

文章编号:1674-7607(2026)06-0129-11

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250113

基于模糊自适应控制的混合储能一次调频 控制策略与容量配置研究

杨婷婷, 轩辕诗雨, 徐永强, 吕游

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 为有效提升电网发电侧频率的主动支撑能力,提高火电机组运行的稳定性、安全性和经济性,以混合储能辅助火电机组一次调频为主要研究对象,提出了一种优化的协同控制策略。首先,建立火储联合系统的协同控制模型,将火电一次调频信号进行分解,以减缓机组频繁升降负荷动作;其次,优化储能控制策略,使用模糊控制方法输出自适应权重系数,实现下垂控制和惯性控制之间的平滑切换,从而提高了调频能力;最后,建立混合储能容量优化配置模型,采用鲸鱼优化算法对不同控制策略下的经济效益进行了分析。结果表明:所提出的控制策略在连续扰动下,系统频率总体偏离程度相较于变 K 法和下垂+惯性控制分别减小 23.33% 与 11.54%,火电机组出力平均值分别减小 35% 和 23.53%,有效改善了火储联合系统的调频性能,提升了经济效益,有助于火电机组的安全稳定运行。

关键词: 混合储能; 一次调频; 控制策略; 容量配置; 模糊控制

中图分类号: TK02

文献标志码: A

学科分类号: 480.40

Research on Hybrid Energy Storage Primary Frequency Control Strategy and Capacity Configuration Based on Fuzzy Adaptive Control

YANG Tingting, XUANYUAN Shiyu, XU Yongqiang, LÜ You

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric

Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To effectively enhance the active support capability for frequency in respect of the generation side of the power grid, and improve the stability, safety, and economy in respect of the operation of thermal power units, the primary frequency regulation of thermal power unit assisted by hybrid energy storage was taken as the main research object, while an optimized coordinated control strategy was proposed. Firstly, a coordinated control model of the combined system of thermal power and storage was established, and the primary frequency regulation signal of the thermal power unit was decomposed to alleviate the frequent load adjustment actions of the unit. Secondly, the energy storage control strategy was optimized. Adaptive weighting coefficients were output using a fuzzy control method, enabling smooth switching between droop control and inertia control, thus enhancing the capability of frequency regulation. Finally, a hybrid energy storage capacity optimization configuration model was constructed, and the economic benefits of different control strategies were analyzed using whale optimization algorithm. Results indicate that under continu-

收稿日期:2025-02-26 修订日期:2025-03-14

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52476009)

作者简介:杨婷婷(1981—),女,山东威海人,副教授,博士,研究方向为发电机组节能优化控制, E-mail: yangtingting@ncepu.edu.cn.

ous disturbances, the overall deviation of the system frequency of the proposed control strategy is reduced by 23.33% and 11.54% compared with that of the variable K method and droop-inertia control, respectively, while the average output of thermal power unit is decreased by 35% and 23.53%, respectively. This effectively improves the performance of frequency regulation of the combined system of thermal power and storage, enhances economic benefits, and facilitates the safe and stable operation of thermal power units.

Key words: hybrid energy storage; primary frequency regulation; control strategy; capacity configuration; fuzzy control

在“双碳”目标的引领下,我国正加速推进以可再生能源为主体的新型电力系统。预计到 2030 年,中国非化石能源在一次能源消费的占比将达到 25% 左右^[1]。然而,由于风电、光伏发电具有间歇性、波动性等特点,大规模的可再生能源并入电网给电网的频率稳定性带来了一定的挑战,因此提升电力系统调频能力已成为现阶段的研究热点^[2]。目前,火电机组在响应速度缓慢和调节精度不高等方面存在明显的不足,已经不能完全满足新型电力系统对调频的需求^[3]。储能系统响应快速,可以减缓火电机组的出力波动,能够有效提升电力系统调频能力并保障机组的安全性和经济性^[4],已经广泛应用于辅助火电参与系统调频任务。

在电网一次调频的运行控制中,储能参与的主要方法包括虚拟下垂控制^[5]和虚拟惯性控制^[6]。文献[7]采用定系数下垂控制,通过调节储能输出功率与频率的偏差关联,实现电网频率控制。文献[8]采用变系数下垂控制策略,通过动态调整下垂系数 K 灵活调整输出功率。文献[9]通过引入虚拟惯性控制,证明所提出的策略能够快速调节频率稳定,有效抑制频率变化率。文献[10]采用虚拟下垂和虚拟惯性相结合的控制策略,并证明将两者结合的综合控制策略更有利于提高电网频率稳定性。在前文基础上,文献[11]提出虚拟负惯性概念,结合虚拟正惯性、虚拟下垂和虚拟负惯性控制 3 种方法的特性,可有效减缓频率的频繁波动。文献[12]引入控制虚拟惯性和虚拟下垂出力比重随频率变化而调节的权重系数,有助于稳定电网频率。为更好地平滑策略间的切换,文献[13]通过模糊控制器来动态分配下垂与惯性控制的权重系数,结果表明模糊自适应策略下电网频率的稳定效果更好。但是,仅依靠储能控制策略进行电网频率控制无法充分发挥储能的快速性。

设计合理的火储协调控制策略可以减缓频繁出

力波动对火电机组的影响,充分利用储能响应特性。文献[14]将原火电机组一次调频指令进行非线性分解,由火电机组响应慢变信号,飞轮响应快变信号,可有效减缓火电频繁出力波动,提升电网频率稳定性。文献[15]设计了一种基于低通滤波自动分配火储功率的火储联合一次调频协调控制策略,由火电机组响应低频信号,飞轮响应高频信号,有利于更好地发挥火电机组和储能的各自优势,降低对火电机组的磨损。文献[16]利用低通滤波将一次调频指令进行非线性分解,其中滤波时间常数随荷电状态自适应变化。然而,上述文献均基于单一储能进行研究,在面对电力系统中多层次的频率调节需求时往往存在局限性。

混合储能系统与火电机组的耦合可以有效提高调频质量。文献[17]对频率偏差进行高低频需求划分,使飞轮与锂电池在充放电过程中取长补短,从而改善系统的整体调频性能。文献[18]研究混合储能一次调频控制策略,并根据不同类型混合储能方案进行容量配置方案比较。文献[19]提出锂电池-飞轮控制策略和火电机组区域动态一次调频模型,采用非支配排序遗传算法研究一定储能容量下飞轮-锂电池混合储能系统的容量配置方案。

以上研究表明储能运行策略和火储协同策略均有效提升了一次调频效果,但目前文献中很少有以混合储能作为火电机组参与一次调频的对象。本文以飞轮-锂电池作为研究对象协助火电进行一次调频,构建合适的协同控制模型,并通过模糊控制器计算权重系数,使得下垂控制与惯性控制在相互转换时可以平稳过渡。最后,利用鲸鱼优化算法分析不同控制策略下的经济效益,以及合理配置飞轮-锂电池的容量。

1 火储系统一次调频控制策略

1.1 整体框架

本文建立的调频动态模型如图 1 所示,其中:

K_g 为火电一次调频系数; K_F 为储能下垂系数; α_{fess} 为飞轮储能的下垂权重系数; α_{bess} 为电池储能的下垂权重系数; M_F 为储能惯性系数; Δf 为频率偏差; β_{fess} 为飞轮储能的惯性权重系数; β_{bess} 为电

池储能的惯性权重系数。该模型由火电机组、飞轮储能系统、电池储能系统、火储协同控制模块、储能运行控制模块、死区、功率约束、荷电状态等组成。

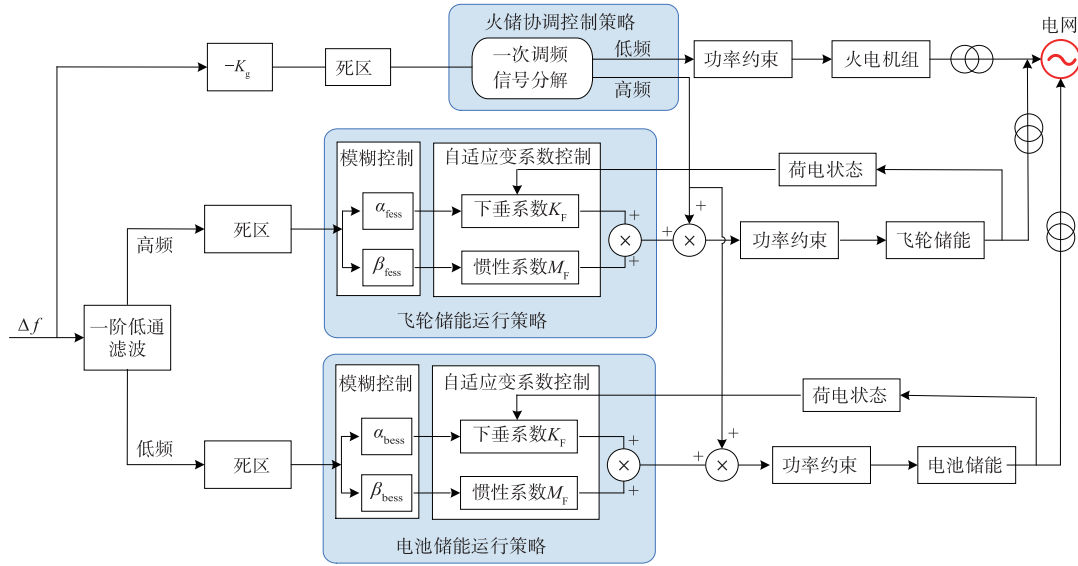


图1 火储系统一次调频动态模型

Fig. 1 Dynamic model of primary frequency regulation for thermal power-energy storage system

火电机组建模时一般选取再热式汽轮机模拟调频效果。简化的汽轮机模型可用传递函数^[20]表示,即

$$G_{en}(s) = \frac{F_{HP}}{1+sT_{CH}} + \frac{F_{IP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} + \frac{F_{LP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})(1+sT_{CO})} \quad (1)$$

式中: $G_{en}(s)$ 为汽轮机模型传递函数; F_{LP} 、 F_{IP} 、 F_{HP} 分别为汽轮机低、中、高压缸功率系数; T_{CO} 、 T_{RH} 、 T_{CH} 分别为低压蒸汽、再热蒸汽、高压蒸汽时间常数; s 为拉普拉斯算子。

但在实际应用过程中,因为高压缸功率在动态过程中会存在明显的过调现象,所以在汽轮机模型加入过调系数,传递函数见式(2)。具体模型如图2所示。

$$G_{en}(s) = \frac{F_{HP}}{1+sT_{CH}} + \frac{F_{HP} \cdot \lambda \cdot sT_{RH} + F_{IP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} + \frac{F_{LP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})(1+sT_{CO})} \quad (2)$$

式中: λ 为过调系数,通常取 0.8。

火电机组调速器表示为

$$G_{OV}(s) = \frac{1}{1+sT_g} \quad (3)$$

式中: $G_{OV}(s)$ 为调速器传递函数; T_g 为调速器时间常数。

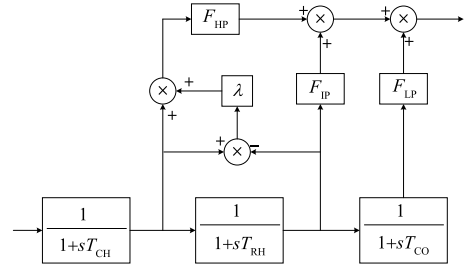


图2 加入过调系数的汽轮机模型

Fig. 2 Steam turbine model with added overshoot coefficient

发电机-负荷模型表示为

$$G(s) = \frac{1}{2Hs + D} \quad (4)$$

式中: $G(s)$ 为发电机-负荷传递函数; H 为惯性常数; D 为负荷阻尼系数。

储能等效模型选用具有较高精度的一阶惯性,则传递函数表示为

$$G_E(s) = \frac{1}{1+sT_E} \quad (5)$$

式中: $G_E(s)$ 为储能模型传递函数; T_E 为储能时间常数,对于飞轮储能取 1,对于电池储能取 5。

储能的荷电状态模块主要对混合储能输出功率进行实时监测。荷电状态 X_{SOC} ^[21] 计算公式为

$$X_{SOC} = S_0 - \frac{\int_0^t \Delta P dt}{E} \quad (6)$$

式中: S_0 为荷电状态初始值; ΔP 为实时输出功率, MW; E 为系统储电量, MW·h; t 为时间, s。

1.2 火储协调控制策略

当电网频率出现偏差时,火电机组需要快速变负荷以保持功率平衡,但频繁快速变负荷会对机组设备造成磨损,不利于机组安全运行。为减少机组磨损且充分利用储能的快速性,本文将原火电机组一次调频指令进行分解,由混合储能系统响应高频信号,火电机组响应低频信号,建立火储联合系统协调控制策略。该方案可以有效减缓机组出力波动,快速稳定电网频率。

火电机组一次调频指令 P_{pr} 为

$$P_{pr} = -K_g \cdot \Delta f \quad (7)$$

通过一阶低通滤波器将原火电机组一次调频指令 P_{pr} 进行高低频分解,由火电机组承担低频分量,高频分量传递给混合储能系统。低通滤波器的传递函数 $F(s)$ 为

$$F(s) = \frac{1}{1 + Ts} \quad (8)$$

式中: T 为低通滤波时间常数。

一次调频指令、高频分量 P_H 、低频分量 P_L 三者之间的关系为

$$P_{pr} = P_H + P_L \quad (9)$$

经过分解后,火电机组和混合储能系统响应的功率指令分别为

$$\begin{cases} P_{g,ref} = P_L \\ P_{fess,ref} = P_H \cdot \omega + \Delta P_{fess} \\ P_{bess,ref} = P_H \cdot (1 - \omega) + \Delta P_{bess} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{g,ref}$ 为火电功率输入参考值; $P_{fess,ref}$ 为飞轮储能输入功率参考值; $P_{bess,ref}$ 为电池储能输入功率参考值; ω 为飞轮储能占比; ΔP_{fess} 为飞轮储能响应频率变化的功率; ΔP_{bess} 为电池储能响应频率变化的功率。

1.3 基于模糊自适应控制的储能运行策略

储能调频阶段可以划分为频率恶化阶段(电网频率偏差与其变化率的乘积为正,即 $\Delta f \cdot \frac{d\Delta f}{dt} > 0$)和频率恢复阶段(电网频率偏差与其变化率的乘积为负,即 $\Delta f \cdot \frac{d\Delta f}{dt} < 0$)。储能调频过程示意图如图3所示,其中: t_m 为调节峰值时间; t_s 为稳态调节时间。

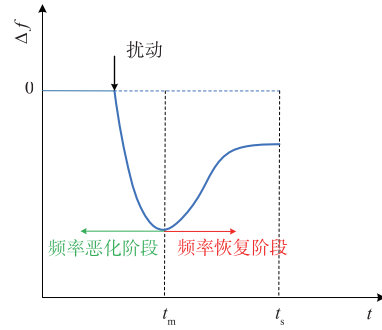


图3 储能调频过程

Fig. 3 Process of frequency regulation with energy storage

由于在扰动初期,频率恶化严重,频率偏差变化率变化较明显,为较好地实现对频率调节与控制作用,在频率恶化阶段采用下垂+正惯性控制方式。当频率偏差达到最大值时,频率偏差变化率接近于零,此时如果仍然采用虚拟正惯性控制方式则会加剧频率波动振荡,易引起频率二次跌落,而采用虚拟负惯性控制则可起到减缓二次跌落的作用,因此在频率恢复阶段采用下垂+负惯性控制方式。

考虑到储能 SOC 及调频容量等因素,为避免在调频过程中储能 SOC 越限导致出力不足的问题,现对传统定系数控制方案进行改进,采用 Logistic 函数^[13],根据储能的 SOC 对下垂系数进行实时修正,以合理地进行充放电,见式(11)~式(13)。

$$K_c = \begin{cases} K_{\max}, 0 \leq X_{SOC} < S_{\min} \\ \frac{K_{\max} \cdot K_0 \cdot \exp\left[\frac{n(S_{\max} - X_{SOC})}{(S_{\max} - S_{\min})/2}\right]}{K_{\max} + K_0 \cdot \left\{ \exp\left[\frac{n(S_{\max} - X_{SOC})}{(S_{\max} - S_{\min})/2}\right] - 1 \right\}}, S_{\min} \leq X_{SOC} \leq S_{\max} \\ 0, S_{\max} < X_{SOC} \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$K_d = \begin{cases} 0, 0 \leq X_{SOC} < S_{\min} \\ \frac{K_{\max} \cdot K_0 \cdot \exp\left[\frac{n(X_{SOC} - S_{\min})}{(S_{\max} - S_{\min})/2}\right]}{K_{\max} + K_0 \cdot \left\{ \exp\left[\frac{n(X_{SOC} - S_{\min})}{(S_{\max} - S_{\min})/2}\right] - 1 \right\}}, S_{\min} \leq X_{SOC} \leq S_{\max} \\ K_{\max}, S_{\max} < X_{SOC} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$K_{\text{ess}} = \begin{cases} K_c, \Delta f > 0 \\ K_d, \Delta f < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: K_0 为储能的初始充放电系数; K_{max} 为储能最大充放电系数; K_c 为充电系数; K_d 为放电系数; S_{max} 、 S_{min} 分别为储能荷电状态上、下限; K_{ess} 为下垂控制系数。

为实现下垂和惯性控制策略的优势互补, 本文通过使用模糊控制器输出权重系数实现 2 种策略的平滑切换。自适应控制策略如图 4 所示, 其中 α 和 β 分别为虚拟下垂策略和虚拟惯性控制的权重系数。控制器输入为 $\frac{d\Delta f}{dt}$ 和 Δf , 输出为权重系数 β 。

$$\Delta P_{\text{ess}} = -\alpha \cdot K_{\text{ess}} \cdot \Delta f - \beta \cdot M_{\text{ess}} \cdot \frac{d\Delta f}{dt} \quad (14)$$

式中: ΔP_{ess} 为储能根据频率偏差响应调频指令的功率; M_{ess} 为惯性控制系数。

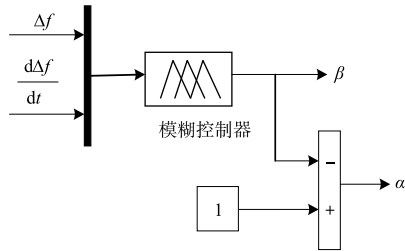


图 4 模糊自适应分配权重系数

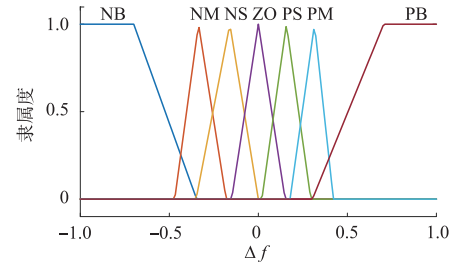
Fig. 4 Fuzzy adaptive allocation weighting coefficients

将频率变化量和频率偏差变化率 $\frac{d\Delta f}{dt}$ 的论域设置都经标么化处理后得到论域 $[-1, 1]$, 模糊子集为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$; 输出变量 β 的论域为 $[0, 1]$, 子集为 $\{\text{Z}, \text{S}, \text{M}, \text{L}, \text{VL}\}$ 。模糊控制器规则如表 1 所示。隶属度函数图像如图 5 所示。模糊控制曲面图如图 6 所示。

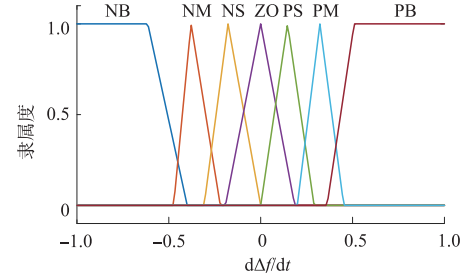
表 1 模糊控制器规则

Tab. 1 Rules for fuzzy controller

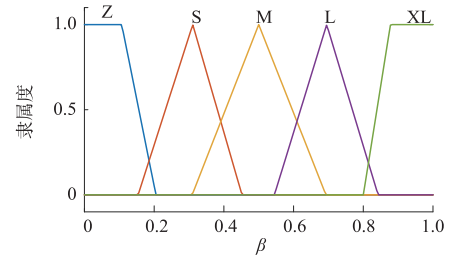
$\frac{d\Delta f}{dt}$	Δf						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	L	L	VL	VL	M	M	M
NM	L	L	M	L	S	S	M
NS	M	M	M	M	Z	M	S
ZO	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PS	S	M	Z	M	M	M	M
PM	M	S	S	L	M	L	L
PB	M	M	M	VL	VL	L	L



(a) 输入(Δf)的隶属度函数



(b) 输入($d\Delta f/dt$)的隶属度函数



(c) 输出(β)的隶属度函数

图 5 隶属度函数图像

Fig. 5 Membership function graph

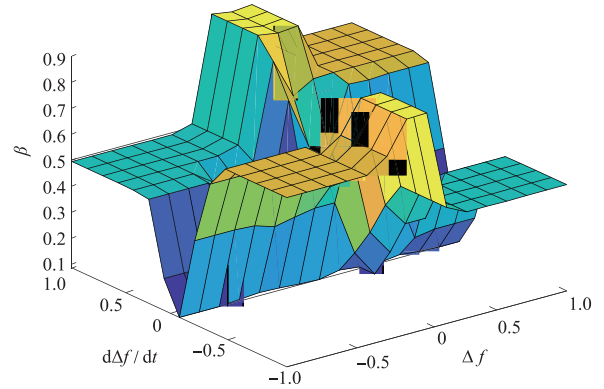


图 6 模糊控制曲面图

Fig. 6 Surface view of fuzzy control

为进一步充分发挥混合储能调频优势, 基于一阶低通滤波对系统频率偏差信号 Δf 进行分解^[22]。飞轮响应速度快, 因此由飞轮响应高频频率偏差, 电池储能响应低频频率偏差^[15]。

$$\begin{cases} \Delta f_L = \frac{1}{1+T_s} \Delta f \\ \Delta f_H = \Delta f - \Delta f_L \end{cases} \quad (15)$$

式中: Δf_L 为低频分量; Δf_H 为高频分量。

电池储能和飞轮储能分别响应频率偏差部分的功率值为

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{bess}} = -\alpha_{\text{bess}} \cdot K_{\text{bess}} \cdot \Delta f - \beta_{\text{bess}} \cdot M_{\text{bess}} \cdot \frac{d\Delta f}{dt} \\ \Delta P_{\text{fess}} = -\alpha_{\text{fess}} \cdot K_{\text{fess}} \cdot \Delta f - \beta_{\text{fess}} \cdot M_{\text{fess}} \cdot \frac{d\Delta f}{dt} \end{cases} \quad (16)$$

式中: M_{bess} 为电池储能的惯性系数; M_{fess} 为飞轮储能的惯性系数。

2 混合储能系统容量配置模型

储能系统的控制策略与容量配置关系密切。有效的控制策略可以改善电网一次调频效果,而合适的容量优化配置可以提高电网的经济效益,对储能系统的推广应用具有重要影响。利用经济评估模型得到在不同控制策略下混合储能系统的最优容量配置结果,并对比不同控制策略下的经济性能。

2.1 目标函数

2.1.1 电池储能的全生命周期成本 $C_{\text{lcc_bess}}$

电池储能的成本包括初始投资成本 $C_{\text{inv_bess}}$ 、运行维护成本 $C_{\text{o\&m_bess}}$ 和置换成本 $C_{\text{scr_bess}}$, 如式(17)所示。各项具体内容及计算公式见文献[23]。

$$C_{\text{lcc_bess}} = C_{\text{inv_bess}} + C_{\text{o\&m_bess}} + C_{\text{scr_bess}} \quad (17)$$

2.1.2 飞轮储能的全生命周期成本 $C_{\text{lcc_fess}}$

飞轮储能的成本包括初始投资成本 $C_{\text{inv_fess}}$ 和运行维护成本 $C_{\text{o\&m_fess}}$ 。该系统在生命周期内不需要进行更换,因此不考虑其置换成本^[24]。

(1) 初始投资成本

$$C_{\text{inv_fess}} = C_{\text{pcs}} P_{\text{rated}} + C_{\text{fess}} E_{\text{rated}} \quad (18)$$

式中: P_{rated} 为额定功率, MW; E_{rated} 为额定容量, MW·h; C_{pcs} 为单位功率成本, 元/MW; C_{fess} 为单位容量成本, 元/(MW·h)。

(2) 运行维护成本

运行维护成本 $C_{\text{o\&m_fess}}$ 包括功率维护成本及容量维护成本。

$$C_{\text{o\&m_fess}} = C_{\text{pom}} P_{\text{rated}} + C_{\text{eom}} E_{\text{rated}} \quad (19)$$

式中: C_{pom} 为单位功率维护成本, 万元/MW; C_{eom} 为单位容量维护成本, 万元/(MW·h)。

采用净现值将成本折算为经济现值, 即

$$N_{\text{o\&m_fess}} = C_{\text{o\&m_fess}} \cdot \frac{(1+r)^{T_{\text{LCC}}} - 1}{r(1+r)^{T_{\text{LCC}}}} \quad (20)$$

式中: $N_{\text{o\&m_fess}}$ 为运行维护成本净现值, 元; T_{LCC} 为飞轮寿命周期; r 为贴现率。

综上所述, 飞轮储能系统在全寿命周期内总成本 $C_{\text{lcc_fess}}$ 为

$$C_{\text{lcc_fess}} = C_{\text{inv_fess}} + N_{\text{o\&m_fess}} \quad (21)$$

2.1.3 相关收益计算

(1) 一次调频收益 Y_s

如果火电机组可以提供有效的一次调频服务, 有关部门将根据其所提供的服务价值进行补偿和奖励。

$$Y_s = A_f \cdot \int (|P_{\text{fess}}(t)| + |P_{\text{bess}}(t)|) dt \quad (22)$$

式中: $P_{\text{fess}}(t)$ 为飞轮实时功率, kW; $P_{\text{bess}}(t)$ 为电池实时功率, kW; A_f 为调频收益单价, 元/(kW·h)。

(2) 火电机组节约成本收益 Y_c

储能系统参与电网调频可以减少火电机组的发电量, 从而实现成本节约。因储能系统而减少的发电量 M 为

$$M = \int (P_{g0}(t) - P_g(t)) dt \quad (23)$$

式中: $P_{g0}(t)$ 为无储能参与时机组出力, MW; $P_g(t)$ 为火电联合调频时火电机组出力, MW。

减少的煤耗成本为

$$Y_c = M \cdot P_c \cdot C_c \quad (24)$$

式中: Y_c 为节约成本收益, 万元; P_c 为机组煤耗, t/(MW·h); C_c 为当地煤价, 万元/t。

(3) 环境收益 Y_E

储能系统参与调频后, 火电机组出力减少, 所以污染物排放量也会减少, 环境治理成本 Y_E 为

$$Y_E = M \cdot G \cdot X \quad (25)$$

式中: G 为单位气体排出量, kg/(MW·h); X 为单位气体治理成本, 万元/kg。

最终得到调频的综合效益为

$$Y = Y_s + Y_c + Y_E \quad (26)$$

容量配置的优化目标表达式为

$$F = \max(Y - C_{\text{lcc_fess}} - C_{\text{lcc_bess}}) \quad (27)$$

2.2 约束条件

通过仿真实验, 在不同控制策略下得出飞轮和电池储能系统的最大充放电功率, 并将最大功率作为功率指令的约束条件。因此, 飞轮和电池储能系统的额定功率约束为

$$\begin{cases} 0 < P_{f,\text{rated}} < P_{f,\text{max}} \\ 0 < P_{b,\text{rated}} < P_{b,\text{max}} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $P_{f,\text{rated}}$ 为飞轮额定功率, kW; $P_{b,\text{rated}}$ 为电池额定功率, kW; $P_{f,\text{max}}$ 为飞轮储能系统功率指令的最大绝对值, kW; $P_{b,\text{max}}$ 为电池储能系统功率指令的最大绝对值, kW。

在电网的一次调频考核中, 通常设定考核周期为 60 s。储能系统的额定容量设定需要在保证自身

电量充足的情况下多次参与一次调频,故假定储能系统的放电时间 Δt 为 2 min,以为混合储能系统留出一定的调频裕量。根据该假设,混合储能的额定容量约束为

$$\begin{cases} 0 < E_{f,\text{rated}} < P_{f,\text{max}} \cdot \Delta t \\ 0 < E_{b,\text{rated}} < P_{b,\text{max}} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (29)$$

式中: $E_{f,\text{rated}}$ 、 $E_{b,\text{rated}}$ 分别为飞轮、电池的额定容量, kW·h。

2.3 算法求解

鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA) 是一种新型的群体智能优化算法^[25],由 Seyedali Mirjalili 于 2016 年提出。该算法模拟了鲸鱼捕食行为,尤其是座头鲸的“泡网捕食”策略,即通过群体间的合作和搜索过程寻找全局最优解。鲸鱼优化算法结合了鲸鱼的行为特征和自然界的合作机制,具备较强的全局搜索能力和优化性能。

在捕食过程中鲸鱼会采用螺旋形态围绕猎物游动。WOA 通过模仿这种行为,更新粒子的位置。具体的更新公式为

$$x_{t+1,i} = x_{t,i} + A \cdot |C \cdot g_t - x_{t,i}| \quad (30)$$

式中: $x_{t,i}$ 为第 t 次迭代中鲸鱼 i 的位置; g_t 为第 t 次迭代中全局最优解的位置; A 和 C 为控制参数,用于控制搜索的方式和程度。

为了增强算法的探索能力,WOA 引入了一定的随机性,使得部分鲸鱼粒子能够随机地在整个搜索空间中进行搜索。具体公式为

$$x_{t+1,i} = x_{t,i} + l \cdot (x_{\text{rand}} - x_{t,i}) \quad (31)$$

式中: x_{rand} 为随机选取的粒子位置; l 为随机系数,以增强搜索的随机性。

3 算例分析

在 MATLAB/Simulink 软件仿真平台搭建含飞轮和电池储能的单区域电网一次调频模型,其中火电机组额定功率为 350 MW,电网额定频率为 50 Hz,相关参数见表 2。仿真结果表明控制策略在参与电网调频时效果较好。

表 2 实验相关参数

Tab. 2 Experimental related parameters

参数	数值	参数	数值
调速器时间常数 T_g	0.08	飞轮储能系统时间常数 $T_{E,t}/s$	1
低压缸功率系数 F_{LP}	0.4	电池储能系统时间常数 $T_{E,b}/s$	5
中压缸功率系数 F_{IP}	0.3	低通滤波时间常数 T/s	2
高压缸功率系数 F_{HP}	0.3	低压蒸汽时间常数 T_{CO}/s	0.5
惯性常数 H	5	再热蒸汽时间常数 T_{RH}/s	10
负荷阻尼系数 D	0.8	高压蒸汽时间常数 T_{CH}/s	0.3

3.1 控制策略评价指标

(1) 阶跃扰动

评价指标为火电机组出力峰值 $P_{g,\text{max}}$ 、稳态频率偏差绝对值 $|f_s|$ 和最大动态频率偏差绝对值 $|f_m|$ 。 $P_{g,\text{max}}$ 数值越小对火电机组越有益, $|f_m|$ 和 $|f_s|$ 数值越小调频效果越好。

(2) 连续扰动

评价指标为频率峰值差 Δf 、频率偏差平均值 $\bar{f}$ 、频率总体偏离程度 f_{sd} 及机组出力平均值 $\bar{P}_g$, 其中: Δf 和 f_{sd} 越小调频效果越好; $\bar{P}_g$ 反映了调频过程中火电的出力占比,其值越小表明储能利用度越高。

$$\Delta f = f_{\text{max}} - f_{\text{min}} \quad (32)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k f_j \quad (33)$$

$$f_{sd} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (f_j - \bar{f})^2} \quad (34)$$

$$\bar{P}_g = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k P_{g,j} \quad (35)$$

式中: f_{max} 、 f_{min} 分别为系统频率最大值、最小值, Hz; f_j 为在 j 处采样点的频率, Hz; $P_{g,j}$ 为机组在 j 处采样点的功率, MW; k 为采样数量。

3.2 不同策略调频效果对比

$t=10$ s 时,在仿真模型中加入阶跃负荷扰动,幅值标幺值为 0.1,仿真时间设为 60 s。设置 3 组对照组(对应 3 种策略),其中:策略 1 为仅火电机组调频,策略 2 为传统变 K 下垂控制策略,策略 3 为无模糊自适应的下垂+惯性控制策略。不同控制策略下机组出力见图 7,频率偏差见图 8,评价指标结果见表 3。

阶跃扰动下混合储能辅助火电机组调频可以有效提升系统调频效果,并且本文策略调频效果最好,与策略 1、策略 2、策略 3 相比,其最大动态频率偏差 $|f_m|$ 分别减小了 40.45%、27.40% 和 8.6%,稳态频率偏差 $|f_s|$ 分别减小 39.58%、9.4% 与 12.12%,且明显减少了火电出力的频繁调整,机组出力最大

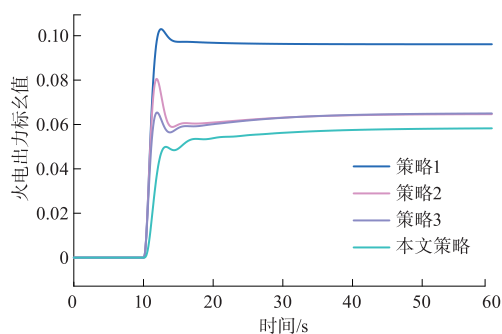


图 7 阶跃扰动下火电机组出力

Fig. 7 Thermal unit output power under step disturbance

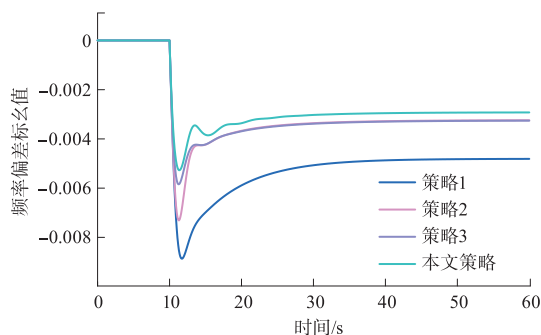


图8 阶跃扰动下频率偏差

Fig. 8 Frequency difference under step disturbance

表3 阶跃扰动下调频指标

Tab. 3 Frequency regulation index under step disturbance

策略	$ f_m $ 标幺值	$ f_s $ 标幺值	$P_{g,max}$ 标幺值
策略1	8.9×10^{-3}	4.8×10^{-3}	103.0×10^{-3}
策略2	7.3×10^{-3}	3.2×10^{-3}	80.6×10^{-3}
策略3	5.8×10^{-3}	3.3×10^{-3}	65.4×10^{-3}
本文策略	5.3×10^{-3}	2.9×10^{-3}	58.3×10^{-3}

值 $P_{g,max}$ 分别减小 43.40%、27.67% 和 10.86%。

在连续扰动下进行仿真,设置模拟试验总时间为 200 s,采样时间为 3 s。连续扰动下火电机组出力见图 9,频率偏差见图 10,连续扰动下调频指标见表 4。

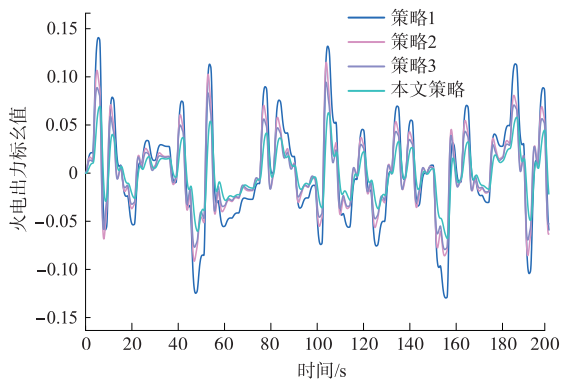


图9 连续扰动下火电机组出力

Fig. 9 Thermal unit output power under continuous disturbance

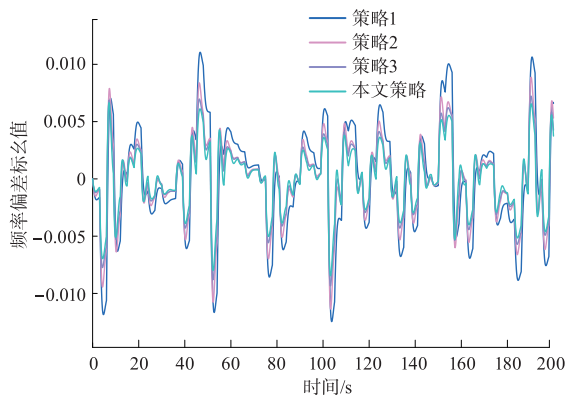


图10 连续扰动下频率偏差

Fig. 10 Frequency difference under continuous disturbance

表4 连续扰动下调频指标

Tab. 4 Frequency regulation index under continuous disturbance

控制策略	Δf 标幺值	f_{sd} 标幺值	$\bar{P}_g$ 标幺值
策略1	23.5×10^{-3}	4.1×10^{-3}	3.8×10^{-3}
策略2	20.2×10^{-3}	3.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}
策略3	16.6×10^{-3}	2.6×10^{-3}	1.7×10^{-3}
本文策略	15.1×10^{-3}	2.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}

由表4可以看出,本文策略在连续扰动下也可以有效提升系统调频效果,频率峰值差 Δf 与策略1、策略2、策略3相比,分别减小 35.74%、25.25% 和 9.04%,频率总体偏离程度 f_{sd} 分别减小 43.90%、23.33% 与 11.54%。此外,机组出力平均值 $\bar{P}_g$ 分别减小了 65.79%、35% 和 23.53%,可以有效减缓火电机组的频繁出力调整。

3.3 容量配置结果分析

基于2.1节,建立混合储能辅助火电机组一次调频的容量配置经济评估模型,电池储能相关参数设置见文献[23],飞轮储能相关参数见文献[24]。为比较本文策略在经济性方面的优势,仍选取策略2和策略3作为对比进行容量优化配置。

采用鲸鱼优化算法得出了3种策略下混合储能系统的最佳容量配置结果,以及飞轮和电池储能的全生命周期成本和净收益,具体结果见表5。

表5 容量配置结果

Tab. 5 Capacity configuration results

参数	策略2	策略3	本文策略
飞轮额定功率 $P_{f,rated}/kW$	83	245	250
飞轮额定容量 $E_{f,rated}/(kW \cdot h)$	2.77	8.17	8.33
电池额定功率 $P_{b,rated}/kW$	24	62	128
电池额定容量 $E_{b,rated}/(kW \cdot h)$	0.80	2.07	4.27
飞轮储能全生命周期成本 $C_{lcc_fess}/万元$	20.77	61.05	62.55
电池储能全生命周期成本 $C_{lcc_bess}/万元$	6.43	16.88	34.29
净收益 $Y/万元$	1 195	5 262	7 926

在策略2下,飞轮储能系统的容量配置为 83 kW/2.77 kW·h,电池储能的容量配置为 24 kW/0.8 kW·h,在该配置下净收益可达 1 195 万元。

在策略3下,飞轮容量配置为 245 kW/8.17 kW·h,电池容量配置为 62 kW/2.07 kW·h。在该控制策略下混合储能出力占比变大,故投资成本相较于变K法的略有提升,但净收益相较于变K法的约提高了 340%;本文策略下混合储能系统的容量配置最大,其中飞轮为 250 kW/8.33 kW·h,电池储能配置为 128 kW/4.27 kW·h,净收益结果最大,相

比于变 K 法净收益提升了 563%, 相比于下垂+惯性策略净收益提升了 50.6%。

为进一步分析各控制策略在最优配置条件下的调频性能, 对 3 种控制策略在各自最优配置下的调频效果进行了对比。阶跃扰动下火电机组出力见图 11, 频率偏差变化见图 12, 评价指标结果见表 6。在储能容量达到最优配置时, 本文策略调频效果最好, 相比于策略 1、策略 2、策略 3, 最大动态频率偏差 $|f_m|$ 分别减小了 43.82%、30.56% 和 12.28%, 稳态频率偏差 $|f_s|$ 分别减小 39.58%、9.38% 与 12.12%, 机组出力最大值 $P_{g, \max}$ 分别减小 43.40%、26.20% 和 10.31%。

连续扰动下火电机组出力见图 13, 频率偏差见图 14, 评价指标结果见表 7。本策略相比于策略 1、

策略 2、策略 3, 频率峰值差 Δf 分别减小 42.13%、30.61% 和 12.82%, 频率总体偏离程度 f_{sd} 分别减小 46.34%、24.14% 与 12%。此外, 机组出力平均值 $\bar{P}_g$ 分别减小了 67.57%、36.84% 和 25%, 可以有效减缓火电机组的频繁出力调整。

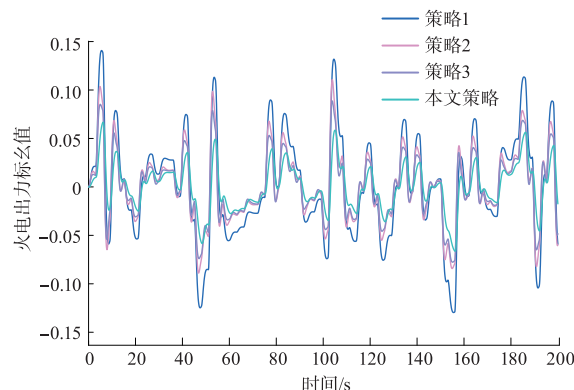


图 13 连续扰动下火电机组出力(最优容量配置)

Fig. 13 Thermal unit output power under continuous disturbance (with optimal capacity configuration)

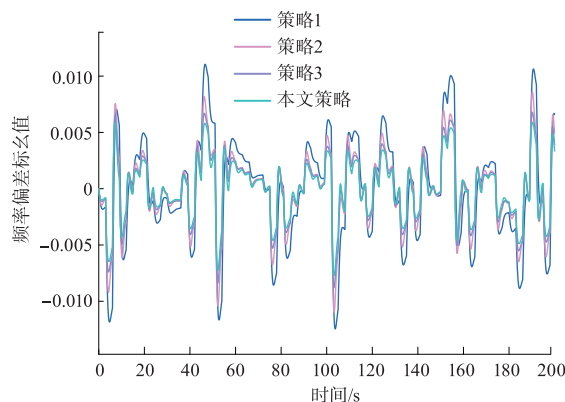


图 14 连续扰动下频率偏差(最优容量配置)

Fig. 14 Frequency difference under continuous disturbance (with optimal capacity configuration)

表 7 连续扰动下调频指标(最优容量配置)

Tab. 7 Frequency regulation index under continuous disturbance (with optimal capacity configuration)

策略	Δf 标么值	f_{sd} 标么值	$\bar{P}_g$ 标么值
策略 1	23.5×10^{-3}	4.1×10^{-3}	3.7×10^{-3}
策略 2	19.6×10^{-3}	2.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}
策略 3	15.6×10^{-3}	2.5×10^{-3}	1.6×10^{-3}
本文策略	13.6×10^{-3}	2.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}

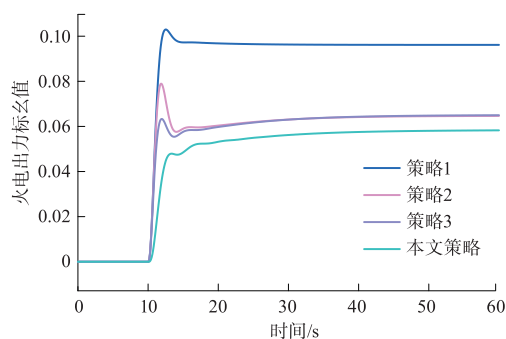


图 11 阶跃扰动下火电机组出力(最优容量配置)

Fig. 11 Thermal unit output power under step disturbance (with optimal capacity configuration)

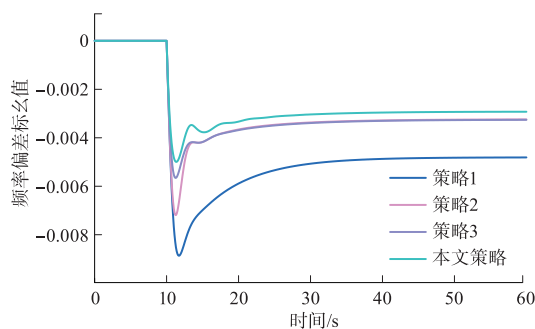


图 12 阶跃扰动下频率偏差(最优容量配置)

Fig. 12 Frequency difference under step disturbance (with optimal capacity configuration)

表 6 阶跃扰动下调频指标(最优容量配置)

Tab. 6 Frequency regulation index under step disturbance (with optimal capacity configuration)

策略	$ f_m $ 标么值	$ f_s $ 标么值	$P_{g, \max}$ 标么值
策略 1	8.9×10^{-3}	4.8×10^{-3}	103.0×10^{-3}
策略 2	7.2×10^{-3}	3.2×10^{-3}	79.0×10^{-3}
策略 3	5.7×10^{-3}	3.3×10^{-3}	65.0×10^{-3}
本文策略	5.0×10^{-3}	2.9×10^{-3}	58.3×10^{-3}

4 结论

(1) 与无储能参与相比, 采用混合储能系统来辅助火电机组的调频可以有效减小机组出力波动, 提升调频性能。

(2) 在本文策略下,混合储能辅助电网调频效果改善明显。该控制策略在连续扰动下相较于变 K 法和下垂+惯性控制系统频率,总体偏离程度 f_{sd} 分别减小23.33%与11.54%,火电机组出力平均值 $\bar{P}_g$ 分别减小35%和23.53%,有利于机组安全运行。

(3) 通过容量优化配置结果可以看出,本文策略不仅在调频能力上有显著提升,从经济角度出发其净收益结果也最高,相比于变 K 法净收益提升了563%,相比于下垂+惯性策略净收益提升了50.6%。

参考文献:

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258.
- [2] 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.
- [3] 郝玲,陈磊,黄怡涵,等. 新型电力系统下燃煤火电机组一次调频面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 14-29.
HAO Ling, CHEN Lei, HUANG Yihan, et al. Challenges and prospects of primary frequency regulation of coal-fired thermal power units for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(8): 14-29.
- [4] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2023年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1359-1397.
CHEN Haisheng, LI Hong, XU Yujie, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1359-1397.
- [5] 张文政,王玮,高嵩,等. 考虑火电运行平稳性的飞轮储能辅助二次调频控制策略[J]. 动力工程学报, 2024, 44(6): 919-929.
ZHANG Wenzheng, WANG Wei, GAO Song, et al. Secondary frequency control strategy assisted by fly-wheel energy storage considering operation stability of thermal power plant[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(6): 919-929.
- [6] 丁佳欣,罗日忠,何毅,等. 基于电池储能系统寿命的SOC反馈的自适应电厂调频策略[J]. 动力工程学报, 2025, 45(3): 391-398, 419.
DING Jiaxin, LUO Rizhong, HE Yi, et al. Adaptive frequency modulation strategy of power plant based on SOC feedback of battery energy storage system life[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(3): 391-398, 419.
- [7] 隋云任,梁双印,黄登超,等. 飞轮储能辅助燃煤机组调频动态过程仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2597-2605.
SUI Yunren, LIANG Shuangyin, HUANG Dengchao, et al. Simulation study on frequency modulation process of coal burning plants with auxiliary of fly-wheel energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2597-2605.
- [8] 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.
- [9] 梁继业,袁至,王维庆,等. 基于电池储能系统的综合自适应一次调频策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(7): 2322-2334.
LIANG Jiye, YUAN Zhi, WANG Weiqing, et al. Comprehensive adaptive primary frequency control strategy based on battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(7): 2322-2334.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] 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.
- [13] 孙风东. 飞轮储能-火电机组支撑电网一次调频控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [14] 洪烽, 梁璐, 逢亚蕾, 等. 基于自适应协同下垂的飞轮储能联合火电机组一次调频控制策略[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 36-44.
HONG Feng, LIANG Lu, PANG Yalei, et al. Primary frequency regulation of flywheel energy storage combined thermal power unit based on adaptive coordinated droop control[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 36-44.
- [15] 陈彪, 王玮, 高嵩, 等. 计及灵活经济环保运行的火电-飞轮储能系统容量配置与调频参数协同优化[J]. 动力工程学报, 2024, 44(3): 376-384.
CHEN Biao, WANG Wei, GAO Song, et al. Co-optimization of capacity allocation and frequency control parameters for thermal power-flywheel energy storage system considering flexible, economical and environment friendly operation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 376-384.
- [16] 洪烽, 梁博洋, 孙风东, 等. 多运行阶段下飞轮储能耦合火电机组调频控制策略[J]. 发电技术, 2026, 47(1): 89-98.
HONG Feng, LIANG Boyang, SUN Fengdong, et al. Frequency regulation control strategy for flywheel energy storage coupled with thermal power unit under multiple operation stages[J]. Power Generation Technology, 2026, 47(1): 89-98.
- [17] 李聪, 秦立军. 基于改进粒子群算法的混合储能独立调频的容量优化研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 426-434.
LI Cong, QIN Lijun. Sizing optimization for hybrid energy storage system independently participating in regulation market using improved particle swarm optimization[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(1): 426-434.
- [18] 严晓生, 刘仲稳, 赵建红, 等. 混合储能辅助火电机组一次调频及其容量配置[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 647-654.
YAN Xiaosheng, LIU Zhongwen, ZHAO Jianhong, et al. Primary frequency regulation and capacity configuration of hybrid energy storage auxiliary thermal power unit[J]. Acta Energetica Sinica, 2024, 45(11): 647-654.
- [19] HAN Xu, LIU Zhongwen. Research on frequency modulation capacity configuration and control strategy of multiple energy storage auxiliary thermal power unit[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 109186.
- [20] 田云峰, 郭嘉阳, 刘永奇, 等. 用于电网稳定性计算的再热凝汽式汽轮机数学模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 39-44.
TIAN Yunfeng, GUO Jiayang, LIU Yongqi, et al. A mathematical model of rehear turbine for power grid stability calculation[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 39-44.
- [21] WEN Shizhao, WANG Hongzeng, QIAN Jinhua, et al. A novel combined model based on echo state network optimized by whale optimization algorithm for blast furnace gas prediction[J]. Energy, 2023, 279: 128048.
- [22] 王腾, 张新燕, 王亚东, 等. 基于二阶滤波的混合储能系统能量管理控制策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 399-405.
WANG Teng, ZHANG Xinyan, WANG Yadong, et al. Energy management control strategy of hybrid energy storage system based on second-order filtering[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(11): 399-405.
- [23] 黄际元, 李欣然, 常敏, 等. 考虑储能电池参与一次调频技术经济模型的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 112-121.
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CHANG Min, et al. Capacity allocation of BESS in primary frequency regulation considering its technical-economic model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 112-121.
- [24] 梁璐. 飞轮储能辅助发电机组参与调频的容量配置与控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [25] YANG Tingting, LIU Ziyuan, ZENG Deliang, et al. Simulation and evaluation of flexible enhancement of thermal power unit coupled with flywheel energy storage array[J]. Energy, 2023, 281: 128239.