

基于飞轮储能的风电场联合调频控制策略

张继红, 刘云飞, 崔天祥, 吴振奎, 李忠虎

(内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 大规模可再生能源的高效利用是实现“碳达峰”、“碳中和”目标的重要途径。为提升风储联合系统调频精度, 充分利用可再生能源解决电力系统的频率调节问题, 文中建立了飞轮储能系统(FESS)模型, 研究了飞轮储能阵列协调控制策略。针对负荷扰动前、后频率变化不同及频率变化率不同两种特殊情形, 设计了自适应下垂系数的控制策略, 修正了各飞轮储能的放电速度, 同时考虑飞轮储能荷电状态(SOC)约束限制, 实现了储能系统对负荷变化的快速跟踪, 达到了稳定频率的预期目的。最后, 采用PSCAD/EMTDC大型数字化仿真软件进行仿真测试, 证实了控制策略的可行性。

关键词: 风储联合系统; 负荷扰动; 自适应下垂控制; 功率分配; 频率调节

Joint Frequency Control Strategy for Wind Farms Based on Flywheel Energy Storage

ZHANG Jihong, LIU Yunfei, CUI Tianxiang, WU Zhenkui, LI Zhonghu

(Inner Mongolia University of Science and Technology, Inner Mongolia Baotou 014010, China)

Abstract: The efficient use of large-scale renewable energy is an important way to achieve the goals of 'peak carbon' and 'carbon neutrality'. The article investigates the coordinated control strategy of flywheel energy storage array based on the development of flywheel energy storage system (FESS) model, the adaptive variable sag factor control strategy is designed to take into account the state of charge (SOC) limitations of the flywheel energy storage while correcting the discharge rate of each flywheel energy storage in the paper. In turn, the rapid tracking of load changes by the energy storage system is achieved, meeting the expectation of a stable frequency. Finally, simulation tests using the PSCAD/EMTDC large-scale digital simulation software confirmed the feasibility of the control strategy.

Key words: combined wind-storage system; load disturbance; adaptive sag control; power distribution; frequency regulation

0 引言

截至到 2021 年底, 内蒙地区风电装机容量超过 4 500 万 kW, 重点建设了八大能源基地, 并采取风火打捆、风光互补、风电供热等多项有力措施, 提高了风电消纳比例, 体现了绿色能源优势, 在减排工作中发挥了重要作用^[1-3]。但可再生能源发电具有随机性、间歇性等显著特点, 在大规模开发风电和提高绿色电能比例的同时不可避免地降低了电力系统的惯性和频率调节能力^[4-7]。随着风力发电装机容量的进一步提高需要解决的调峰、调频问题日益凸显, 为此, 国内电网公司出台了储能系统参与风电机组联合调节的指导意义, 旨在确保电力系统频率稳定与电能质量水平。

频率是电能质量的关键指标之一^[8-9]。频率稳定对于电力系统安全可靠运行有着重要的影响^[10]。飞轮储能属于功率型和物理型储能设备, 运行过程具有环境友好、响应快速、充放电次数不受限等诸多优点, 因此, 飞轮储能的开发研究备受学者专家的重视^[11-13]。文[14-15]中指出了飞轮

储能的基本控制策略, 研究了相应数学模型并进行了仿真测试, 但缺乏对飞轮储能容量的配置方法介绍; 文[16-17]中设计了飞轮储能综合控制策略, 并考虑了容量、荷电状态等约束条件, 对于风储联合系统的调频设计具有一定参考价值; 文[18]中从经济学角度分析了风场需要配置较小容量储能即可得到传统电源的惯量和调频能力, 有助于提高电网的调频精度和系统运行的安全性。上述文献均针对单台飞轮的控制给出了数学模型并进行了算例验证, 但并没有开展飞轮储能阵列的协同控制策略研究, 由于多台飞轮并联运行情况复杂, 本身存在荷电状态不同、性能差异, 因而针对阵列系统的研究更具有实际价值。

1 风储联合调频拓扑结构

风储联合调频系统根据电流汇集方式的不同可以分为交流型和直流型两类^[19]。前者可将飞轮储能所发交流电能直接并入大电网, 前提条件是各台飞轮储能逆变器均需满足并网条件, 进而对各逆变器进行综合协调控制, 其算法复杂、体

积偏大、成本较高,但对于扩容有利;后者将飞轮储能阵列的直流母线进行汇集,然后通过一个逆变器将交流电能并入大电网。作为储能变流器只需要维持直流母线电压稳定即可,不需要考虑交流侧的协调控制,对电网频率波动响应更快,但输出容量受限于网侧逆变器,扩容裕量较小,文中研究内容侧重于后者,并给出的风储联合调频拓扑设计结构见图1。电场风机群经由变流器、滤波器接入690V交流母线;飞轮储能(以三台为例)采取全功率变流器进行整流、逆变、滤波后接入电网,并根据频率波动幅值进行充放电运行,达到了稳定系统稳定运行的基本条件。

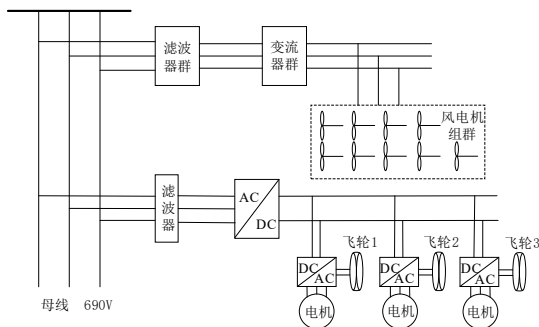


图1 控制系统结构图

Fig. 1 Control system structure diagram

2 飞轮储能控制技术

2.1 飞轮储能运行特点

飞轮储能属长寿命、无污染的物理储能典型代表,工作过程实现了动能与电能的平滑转换^[9-10]。飞轮转子部分直接与电机连接,电机可运行于电动和发电两种状态。当电机处于电动状态时飞轮加速旋转,此时将输入的电能转换为动能;相反,当电机处于发电状态时飞轮减速,此时将动能转换成电能对外输出。飞轮储能运行的典型特征如下:①功率高、响应快,功率可达MW级或以上,响应速度可低于0.1s,特殊场景下可满足深度放电要求;②充电次数多、使用寿命长,飞轮储能成套设备充放电次数至少10万次,使用寿命25~30年;③充放电切换速度快、荷电状态检测准确,飞轮储能变流器模块采用双向无触点IGBT管子搭建,具备能量转换效率高,损耗低等特点,另外飞轮转速与储能能量两者关系直接耦合,设备运行状态监测方便、调控简单;④绿色发电、环保运行,成套设备工作过程无化学反

应,无设备回收问题和环境污染现象。

2.2 飞轮储能控制思路

风电渗透率的逐年提高以及随机性、波动性的特征对电力系统频率稳定构成了严重威胁^[20-21]。一方面风电机组的控制应用了电力电子设备,使得电机转速与电网频率完全解耦,转子动能被“屏蔽”无法实现能量“缓冲”,因而风电机组几乎无惯量;另一方面,为了使风电机组具备一定的调频能力,主要采取变桨技术、偏航控制以及综合协调方法,但这些策略均利用风机预留有功进行备用,却牺牲了风能资源,有悖于绿色资源的最大化利用理念。风储联合调频就是通过设置储能方式以增加系统阻尼,从而实现频率的调节功能。调频过程首先依据调度指令作为发电命令,然后将总发电功率减去火电机组功率,剩余功率即风储发电功率,最后将剩余功率合理分配到风场及储能,调频过程结束^[22]。

2.3 飞轮储能容量设置方法

以传统火电机组的调频案例作为参考,风场设置储能容量应与调频机组额定状态的转子动能相当,即频率波动时储能需要输出功率与调频机组功率相当。基于此,国内外均出现了不同的设计总则。其中国外给出的要求为装机容量较大的风场,其调节容量不小于额定容量的2%^[23];在国内,按照电力系统频率波动要求作了限制说明^[24],例如国内规定的低压系统频率波动允许的范围是0.5Hz,但作为调频过程考虑的频率变化范围是49~51Hz,文中重点考虑频率降低时的功率补偿情况。

同步机转速—频率关系为

$$f = \frac{np}{60} \quad (1)$$

进行计算,火电机组为2极电机,当频率从50Hz降到49Hz时,同步机转速由3000变为2940,此时转速的相对变化率为0.98,转子释放动能最大值为

$$\Delta E_{G,max} = 2^{-1} J(1 - 0.98^2) \omega_N^2 \approx 0.0198 J \omega_N^2 \quad (2)$$

式(2)中: $\Delta E_{G,max}$ 电机释放动能; J 机转动惯量; ω_N 电机角速度。

发电机额定转速时的转子动能为

$$E_G = 2^{-1} J \omega_N^2 = P_N T_J \quad (3)$$

式(3)中, P_N 、 T_J 为发电机额定功率和单位时间常数。

假设飞轮储能在时间 t 内输出的能量等价于同步机释放能量, 则存在如下关系

$$\Delta E_{FESS} = \Delta E_{G,max} = P_{FESS} t = 0.0396 P_N T_J \quad (4)$$

式(4)中, ΔE_{FESS} 、 P_{FESS} 为飞轮储能存储的能量和功率。

考虑紧急情况下需要输出更多功率, 现假设 $t=2^{-1}T_J$ 需要配置飞轮储能的功率为

$$P_{FESS} = 0.0792 P_N \quad (5)$$

分析式(5)可以得到, 对于配置的飞轮储能只要满足 8%的额定功率即可达到频率稳定要求。但考虑实际系统存在储能的充放电情况, 通常取 9%~10%作为配置储能的功率需求, 也不会对风机运行产生不良影响, 满足系统稳定运行要求。

3 控制策略

3.1 风机独立参与调频策略

由于风机独立运行时的惯性较小, 加上风能的随机与波动特性, 在额定运行状态的风机基本无调频能力。为解决该问题, 通常的做法是降低风机出力, 将剩余功率作为备用进行调频。独立调频采取的措施主要有变桨控制、偏航设定以及频率下垂控制等, 图 2 为风机参与电力系统调频结构图见图 2。

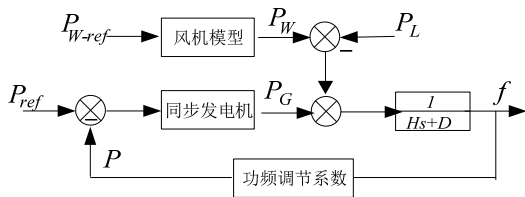


图 2 风机独立调频模型

Fig. 2 Wind turbine independent frequency modulation model

图 2 中: P_{ref} 为调度有功功率给定; $P_{\omega-ref}$ 为风功率给定; P_w 为风机出力; P_L 为负荷功率; P_G 为同步发电机输出功率; f 为调节后频率; P 为反馈功率; D 为阻尼系数; H 为系统惯量系数。显然系统输出频率决定于同步电机、风机和负荷。现假定同步机不参与系统调频, 虽然风机在一定意义上具备频率调节能力, 但存在调节范围受限及风能变化等一系列条件约束, 因此调节能力非常有限。

3.2 储能阵列各自功率分配策略

针对风电机组惯量不足、调频能力低下的问题, 文中提出了基于飞轮储能阵列的综合调控策略, 飞轮储能放电过程采用自适应下垂系数调节法, 其显著特点是储能的出力随频率偏差的变化而变化。重点解决负荷扰动前期频率偏差小、但变化率大以及后期频率偏差大但变化率小的突出问题。

现以两台飞轮储能组合系统为例进行分析, 飞轮储能出力特性与各自机组的有功功率分配关系见图 3。两台设备为并联运行, 横坐标为飞轮储能的输出有功功率, 纵坐标为系统频率, 其中曲线 w_1 、 w_2 分别代表 1 号、2 号机组的功率输出调节特性。首先假设此系统总负荷为 $\sum P_L$, 系统频率为工频 50 Hz, 则 1 号、2 号机组各自分配的功率分别为 P_1 、 P_2 , 即

$$\sum P_L = P_1 + P_2 \quad (6)$$

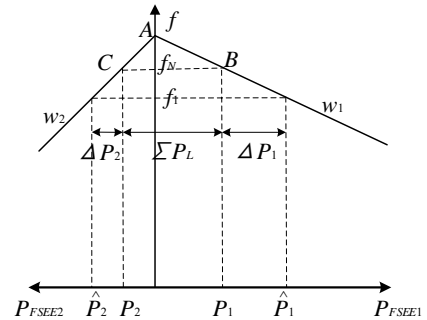


图 3 基于自适应下垂系数的飞轮储能出力分配策略

Fig. 3 Flywheel energy storage output distribution strategy based on adaptive sag factor

当负荷增加时, 系统频率降低到 f_1 , 此时两台飞轮储能各自分配的功率变化到 \hat{P}_1 、 \hat{P}_2 , 变化幅值为 ΔP_1 、 ΔP_2 台机组的功率增量为 $\sum \Delta P_L$ 。

即

$$\sum \Delta P_L = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (7)$$

分析图 3 并定义功率调节下垂系数为

$$k = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} \quad (8)$$

式(8)中: k 为飞轮储能的下垂系数; Δf 为飞轮储能频率变化量; ΔP_G 为飞轮储能功率变化量; 负号表示飞轮储能功率变化与频率变化方向相

反。

下垂系数也可采用标么值表示, 即

$$k^* = -\frac{\Delta f f_N^{-1}}{\Delta P_G \Delta P_{GN}^{-1}} = -\frac{\Delta f^*}{\Delta P_G^*} \quad (9)$$

由图 3 可知, 两台机组的频率变量与功率变量构成了两对相似三角形, 所以可得到

$$\Delta P_1^* / \Delta P_2^* = k_2^* / k_1^* \quad (10)$$

式(10)中: k_1^* 、 k_2^* 分别为 1 号、2 号机组的下垂系数。由式(10)表明, 飞轮储能的出力与机组的下垂系数成反比关系。下垂系数小的机组承担的负荷功率相对较大, 而下垂系数大的机组承担负荷功率相对较小。

将上述结论进行推广可以得到多台储能并联的功率分配情况见式(11)。

$$\Delta P_{Gi} = -\frac{1}{k_i^*} \times \frac{\Delta f}{f_N} P_{GNi} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

3.3 充放电控制策略

3.3.1 功率分配策略

飞轮储能作为风电调频机组具有充电、放电两种工作状态。因此, 飞轮具有双向调节能力。但须注意, 飞轮尽管可以多次并快速充放电, 但并非能够深度充放电。为此依据飞轮工作特性设计的充放电与荷电状态之间的关系见图 4。荷电状态小于 0.35 时按照左边下倾斜斜线放电; 荷电状态大于 0.7 时按照右边下倾斜斜线充电, 更为精准的充放电要求还需要参考充放电下垂公式(12)、(13)执行。

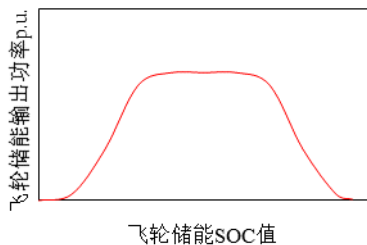


图 4 飞轮储能荷电状态与功率关系图

Fig. 4 Plot of flywheel storage charge state versus power

$$k_c = \begin{cases} 1 & SOC \in (0, 0.38] \\ 1 - \frac{1}{1 + e^{-(SOC-0.7)}} & SOC \in (0.38, 0.9] \\ 0 & SOC \in (0.9, 1] \end{cases} \quad (12)$$

$$k_d = \begin{cases} 0 & SOC \in (0, 0.1] \\ \frac{1}{1 + e^{-(SOC-0.3)}} & SOC \in (0.1, 0.45] \\ 1 & SOC \in (0.45, 1] \end{cases} \quad (13)$$

式(12)、(13)中, k_c 、 k_d 分别为飞轮储能不同荷电状态时对应的充、放电下垂系数。

参考图 4 并拟合荷电状态与功率关系曲线可以得到, 飞轮储能调频过程的充放电下垂系数设置方法见式(12)、(13)。

3.3.2 综合控制策略

文中设计的控制策略见图 5。以单台飞轮储能为例进行分析, 飞轮储能连接的电机为永磁同步电机, 充放电过程采用背靠背式全功率变流器件 IGBT 搭建, 滤波电路设计为 LCL 模式。其主要特点是飞轮储能成套设备体积小、成本低、滤波效果好。针对飞轮储能充放电控制的特殊性, 针对飞轮储能的控制策略, 该次设计了双闭环控制策略, 作为充电过程重点考虑了防止过充现象发生, 采用速度外环电流内环的方式, 而放电过程则主要考虑了功率输出以及电压稳定问题。

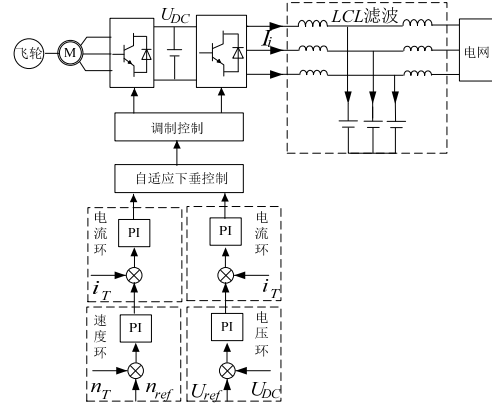


图 5 飞轮储能综合控制策略图

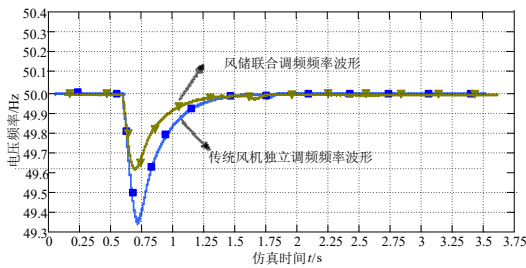
Fig. 5 Diagram of the integrated control strategy for flywheel energy storage

4 仿真算例分析

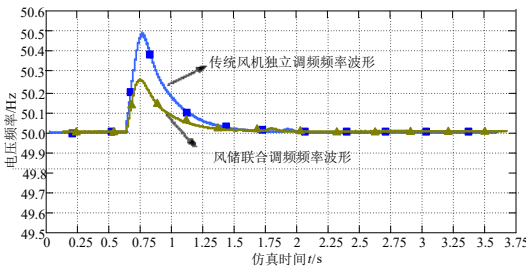
为验证文章提及控制策略的可行性, 以内蒙地区二连浩特某风电场运行系统为例, 采用 PSCAD/EMTDC 大型数字化仿真平台进行验证。现场单台风电机容量为 2.5 MW, 共计 40 台。风电场额定功率为 100 MW, 储能系统额定功率为 8 MW, 单台功率为 1 MW(60 MJ), 同步发电机额定功率为 200 MW, 有功负荷为 260 MW。

4.1 算例 1

仿真运行于 0.6 s 时，系统负荷增加 12 MW，此时的风电单独调频及联合调频的频率波形均有所降低，见图 6(a)。前者的频率降低至 49.3 Hz，而后者的频率降低至 49.6 Hz。究其原因在于风储系统具有较大惯性，其频率波动最低值有所提高，显然，风储联合系统能够有效改善负荷增加时的频率变化特性。相反，当负荷减少情况下的频率波动见图 6(b)，风储联合系统的频率波形波动较小，频率上升至 50.2 Hz，较风机单独调节效果更好，显示了储能的增加还可以瞬时吸收多余风电功率，增强了风电机组的调频韧性。



(a) 负荷增加时的频率波动图



(b) 负荷减少时的频率波动图

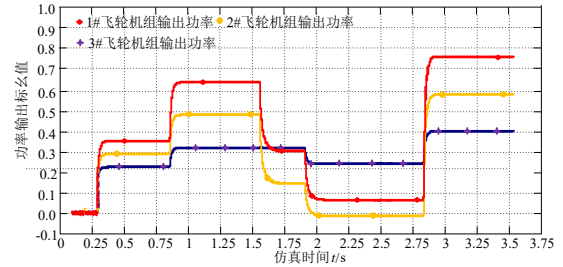
图 6 负荷突变频率变化趋势图

Fig. 6 Trend graph of the frequency of sudden load changes

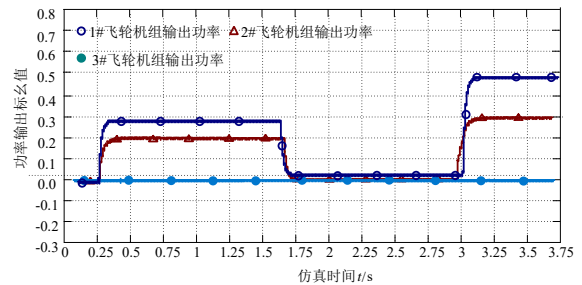
4.2 算例 2

仿真时间分为 5 段，见图 7(a)。图 7(a)中给出了负荷功率增加情况下各飞轮储能的出力分配，验证不同下垂系数的调节效果。假设各储能的荷电状态均满足放电条件，且只有 3 台机组参与调频，则负荷增加时，1、2、3 号机组出力峰值与谷值分别为 0.65、0.1、0.5、0、0.3、0.25 MW。各机组的出力均考虑负荷变化、荷电状态以及相应下垂系数等基本约束条件，能够按照下垂系数合理分配出力。与此相对应，图 7(b)给出的 3 台调

频机组中有一台荷电状态较低无法供电，因此剩余两台机组参与调频，各台机组的出力最大为 0.5 MW，最小为 0.2 MW，同样遵循了下垂系数调节总则，证实了自适应下垂系数设置的可行性。



(a) 3 台机组荷电状态正常时的出力分配图



(b) 第 3 台机组荷电状态较低情况时的出力分配图

图 7 3 台飞轮储能并联系统出力图

Fig. 7 Output of three flywheel energy storage parallel systems

5 结语

针对风场频率波动的实际现状，分析了负荷扰动的基本特性，设计的自适应下垂系数能够调整各飞轮储能出力，解决系统功率缺额的快速补充以及飞轮的过充和过放问题，保证频率波动范围始终在标称值以内。

针对两台飞轮的出力进行了测算，在考虑荷电状态的基础上设计的功率分配方案具有算法简单、功率调整快速等优势，该算法不仅适合于两台并联机组，同时也可推广应用到多台飞轮组成的阵列当中。

从经济角度考虑，储能容量的设置不应小于风场容量的 8%，这样的配置方法可以达到与同容量同步发电机的调频需求及相应惯量要求。

参考文献：

[1] 戴兴建, 魏鲲鹏, 张小章, 等. 飞轮储能技术研究五十

- 年评述[J]. 储能科学与技术, 2018, 5(7): 765-782.
- DAI Xingjian, WEI Kunpeng, ZHANG Xiaozhang, et al. Review of fifty years of flywheel energy storage technology research[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 5(7): 765-782.
- [2] 梁 恺, 彭晓涛, 秦世耀, 等. 基于协同控制优化风储系统频率响应的策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2628-2640.
- LIANG Kai, PENG Xiaotao, QIN Shiyao, et al. Study on synergetic control strategy for optimizing frequency response of wind farm augmented with energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2628-2640.
- [3] 杨欢红, 洪 雨, 史博文, 等. 储能站动力电池逆变单元过电压保护方案优化研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(6): 76-80.
- YANG Huanhong, HONG Yu, SHI Bowen, et al. Optimization of overvoltage protection scheme of power battery inverter unit in energy storage station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6): 76-80.
- [4] 虞临波, 寇 鹏, 冯玉涛, 等. 风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 36-43.
- YU Linbo, KOU Peng, FENG Yutao, et al. Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 36-43.
- [5] 刘 侃, 贾 祺, 翟文超, 等. 面向次同步振荡的直驱风电机组阻抗频率响应特性辨识[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 39-46.
- LIU Kan, JIA Qi, ZHAI Wenchao, et al. Identification of impedance frequency response characteristics of PMSG for subsynchronous oscillation[J]. Smart Power, 2021, 49(9): 39-46.
- [6] 姜惠兰, 蔡继朝, 肖 瑞, 等. 一种提高系统频率响应特性的风储协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 44-51.
- JIANG Huilan, CAI Jichao, XIAO Rui, et al. A wind-storage coordinated control strategy for improving system frequency response characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 44-51.
- [7] 万天虎, 李 华, 唐 浩, 等. 基于多主站协调控制的光伏电站一次调频应用研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(4): 37-43.
- WAN Tianhu, LI Hua, TANG Hao, et al. Application&research on primary frequency modulation of photovoltaic power station based on multi-master coordinated control[J]. Smart Power, 2021, 49(4): 37-43.
- [8] 王 中, 黎丽丽, 李振华, 等. 考虑新能源渗透的电网频率概率分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 65-73.
- WANG Zhong, LI Lili, LI Zhenhua, et al. The evolution characteristics of power grid frequency probability distribution[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 65-73.
- [9] 蔡 晖, 张文嘉, 彭竹弈, 等. 基于大规模风电机组的虚拟惯量控制技术对江苏电网频率稳定性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4): 41-46.
- CAI Hui, ZHANG Wenjia, PENG Zhuyi, et al. Influence of large scale wind turbine-based virtual inertia control technology on frequency stability of Jiangsu power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 41-46.
- [10] 蔡葆锐, 杨 蕾, 黄 伟. 基于惯性/下垂控制的变速型风电机组频率协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 169-177.
- CAI Baorui, YANG Lei, HUANG Wei. Frequency coordination control of a variable speed wind turbine based on inertia/droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 169-177.
- [11] ADHIKARI S, KARKI R, PIYA P. Recovery risk mitigation of wind integrated bulk power system with flywheel energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3484-3493.
- [12] 何海婷, 柳亦兵, 巴黎明, 等. 基于 BP 神经网络的飞轮储能系统主动磁轴承非线性动力学模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 1184-1197.
- HE Haiting, LIU Yibing, BA Liming, et al. Nonlinear dynamic model of active magnetic bearing in flywheel system based on BP neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 1184-1197.
- [13] 张文元. 基于递推最小二乘离散辨识法的飞轮储能系统无位置控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 135-141.
- ZHANG Wenyuan. Research on FESS sensorless control based on recursive least-squares discrete identifica-

- tion[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 135-141.
- [14] KAZEMI M, ZAREIPOUR H. Long-term scheduling of battery storage systems in energy and regulation markets considering battery's lifespan[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6840-6849.
- [15] 严干贵, 王昱博, 钟 诚, 等. 风储联合系统调频控制策略研究[J]. 电力建设, 2016, 37(12): 55-60.
- YAN Gangui, WANG Yubo, ZHONG Cheng, et al. Frequency regulation control strategy for combined wind and storage systems[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(12): 55-60.
- [16] 张继红, 王洪明, 魏毅立, 等. 含复合储能和燃气轮发电机的直流微电网母线电压波动分层控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1238-1246.
- ZHANG Jihong, WANG Hongming, WEI Yili, et al. Hierarchical control strategy of voltage fluctuation in DC microgrid consisting Gas-Turbine generator and composite energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1238-1246.
- [17] 孙 铭, 徐 飞, 陈磊, 等. 利用转子动能的风机辅助频率控制最优策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 506-513.
- SUN Ming, XU Fei, CHEN Lei, et al. Optimal auxiliary frequency control strategy of wind turbine generator utilizing rotor kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 506-513.
- [18] 王浩浩, 陈嘉俊, 朱 涛, 等. 计及储能寿命与调频性能的风储联合投标模型及算法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 208-215.
- WANG Haohao, CHEN Jiajun, ZHU Tao, et al. Joint bidding model and algorithm of wind-storage system considering energy storage life and frequency regulation performance[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 208-215.
- [19] 徐丽华, 杨青斌. 基于 VC++ 的风电场储能容量优化配比软件实现[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(4): 80-86.
- XU Lihua, YANG Qingbin. Energy storage capacity optimal matching of wind farm and energy storage integration system based on VC++[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(4): 80-86.
- [20] 杨军伟, 杜露露, 刘 夏, 等. 高风电渗透率下考虑需求侧管理策略的智能微电网调度方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 32-39.
- YANG Junwei, DU Lulu, LIU Xia, et al. Dispatching method of smart microgrid considering demand-side management strategy under high wind power penetration rate[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 32-39.
- [21] 张雪娟, 束洪春, 孙士云, 等. 双馈风机参与系统调频对系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 18-29.
- ZHANG Xuejuan, SHU Hongchun, SUN Shiyun, et al. Effect analysis of a doubly-fed induction generator participating in system frequency modulation on system transient power angle stability[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 18-29.
- [22] 蔡逸超, 杜欣慧, 王质素, 等. 风电高渗透率电网的经济优化调度[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6): 156-161.
- CAI Yichao, DU Xinhui, WANG Zhisu, et al. Economic optimization of wind power high permeability grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 156-161.
- [23] 李军徽, 范兴凯, 穆 钢, 等. 10 kW/20 kWh 锂电池储能协同风电一次调频备用的实验验证[J]. 全球能源互联网, 2018, 5(39): 1373-1379.
- LI Junhui, FAN Xingkai, MU Gang, et al. Experimental verification of 10 kW/20 kWh lithium battery energy storage synergistic wind power primary frequency modulation backup[J]. Global Energy Internet, 2018, 5(39): 1373-1379.
- [24] 供电营业规则. 中华人民共和国电力行业标准[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- Power Supply Business Rules. Electric power industry standards of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- 张继红(1975—), 男, 博士, 教授, 硕导, 主要从事新能源发电及其储能控制技术方面的研究工作(E-mail: 12345678@126.com)。
- 刘云飞(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事微电网多逆变器并联系统优化配置方面的研究工作(通信作者)(E-mail: 1810177805@qq.com)。