平衡，可以判定本文方法调度响应效果较好。

2.3 出力波动抗扰性能测试

分别测试瞬时出力波动与连续出力波动的抗扰

性能，结果分别如图4、图5所示。

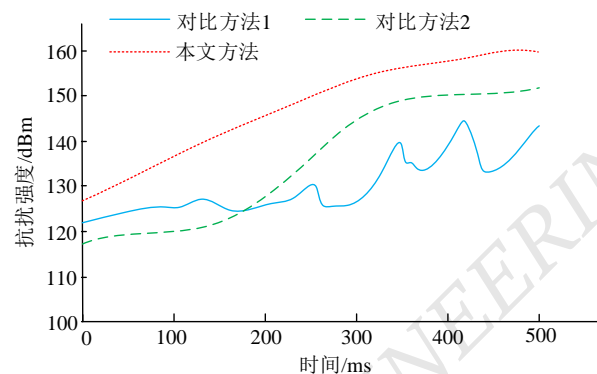


图4 3种调度方法的瞬时出力波动抗扰性能

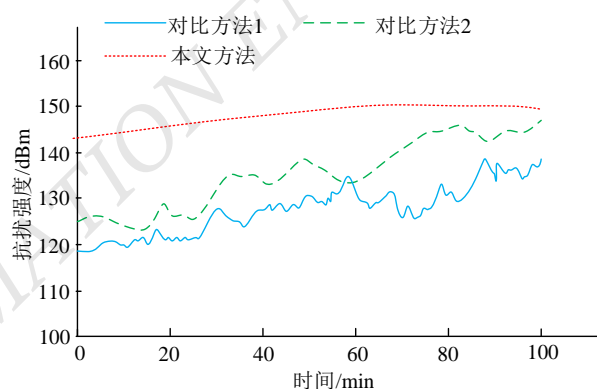


图5 3种调度方法的连续出力波动抗扰性能

由图4可知：在瞬时出力波动扰动下，对比方法1的抗扰曲线变化较大，在测试过程中后期出现明显的波峰起伏，说明对比方法1的瞬时出力波动抗扰性存在阈值权重控制缺陷；对比方法2抗扰曲线呈平滑上升趋势，但上升幅度较大，经过时间的积累，其后期抗扰性能存在不稳定因素；本文方法抗扰曲线平滑，随着时间的积累，抗扰强度缓慢增长，说明该方法对瞬时出力波动具有较好的控制能力。

由图5可知：3种调度方法在连续出力波动作用下，抗扰性能均有所减弱，其中对比方法1波动扰动最为剧烈；对比方法2波动次数明显增多，虽由波动幅度可以看出其具有收敛作用，但整体收敛控制不足；本文方法抗扰强度明显下滑，但中后期调度控制分量优化的收敛作用有效果，抗扰强度有所回升。

2.4 调度误差测试

在上述测试结果数据中, 随机抽取 20 组测试数据, 对其中的调度偏差值进行提取统计, 获得调度误差统计如表 1 所示。

表 1 调度误差测试结果统计

测试组	对比方法 1 调度误差	对比方法 2 调度误差	本文方法 调度误差
1	1.6	1.5	0.4
2	1.5	1.2	0.5
3	1.8	1.5	0.5
4	1.3	1.6	0.5
5	1.6	1.6	0.4
6	1.4	1.2	0.3
7	1.2	1.6	0.2
8	1.4	1.2	0.2
9	1.3	1.2	0.3
10	1.2	1.2	0.2
11	1.4	1.4	0.5
12	1.6	1.6	0.8
13	1.4	1.4	0.5
14	1.2	1.8	0.7
15	1.4	1.6	0.4
16	1.2	1.2	0.5
17	1.4	1.4	0.5
18	1.6	1.6	0.4
19	1.4	1.4	0.3
20	1.2	1.8	0.2

通过横向对比表 1 数据发现, 本文方法的调度误差明显小于对比方法 1、对比方法 2 的调度误差值, 说明本文提出的出力波动影响下的风电储能优化调度技术, 能够有效降低出力波动影响下的风电储能调度偏差, 提升调度稳定性与准确性, 证明了本文方法具有可实现性。

3 结论

本文通过对出力波动特征的分析, 结合风电储能调度现状, 在分析出力波动影响过程的基础上, 利用一维高斯混合模型构建了出力波动影响下的风电储能调度尺度模型。以此为基础, 设计了风电储能调度优化目标函数, 实现风电储能优化调度, 解决调度误差偏大的问题, 为风电储能及清洁能源储能调度研究

提供了一个新的研究思路。但受到风电储能系统联合属性的影响, 无法将调度效果应用到全局, 造成局部能源调度系数与风电储能调度优化系数出现调度差值, 进而降低调度优化效果。为避免这一问题, 可尝试设计一组分量控制系统, 通过 BP 神经网络算法或大数据融合算法等自适应学习算法, 对其调度变量进行区域匹配, 以此保证优化效果, 更好地适应各种储电调度应用。

参考文献

- [1] 秦海岩. 十八大以来我国风电产业实现高质量发展[J]. 风能, 2022(9):1.
- [2] 夏洪伟, 李坤, 韩丽. 考虑风电预测误差的电-热系统混合时间尺度调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17):86-96.
- [3] 梅书凡, 檀勤良, 代美. 考虑风光出力季节性波动的储能容量配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4):51-57.
- [4] 雷旭, 马鹏飞, 宋智帅, 等. 计及风电预测误差的柔性负荷日内调度模型[J]. 发电技术, 2022, 43(3):485-491.
- [5] 朱自伟, 黄彪, 裘昕月, 等. 基于平抑风光出力波动的主动配电网优化调度[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5):90-97.
- [6] 张紫菁, 张芳, 姚文鹏. 基于风电出力概率预测模型的源荷储日前概率优化调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7):190-197.
- [7] 米夏, 徐晓红, 刘小恺. 基于波动特性的光伏电站出力时间序列建模方法研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(3):120-122.
- [8] 郑晨昕, 江岳文. 基于改进 Shapley 值的风电波动成本分摊策略[J]. 电网技术, 2021, 45(11):4387-4394.
- [9] 程军照, 林涛, 杜蕙. 计及新能源出力波动性的节点状态脆弱性评估[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12):118-124.
- [10] 裴蕾, 卫志农, 陈胜, 等. 计及光伏出力波动的交直流混合配电网安全域模型[J]. 电网技术, 2021, 45(10):4084-4093.
- [11] 郑浩, 谢丽蓉, 叶林, 等. 考虑光伏双评价指标的混合储能平滑出力波动策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9):1805-1817.
- [12] 李德鑫, 王佳蕊, 张家郡. 基于光伏波动性的储能出力特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(2):99-107.
- [13] 韦子瑜, 赵书强, 方宇晨. 平抑风光联合系统短期出力波动的光热电站储热系统优化运行策略[J]. 电网技术, 2021, 45(3):881-892.
- [14] 乔延辉, 韩爽, 许彦平, 等. 基于天气分型的风光出力互补性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2):82-88.
- [15] 焦东东, 陈洁, 方圆, 等. 基于变分模态分解下利用混合储能平抑风电出力波动的控制策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5):14-19;30.

(下转第 27 页)