

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.006

基于模糊逻辑控制的混合储能辅助风电调频的 双层优化配置模型

王岑峰¹, 王 蕾¹, 孙飞飞¹, 胡哲晟¹, 唐 早², 刘 佳²

(1. 国网浙江电力有限公司经济技术研究院, 杭州 311500; 2. 杭州电子科技大学, 杭州 310038)

摘要: 基于风电场站实际调频需求, 展开混合储能的优化配置计算能实现降低调频服务成本和混合储能投资成本的兼顾。故而, 文中提出了一种基于模糊逻辑预测控制的混合储能辅助风电调频的双层优化配置模型。上层模型由计及混合储能投资成本, 运维成本, 替换利用成本, 电量偏差成本, 风电调频收益以及促进新能源消纳收益的六因素优化配置模型, 为下层模型提供混合储能功率与容量限制; 下层模型构建了基于模糊逻辑控制的单步长混合储能协同风电调频的能量优化分配策略, 缩短策略计算时间同时避免了电池储能的频繁充放电行为, 为上层模型提供运行成本与收益的核算依据, 并采用智能算法对模型进行优化求解。最后, 基于浙江省某风电场的实际运行数据进行仿真分析, 结果证明了文中所提方法的有效性与经济性。

关键词: 混合储能; 风电; 调频; 模糊逻辑控制

Two-layer Optimal Configuration Model of Hybrid Energy Storage Assisted Wind Power Frequency Regulation Based on Fuzzy Logic Control

WANG Cenfen¹, WANG Lei¹, SUN Feifei¹, HU Zhesheng¹, TANG Zao², LIU Jia²

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311500, China;

2. Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310038, China)

Abstract: Based on the actual frequency regulation requirements of wind farm stations, the development of optimal configuration calculation of hybrid energy storage can achieve the balance between reducing the cost of frequency regulation service and the investment cost of hybrid energy storage. Therefore, a kind of two-layer optimal configuration model for hybrid energy storage assisted wind power frequency regulation based on fuzzy logic predictive control is proposed. The upper layer model consists of such six factors as hybrid energy storage investment cost, operation and maintenance cost, replacement and utilization cost, electricity deviation cost, wind power frequency regulation benefit and promotion of new energy consumption benefit so to provide constraints on the power and capacity of hybrid energy storage in the lower model. The lower layer model constructs an energy optimization allocation strategy using fuzzy logic control for single-step hybrid energy storage and wind power frequency regulation, which significantly reduces the calculation time required for the strategy and, at the same time, eliminates the need for frequent charging and discharging of battery energy storage. Moreover, it provides the basis for accounting the operating cost and benefit of the upper layer model. Additionally, the intelligent algorithms are used to optimize and solve the model. Finally, the simulation and analysis are performed based on the actual operation data of one wind farm in Zhejiang province, and both effectiveness and economic performance of the method proposed in the paper are verified by the result.

Key words: hybrid energy storage; wind power; frequency modulation; fuzzy logic control

收稿日期: 2024-04-23; 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 国网浙江省电力有限公司经济计划研究院专项项目(JY02202320)。

Project Supported by Economic and Technological Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Project (JY02202320).

0 引言

随着大规模风电机组的并网接入,电网对新能源的承载能力面临严峻的挑战,电网难以仅依靠系统中的传统机组实现对风电的安全稳定消纳^[1-2]。2018年,国家能源局华东监管局发布关于征求对《华东区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》的意见函^[3],明确了风、光等新能源也将成为辅助服务参与主体,面临调频服务补偿考核。然而风电出力的间歇性和波动性,使其可能面临高昂的调频补偿考核。储能系统具有电力的时空迁移能力,可以显著提高风电机组的调频性能,降低调频补偿考核成本^[4-5]。而混合储能系统较单一储能更具有经济性^[6],故而亟需展开基于风电调频需求的混合储能系统的优化配置的研究,使其兼顾调频效果的同时有效的降低投资成本。

现有关于混合储能系统辅助调频的容量配置问题研究可分为大致两类:①单层规划模型^[7-10]。该方法通常采用滤波器^[7-8],经验模态分解法^[9-11]等方法,对调频信号进行解构,采用混合储能分别对高、低频信号进行适配,以最小化投资成本为目标优化确定混合储能容量配置。②双层规划模型^[12-16],该方法兼顾了混合储能规划与调频运行需求。文[12]构建了混合储能双层调频优化配置模型,上层模型为最小化含全生命周期成本收益的综合调频成本的配置模型,下层模型计及荷电状态恢复的混合储能调频控制策略。文[15]提出了一种储能容量规划与综合能源调度运行耦合的双层协同优化

配置模型,通过优化计算可获得最大化系统收益的混合储能配置方案与系统运行策略。文[17]通过对调频运行的仿真计算得到风储系统的收益,以风储系统收益最大化为目标,采用智能算法优化求解得到混合储能的配置方案。然而,上述混合储能优化配置策略在运行策略制定过程中,都考虑的多步长协调控制行为,其计算耗时相对长,需要的信息多,对秒级的调频策略实用性相对较差^[18]。故而需要一种满足实际运行方案的配置策略,可以更好的捕捉混合储能的最优容量。

综上,文中提出了一种基于模糊逻辑控制的混合储能辅助风电调频的双层优化配置模型。首先,对风电—混合储能的调频系统进行介绍,明确了风储系统的调频框架与逻辑;其次提出了风电—混合储能的双层优化配置模型,上层模型构建了计及多维度成本与收益的优化配置模型,下层模型采用模糊逻辑控制驱动的频率调节分配策略,实现频率调节的快速近似优化控制;最后以浙江省某风电场站实际运行数据验证文中方法的有效性和经济性。

1 风电—混合储能调频系统

由于风电功率的随机性与波动性,使得其不具备足够长时间的频率调节能力。而储能系统具备电力的时空迁移,可以有效弥补风电功率随机波动的短板。故而,风电—混合储能系统能有实现有效的AGC调频信号追踪,参与到电网的频率调节中去。其中,风电—混合储能系统的频率调节框架见图1。

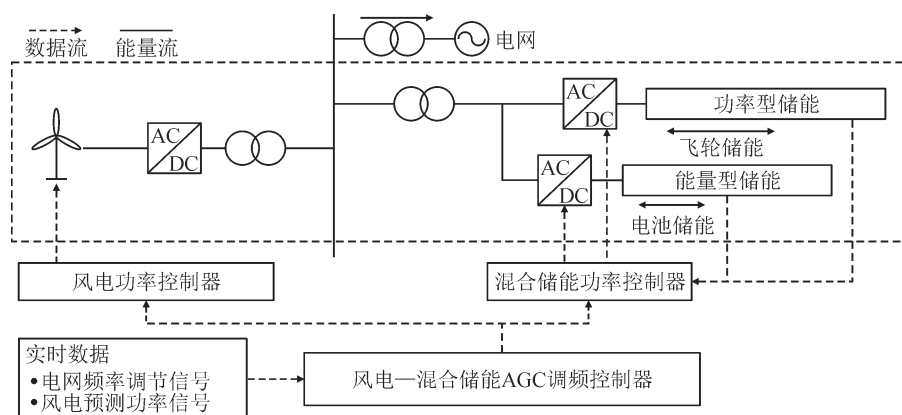


图1 风电—混合储能系统结构及其调频控制框架

Fig. 1 Structure of wind power-hybrid energy storage system and its frequency regulation control framework

风电—混合储能系统利用混合储能的充放电行为实现主动干预风电机组的频率调节能力。调度部门通过分析全网的实时运行情况,实时生成各个发电机组的AGC频率调节信号发送到风电场

站。然后,该AGC信号由风电—混合储能AGC调频控制器结合风电预测功率信号进行优化计算后,分别发送给风电功率控制器和混合储能功率控制器实施执行,确保每个调频资源的最佳分配。其中,

对于能量型储能的充放电功率安排,需要结合 AGC 信号的波动情况,采用模糊逻辑控制器进行粗设置后结合优化控制算法进行求解。

2 双层优化配置模型

文中所提针对混合储能辅助风电机组的调频配置问题为两阶段优化模型,上层模型为投资层,从投资成本,运维成本,替换利用成本,电量偏差成本,风电 AGC 调频收益以及促进新能源消纳收益 6 个方面,展开混合储能的效益测算。上层模型的决策变量为电池储能的投资功率和容量以及飞轮储能的投资功率和容量。下层模型为运行层,以单时间段调节效益最优为目标,通过对典型日调频策略的优化计算与仿真模拟,得到对应混合储能投资策略下的调频改善情况,同时为上层的投资效益计算提供依据。

2.1 上层规划模型

为解决储能成本过高和风电机组本身的经济效益导致储能配置结果偏低进而达不到提高调频效果的问题,文中在混合储能优化配置上层模型中设置目标函数,具体为风电—混合储能全寿命周期内成本与收益之差。其中,成本包括混合储能全寿命周期成本,风电—混合储能 AGC 调节其他成本,收益包括风电调频里程的直接收益和降低风电调频惩罚,促进风电消纳的间接收益。因此,目标函数的数学表示为:

$$F = \min C_{\text{inv}} + C_{\text{om}} + C_{\text{scr}} + C_{\text{pe}} - B_{\text{AGC}} - B_{\text{cum}} \quad (1)$$

$$C_{\text{inv}} = C_{\text{B,P}}^{\text{inv}} p_{\text{B}}^{\text{rated}} + \sum_{i=0}^n C_{\text{B,E}}^{\text{inv}} e_{\text{B}}^{\text{rated}} (1+r)^{-\left(\frac{iT_{\text{lc}}}{n+1}\right)} + \quad (2)$$

$$C_{\text{F,P}}^{\text{inv}} p_{\text{F}}^{\text{rated}} + C_{\text{F,E}}^{\text{inv}} e_{\text{F}}^{\text{rated}} \\ C_{\text{om}} = (C_{\text{B,P}}^{\text{OM}} p_{\text{B}}^{\text{rated}} + C_{\text{F,P}}^{\text{OM}} p_{\text{F}}^{\text{rated}}) [(1+r)^{T_{\text{lc}}} - 1] / [r(1+r)^{T_{\text{lc}}} - 1] + \sum_{t=1}^{T_{\text{lc}}} (C_{\text{B,E}}^{\text{OM}} w_{\text{B},t} + C_{\text{F,E}}^{\text{OM}} w_{\text{F},t}) (1+r)^{-t} \quad (3)$$

$$C_{\text{scr}} = C_{\text{B,P}}^{\text{SCR}} p_{\text{B}}^{\text{rated}} (1+r)^{-T_{\text{lc}}} + \sum_{t=1}^{n+1} C_{\text{B,E}}^{\text{SCR}} e_{\text{B}}^{\text{rated}} (1+r)^{-iT_{\text{lc}}/(n+1)} \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_{\text{pe}} = \sum_{t=1}^{T_{\text{lc}}} C_{\text{pe}} w_{\text{pe},t} (1+r)^{-t} \\ w_{\text{pe},t} = \sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{i=1}^T (p_{\text{pe},t,i}) \end{cases} \quad (5)$$

$$B_{\text{AGC}} = B_{\text{AGC}}^{\text{wind}} \ln(kd+1) \sum_{i=1}^n D_i \quad (6)$$

$$B_{\text{cum}} = B_{\text{cum}}^{\text{wind}} \sum_{t=1}^{T_{\text{lc}}} (w_{\text{wind},t}^{\text{After}} - w_{\text{wind},t}^{\text{Before}}) (1+r)^{-t} \quad (7)$$

$$w_{\text{wind},t}^{\text{After}} - w_{\text{wind},t}^{\text{Before}} = \sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{i=1}^T (p_{\text{wind},t,i,s}^{\text{After}} - p_{\text{wind},t,i,s}^{\text{Before}}) \Delta t \quad (8)$$

式(1)–(8)中: C_{inv} 是投资成本; C_{om} 是运行维护成本; C_{scr} 是替换利用成本; C_{pe} 是年电量偏差成本; B_{AGC} 是风电 AGC 调节收益; B_{cum} 是促进新能源消纳收益; $C_{\text{B,P}}^{\text{inv}}$ 、 $C_{\text{B,E}}^{\text{inv}}$ 分别是电池储能单位功率和单位容量的投资成本; $p_{\text{B}}^{\text{rated}}$ 、 $e_{\text{B}}^{\text{rated}}$ 分别是规划的电池储能功率和容量,是文中的决策变量; $C_{\text{F,P}}^{\text{inv}}$ 、 $C_{\text{F,E}}^{\text{inv}}$ 分别是飞轮储能单位功率和单位容量的投资成本; $p_{\text{F}}^{\text{rated}}$ 、 $e_{\text{F}}^{\text{rated}}$ 分别是规划的飞轮储能功率和容量,是文中的决策变量; r 是通货膨胀率; T_{lc} 是电池储能的寿命长度; n 是规划年限; $C_{\text{B,P}}^{\text{OM}}$ 、 $C_{\text{F,P}}^{\text{OM}}$ 分别是电池和飞轮储能的功率单位运维成本; $C_{\text{B,E}}^{\text{OM}}$ 、 $C_{\text{F,E}}^{\text{OM}}$ 分别是电池储能和飞轮储能的能量单位运维成本; $w_{\text{B},t}$ 、 $w_{\text{F},t}$ 分别表示电池储能和飞轮储能的年用电量; $C_{\text{B,P}}^{\text{SCR}}$ 、 $C_{\text{B,E}}^{\text{SCR}}$ 分别是电池的功率和能量寿命单位损耗成本; C_{pe} 是风电偏差单位惩罚成本; $w_{\text{pe},t}$ 是年风电偏差总电量; $B_{\text{AGC}}^{\text{wind}}$ 是风电的 AGC 调频收益; kd 是调节系数, D_i 是调节深度,其中风电调节系数和调节深度的计算依据与火电机组相似,均参考两个准则^[9]; B_{cum} 为促进风电消纳的收益; $B_{\text{cum}}^{\text{wind}}$ 单位风电消纳的收益; $w_{\text{wind},t}^{\text{Before}}$ 、 $w_{\text{wind},t}^{\text{After}}$ 分别为配置混合储能前与配置后的风电消纳电量; $p_{\text{wind},t,i,s}^{\text{Before}}$ 、 $p_{\text{wind},t,i,s}^{\text{After}}$ 分别为混合储能前与配置后的风电消纳功率。

电化学储能要求其功率能量比的限制如下,要求电化学电池具有至少持续工作 1 min 的能力,最大不超过 24 h。其具体约束如下:

$$\begin{cases} p_{\text{B}}^{\text{rated}} \geq 0 \\ p_{\text{E}}^{\text{rated}} \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{1}{60} \cdot p_{\text{B}}^{\text{rated}} \leq e_{\text{B}}^{\text{rated}} \leq 24 \cdot p_{\text{B}}^{\text{rated}} \quad (10)$$

2.2 下层运行模型

下层主要解决混合储能的仿真运行仿真问题,通过对风电—混合储能系统的调频行为的优化运行,获得上层模型中需要得的变量。其中,下层运行模型,以单周期调节的经济性最佳为目标展开调频行为计算,其目标函数为

$$\min f = c_{\text{B},t}^{\text{op}} |p_{\text{B},t}| + c_{\text{FW},t}^{\text{op}} |p_{\text{FW},t}| + c_{\text{t}}^{\text{pe}} |p_{\text{pe},t}| \quad (11)$$

式(11)中: $c_{\text{B},t}^{\text{op}}$ 、 $c_{\text{FW},t}^{\text{op}}$ 、 c_{t}^{pe} 分别是电池储能、飞轮储能和风电—混合储能系统的单位功率运行成本; $p_{\text{B},t}$ 、 $p_{\text{FW},t}$ 为电池储能和飞轮储能功率值; $p_{\text{pe},t}$ 为未满足的 AGC 信号偏差功率。

另一方面,风电—混合储能的运行需要考虑的约束有功率平衡,锂电池运行约束以及飞轮储能运

行约束。风电—混合储能系统的功率平衡如式(12)所示,风电功率叠加混合储能功率需要满足 AGC 信号减去偏差功率。

$$\Delta P_t^{\text{AGC}} = \Delta P_t^{\text{wind}} + p_{B,t} + p_{\text{FW},t} + p_{\text{pe},t} \quad (12)$$

式(12)中: ΔP_t^{AGC} 为 AGC 功率信号值; ΔP_t^{wind} 为风电功率调整量; $p_{B,t}$ 、 $p_{\text{FW},t}$ 为电池储能和飞轮储能功率值; $p_{\text{pe},t}$ 为未满足的 AGC 信号偏差功率。

为保证电池的安全稳定运行,需要保证电化学储能的功率和容量在如式(13)、(14)的范围内运行,其能量更新如式(15)所示。为保证电池储能的使用寿命,引入模糊逻辑控制规则,基于一段时间内的 AGC 信号的波动规律来确定一定时间段范围内的功率调节因子,有效限制电池储能的频繁充放电行为。

$$-k_1 \cdot p_B^{\text{rated}} \leq p_{B,t} \leq -k_2 \cdot p_B^{\text{rated}} \quad (13)$$

$$\text{Soc}_B^{\min} \cdot e_{B,t}^{\text{rated}} \leq e_{B,t} \leq \text{Soc}_B^{\max} \cdot e_{B,t}^{\text{rated}} \quad (14)$$

$$e_{B,t} = \begin{cases} e_{B,t-1} + p_{B,t} \cdot \eta_B^{\text{cha}} \cdot \Delta t & p_{B,t} \leq 0 \\ e_{B,t-1} + p_{B,t} / \eta_B^{\text{dis}} \cdot \Delta t & p_{B,t} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

式(13)–(15)中, k_1 、 k_2 为模糊逻辑控制因子; $e_{B,t}$ 为电池储能的容量状态; $\text{Soc}_B^{\min}$ 、 $\text{Soc}_B^{\max}$ 分别为电池储能最小和最大荷电状态; η_B^{cha} 、 η_B^{dis} 分别为电池储能的充放电效率。

与电池储能不同,飞轮储能的充放电次数不受限制,因此其功率约束、能量约束以及能量状态转移函数分别如式(16)–(18)所示:

$$-p_{\text{FW}}^{\text{rated}} \leq p_{\text{FW},t} \leq p_{\text{FW}}^{\text{rated}} \quad (16)$$

$$\text{Soc}_{\text{FW}}^{\min} \cdot e_{\text{FW},t}^{\text{rated}} \leq e_{\text{FW},t} \leq \text{Soc}_{\text{FW}}^{\max} \cdot e_{\text{FW},t}^{\text{rated}} \quad (17)$$

$$e_{\text{FW},t} = \begin{cases} e_{\text{FW},t-1} + p_{\text{FW},t} \cdot \eta_{\text{FW}}^{\text{cha}} & p_{\text{FW},t} \leq 0 \\ e_{\text{FW},t-1} + p_{\text{FW},t} / \eta_{\text{FW}}^{\text{dis}} & p_{\text{FW},t} > 0 \end{cases} \quad (18)$$

式(16)–(18)中: $e_{\text{FW},t}$ 为飞轮储能的容量状态; $\text{Soc}_{\text{FW}}^{\min}$ 、 $\text{Soc}_{\text{FW}}^{\max}$ 分别为飞轮最小和最大荷电状态; $\eta_{\text{FW}}^{\text{cha}}$ 、 $\eta_{\text{FW}}^{\text{dis}}$ 分别为飞轮储能的充放电效率。

2.3 模糊逻辑控制器

采用模糊逻辑控制器,以 AGC 信号偏差的变化趋势,来确定电池储能的模糊逻辑控制因子。具体步骤如下。

1)模糊化:在模糊逻辑控制器中,输入和输出变量都将以模糊集合的形式呈现。文中方法中,将风电 AGC 信号偏差量 ΔP_t^{AGC} 和电池储能能量状态 $e_{B,t}$ 作为模糊控制器的输入变量,将电池储能的模糊逻辑控制因子 k_1 和 k_2 作为模糊控制器的输出变量。各个模糊集合均由若干个隶属度函数组成,文中选用高斯隶属度函数(gaussmf)描述文中的输入输出变量,各变量隶属度函数见图 2。 ΔP_t^{AGC} 的模糊子集

定义为{NB,NM,Z,PM,PB},NB 表示较大的负数,表征 AGC 信号的功率缺口较大;NM 表示大小适中的负数,表征 AGC 信号的功率缺口适中;Z 表示其取值范围在 0 附近,表示 AGC 信号的功率小幅波动。PM 表示大小适中的正数,表征 AGC 信号的功率富余适中;PB 表示较大的正数,表征 AGC 信号的功率富余较多。 $e_{B,t}$ 的模糊子集定义为{VS,S,M,B,VB},VS 为很小,表征电池储能的荷电状态很低,丰富的充电空间,可以放电的空间少;S 为小,表征电池储能的荷电状态低,相对富足的充电空间,少许可以放电的空间;M 为中,表征电池荷电状态居中,即可持续充电又可持续放电;B 为大,表征电池储能的荷电状态大,相对富足的放电空间,少许可以充电的空间;VB 为极大,表征电池储能的荷电状态极大,富足的放电空间,可以放电的空间少。 k_1 和 k_2 的模糊子集定义为{VS,S,M,B,VB},VS 表示极小的充放电功率调节系数,S 表示较小的充放电功率调节系数,M 表示适中的充放电功率调节系数,B 表示较大的充放电功率调节系数,VB 表示极大的充放电功率调节系数。

2)模糊推理:为了更好发挥电池储能特性,本研究综合考虑电池储能的充放电特性和功率能量比特性,在满足风电机组 AGC 信号偏差需求的同时兼顾电池储能自身的状态,基于以下原则进行模糊规则设计:①当风电 AGC 信号提示电量缺口大且电池储能的荷电状态能量较高时,优先放电,少充电;②当风电 AGC 信号提示电量富余多且电池储能的荷电状态能量较低时,优先充电,少放电;③当风电 AGC 信号提示电量缺口小而电池储能的荷电状态能量较高时,谨慎充电,伺机放电;④当风电 AGC 信号提示电量富余少而电池储能的荷电状态能量较低时,谨慎放电,伺机充电。文中基于上述原则对模糊规则进行设计,获得的具体模糊逻辑控制规则见表 1。基于所设计的模糊逻辑系统可获得的模糊控制因子的值。

3)去模糊化:利用中心法(center of gravity)求解得到具体的模糊控制因子的值。具体为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n F_i S_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (19)$$

式(19)中: F_i 是隶属度函数; S_i 是隶属函数单例模式; k 表征 k_1 和 k_2 。

3 算例分析

基于浙江省某风电场站 100 MW 的风力发电数

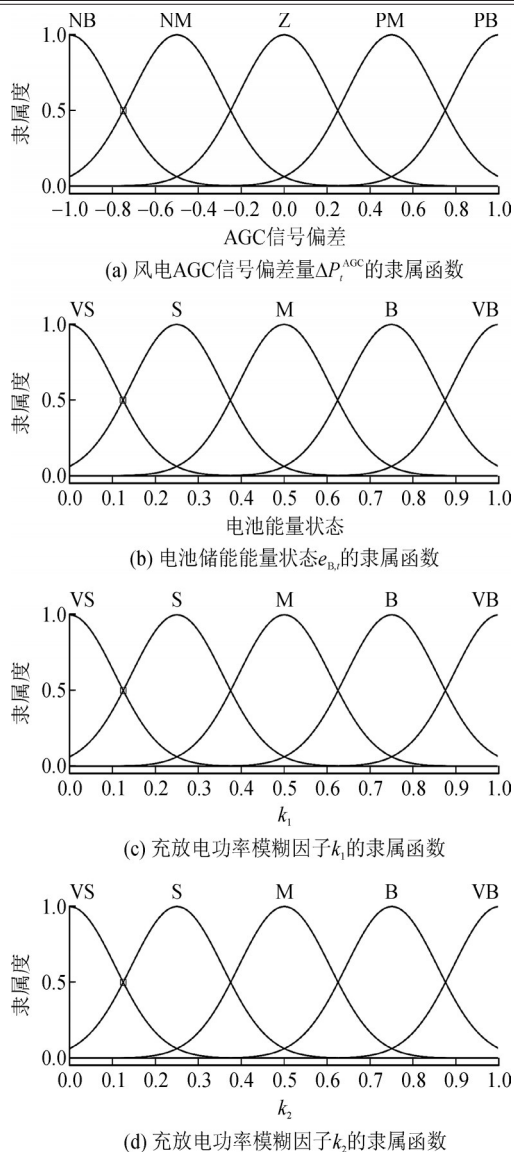


图2 输入与输出的隶属函数图

Fig. 2 The graphs of membership functions for input and output variables

表1 模糊逻辑控制规则

Table 1 Fuzzy logic control rules

$e_{B,t}$	(k_1, k_2)				
	ΔP_t^{AGC}	ΔP_t^{AGC}	ΔP_t^{AGC}	ΔP_t^{AGC}	ΔP_t^{AGC}
	为NB	为NM	为Z	为PM	为PB
VS	(VB, VS)	(B, S)	(M, VS)	(S, S)	(VS, M)
S	(B, VS)	(B, S)	(M, S)	(S, M)	(VS, M)
M	(M, VS)	(M, S)	(M, M)	(S, M)	(VS, M)
B	(M, VS)	(M, S)	(S, M)	(S, B)	(VS, B)
VB	(M, VS)	(S, S)	(VS, M)	(S, B)	(VS, VB)

据及其AGC指令数据进行展开混合储能系统的优化配置计算与仿真分析。某日该风电场得调节前风电出力和AGC信号见图3。文中将“电池—飞轮”混合储能系统配置在风电机组侧,系统参数见表2,其他成本参数参考文[12,20–21]。

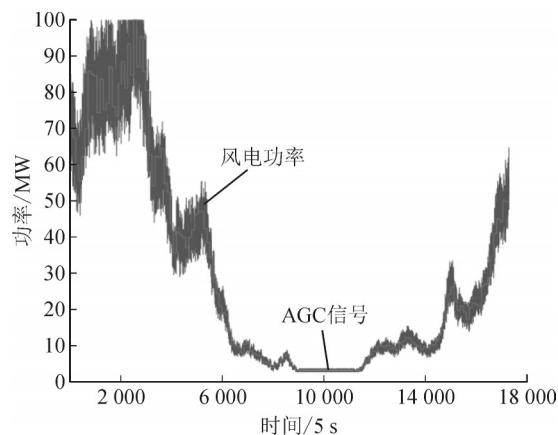


图3 浙江省某风电场某日风电功率与AGC信号图

Fig. 3 Wind power and AGC signal diagram of a wind farm in Zhejiang province on a certain day

表2 混合储能系统核心参数信息

Table 2 Core parameter information of hybrid energy storage system

参数名称		数值
投	电池单位功率成本/(万元·MW ⁻¹)	50.00
资	电池单位能量成本/(万元·MWh ⁻¹)	120.00
成	飞轮单位功率成本/(万元·MW ⁻¹)	125.00
本	飞轮单位能量成本/(万元·MWh ⁻¹)	200.00
运	电池单位功率成本/(万元·MW ⁻¹)	6.00
维	电池单位能量成本/(万元·MWh ⁻¹)	0.10
成	飞轮单位功率成本/(万元·MW ⁻¹)	8.00
本	飞轮单位能量成本/(万元·MWh ⁻¹)	0.10
	电池储能单位功率报废成本/(万元·MW ⁻¹)	0.72
	电池储能单位容量报废成本/(万元·MWh ⁻¹)	0.72

本算例分析具体设置如下:先展开下层基于模糊逻辑控制的优化控制策略计算,通过与不采用模糊逻辑控制的优化控制结果进行比较,判断采用模糊逻辑控制的方式是否合适。然后第二步,由于规划涉及到年数据,先对年风力发电及其AGC指令数据采用K-means进行聚类,获取15组典型样本数据。然后采用模拟退火算法展开双层模型的优化计算,由于模拟退火算法相对成熟,因此文中不再赘述。

3.1 基于模糊逻辑控制的控制策略

为验证文中所提考虑模糊逻辑控制策略的混合储能调频策略的经济性和有效性,文中选用了两种不同的方法来验证:方法1,文中所提模糊逻辑控制的调频控制方法;方法2,文[18]的模型预测控制方法,来制定混合储能跟随风电功率的频率调节策略,并对比其调频控制效果。此外,在本节设置了混合储能配置方案为电池储能10 MW/20 MWh,飞轮储能10 MW/5 MWh。为了避免储能功率配置

不足引起的偏差问题,故在本节策略效果证明环节,按照风电功率的20%配置混合储能功率。基于模糊规则的输入输出关系映射见图4。

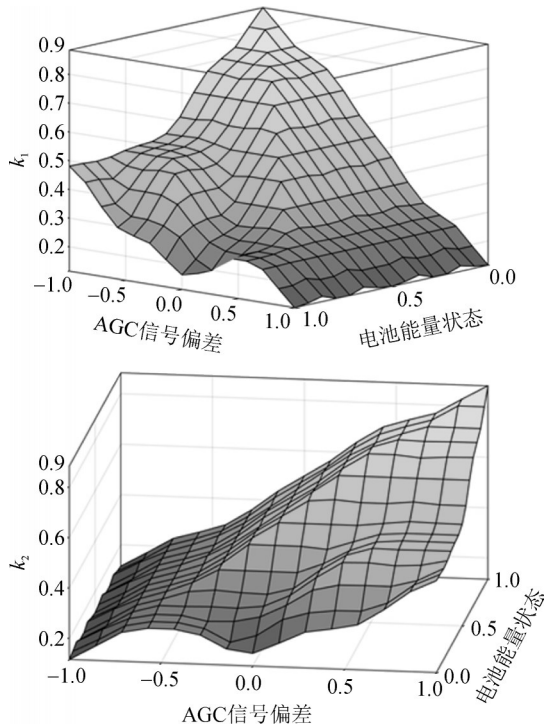


图4 模糊逻辑关系映射图

Fig. 4 Fuzzy logical relationship map

文中基于图3所示的浙江省的风电机组出力数据进行仿真,分别采用文中所提方法和文[18]所提混合储能调频控制技术进行对比,分析获得的混合储能调频策略及其调频效果分别见图5、6。采用

文[18]所提基于模型预测控制的调频策略方法获得的风电—混合储能系统实际出力与AGC信号的状态偏差概率为97.8%,最大功率缺口状态偏差为-4.61 MW,最大功率需求缺口偏差为-4.52 MW。由于文[18]所提的基于模型预测控制策略是通过多步长优化计算而来的,可视理论最优值。文中所提方法,风电—混合储能系统实际出力与AGC信号的状态偏差存在概率为96.31%,最大功率缺口偏差状态为4.61 MW,最大功率需求缺口偏差为-4.52 MW。两者的最大功率缺口偏差相同,是由于风电波动偏差超过了两种混合储能消纳的最大极限,两种模式下,均满额度利用混合储能的充放电行为。此外,文中所提方法求得的策略与采用模型预测控制得到的策略相似度极高,每5 s一个状态,一天共计17 280个状态:①飞轮储能的充放电状态相同个数为17 019个,相似概率为98.49%,充放电功率偏差不得超过5%的状态个数为16 497个,占总概率的95.47%;②电池储能的充放电状态相同的个数为16 989个,相似概率为98.32%,充放电功率偏差不得超过5%的状态个数为16 740,占总概率的96.88%。虽然,采用模糊逻辑控制的频率调节策略并不如采用模型预测控制策略的精度,但模糊逻辑控制规则的调节不仅实现了较小的频率调节误差,也有效的减少了电池储能的充放电频率切换次数,有助于储能电池寿命的延长。另一方面,模糊逻辑控制的模型更为简单且便于求解,宜于应用。

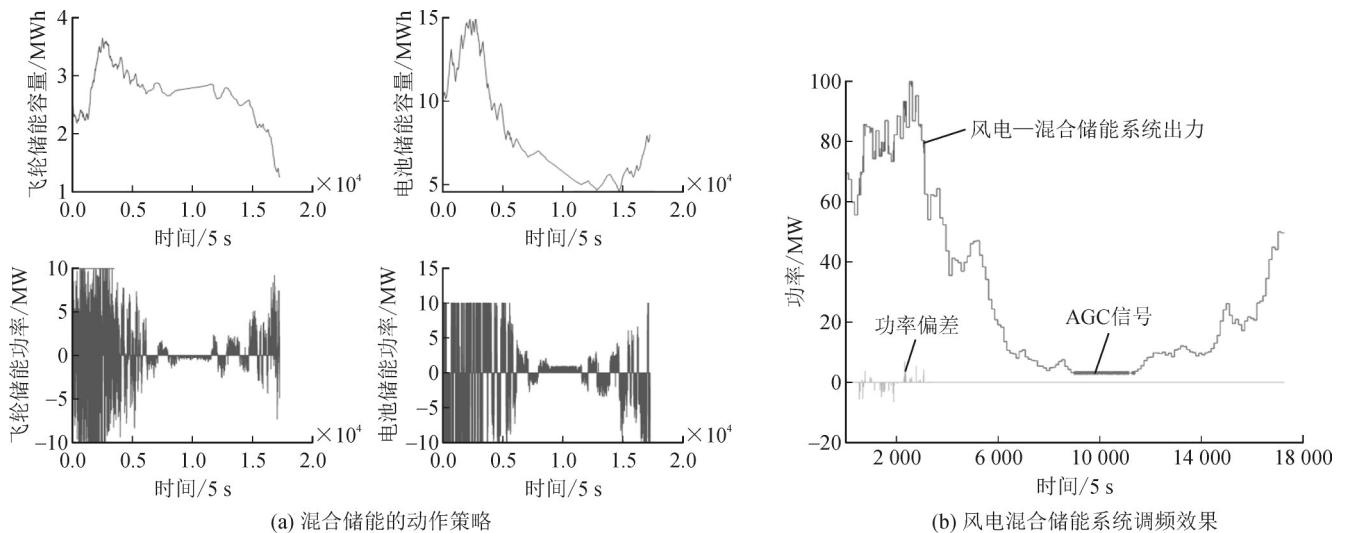


图5 采用文中方法的混合储能调频策略及其效果

Fig. 5 Hybrid energy storage frequency regulation strategy using the proposed method and its effect

3.2 混合储能系统配置

采用文中所提基于模糊逻辑控制的优化方法,可以得到文中场景下,混合储能的最优容量配置策略为电池储能(功率7.14 MW,容量9.29 MWh),飞轮

储能(功率12.86 MW,容量6.43 MWh)。此外,采用文中所提模型,对仅配置电池储能、仅配置飞轮储能两种进行了优化计算,其优化配置结果分别为仅配置电池储能(21.42 MW,22.30 MWh),仅配置飞轮

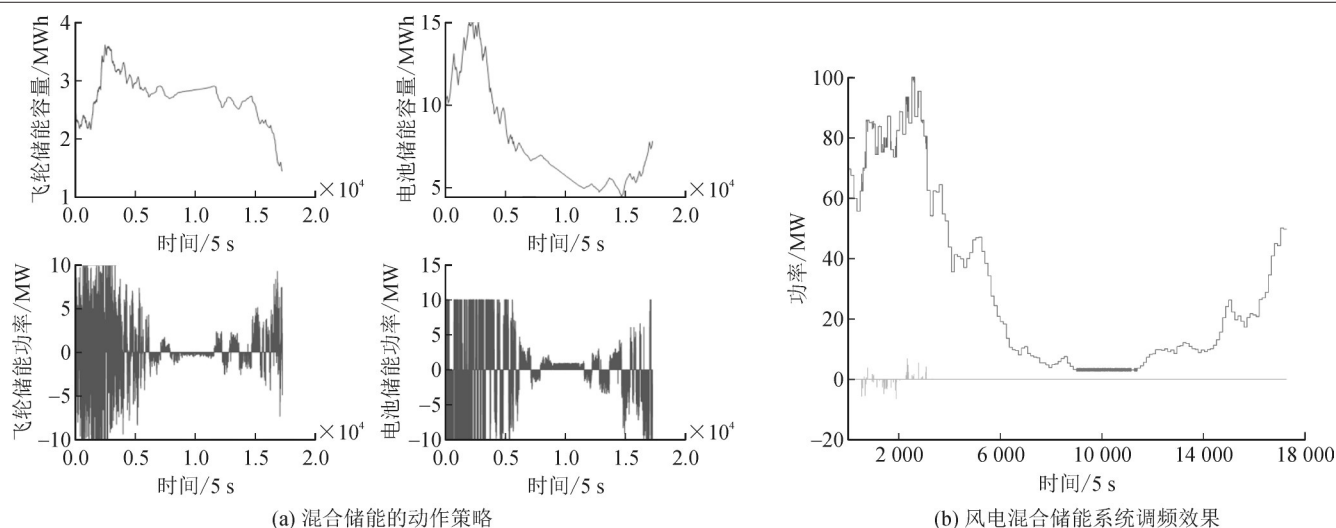


图6 采用文[18]方法的调频策略及其效果

Fig. 6 Frequency modulation strategy using the literature [18] method and its effect

储能(26.84 MW, 12.644 MWh)。另外,增加了无储能配置下的调频效益分析,证明文中进行混合储能投

资的价值,4种方案下储能的投资收益与成本相关信息列于表3中。

表3 不同方案下的储能投资策略及其收益与成本

Table 3 Energy storage investment strategies and their benefits and costs under different schemes

参数	数值			
	仅配置电池储能	仅配置飞轮储能	文中混合储能配置	无储能配置
电池储能/(MW, MWh)	21.420, 22.300	—	7.140, 9.292	—
飞轮储能/(MW, MWh)	—	26.840, 12.644	12.860, 6.430	—
初始投资成本/亿元	0.375 000	0.588 380	0.436 554	—
运行维护成本/亿元	0.203 7	0.313 2	0.254 7	—
电池替换成本/亿元	0.133 83	0.000 00	0.043 00	—
电量偏差成本/万元	16.14	14.11	10.32	438.11
风电 AGC 调节收益/亿元	1.280	1.476	1.460	0.332
促进新能源消纳收益/万元	0.443	0.489	0.468	0.000
净收益/亿元	0.566 3	0.573 1	0.724 8	0.288 2

从表3可以看出:

1)投资混合储能系统辅助调频,能够在提升风电场站 AGC 调节效果的同时获得更优的投资净收益值,其净收益较仅配置电池储能和仅配置飞轮储能分别多0.158 5亿元,0.151 7亿元。

2)仅投资飞轮储能的策略初始投资成本最高,且飞轮储能的维护成本高于另外两种策略。但,仅配置电池储能由于其频繁的充放电状态切换,使得电池使用寿命较短,电池的替换成本高。但混合储能系统的投资很好的改善了这个方面存在的问题,使其兼顾了飞轮储能和电池储能投资的有点,中和了两者的缺点。

3)3种不同储能配置策略的 AGC 调频效果及其典型日充放电运行方式见图7-9。仅投资飞轮储能

的 AGC 调频效果最好,其 AGC 调频收益最高,这是由于仅配置飞轮储能策略中,投资了更多功率的飞轮储能,并利用飞轮储能的快速响应能力追踪 AGC 信号。但由于投资的成本较高,使得其经济性不如投资混合储能系统。而混合储能系统,在减少投资的同时,也能保持略逊于仅飞轮储能的 AGC 投资效果。

综上,混合储能系统在保证调频效果的同时,减少了设备的投资成本与运维成本,是更优的选择。

4 结论

为提高风电场站的调频性能,提升储能系统的利用效率,文中提出了一种基于模糊逻辑控制的混合储能辅助风电调频的双层优化配置模型,得到的主要结论如下。

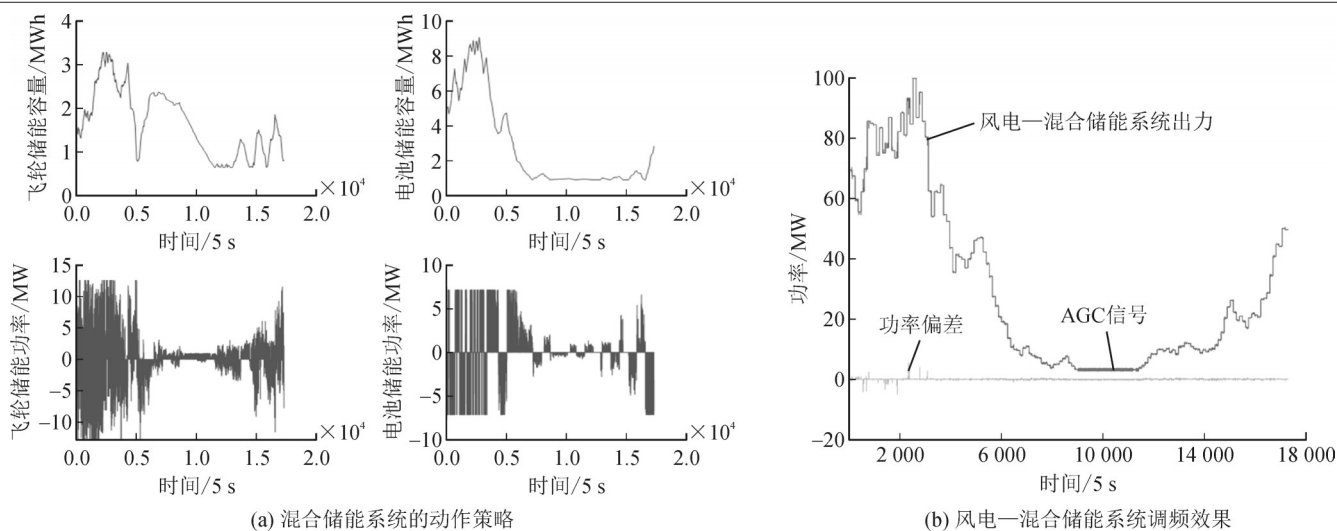


图7 采用混合储能系统的调频策略及其效果

Fig. 7 Frequency modulation strategy using hybrid energy storage system and its effect

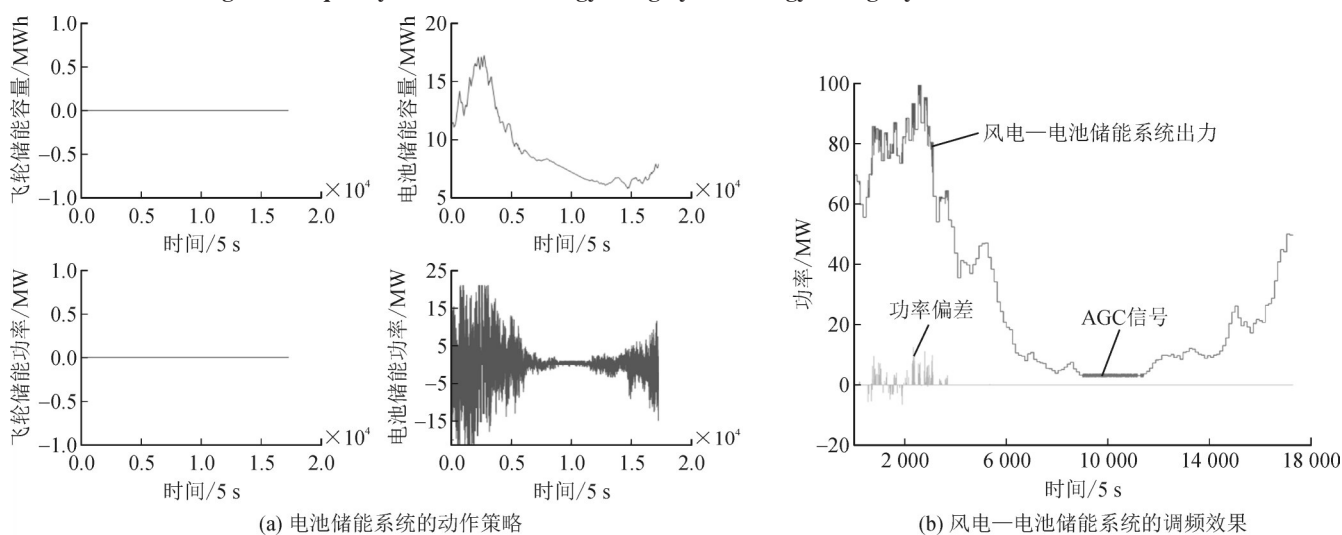


图8 仅采用电池储能系统的调频策略及其效果

Fig. 8 Frequency modulation strategy only using battery storage system and its effect

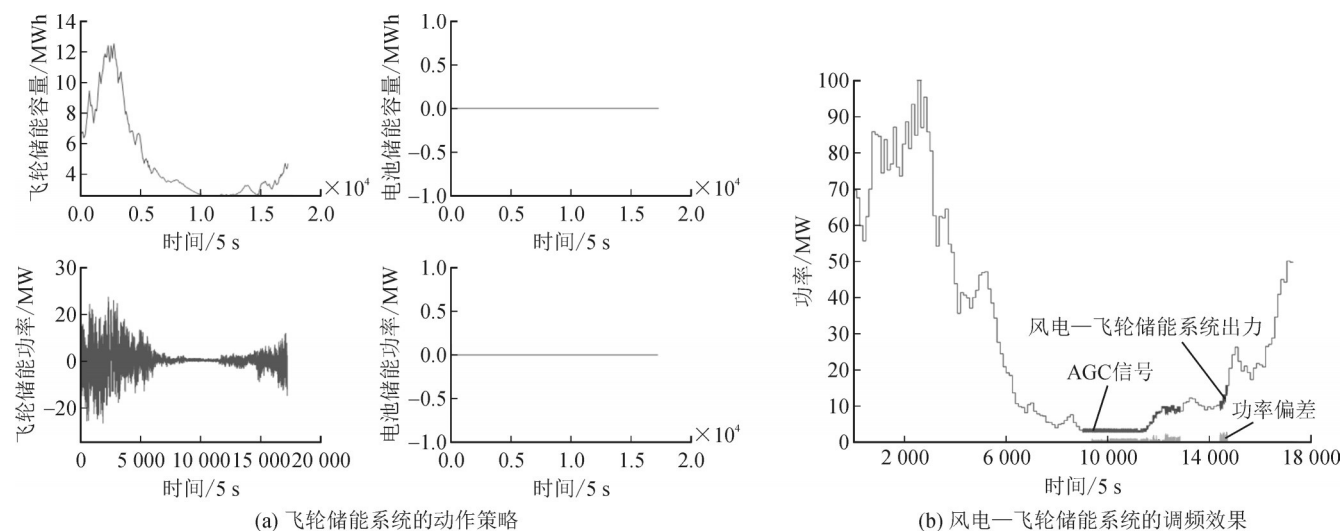


图9 采用飞轮储能的调频策略及其效果

Fig. 9 Frequency modulation strategy only using flywheel storage system and its effect

1)基于模糊逻辑控制的风电—混合储能 AGC 调频策略其在兼顾调频效果的同时减少了电池储能的状态频繁切换,有效的延长了电池储能的寿命,提高了混合储能系统投资的经济性。

2)投资混合储能系统较仅投资飞轮储能系统,减少了初始投资,降低了运维成本;较仅投资电池储能系统,减少了电池储能的寿命损耗,降低了替换成本。在保证调频效果的同时,提高了系统的净收益。

未来,随着要求新能源场站提供 AGC 支撑政策的出台,具有强不确定的新能源场站投资储能系统是十分必要的。另一方面,随着储能系统成本的下降,新能源场站投资储能系统的净收益也会越来越高。

参考文献:

- [1] 马昱欣,胡泽春,刁 锐. 新能源场站共享储能提供调频服务的日前优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3857-3868.
MA Yuxin, HU Zechun, DIAO Rui. Day - ahead optimization strategy for shared energy storage of renewable energy power stations to provide frequency regulation service[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3857-3868.
- [2] 杨 楠,董邦天,黄 禹,等.考虑不确定性和多主体博弈的增量配电网源网荷协同规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9):2689-2702.
YANG Nan, DONG Bangtian, HUANG Yu, et al. Incremental distribution network source-load collaborative planning method considering uncertainty and multi-agent game[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9):2689-2701.
- [3] 国家能源局浙江监管办公室.华东能源监管局关于开展《华东区域电力辅助服务管理实施细则》和《华东区域电力并网运行管理实施细则》模拟[EB/OL]. [2024-04-23]. <https://zjb.nea.gov.cn/scjg1/8391.jhtml>.
The Zhejiang Regulatory Office of the National Energy Administration of the People's Republic of China. East China energy regulatory bureau of national energy administration is conducting a simulation on the implementation details of the "implementation rules for power system ancillary services management in the east China region" and the "implementation rules for power grid operation management in the east China region" [EB/OL]. [2024-04-23]. <https://zjb.nea.gov.cn/scjg1/8391.jhtml>.
- [4] 马速良,武亦文,李建林,等. 面向多服务目标需求的集中式电池储能优化配置方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 75-86.
MA Suliang, WU Yiwen, LI Jianlin, et al. Research on optimal configuration of centralized battery energy storage for multiple service objectives[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7):75-86.
- [5] 李 盈,赵 伟,赵立宁,等. 基于电池储能SOC的调峰、调频混合控制策略[J]. 高压电器, 2023, 59(7):48-55.
LI Ying, ZHAO Wei, ZHAO Lining, et al. Mixed control strategy of peak regulation and frequency modulation based on SOC of battery energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7):48-55.
- [6] 乔亮波,张晓虎,孙现众,等. 电池—超级电容器混合储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 98-106.
QIAO Liangbo, ZHANG Xiaohu, SUN Xianzhong, et al. Advances in battery-supercapacitor hybrid energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1):98-106.
- [7] 孟 杰,丁 泉,陈孝煜,等. 基于寿命模型的混合储能参与二次调频的经济性研究[J]. 现代电力, 2021, 38(2): 205-212.
MENG Jie, DING Quan, CHEN Xiaoyu, et al. Economic feasibility in secondary frequency regulation considering hybrid energy storage cycle life model[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(2):205-212.
- [8] 田博文,张志禹,杨梦飞. 基于MMAF的混合储能系统功率分配方法及定容研究[J/OL]. 电工技术学报: 1-18 [2024-04-23]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222348>.
TIAN Bowen, ZHANG Zhiyu, YANG Mengfei. Research on power distribution method and energy storage system planning of hybrid energy storage based on MMAF[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-18 [2024-04-23]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222348>.
- [9] 宋 杰,耿林霄,桑永福,等. 基于EMD分解的混合储能辅助火电机组一次调频容量规划[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2):496-503.
SONG Jie, GENG Linxiao, SANG Yongfu, et al. Study on primary frequency modulation capacity planning of thermal power unit assisted by hybrid energy storage based on EMD decomposition[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2):496-503.
- [10] 张雯雯,魏震波,郭 毅,等. 含混合储能的交直流配电网日经济优化运行[J]. 高电压技术, 2022, 48(2):565-574.
ZHANG Wenwen, WEI Zhenbo, GUO Yi, et al. Optimal daily economic operation of AC/DC distribution network with hybrid energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2):565-574.
- [11] 李翠萍,司文博,李军徽,等. 基于集合经验模态分解和多目标遗传算法的火—多储系统调频功率双层优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7):2017-2032.
LI Cuiping, SI Wenbo, LI Junhui, et al. Two-layer optimization of frequency modulated power of thermal

- generation and multi-storage system based on ensemble empirical mode decomposition and multi-objective genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2017-2032.
- [12] 李军徽, 贾才齐, 朱星旭, 等. 降低火电调频损耗的混合储能系统容量优化配置双层模型[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3965-3976.
- LI Junhui, JIA Caiqi, ZHU Xingxu, et al. Dual-layer model for capacity optimization of hybrid energy storage system to reduce thermal power frequency modulation loss[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3965-3976.
- [13] SHEN Xin, LUO Zhao, XIONG Jun, et al. Optimal hybrid energy storage system planning of community multi-energy system based on two-stage stochastic programming[J]. IEEE Access, 2021(9): 61035-61047.
- [14] HEIN K, XU Yan, WILSON G, et al. Coordinated optimal voyage planning and energy management of all-electric ship with hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2355-2365.
- [15] 刘佳玲, 秦博宇, 孙 颖, 等. 面向清洁低碳转型的隧道智慧能源系统框架设计及储能容量优化配置[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2563-2572.
- LIU Jialing, QIN Boyu, SUN Ying, et al. Framework design of tunnel intelligent power system and optimal planning method of energy storage capacity for low Carbon transition [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2563-2572.
- [16] WAN Can, QIAN Weiting, ZHAO Changfei, et al. Probabilistic forecasting based sizing and control of hybrid energy storage for wind power smoothing[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 1841-1852.
- [17] 刘颖明, 陈 亮, 王晓东, 等. 混合储能参与风电集群一次调频的容量配置优化[J]. 电器与能效管理技术, 2020 (10): 55-63.
- LIU Yingming, CHEN Liang, WANG Xiaodong, et al. Mixed energy storage participating in capacity optimization configuration of wind power primary frequency regulation [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020 (10): 55-63.
- [18] 唐 早, 刘 佳, 刘一奎, 等. 基于随机模型预测控制的火电—储能两阶段协同调频控制模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 86-95.
- TANG Zao, LIU Jia, LIU Yikui, et al. Two-stage coordinated frequency regulation control model for thermal power and energy storage based on stochastic model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (3): 86-95.
- [19] 国家能源局华北监管局. 华北能源监管局关于印发华北区域并网发电厂“两个细则”(2019年修订版)的通知[EB/OL]. [2024-04-23]. https://hbj.nea.gov.cn/xxgk/zcfg/202402/t20240208_239961.html.
- North China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration of the People's Republic of China. The notification issued by the north China energy regulatory administration on the “two regulations” for regional grid-connected power plants in north China (revised edition 2019) is pertinent[EB/OL]. [2024-04-23]. https://hbj.nea.gov.cn/xxgk/zcfg/202402/t20240208_239961.html.
- [20] GONG Yuzhong, JIANG Quanyuan, BALDICK R. Ramp event forecast based wind power ramp control with energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1831-1844.
- [21] 罗耀东, 田立军, 王 垚, 等. 飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 71-82.
- LUO Yaodong, TIAN Lijun, WANG Yao, et al. Coordinated control strategy and optimal capacity configuration for flywheel energy storage participating in primary frequency regulation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 71-82.
- 王岑峰(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为储能在电力系统中的规划研究。
- 王 蕾(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为储能在电力系统中的规划研究。
- 孙飞飞(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划。
- 胡哲晟(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划。
- 唐 早(1995—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为储能在电力系统中的规划与分析研究(E-mail: ztang@hdu.edu.cn)。
- 刘 佳(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电网规划与分析研究。