

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231540

高比例新能源电网中储能调频死区优化设定控制策略

贺 悝¹, 郭罗权¹, 谭庄熙¹, 李欣然², 黄际元³, 陈超洋¹

(1. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;
3. 国网湖南省电力有限公司长沙供电分公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 高比例新能源的接入使新型电力系统的净功率波动以及低惯量特性不断增强, 给系统频率调节与稳定带来更大挑战。针对日益提升的调频需求, 提出一种电网储能死区优化调频控制策略。首先, 构建了含储能调频死区的电网频率响应模型, 分析了随着新能源渗透率的提升系统频率的变化特性, 并阐述了传统死区的不足之处。其次, 提出一种基于调频阶段分区的死区优化设置方法, 根据频率当前变化状态, 设定不同的死区响应模式。基于描述函数法定量分析了死区非线性环节对系统稳定性的影响, 给出了考虑死区影响的储能调频下垂系数的稳定边界。此外, 提出了储能参与调频的容量配置方法。最后, 搭建含新能源场站的区域电力系统模型, 对比了不同死区设定下的系统调频动态特性。结果表明, 所提新型死区设定方法可以有效改善电网的频率质量, 减轻系统的调频负担, 且所提死区设定方法不会增加储能的容量配置需求, 具有一定的经济实用价值。

关键词: 新能源; 储能; 死区; 调频; 稳定性

Improved dead zone setting of a frequency regulation strategy for energy storage with high penetration of RESs

HE Li¹, GUO Luoquan¹, TAN Zhuangxi¹, LI Xinran², HUANG Jiyuan³, CHEN Chaoyang¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Changsha Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: A high proportion access of renewable energy sources (RESs) enhances the characteristics of net power fluctuation and low inertia of the new power system. This brings greater challenges to frequency regulation and stability. Thus an improved dead zone frequency regulation control strategy for energy storage to meet the increasing frequency regulation demand is proposed. First, the frequency response model of a power system with an energy storage dead zone is introduced. The characteristics of system frequency varying with the increase of RESs penetration are analyzed, and the shortcomings of the traditional dead zone are elaborated. Then, an improved dead zone setting method based on frequency regulation stage division is proposed, where the frequency response modes are set according to the frequency changing status. Based on the description function method, the influence of dead zone nonlinear elements on the stability of the system is quantitatively analyzed, and the stable boundary of the droop coefficient considering the dead zone is given. In addition, a capacity configuration method is proposed for energy storage in frequency regulation. Finally, a regional power system model is built with an RESs farm, and the dynamics are compared with different dead zone settings. The simulation results verify that the proposed dead zone can effectively improve the frequency quality, relieve the frequency regulation burden, and will not increase the capacity configuration. It has a certain economic and practical value.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207097).

Key words: renewable energy sources (RESs); energy storage; dead zone; frequency regulation; stability

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207097); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点项目资助(2019YFE0118700); 湖南省自然科学基金项目资助(2022JJ40150)

0 引言

随着新能源(renewable energy sources, RESs)渗透率的逐步提高,利用储能电源参与电网的辅助调频服务已成为发展趋势^[1-2]。一方面,大规模的 RESs 接入使得电网的源端出力波动加剧,频率波动越限的概率增加,系统的调频负担随之加重,亟需新的优质调频资源进行调频辅助^[3-7];另一方面,RESs 占比的提升,使源端同步发电机占比下降。此外,新型电力系统中直流线路占比逐步提升,经电力电子器件并网的 RESs 电源与直流电网均具有低惯量的特性,导致电力系统整体的惯量水平下降,系统在遭遇净功率波动时频率失稳风险加剧^[8-9]。

目前,国内外学者针对储能参与电网快速调频开展了较多研究。主要集中在以下两个方面:

1) 辅助 RESs 参与系统频率响应,提升 RESs 场站的调频能力^[10-14]。为进一步提升储能调频经济性效益,文献[15]提出一种考虑季节性出力差异和储能不同荷电状态放电折损模型的容量配置方法,提升风储全天候调频能力和收益;文献[16]提出一种基于多智能体系统的分布式风储协同频率控制策略,适应新型电力系统背景下有功调度单元的分布式布局;文献[17]提出一种适用于正常运行与故障工况下的光储调频策略,提升了系统在功率波动、故障扰动引起频率变化场景中的频率稳定性。

2) 提升储能参与调频的性能,使高比例新能源电网具备更好的惯性响应能力,维持荷电状态(state of charge, SOC)的安全稳定区间^[18-19]。为进一步提升储能调频动态性能,文献[20]提出下垂系数与惯性系数随调频阶段频率特性动态变化的自适应控制策略,提升调频效果;为增加储能参与调频的参与时间,文献[21]提出一种考虑 SOC 恢复的储能一次调频控制策略,能有效改善储能 SOC 处于极端区间时的调频效果。

上述研究集中于储能的协同和自身的控制问题,忽略了储能调频的死区非线性环节对其调频性能及系统稳定性的影响。针对此,文献[22]提出一种考虑储能调频死区的综合一次调频控制方法,通过设置与常规机组不同的调频死区,充分利用储能的快速调频能力,在改善调频效果的同时减少了常规机组的调频负担。进一步地,文献[23]将储能调频死区设置成小于常规电源的调频死区并改进惯性响应模式,提升了调频响应速度。文献[24]通过分析不同死区的频率响应特性,提出了一种死区综合设定与优化方法,提升储能参与调频的灵敏度及 SOC 维持能力。

需指出的是,上述工作均未从机理上分析死区的非线性影响,仅从提升调频效果角度进行研究,因此,已有研究仍存在两个方面的不足:1) 未分析死区非线性环节对系统稳定性的影响,仅依据调频效果进行死区的优化设置,忽略了系统参数的匹配性问题,可能造成系统频率不稳定;2) 未分析死区设定对储能容量配置的影响,缺乏经济可行性分析,对工程实践的参考价值仍待提升。

为此,本文提出一种基于改进死区设置的储能快速调频策略。首先,构建了考虑储能死区的电网调频分析模型,分析了高渗透率下传统调频死区的不足;其次,考虑不同阶段的调频需求,本文提出了一种新型死区设定方法,并定量分析了其稳定性,给出了储能的容量配置方法;最后,搭建了含储能及风电场的电力系统仿真模型,基于不同工况的净功率波动进行了仿真分析,验证了所提死区设定方法对改善调频性能的作用及系统稳定性结论。结合仿真运行数据进行了储能容量配置的分析,验证了所提方法的经济技术可行性。

1 考虑死区的储能调频特性分析

1.1 区域电网调频模型及频率变化特性

本文基于经典的低阶电力系统频率响应模型展开分析研究^[25-26],如图 1 所示。该模型可以较好地表征调频过程的机电暂态过程特性。其中: T_G 为火电机组的时间常数; T_{CH} 、 T_{RH} 和 F_{HP} 分别为汽轮机时间常数、再热器时间常数和再热器增益; $\Delta P_{RES}(s)$ 、 $\Delta P_G(s)$ 、 $\Delta P_L(s)$ 、 $\Delta f(s)$ 分别为新能源功率波动、机组参与调频的功率变化量、负荷功率波动量、电网频率偏差; R 为传统电源的单位调差系数,表征传统同步发电机的频率下垂响应特性; H_{sys} 和 D 分别为电网惯性时间常数和负荷阻尼系数; s 为拉普拉斯算子。

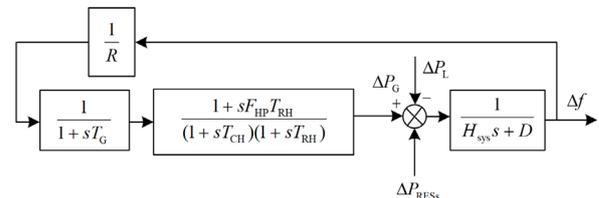


图 1 电力系统经典频率响应模型

Fig. 1 Classical frequency response model of power system

在图 1 所示调频模型基础上,建立考虑储能调频死区的系统频率响应模型,如图 2 所示。其中,储能单元采用一阶传递函数模型表征, T_{BES} 为时间常数, k_D 为储能一次调频下垂系数。

随着新能源渗透率的不断提升, 电力系统惯量水平下降, 频率波动愈发明显。图 3 给出了某省级电网在不同新能源渗透率下频率偏差的概率分布。由图 3 可知, 在日常运行中频率偏差大概集中在调频死区范围内。在传统电网中, 参与快速调频的同步发电机将会反复投入或退出调频状态, 这种小幅高频的出力变化将会导致更大的机械损耗, 不利于机组的运行经济性及服役寿命。此外, 随着新能源渗透率的提升, 频率偏差越过调频死区(本文取±0.033 Hz)的次数也随之明显增加。因此, 随着新能源比例的进一步提升, 频率偏差将会变大且越限的概率也会增加, 从而给调频机组带来更大的调频负担。

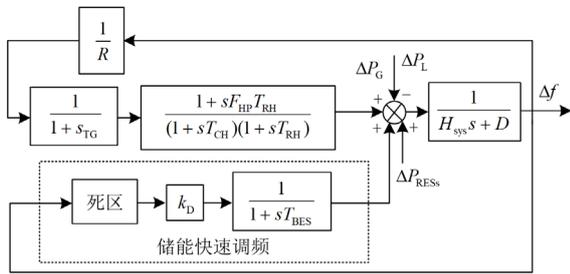


图 2 含储能快速调频死区的频率响应模型

Fig. 2 Frequency response model with dead band of energy storage fast frequency regulation

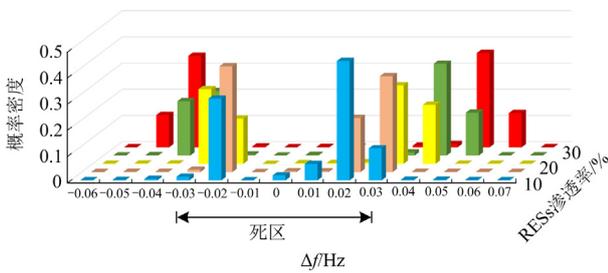


图 3 不同新能源渗透率下频率偏差的概率分布

Fig. 3 Probability distribution of Δf with different RESs penetration rate

1.2 传统死区的不足

传统调频死区设定方式由调度部门结合实际情况确定, 其阈值一般为 0.000 66 p.u.。常用的死区类型有以下两种, 即普通型死区(以下简称 I 型)和增强型死区(以下简称 II 型), 如图 4 所示。I 型死区又称为低精度死区, 其特征是: 死区内频率变化量等效响应量为 0, 超出死区阈值部分取实际变化量 Δf 与死区阈值的差作为系统调频控制的等效频率变量。这种设置方法将使得系统响应小于实际需要值, 相当于减小了频率变化量, 精度较低, 常用于调节精度较低的火电机组。I 型死区的数学表达式为

$$\Delta f_{out_I} = \begin{cases} f_{in} - f_{ref} - \Delta f_{db}, & (f_{in} - f_{ref}) > \Delta f_{db} \\ 0, & |f_{in} - f_{ref}| \leq \Delta f_{db} \\ f_{in} - f_{ref} + \Delta f_{db}, & (f_{in} - f_{ref}) < -\Delta f_{db} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δf_{out_I} 为经 I 型死区处理后的频率偏差量; f_{in} 为电网真实频率; f_{ref} 为电网参考频率; Δf_{db} 为频差死区, 一般设为 0.033 Hz。

II 型死区的特征是: 死区内频率变化量等效响应量为 0, 超出死区阈值部分, 取实际频率变化量作为系统调频控制的等效频率变量。相较于 I 型死区, 这种死区设置具有更高的精度及更好的调频效果。但调频出力在阈值附近存在阶跃变化, 非线性特征更明显, 对系统稳定性的影响也更大。 Δf_{out_II} 为经 II 型死区处理后的频率偏差量, II 型死区的数学表达式为

$$\Delta f_{out_II} = \begin{cases} f_{in} - f_{ref}, & |f_{in} - f_{ref}| > \Delta f_{db} \\ 0, & |f_{in} - f_{ref}| \leq \Delta f_{db} \end{cases} \quad (2)$$

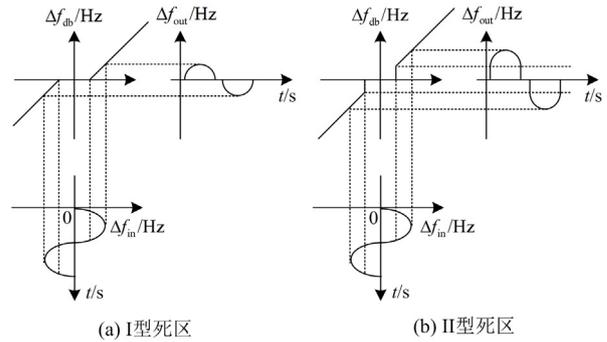


图 4 两种传统死区设定

Fig. 4 Settings of two different conventional dead zones

传统 I 型死区响应频率偏差的能力较弱、精度较低, 影响储能调频性能; 传统 II 型死区响应精度较高, 具有更好的调频效果, 但其非线性特征更明显, 对系统频率的稳定性影响较大, 易造成死区附近的频率振荡。两种死区在工程上均得到了广泛应用, 但均没有考虑调频的阶段需求。具体地, 当系统的净功率出现不平衡时, 频率从额定值偏离直至达到最大偏离量, 这一过程称为频率恶化阶段, 此时适当的死区设定是必要的, 可以避免调频电源的反复启动, 减小传统调频机组的机械损耗以及微小扰动造成的系统频率振荡; 当频率从最大偏离量向额定值恢复时, 这一过程为频率的恢复阶段, 此时无论 I 型死区还是 II 型死区, 均会在频率频差进入死区阈值范围内后, 停止调频电源的出力, 导致频率恢复过程中调频电源的有功输出中断, 从而造成频率的二次跌落, 使系统频率在死区阈值附近反复

穿越, 从而造成振荡, 影响系统稳定性。

2 改进的死区设置

2.1 本文所提新型死区

储能电池能够参与电网一次调频, 是由于储能动作准确性高且其响应速度快, 具备快速、精准的功率响应能力。正因其存在快速响应的能力, 所以储能电池的死区设置可以更加灵活, 也能兼顾调频能力, 防止储能频繁动作, 增加储能电池寿命。本文充分考虑了这些因素, 针对已有死区设置的不足, 本文提出一种新型调频死区设定方法。如图 5 所示, 在频率恶化阶段按照传统 II 型死区的设置方式设置死区, 能够在频率跌落到死区边界时迅速动作, 快速起到功率支撑的作用; 在频率恢复阶段不设置死区, 防止频率在死区边界时由于储能的不动作导致频率重新恶化。其数学表达式为

$$\Delta f_{\text{out}} = \begin{cases} 0, & \Delta f \cdot df/dt > 0 \text{ \& } |\Delta f| < \Delta f_{\text{db}} \\ \Delta f, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Δf_{out} 为经本文新型死区处理后的频率偏差量; Δf 为电网频率实际偏差量。

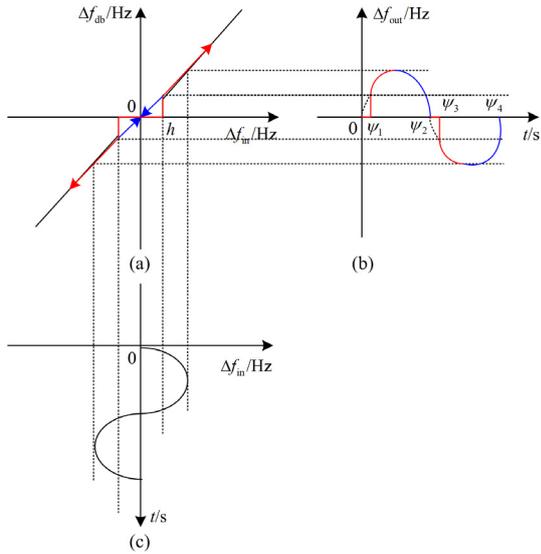


图 5 本文提出的储能调频新型死区

Fig. 5 Proposed dead zone for energy storage frequency regulation

新型死区在频率恶化阶段仍有动作阈值, 不会造成储能的频繁动作, 而在频率恢复阶段不设定动作阈值, 避免频率在阈值附近振荡的问题。图 6 给出了传统常规死区和本文新型死区的频率响应对比图, 用于展示不同死区设定对频率变化响应的差异。由图 6 可知, II 型死区和新型死区在频率恶化阶段的频率响应效果一致, 能够积极响应频率偏差, 相较于 I 型

死区存在明显优势; 在频率恢复阶段, 新型死区在频率恢复到死区阈值内时, 仍会响应频率偏差, 避免频率振荡波动。

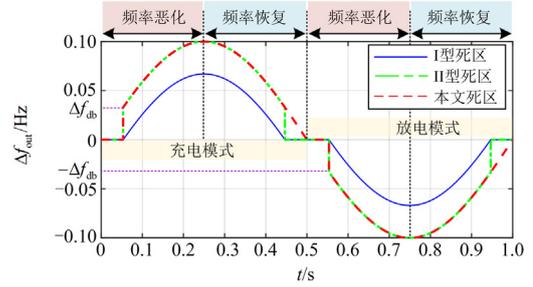


图 6 不同死区设定下的频率响应对比

Fig. 6 Response comparison of different dead zone settings

2.2 稳定性分析

新型死区基于死区非线性环节、采用非线性系统的频率特性分析法, 得到基于描述函数的非线性描述, 此时非线性系统就近似等效为一个线性系统, 可以根据线性系统中的频率分析法对系统进行频域分析。典型非线性系统的结构如图 7 所示, $R(s)$ 和 $C(s)$ 分别为系统输入、输出量, $E(s)$ 为系统输入与输出的误差, $G(s)$ 为系统线性部分的传递函数, 其中描述函数 $N(A)$ 是关于 A 的函数, 其表达式为

$$N(A) = \frac{B_1 + jA_1}{A} \quad (4)$$

其中,

$$B_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (n=1, 2, \dots) \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (n=1, 2, \dots) \quad (6)$$

式中: $y(t)$ 为非线性环节稳态输出信号; A 、 ω 分别为非线性环节正弦输入信号的幅值和角频率。

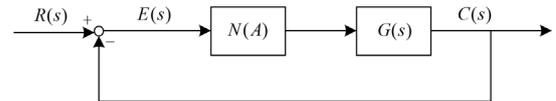


图 7 典型非线性系统结构形式

Fig. 7 Typical structure of nonlinear system

参考图 5(b) 中的新型死区动作示意图, 其中死区动作节点的取值为

$$\begin{cases} \psi_1 = \arcsin \frac{h}{A} \\ \psi_2 = \pi - \arcsin \frac{h}{A} \\ \psi_3 = \pi + \arcsin \frac{h}{A} \\ \psi_4 = 2\pi \end{cases} \quad (7)$$

式中: ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 、 ψ_4 为死区处理后不同区间频率变化量的区间端点; h 为死区阈值, 工程实践中一般取 0.033 Hz。

列写一个周期内 $y(t)$ 的函数表达式, 如式(8)所示。

$$y(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega t < \psi_1 \\ A \sin \omega t, & \psi_1 \leq \omega t \leq \psi_2 \\ 0, & \psi_2 < \omega t < \psi_3 \\ A \sin \omega t, & \psi_3 \leq \omega t \leq \psi_4 \end{cases} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(5)、式(6), 得到

$$B_1 = A - \frac{A}{\pi} \psi_1 + \frac{h}{\pi} \cos \psi_1 \quad (9)$$

$$A_1 = \frac{A}{2\pi} [\cos 2\psi_1 - 1] \quad (10)$$

将式(9)、式(10)代入式(4), 推导得到新型死区的描述函数为

$$N(A) = 1 - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{h}{A} + \frac{h}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{A}\right)^2} - j \frac{1}{\pi} \left(\frac{h}{A}\right)^2 \quad (11)$$

将图 2 所示含储能系统频率响应控制框图转换为图 8 所示的标准形式, 这样的标准形式便于分析和提取线性部分, 其中 $G_{ES}(s)$ 和 $G_T(s)$ 分别为储能、火电机组的传递函数。进而根据等效控制模型得到系统的闭环特征方程为

$$1 + \frac{k_D R G_{sys}(s) G_{ES}(s)}{R + G_T(s) G_{sys}(s)} N(A) = 1 + G(s) N(A) = 0 \quad (12)$$

式中: $G_{sys}(s)$ 为系统的传递函数; $G(s)$ 为线性部分传递函数, 其组成式各部分定义为

$$G_{sys}(s) = \frac{1}{H_{sys}s + D} \quad (13)$$

$$G_T(s) = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_G)(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (14)$$

$$G_{ES}(s) = \frac{1}{1 + sT_{BES}} \quad (15)$$

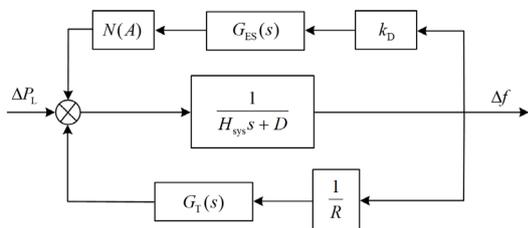


图 8 含储能快速调频死区的等效控制模型

Fig. 8 Equivalent control model with dead band of energy storage fast frequency regulation

根据非线性系统的奈奎斯特稳定判据可知, 当负倒描述函数曲线与线性部分的奈氏曲线有交点

时, 系统不稳定。取表 1 中的参数数值^[26], 由此计算得到储能的下垂系数稳定临界值为 312.5。当 $k_D = 312.5$ 时, 描述函数 $-1/N(A)$ 与线性部分奈奎斯特曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 在 A 逐渐变大的过程中, $-1/N(A)$ 从无穷远处达到最大值 -1, 而其与线性部分的曲线相交表征着非线性部分将导致系统产生不稳定的自激振荡。

表 1 相关参数数值设置

Table 1 Related parameter value settings			
参数	取值	参数	取值
T_G	0.3	T_{BES}	0.05
T_{RH}	14	H	6.5
T_{CH}	0.5	D	0.012
F_{HP}	0.4	R	0.02

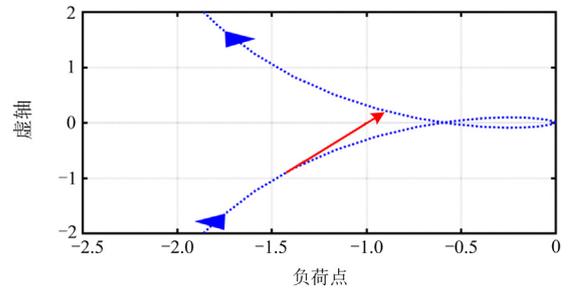


图 9 描述函数与奈奎斯特曲线 ($k_D = 312.5$)

Fig. 9 Description function and Nyquist curve $k_D = 312.5$

2.3 储能功率容量配置

1) 额定功率配置

设储能单元需要配置的额定功率为 P_B , 配置的额定功率需满足该调频时段 T 内的最大功率吞吐, 设时段 T 内调频最大放电功率为 $P_{dis}(t)$, 最大充电功率为 $P_{ch}(t)$, 并以储能放电为正功率流向, 考虑储能双向变流器的电能损耗及储能自身的充放电效率, 得到储能额定功率配置公式为

$$P_B = \max \left\{ \min_{t \in (t_0, t_0+T)} P_{ch}(t) \lambda_{DC} \lambda_{AC} \lambda_C, \frac{\max_{t \in (t_0, t_0+T)} P_{dis}(t)}{\lambda_{DC} \lambda_{AC} \lambda_D} \right\} \quad (16)$$

式中: t_0 为 T 时段的初始值; λ_{DC} 和 λ_{AC} 分别为 DC/DC 和 DC/AC 变换器的效率; λ_C 和 λ_D 分别为储能元件的充电和放电效率。

2) 额定容量配置

设储能的额定容量为 E_B , 储能容量配置需要考虑储能自身的 SOC, 定义储能元件的 SOC, 根据定义有

$$E_{SOC}(t) = \frac{E(t)}{E_B} \times 100\% \quad (17)$$

$$E_{\text{SOC}}(t) = E_{\text{SOC}}(0) - \frac{\int_0^t P_{\text{ES}}(t) dt}{E_B} \quad (18)$$

式中： $E_{\text{SOC}}(t)$ 为 t 时刻储能元件的SOC； $E(t)$ 为 t 时刻储能元件的剩余容量； $P_{\text{ES}}(t)$ 为 t 时刻的充/放电功率； $E_{\text{SOC}}(0)$ 为储能参考SOC。SOC需要满足如式(19)的约束。

$$E_{\text{SOC}}^{\min} \leq E_{\text{SOC}}(t) \leq E_{\text{SOC}}^{\max} \quad (19)$$

式中， E_{SOC}^{\max} 、 E_{SOC}^{\min} 分别为储能安全运行最大、最小SOC。

将式(18)代入式(17)和式(19)，可以得到式(20)。

$$\begin{cases} E_B \geq \frac{\max \int_0^T P_{\text{ES}}(t) dt}{E_{\text{SOC}}(0) - E_{\text{SOC}}^{\min}} \\ E_B \geq \frac{-\min \int_0^T P_{\text{ES}}(t) dt}{E_{\text{SOC}}^{\max} - E_{\text{SOC}}(0)} \end{cases} \quad (20)$$

因此额定容量应满足：

$$E_B \geq \max \left\{ \frac{\max \int_0^T \frac{P_{\text{ES}}(t)}{\lambda_{\text{DC}} \lambda_{\text{AC}} \lambda_{\text{D}}} dt}{E_{\text{SOC}}(0) - E_{\text{SOC}}^{\min}}, \frac{-\min \int_0^T P_{\text{ES}}(t) \lambda_{\text{DC}} \lambda_{\text{AC}} \lambda_{\text{C}} dt}{E_{\text{SOC}}^{\max} - E_{\text{SOC}}(0)} \right\} \quad (21)$$

由式(21)可得满足要求的最小储能容量，以其为额定容量进行配置。

3 仿真验证

本文基于 DIgSILENT/PowerFactory 平台搭建含新能源接入的区域电力系统仿真模型，如图 10 所示。系统包含一个风电场和若干个同步发电机，其中风电场由 25 个 5 MW 的风机组成，切入、切出和额定风速分别为 6.4 m/s、18 m/s、11 m/s，通过改变风速从而改变风电场的出力，进而调节系统的新能源渗透率；4 台同步发电机组构成系统的主要电源，容量均为 200 MVA，发电机调速系统参数

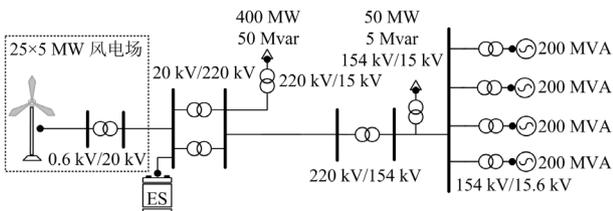


图 10 含新能源仿真测试电力系统模型

Fig. 10 Simulation test model of power system with renewable energy

设置同 2.2 节表 1；两个恒功率负荷分别在不同母线处接入系统，功率分别为 400 MW 及 50 MW；等效规模化储能电站安装于 20 kV 母线处。

针对连续负荷扰动工况，引入具有代表性的调频评价指标： $\Delta\varphi_{\text{max}}$ 、 Δf_{max} 、 Δf_{min} 、 Δf_{rms} ，分别为扰动后的最大频率偏差变化率、最大频率偏差、最小频率偏差、频率偏差均方根值。其中 Δf_{rms} 定义为

$$\Delta f_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_0)^2} \quad (22)$$

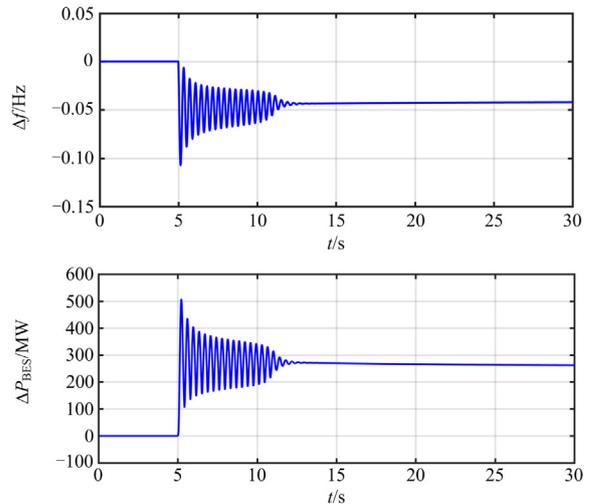
式中： f_i 为采样点 i 的频率偏差； f_0 为额定频率 50 Hz； n 为总采样点数。式(22)表征了仿真窗口内频差变化的均方根，根据其含义可知，这个指标取值越小，表示系统频率越接近参考值，即调频效果越好。

为了进一步表征不同方法对频率动态变化过程的提升效果，定义频率变化量的绝对值积分(Δf_{int})为表征指标，如式(23)所示。其物理含义是：对于具有更小波动范围的频率变化，其频差曲线与时间轴围成的图形面积应有更小值。

$$\Delta f_{\text{int}} = \int_{t_0}^{t_0+T} |\Delta f(t)| dt \quad (23)$$

3.1 阶跃负荷扰动工况仿真分析

系统在 0 s 时建立稳态，在 5 s 时负荷阶跃增加 0.3 p.u.，系统频率发生变化。由前面的理论分析可知，本文新型死区下的储能参与调频时的下垂系数最大边界值为 312.5，当 $k_D = 312.5$ 时，系统在遭受负荷扰动后，会出现频率波动并逐渐恢复稳态；但当 $k_D = 313$ 时，系统就会出现振荡而逐渐失稳的现象。仿真结果如图 11 所示，其中 $\Delta P_{\text{BES}}(s)$ 为储能参与调频的功率变化量(以放电方向为正)。由图 11 可知，当 $k_D = 312.5$ 时，系统在第 5 s 发生频率跌落，



(a) $k_D = 312.5$

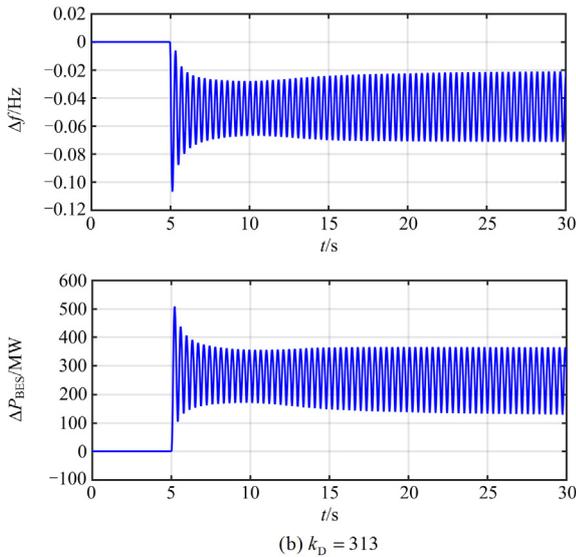


图 11 阶跃扰动下储能不同调频控制增益时的仿真曲线
Fig. 11 Simulation result of energy storage with different frequency regulation control gain under step disturbance

频率快速跌落到最低点至 -0.107 Hz 并逐渐恢复稳态, 储能出力此时也达到最大值 508 MW; 当 $k_D = 313$ 时, 系统频率快速跌落至最低点 -0.108 Hz 后呈现等幅振荡并逐渐失稳, 与理论分析结果一致。

3.2 连续负荷扰动工况仿真分析

连续扰动是系统中更为常见的运行工况。本节采用连续净功率扰动, 记作 $\Delta P_{net}(t)$, 用以模拟真实的电网中的一次调频处理的负荷波动, 符合连续高频小幅变化的特征, 如图 12 所示。

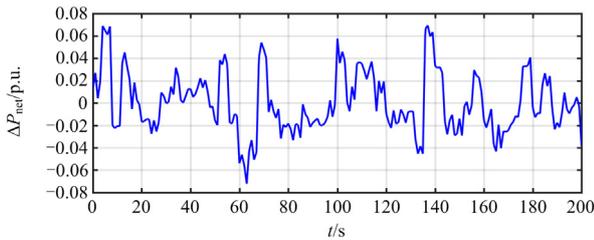


图 12 连续扰动负荷变化

Fig. 12 Continuous disturbance load variation

基于图 10 的新能源仿真测试电力系统模型, 当系统建立稳态时, 若此时风机发电量占全部发电量的 20%, 即渗透率为 20%, 此时风机运行在最大功率点跟踪(maximum power point track, MPPT)模式。为了定量分析对比不同新能源渗透率下的储能调频效果, 风场不参与频率响应。需指出的是, 通过提高风速实现风电渗透率的增加, 同时对应削减同步发电机的发电量。

图 13、图 14 为不同新能源渗透率下的频率变化情况, 此时储能调频系数 $k_D=30$ 。由图 13(a)、图 14(a)可知, I 型死区的最大频率偏差为 0.15 Hz, II 型死区的最大频率偏差比 I 型死区降低了 50%, 但仍高于新型死区。需指出的是, II 型死区下的频率在死区(± 0.033 Hz)附近振荡, 这是因为系统频率恢复到死区阈值附近时, II 型死区的等效频差按设定变为 0 , 导致储能停止出力, 而此时频率尚未恢复至参考值, 由于储能停止出力, 则频率出现二次跌落而恶化, 从而跌出死区外, 则使得储能重新开始出力支撑频率, 如此往复, 造成频率在死区附近反复振荡变化。

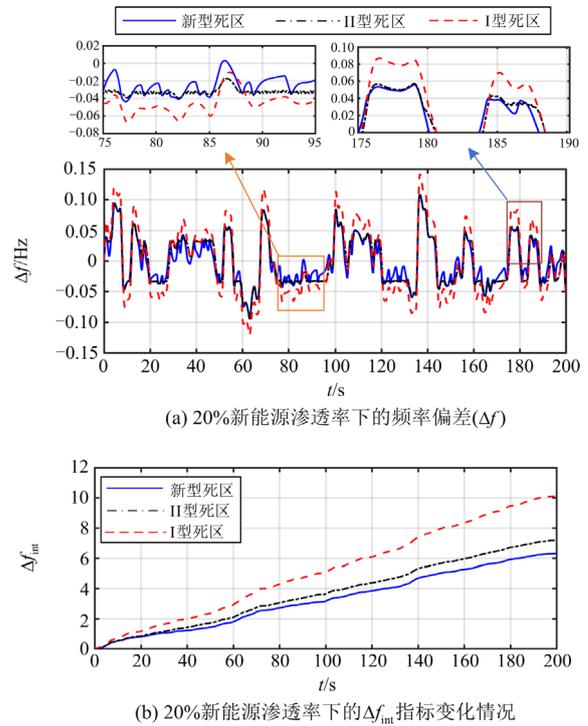
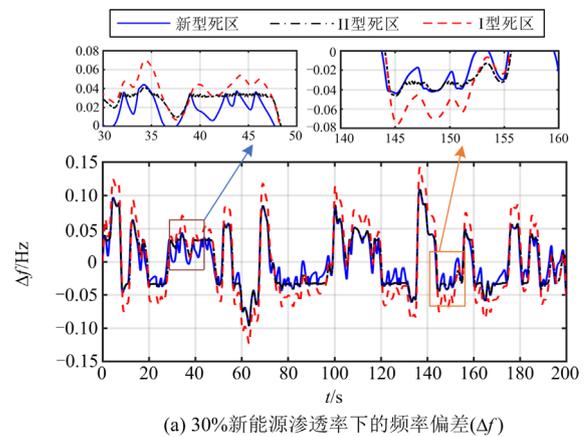
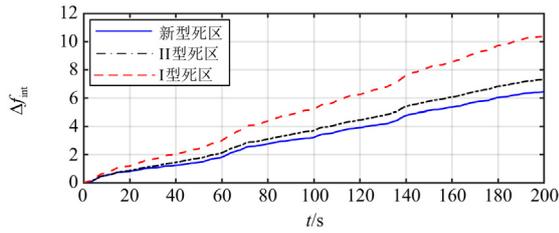


图 13 20% 新能源渗透率下的频率变化

Fig. 13 Frequency variation under 20% RESs penetration rate



(a) 30% 新能源渗透率下的频率偏差(Δf)



(b) 30%新能源渗透率下的 Δf_{int} 指标变化情况

图 14 30%新能源渗透率下的频率偏差

Fig. 14 Frequency variation under 30% RESs penetration rate

引入积分指标 Δf_{int} 更直观地表征频率连续变化动态情况, 由图 13(b)及图 14(b)可见, 随着运行时间的增加, 本文新型死区下的 Δf_{int} 始终小于另外两种传统死区(I 型死区和 II 型死区), 分别下降了 12.2%和 37.5%。这表明在连续扰动的工况下, 面对调频需求, 本文所提新型死区可以有效减小频率的

波动, 改善调频性能。

此外, 由图 15 给出的不同新能源渗透率下的系统频率波动分布可见, 采用本文所提新型死区后, 系统频率波动多集中在死区之内, 越限概率较小; 采用 II 型死区时频差多集中于死区附近, 系统越限风险较大, 调频电源将处于反复频繁启动状态; 采用 I 型死区时, 由于调频出力较小, 则频差多分布于死区之外, 表示频率波动较为明显, 频率质量为 3 种方法中最差。以 20%新能源渗透率为例, 采用 I 型死区后, 系统频率采样中有接近 8000 个样本点在死区之外; 采用 II 型死区后, 有近 4000 个频率样本点集中在死区附近; 采用所提新型死区后, 系统频率多分布在死区之内, 这表征了本文新型死区可将系统频率波动较好地控制在死区范围内, 减小传统机组的调频负担, 增强系统频率稳定性。

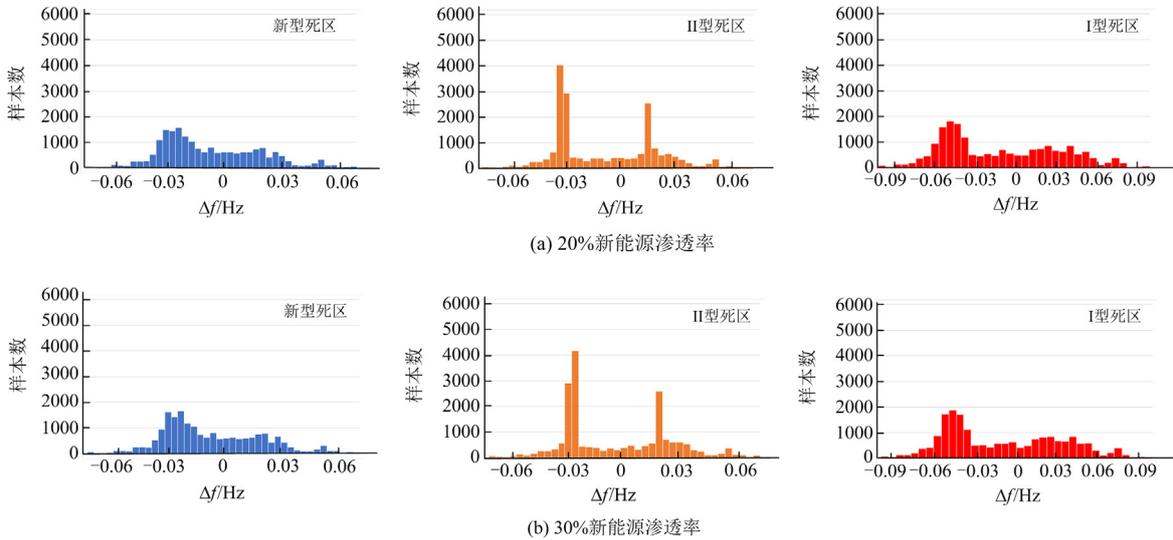


图 15 不同新能源渗透率下不同调频死区的频率波动分布

Fig. 15 Frequency variation distribution with different RESs penetration rate

图 16、图 17 为不同新能源渗透率下的储能出力。由图可知, 随着新能源渗透率的上升, 储能出力变化量也随之增加, 含高比例新能源的电网确实给电网带来了较大的冲击, 增加了系统调频压力; 同时, 本文所提新型死区下的储能出力变化量大于传统常规死区。以 30%新能源渗透率为例, II 型死区下的储能利用率相较于 I 型死区高 8.7%, 但略低于新型死区。由此可见, 本文新型死区进一步挖掘了储能的调频潜力, 提升了储能利用率。

表 2 和表 3 为不同新能源渗透率下定量的调频性能分析, 由式(22)、式(23)定义的调频指标表征。由定量数据可见, 在新能源高渗透率下, 新型死区

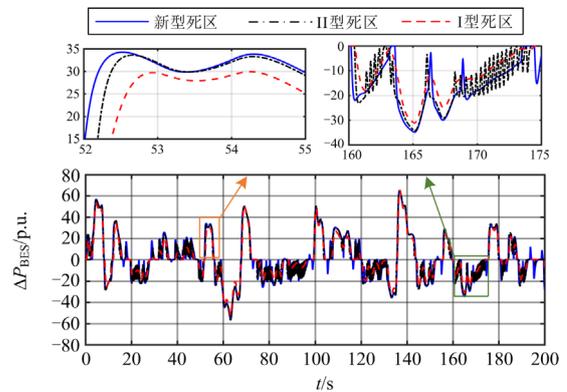


图 16 20%新能源渗透率下的储能出力

Fig. 16 Energy storage output under 20% RESs penetration rate

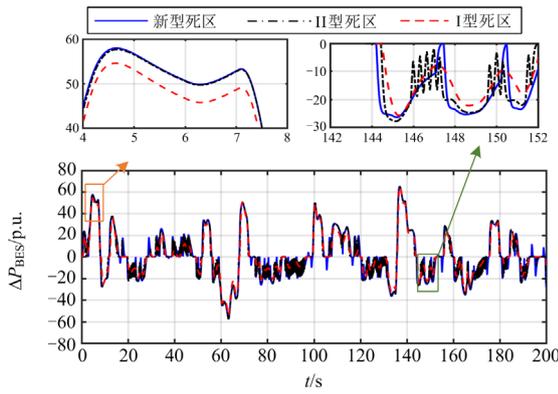


图 17 30%新能源渗透率下的储能出力

Fig. 17 Energy storage output with 30% RESs penetration rate

较另外两种死区的调频优势明显, 以 20%新能源渗透率情况为例, 4 个指标较 II 型死区分别依次下降了 12.2%、7.3%、0.83%、6.2%, 可见本文所提新型死区对调频有较好的改善效果。

表 2 连续扰动工况下的调频指标(20%新能源渗透率)

Table 2 Frequency regulation index with continuous disturbance (20% RESs penetration rate)

指标	Δf_{int}	$\Delta \varphi_{max}$	Δf_{max}	Δf_{rms}
新型死区	6.322	0.203	10.79×10^{-2}	3.79×10^{-2}
II 型死区	7.201	0.219	10.88×10^{-2}	4.04×10^{-2}
I 型死区	10.120	0.275	14.22×10^{-2}	5.77×10^{-2}

表 3 连续扰动工况下的调频指标(30%新能源渗透率)

Table 3 Frequency regulation index with continuous disturbance (30% RESs penetration rate)

指标	Δf_{int}	$\Delta \varphi_{max}$	Δf_{max}	Δf_{rms}
新型死区	6.432	0.204	10.83×10^{-2}	3.86×10^{-2}
II 型死区	7.312	0.221	10.91×10^{-2}	4.09×10^{-2}
I 型死区	10.371	0.279	14.24×10^{-2}	5.89×10^{-2}

3.3 储能功率的容量配置

考虑技术可行性和工程实用, 基于连续扰动工况结果对不同死区设置进行了储能功率、容量配置。表 4 对比了 20%和 30%渗透率下的储能功率、容量配置结果。由表 4 可知, 在 20%新能源渗透率下, 新型死区配置的功率为 3 种死区中最小, 配置功率为 79.64 MW, I 型死区和 II 型死区所配置的功率均明显高于新型死区的配置功率。从容量配置结果来看, II 型死区配置的容量为 0.591 MWh, 为 3 种死区中最大, 这是由于 II 型死区频率会在死区阈值附近振荡, 长时间尺度来看调频效果劣于新型死区, 需要更多调频能量维持频率的稳定; 而 I 型调频死区则由于需要响应的等效频差数值较小, 因此调频

能量需求为最低。新型死区下的频率波动范围最小, 储能配置的容量为 0.584 MWh, 介于传统两类死区之间。

表 4 储能功率容量配置结果

Table 4 Configuration result of energy storage power capacity

新能源渗透率/%	配置类型	死区类型		
		新型死区	II 型死区	I 型死区
20	功率/MW	79.64	80.31	80.53
	容量/MWh	0.584	0.591	0.545
30	功率/MW	79.91	80.48	80.63
	容量/MWh	0.602	0.607	0.566

注: 容量结果数量级对应 200 s 时长。

由表 4 可知, 随着新能源渗透率的上升和同步发电机发电量的减少, 参与调频的储能功率及容量配置也随之增加。总之, 在相同新能源渗透率下, 新型死区设定并不会增加储能的容量配置, 但可以带来更好的调频效果, 使频率变化量超越死区阈值的概率更小, 获得更好的调频效果。

4 结论

为满足新型电力系统日益提升的调频需求, 本文提出一种适用于高比例新能源接入的电网储能死区优化设定及调频控制策略, 主要工作及结论总结如下所述。

1) 构建了含储能调频死区的区域电网频率响应模型; 分析了随着新能源比例提升, 电网频率波动的变化趋势, 论证了提升储能调频响应性能的必要性; 分析了传统调频死区的特征和不足之处, 为改进死区奠定基础。

2) 提出了分调频阶段的新型死区设定方法及其特征; 详细推导了新型死区的描述函数方程, 并进一步构建了含死区非线性环节的系统调频分析模型; 在此基础上, 对含有储能调频死区的电网系统稳定性进行了定量分析, 确定了储能下垂系数的稳定边界阈值, 用以指导调频关键参数的整定。

3) 搭建含风场和同步发电机的区域电力系统仿真模型, 对所提死区进行了对比仿真验证。结果表明, 所提新型死区设定方法可以有效提升调频效果, 降低系统在死区阈值附近的频率波动概率, 提升系统频率的稳定性, 适用于未来新能源渗透率不断提升的电网需求, 且无需增加储能的容量配置负担, 具有经济技术可行性。

未来新能源场站的储能配置比例将逐步提升, RESs 电源侧储能将从基本的平抑功率波动向协同 RESs 电源参与辅助服务方面进行功能拓展。今后将结合不同 RESs 的有功运行特性, 进一步研究储能

与 RESs 电源协同参与调频调峰的调度控制方法。

参考文献

- [1] 陈长青, 李欣然, 杨祥, 等. 基于风机调频特性的储能配置方法及协调运行策略[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 96-103.
CHEN Changqing, LI Xinran, YANG Yang, et al. Energy storage configuration method and coordinated operation strategy based on wind power frequency-regulation characteristics[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 96-103.
- [2] 苏大威, 郝雨辰, 高水朋, 等. 基于储能惯性响应的电网紧急频率控制方法[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(6): 640-649.
SU Dawei, HAO Yuchen, GAO Shuipeng, et al. Grid emergency frequency control method based on energy storage inertial response[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 640-649.
- [3] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [4] 朱介北, 王云逸, 仲悟之, 等. 基于超级电容的新能源惯量-阻尼-电抗综合模拟控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 135-143.
ZHU Jiebei, WANG Yunyi, ZHONG Wuzhi, et al. Composite inertia-damping-impedance emulation control scheme for renewable energy sources based on supercapacitor[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 135-143.
- [5] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4342.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source network load storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4342.
- [6] 程杉, 傅桐, 李津洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1-12.
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning of distribution network with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [7] 周霞, 刘懿诗, 戴剑丰, 等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 30-44.
ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30-44.
- [8] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3006.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3006.
- [9] 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.
- [10] 张靖, 张志文, 胡斯佳, 等. 独立微电网风储协同调频的功率柔性分配策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3767-3780.
ZHANG Jing, ZHANG Zhiwen, HU Sijia, et al. A flexible power distribution strategy with wind turbine generator and energy storage for frequency regulation in isolated microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3767-3780.
- [11] 王瑞明, 徐浩, 秦世耀, 等. 风电场一次调频分层协调控制研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 50-58.
WANG Ruiming, XU Hao, QIN Shiyao, et al. Research and application on primary frequency regulation of wind farms based on hierarchical coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 50-58.
- [12] 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 Jizhao, 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.
- [13] 王鹤, 丁晨, 范高锋, 等. 基于 AGC 调频分区控制的光储联合系统参与市场投标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 121-131.
WANG He, DING Chen, FAN Gaofeng, et al. Photovoltaic and storage system participating in the electricity market based on AGC zoning control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 121-131.

- [14] 薛飞, 李宏强, 田蓓, 等. 储能辅助的孤岛微网自适应事件触发二次调频策略[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 196-205.
XUE Fei, LI Hongqiang, TIAN Bei, et al. Adaptive event-triggered secondary frequency control in islanded microgrids with auxiliary energy storage systems[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 196-205.
- [15] 杨帆, 王维庆, 王海云, 等. 计及储能放电折损的风储一次调频配置优化方法研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 416-423.
YANG Fan, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research on optimization method of primary frequency regulation configuration of wind-storage system considering discharge loss of energy storage[J]. Acta Energy Solar Sinica, 2022, 43(10): 416-423.
- [16] 徐波, 俞向栋, 杨逸欣, 等. 基于多智能体系统的分布式风储协同频率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 13-24.
XU Bo, YU Xiangdong, YANG Yixin, et al. Distributed wind storage cooperative frequency control strategy based on multi-agent system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 13-24.
- [17] 李铁成, 闫鹏, 胡雪凯, 等. 光伏高占比系统中储能辅助调频控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 282-291.
LI Tiecheng, YAN Peng, HU Xuekai, et al. Research on energy storage assisted frequency modulation control strategy in photovoltaic high duty cycle system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(8): 282-291.
- [18] 李培强, 丰云鹤, 李欣然, 等. 考虑超短期负荷预测的储能电池参与电网一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 87-93, 148.
LI Peiqiang, FENG Yunhe, LI Xinran, et al. Control strategy for energy storage battery participating in primary frequency regulation of power grid considering ultra-short-term load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 87-93, 148.
- [19] 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.
- [20] 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-adaptation control strategy of energy storage batteries participating in primary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3897-3908.
- [21] 严干贵, 王铭岐, 段双明, 等. 考虑荷电状态恢复的储能一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 52-61.
YAN Gangui, WANG Mingqi, DUAN Shuangming, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage considering state of charge recovery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 52-61.
- [22] 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.
- [23] 朱武, 董艺, 高迎迎, 等. 考虑调频死区与荷电状态的储能参与电网一次调频控制策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4391-4399.
ZHU Wu, DONG Yi, GAO Yingying, et al. Control strategy of energy storage in primary frequency regulation of power grid considering dead zone and state of charge[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(11): 4391-4399.
- [24] LI S, XU Q, XIA Y, et al. Comprehensive setting and optimization of dead-band for BESS participate in power grid primary frequency regulation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 141: 1-14.
- [25] ANDERSON P, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [26] SHI Q, LI F, CUI H. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6355-6367.

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-04-12

作者简介:

贺悝(1991—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为储能高效利用、新能源电力系统分析与控制; E-mail: helifamily@foxmail.com

郭罗权(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能调频方法及应用; E-mail: guoluoquan@foxmail.com

谭庄熙(1990—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为储能技术与新能源并网。E-mail: tanzhuangxi@foxmail.com

(编辑 魏小丽)