

面向储能辅助火电机组一次调频的深度强化学习控制策略

王建波¹, 孙冉¹, 刘忠凯², 张小科³, 郭泓佐¹, 胡怀中²

(1. 国网河南省电力公司, 450000, 郑州; 2. 西安交通大学自动化科学与工程学院, 710100, 西安;

3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 450052, 郑州)

摘要: 为充分挖掘火储联合系统中储能单元的一次调频潜力,同时减少火电机组调频频度,提出了一种基于双延迟深度确定性策略梯度算法的储能辅助火电机组一次调频控制策略。搭建了典型含火储联合调频系统的区域电网一次调频模型;以提高电网频率控制效果、维持储能荷电状态(SOC)平稳、减少火电机组调频动作次数等多项目标建立优化问题,综合考虑电网运行状态及调频动作的约束,将储能辅助火电机组一次调频问题建模为一个马尔可夫决策过程;使用双延迟深度确定性策略梯度算法进行优化问题求解。典型调频任务场景的仿真结果表明,与传统火储联合调频控制算法相比,所提出的储能辅助火电机组智能调频控制策略可使电网频率偏差均值降低约10.4%、火电机组的调频动作次数减少约56.2%,验证了该策略能在有效释放火储联合系统的调频潜力,同时大幅减少火电机组一次调频频次。

关键词: 一次调频;深度强化学习;下垂控制;调频死区;荷电状态

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202406017 **文章编号:** 0253-987X(2024)06-0186-07

Deep Reinforcement Learning Control Strategy for Primary Frequency Regulation of Energy Storage Assisted Thermal Power Units

WANG Jianbo¹, SUN Ran¹, LIU Zhongkai², ZHANG Xiaoke³,

GUO Hongzuo¹, HU Huaizhong²

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;

2. School of Automation Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710100, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to fully tap the potential of primary frequency modulation in the energy storage unit of the thermal-storage combined system and reduce the frequency regulation of thermal power units, a twin delayed deep deterministic policy gradient algorithm based energy storage assisted primary frequency regulation control strategy for thermal power unit is proposed. A typical regional power grid primary frequency regulation model containing thermal-storage combined frequency regulation system is established. Optimization problems with multiple objectives such as improving the frequency control effect of the power grid, maintaining a stable state of charge (SOC), and reducing the frequency regulation actions of thermal power unit are

收稿日期: 2023-08-23。 作者简介: 王建波(1989—),男,工程师;胡怀中(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金

项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1700104);国网河南省电力公司科技资助项目(521702230011)。

网络出版时间: 2024-02-26

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240223.1340.006

set. Taking into account the constraints of power grid operation status and frequency regulation actions, the primary frequency regulation problem of thermal power unit assisted by energy storage is modeled as a Markov decision process. Twin delayed deep deterministic policy gradient algorithm is used for optimization problem solving. The simulation results of typical frequency regulation task scenarios show that compared with traditional frequency regulation system control algorithms, the proposed energy storage assisted intelligent frequency regulation control strategy for thermal power units can reduce the average frequency difference of the power grid by about 10.4%, and reduce the frequency regulation actions of thermal power unit by about 56.2%. This verifies that the strategy can effectively release the frequency regulation potential of the thermal-storage combined system while significantly reducing frequency regulation of thermal power units.

Keywords: primary frequency control; deep reinforcement learning; droop control; frequency dead band; state of charge

近年来,我国风电、光伏装机容量已跃居世界第一^[1]。随着发电能源结构的清洁低碳化,以风能、太阳能为代表的清洁能源正逐步取代传统化石能源,成为电力系统的重要组成部分。然而,由于清洁能源发电的随机性和波动性,大规模接入将给电网调频带来巨大的挑战^[2-3],火电机组的调频压力也日益增加^[4-6]。电池储能作为一种解决清洁能源并网的有效手段,其凭借着响应速度快、控制精度高、具有双向调节能力等优点在一次调频领域备受关注^[7-8]。

针对储能辅助火电机组的一次调频控制策略,目前已经有了许多研究。文献[9]采用了虚拟下垂控制,并根据储能荷电状态设计了自适应系数优化了调频效果。文献[10]虚拟下垂控制的基础上添加了虚拟惯性控制,并根据电网频率偏差以及偏差变化划分出了多个模式,进一步提高了储能的调频能力。文献[11]分析了储能参与一次调频过程,并根据频率偏差是否达到最大值划分了控制模式,充分发挥了虚拟惯性控制以及虚拟下垂控制的优点。文献[12]分析了一次调频中的频率变换特性,指出了频率恢复期这一特殊的阶段,并提出了负虚拟惯性控制,从而平滑了储能调频动作,且显著提高了电网的暂态稳定质量。此外,部分文献在一次调频死区内兼顾了荷电状态恢复,提高了储能的持续调频能力。文献[13]提出了兼顾荷电状态恢复的一次调频策略,当电网频率处于死区内时,储能可根据电网以及自身荷电状态情况,控制储能进行荷电状态恢复,有效改善了储能的荷电状态。文献[14]在兼顾荷电状态恢复的基础上,采用模糊控制的方式确定虚拟惯性以及虚拟下垂的自适应因子,有效平滑了储能调频动作,提升了其自适应调节能力。文献[15]进一步优化了荷电状态恢复效果,其根据当前负荷状

态调节荷电状态(SOC)恢复基准,并且根据当前频率偏差以及恢复基准确定储能调频动作,使SOC长期处于良好状态。文献[16-17]研究了调频死区设置对于储能参与一次调频的影响,并通过合理的死区设置有效改善了火电机组调频频繁动作的问题。

综上,目前电池储能参与一次调频的研究其控制方式主要为虚拟惯性结合虚拟下垂控制,并根据储能荷电状态、电网频率偏差及其变化调整储能出力,但是这导致了控制模式及其变量过多,参数选取困难。此外,文献[16-17]通过优化储能死区设置来降低火电机组调频动作频率,但依然存在着优化的空间。

为解决上述问题,本文采用智能决策的方法,通过深度强化学习算法训练智能体。该智能体可以根据当前储能荷电状态、电网频率及其变化率控制储能系统参与一次调频,从而提高火电联合调频系统的频率控制效果、维持储能荷电状态平稳、以及减少火电机组调频动作次数。

1 含有火电联合调频系统的区域电网一次调频模型

适用于储能辅助火电机组参与一次调频的区域电网模型^[15]如图1所示。图1中 $\Delta f(s)$ 为系统频率偏差, $\Delta P_l(s)$ 为负荷扰动, M 为电网惯性时间常数, D 为系统等效阻尼常数, s 为拉普拉斯算子, $\Delta P_b(s)$ 为储能动作, $\Delta P_g(s)$ 为火电机组调频动作, K_{gen} 为火电机组一次调频阀位因子。储能传递函数 G_{bess} 为

$$G_{\text{bess}} = \frac{1}{1 + sT_e} \quad (1)$$

式中: T_e 为储能响应时间常数。

图1中 G_{gen} 为火电机组传递函数,其由调速器

传递函数以及汽轮机传递函数组成

$$G_{\text{gen}} = \frac{1}{1+sT_g} \frac{1+sF_{\text{hp}}T_{\text{rh}}}{(1+sT_{\text{ch}})(1+sT_{\text{rh}})} \quad (2)$$

式中: T_g 为调速器传递函数; T_{ch} 为高压缸前汽室容积时间常数; T_{rh} 为再热器容积时间常数; F_{hp} 为再热汽增益。

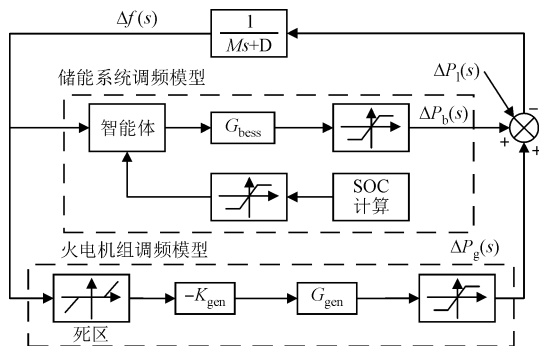


图1 含有火储联合调频系统的区域电网一次调频模型

Fig. 1 Model of primary frequency regulation in power grid with energy storage and thermal power units

2 基于智能体的储能辅助火电机组一次调频控制策略

2.1 算法简介

深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)是一种基于环境状态的学习,通过智能体与环境交互获取状态信息并不断改进策略,以取得最大的预期奖励^[18]。这种从过往经验中进行学习的方法可有效避免当前控制方式参数过多且难以确定的问题。本文采用当前效果较好的双延迟深度确定性策略梯度(twin delayed deep deterministic policy gradient, TD3)算法^[19]来处理储能参与一次调频问题。TD3采用了 Actor-Critic 框架,可以输出连续的动作,是深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)算法^[20]的改进版本。

2.2 针对储能辅助火电机组一次调频的智能体设计

将储能参与电网一次调频问题搭建为马尔可夫决策过程(markov decision processes, MDP)需要明确五元组 $\{O, A, R, P, \gamma\}$ 。其中 O 为系统观测空间, A 为智能体的动作空间, R 为奖励函数, P 为状态转移概率,本问题状态转移概率未知,由智能体在训练中学习, γ 为折扣因子,代表智能体对未来所获得奖励的关注,设置为 0.98。

智能体的状态空间为智能体对当前环境状态的

观测信息。本文将电网当前的频率偏差、频率偏差变化量以及储能当前的荷电状态 S_{oc} 偏差共 3 部分纳入观测,即

$$O = \{\Delta f(t), \Delta f(t) - \Delta f(t-1), \Delta S_{\text{oc}}(t)\} \quad (3)$$

频率偏差变化为当前时刻与上一时刻频率偏差的差值,荷电状态偏差为

$$\Delta S_{\text{oc}}(t) = S_{\text{oc}}(t) - S_{\text{oc_set}} \quad (4)$$

式中: $S_{\text{oc_set}}$ 为储能荷电状态良好值。

控制量为储能目标充放电功率,该值在数值上是连续的,即

$$A = \{P_b(t)\} \quad (5)$$

式中: $P_b(t)$ 为储能接受到的动作指令。

奖励函数是智能体评判动作好坏的唯一标准,其设计与评价指标强相关。为了得到更好的评价指标,本文奖励函数由评价指标项、奖励项以及惩罚项 3 部分组成。

评价指标项由频率控制效果评价指标与荷电状态恢复评价指标加权组成。传统频率评价指标为当前频率与 50 Hz 之间的差值,考虑到储能火电机组调频死区内往往进行荷电状态恢复以及火电机组在调频死区内不进行调频动作,此时的频率偏差无法准确描述频率控制效果,因此当且仅当频率偏差处于火电机组调频死区外时才进行计算

$$\Delta f_p(t) = \begin{cases} |\Delta f| - \Delta f_{\text{dz}}, & |\Delta f| > \Delta f_{\text{dz}} \\ 0, & |\Delta f| \leq \Delta f_{\text{dz}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Δf_{dz} 为火电机组调频死区,设置为 0.033 Hz; $\Delta f_p(t)$ 为 t 时刻的频率控制效果评价。将所有时刻下死区外频率偏差取平均值作为本文的频率控制效果评价指标

$$\Delta f_p = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^T (\Delta f_p(t))^2} \quad (7)$$

当储能处于良好范围时可有效提高储能应对调频任务的能力,延长参与调频的时间,因此超过或者低于良好状态会使评价降低,当前荷电状态与良好值距离越远评价越低。荷电状态恢复评价指标 ΔS_p 计算式为

$$\Delta S_p = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^T (S_{\text{oc}}(t) - S_{\text{oc_set}})^2} \quad (8)$$

式中: $S_{\text{oc_set}} = 50\%$ 。

综上,奖励函数中评价指标项计算式为

$$r_1 = -x_1 \Delta f_p - x_2 \Delta S_p \quad (9)$$

式中: x_1 、 x_2 为权重系数。

当频率偏差处于火电机组调频死区时,则会给

与智能体一定的奖励,即

$$r_2 = \begin{cases} 0, & |\Delta f| \geq \Delta f_{dz} \\ a, & |\Delta f| < \Delta f_{dz} \end{cases} \quad (10)$$

式中: a 为奖励常数。

本方法针对智能体指令频繁切换动作方向给予惩罚,以引导智能体发出更加平滑的指令。具体而言,当智能体最近发出的 3 次指令若改变了 2 次方向的话,则施加惩罚,这个数值远大于其从这种动作方式中获得的奖励,即

$$r_3 = \begin{cases} b, & P_b(t)P_b(t-1) < 0, \\ & P_b(t-1)P_b(t-2) < 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: b 为常数。

综上,智能体奖励函数为

$$R = -r_1 + r_2 - r_3 \quad (12)$$

为保证储能使用寿命以及为紧急情况留有一定裕量,对储能荷电状态范围、最大充放电功率以及储能出力最大变化率进行了限制,即

$$S_{oc_min} \leq S_{oc}(t) \leq S_{oc_max} \quad (13)$$

$$P_{b_min} \leq P_b(t) \leq P_{b_max} \quad (14)$$

$$|P_b(t) - P_b(t-1)| \leq \Delta P_{b_max} \quad (15)$$

式中: S_{oc_min} 、 S_{oc_max} 分别为荷电状态最小值和最大值; P_{b_min} 、 P_{b_max} 分别为储能最小和最大充放电功率; ΔP_{b_max} 为储能出力最大变化率。

3 实验验证

本文评价对比指标为频率偏差均值、SOC 偏差均值以及火电机组调频动作次数,其中频率偏差均值为 Δf_p , SOC 偏差均值为 ΔS_p 。火电机组调频动作次数计算方式如下:如频率频差从火电机组调频死区内到火电机组调频死区外则视为进行了一次动作。

3.1 实验设置

本文将图 1 所示的储能参与一次调频模型作为智能体交互的环境。火电机组参数取自某 1 000 MW 机组,该机组汽轮机为 CCLN1000-25.0/600/600 型四缸四排汽、凝气式汽轮机。最大调频负荷变化幅度为 50 MW,控制方式采用下垂控制,其一次调频阀因子为 20;储能采用磷酸铁锂电池,其容量为 1 MW·h,最大输入输出功率为 10 MW,荷电状态范围限制在 20%~80%,储能出力最大变化率为 15%;火电机组以及储能系统的控制间隔均为 1 s。含储能以及火电机组的电网一次调频动态模型参数如表 1 所示。

表 1 含储能以及火电机组的电网一次调频动态模型参数

Table 1 Dynamic model parameters for primary frequency regulation of power grid including energy storage and thermal power units

参数	数值	参数	数值
T_e/s	0.1	T_{ch}/s	0.3
T_g/s	0.08	T_{rh}/s	10
M/s	20	F_{hp}	0.5
D	1		

本文算法中 Actor 网络输入层有 3 个神经元,对应智能体观测的 3 个维度,其隐藏层有 3 层,前两层各有 128 个神经元,第 3 层则有 64 个神经元;Critc 网络有 3 个隐藏层,前两层各有 256 个神经元,第 3 层则有 128 个神经元。激活函数均采用 RELU,算例运行硬件环境为 11th Gen Intel(R)Core(TM) i5-11400 @ 2.60GHz,所有训练以及测试在 python3.6 环境中运行,使用了深度学习框架 pytorch。

对比方法分别选择了兼顾荷电状态恢复的定 K 法^[21-23]以及当前控制效果较好的变 K 法^[13-15],并设置储能的调频动作死区小于火电机组^[24-25],具体数值上为火电机组调频死区的 60%^[16]。其中变 K 法可以在储能进行一次调频时兼顾荷电状态恢复。当频率处于储能调频死区外时,这种方法可以根据频率偏差以及当前荷电状态自适应改变当前出力,可有效提高调频效果;当频率处于死区内时,其可以根据频率偏差以及当前荷电状态综合决定储能荷电状态恢复的方向以及力度,这种方式可以一定程度上减少火电机组的调频动作次数。

3.2 智能体策略训练

向模型中加入功率不超过 25 MW,长 1 000 s 随机生成的扰动。智能体训练时的奖励曲线如图 2 所示,共进行了约 2×10^7 步的训练,每过 3×10^5 步对当前智能体表现进行测试,选取测试中表现最好的智能体保存作为最优控制策略。

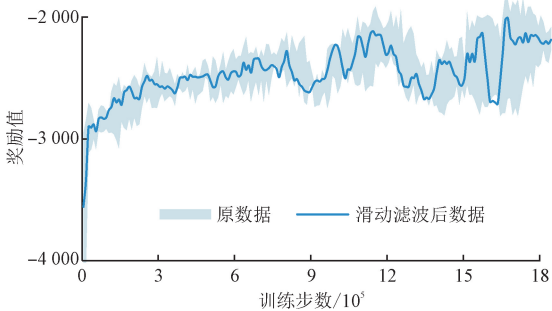


图 2 智能体训练奖励值曲线

Fig. 2 Agent training reward value curve

设置初始荷电状态为 50%，向图 1 所示模型中加入扰动，典型负荷扰动曲线如图 3 所示，扰动时长为 1 000 s，将其与定 K 法以及变 K 法的控制效果进行对比，评价指标的数值结果如表 2 所示，频率波动曲线对比如图 4 所示，测试中储能荷电状态变化以及储能不同控制策略下火电机组调频动作对比如图 5、图 6 所示。

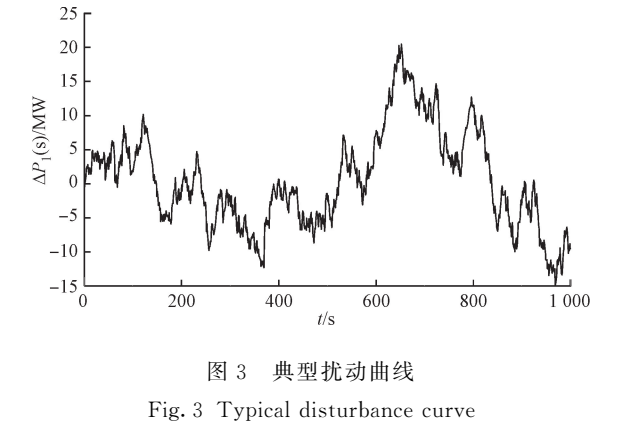


表 2 典型扰动下控制效果对比

评价指标	定 K 法	变 K 法	本文方法
频率偏差均值/ 10^{-4} Hz	1.183	1.153	1.102
SOC 偏差均值	0.125 0	0.123 6	0.122 3
火电机组调频次数	44	43	16

由表 2 可知，本文控制策略下的频率偏差均值小于对比策略的，这表明本文策略能有效提高储能调频能力。本文控制策略下 SOC 偏差均值为 0.122 3，小于定 K 法的 0.125 0 以变 K 法的 0.123 6，表明本策略下的荷电状态恢复能力更好，荷电状态控制能力更强。结合图 4 可知，本文策略下的频率波动曲线频率处于火电机组调频死区内的时间较对比策略更久，本文策略在维持频率稳定上的性能优于对比策略。

在火电机组调频动作次数上，本方法较对比策略有极大的提升。由表 2 可知，本文方法控制下的火电机组调频动作次数较对比策略降低超 50%。结合图 6 可以看到，在 440~520 s 之间，对比方法中的火电机组经常出现小幅调频出力，相比之下本文方法中的火电机组并不进行调频动作，显示出了本文方法对死区附近的高频扰动有着较好的提前抑制作用，从而大大减少了火电机组调频动作次数。

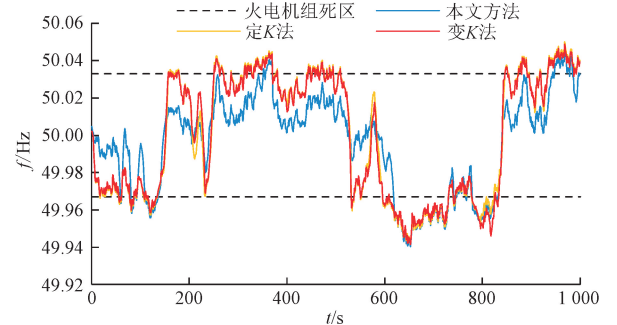


图 4 频率控制效果对比
Fig. 4 Comparison of frequency control effects

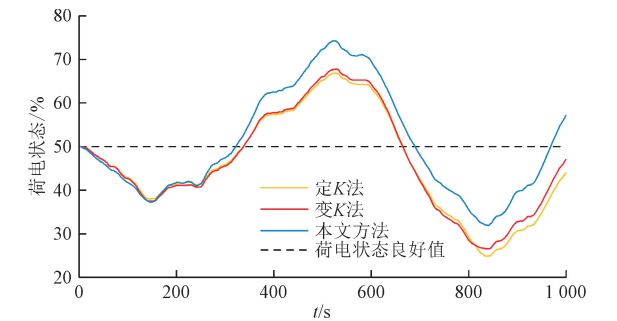


图 5 不同控制策略 SOC 情况对比
Fig. 5 Comparison of SOC situation of different control strategies

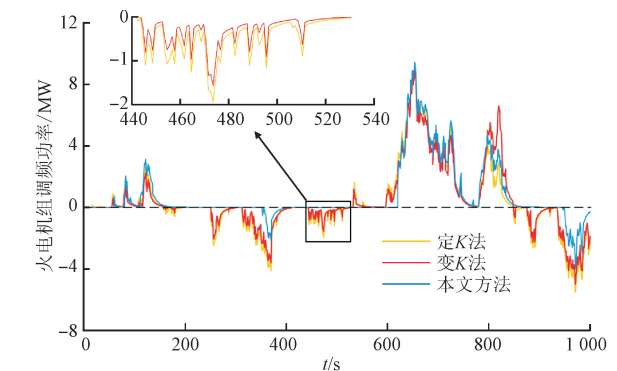


图 6 储能不同控制策略下火电机组调频动作对比
Fig. 6 Comparison of frequency regulation output of thermal power units under different control strategies for energy storage

3.4 随机负荷扰动下控制效果对比

按照上述参数设置，继续向模型中加入多次随机负荷扰动，对其控制效果进行统计，取平均值后，其控制效果对比如表 3 所示。可知在荷电状态控制效果相近下，本文方法频率偏差均值相比于定 K 法降低了 10.4%，较变 K 法降低了 6.2%。在火电机组调频动作次数方面，本文方法较定 K 法降低了 56.2%，较变 K 法降低了 54.6%，可见本文方法极大减少了火电机组的调频动作次数。

表 3 随机扰动下控制效果对比

Table 3 Comparison of control effects under random disturbances

评价指标	定 K 法	变 K 法	本文方法
频率偏差均值/ 10^{-4} Hz	1.113	1.063	0.997
SOC 偏差均值	0.124 3	0.123 8	0.123 6
火电机组调频次数	40.9	39.4	17.9

4 结 论

为充分挖掘火储联合系统中储能单元的一次调频潜力,同时减少火电机组调频频度,本文提出了一种基于 TD3 的储能辅助火电机组一次调频控制策略,并与传统控制策略定 K 法以及变 K 法进行仿真对比,可得如下结论:

- (1)本文控制策略根据当前电网频率、电网频率变化以及储能荷电状态控制储能辅助火电机组一次调频,可有效提高频率控制效果;
- (2)本文控制策略极大减少了火电机组在调频死区附近的小幅度高频率一次调频动作次数,极大幅减少了火电机组一次调频频次。

参考文献:

[1] 张剑云,李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498-3506.
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3506.

[2] 叶林,王凯丰,赖业宁,等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述 [J]. 电网技术, 2023, 47(2): 446-462.
YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-462.

[3] LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of grid-connected DFIG wind farm [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 545-557.

[4] 张小科,王子杰,夏大伟,等. 一种面向深度调峰运行火电机组的一次调频能力建模新方法 [J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4947-4953.
ZHANG Xiaoke, WANG ZI Jie, XIA Dawei, et al. New modeling for primary frequency regulation capability of thermal power units under deep peak regula-

tion [J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4947-4953.

[5] 赵东元,胡楠,傅靖,等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.

[6] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[7] 张程铭,柳璐,程浩忠,等. 考虑频率安全的电力系统规划与运行优化研究综述与展望 [J]. 电网技术, 2022, 46(1): 250-264.
ZHANG Chengming, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Review and prospects of planning and operation optimization for electrical power systems considering frequency security [J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 250-264.

[8] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.

[9] 李欣然,邓涛,黄际元,等. 储能电池参与电网快速调频的自适应控制策略 [J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2362-2369.
LI Xinran, DENG Tao, HUANG Jiyuan, et al. Battery energy storage systems self-adaptation control strategy in fast frequency regulation [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2362-2369.

[10] 邓霞,孙威,肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法 [J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1157-1165.
DENG Xia, SUN Wei, XIAO Haiwei. Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1157-1165.

[11] 李欣然,崔曦文,黄际元,等. 电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3897-3908.

- LI Xinran, CUI Xiwen, HUANG Jiyuan, et al. The Self-Adaption control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3897-3908.
- [12] 吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究 [J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3829-3836.
- WU Qifan, SONG Xinli, ZHANG Jingran, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3829-3836.
- [13] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 63-72.
- LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Primary frequency regulation strategy with energy storage system based on weight factors and state of charge recovery [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 63-72.
- [14] 王育飞, 杨铭诚, 薛花, 等. 计及 SOC 的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 192-198, 219.
- WANG Yufei, YANG Mingcheng, XUE Hua, et al. Self-adaptive integrated control strategy of battery energy storage system considering SOC for primary frequency regulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 192-198, 219.
- [15] 李军徽, 高卓, 应鸿, 等. 基于动态下垂系数与 SOC 基点的储能一次调频控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 1-10.
- LI Junhui, GAO Zhuo, YING Hong, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage based on dynamic droop coefficient and SOC reference [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 1-10.
- [16] 马智慧, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能调频死区的一次调频控制方法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2102-2115.
- MA Zhihui, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Integrated control of primary frequency regulation considering dead band of energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2102-2115.
- [17] 张峰, 游欢欢, 丁磊. 新能源一次调频死区影响机理建模及系数修正策略 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 158-167.
- ZHANG Feng, YOU Huanhuan, DING Lei. Influential mechanism modelling of dead band in primary frequency regulation of renewable energy and its coefficient correction strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 158-167.
- [18] HU Junyan, NIU Hanlin, CARRASCO J, et al. Voronoi-based multi-robot autonomous exploration in unknown environments via deep reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14413-14423.
- [19] FUJIMOTO S, VAN HOOFF H, MEGER D. Addressing function approximation error in actor-critic methods [C]//Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning. Chia Laguna Resort, Sardinia, Italy: PMLR, 2018: 1587-1596.
- [20] LILICRAP T P, HUNT J J, PRITZEL A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning [EB/OL]. (2019-07-05) [2023-06-06]. <https://arxiv.org/abs/1509.02971>.
- [21] ZHANG Yingjun, ZHAO Changhong, TANG Wanrong, et al. Profit-maximizing planning and control of battery energy storage systems for primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 712-723.
- [22] 刘英培, 田仕杰, 梁海平, 等. 考虑 SOC 的电池储能系统一次调频策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 107-118.
- LIU Yingpei, TIAN Shijie, LIANG Haiping, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 107-118.
- [23] 修连成, 熊连松, 康志亮, 等. 运用下垂控制的并网储能系统惯量阻尼特性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 112-120.
- XIU Liancheng, XIONG Liansong, KANG Zhiliang, et al. Analysis on dynamic characteristics of grid-tied energy storage system with droop control [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 112-120.
- [24] FRADLEY J, PREECE R, BARNES M. Fast frequency response from MMC-HVDC with varying dead band implementation [J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(28): 49-54.
- [25] LIU Muyang, BIZZARRI F, BRAMBILLA A M, et al. On the impact of the dead-band of power system stabilizers and frequency regulation on power system stability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3977-3979.

(编辑 赵炜)