

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305061

火-储耦合协同调频策略下飞轮储能 容量配置一体化研究

洪 烽¹, 贾欣怡¹, 梁 璐¹, 郝俊红², 王 玮¹, 房 方¹

(1.华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2.华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘 要] 面对大规模波动性新能源并网带来的电网频率安全问题, 飞轮储能辅助火电机组参与调频可以有效提升电网发电侧频率主动支撑能力, 是能源结构转型期间支撑电网频率安全的有效保障。针对飞轮储能系统的出力控制策略和容量优化配置, 提出一种用于辅助火电机组一次调频的飞轮储能控制策略与容量配置一体化方法。首先设计了一种考虑机组实时状态的飞轮储能协同调频控制策略; 提出了考虑电厂一次调频收益的经济评估模型, 采用改进的粒子群算法进行求解; 最后采用华北某电厂 315 MW 机组实际调频数据进行仿真验证。仿真结果表明, 所提出一体化配置方案能够在有效改善电网调频效果的同时兼顾投资方收益, 该研究对推动飞轮储能辅助火电参与电力系统调频服务的现场工程应用具有重要理论指导意义。

[关 键 词] 飞轮储能; 一次调频; 协同控制; 容量优化; 一体化配置

[引用本文格式] 洪烽, 贾欣怡, 梁璐, 等. 火-储耦合协同调频策略下飞轮储能容量配置一体化研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 65-75. HONG Feng, JIA Xinyi, LIANG Lu, et al. Research on integration of flywheel energy storage capacity configuration under fire-storage coupling coordinated frequency modulation strategy[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 65-75.

Research on integration of flywheel energy storage capacity configuration under fire-storage coupling coordinated frequency modulation strategy

HONG Feng¹, JIA Xinyi¹, LIANG Lu¹, HAO Junhong², WANG Wei¹, FANG Fang¹

(1.School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2.School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Facing the frequency security problem caused by large-scale integrations of fluctuating new energy, the participation of thermal power units coupled with flywheel energy storage in frequency regulation can effectively improve the active power support capability of the power grid from the generation side, which is an effective guarantee for the frequency security of the power grid. According to the output control strategy and capacity configuration of flywheel energy storage systems, this paper proposed a combined method of flywheel control strategy and capacity configuration for primary frequency regulation to optimize the thermal power unit operations. Firstly, a coordinated frequency regulation control strategy of flywheel energy storage considering the real-time power output of thermal power units is designed. An economic evaluation model considering the primary frequency regulation benefit of power plants is proposed, and a refined particle swarm optimization algorithm is utilized to tackle the problem. Finally, the actual data of a 315 MW unit in a power plant from the northern part of China are simulated and verified. The result shows that the proposed integrated configuration strategy can effectively improve the frequency modulation effect of the power grid while taking the cost of energy storage investments into account. The research results are of great significance for promoting engineering applications of flywheel energy storage participating in frequency regulation services.

收 稿 日 期: 2023-05-15

基 金 项 目: 国家自然科学基金项目 (52006062; 52176005)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52006062; 52176005)

第一作者简介: 洪烽 (1991), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为储能+发电支撑电网调频运行控制, hongf@ncepu.edu.cn.

通信作者简介: 梁璐 (1998), 男, 博士研究生, 主要研究方向为储能辅助电网调频控制优化, lianglu@ncepu.edu.cn.

Key words: flywheel energy storage; primary frequency control; coordinated control; capacity optimization; integration configuration

随着国家“双碳”目标的提出,构建以风电和太阳能等可再生能源为主的新型电力系统成为当前我国能源发展的主要方向^[1-3]。未来的火电也将从主力发电电源的角色转变为保障电力供应安全的支撑性能源和促进可再生能源消纳的重要调节性电源,功能定位转变为“安全兜底、调节支撑”^[4-5]。

火电机组长期运行在宽负荷、频繁波动的动态工况下,机组的调频响应能力受限将无法满足新能源大规模并网带来的系统安全稳定和经济运行要求。新型储能快速发展及商业化应用为上述问题提供了解决思路,火电机组耦合储能技术参与调频,是增强电力系统调节能力和提高频率稳定性的的重要途径和有效解决方案^[6-8]。

飞轮储能系统凭借快速响应、调节精准、功率密度大的特点,可以有效应用于辅助火电机组参与时间尺度较短的一次调频^[9]。储能系统的控制策略和容量配置是飞轮储能系统在电网调频应用的2个重要研究课题。控制策略可以在保持飞轮荷电状态的基础上改善电网一次调频效果,而容量优化配置的结果会直接影响投资方的经济效益,对储能系统的推广应用具有重要影响。

何林轩等通过仿真验证了飞轮储能的参与可以减少电网频偏差量和联络线上交换功率波动,飞轮的参与有效减轻了机组负担,对延长机组寿命具有重要意义^[10]。李军徽等引入随频率自适应变化的出力权重因子,在一次调频控制方案中考虑了储能系统荷电状态(SOC)恢复,提出储能SOC自恢复方法^[11]。李若等依据区域控制偏差信号的划分,定量描述了电网二次调频备用容量状态,设计了兼顾调频效果和储能SOC维持效果的储能协调控制策略^[12]。上述策略中,飞轮储能系统的出力控制基本独立于火电机组,储能系统的出力只与系统频差有关,未考虑火电机组实时状态的影响,储能系统的容量参数由人为设定,存在一定的局限性。

针对储能系统的容量优化配置,罗耀东等提出一种考虑积分电量贡献和全生命周期成本的飞轮储能系统容量配置方法,在最优容量配置结果下可以提升积分电量贡献指数到98.2%,飞轮投资回收周期为4.3年^[13]。武鑫等设计了一种粒子滤波下的飞轮阵列容量配置方法,在该设计方案容量配置结果下核电机积分电量贡献指数可提高2.69倍^[14]。

宋杰等通过对一次调频目标功率指令的分解重构,提出一种基于经验模态分解(EMD)的混合储能容量规划方法,该方法考虑功率高低频响应,有利于火电机组调频储能规划实践^[15]。上述容量配置研究中,调频收益的计算无统一标准,对于储能在一次调频过程中的收益和火电效益没有明确指标,储能配置后针对电网调频效果的分析较少。

针对上述问题,本文考虑将飞轮储能系统辅助火电机组一次调频的控制策略与容量配置问题进行一体化研究,在保证调频效果的同时兼顾投资收益。首先提出一种考虑火电机组实时出力的协同调频控制策略;然后建立考虑调频收益和火电机组效益的全生命周期容量配置经济评估模型,在协同控制策略下得到飞轮储能系统的初步功率指令后,采用粒子群算法求解经济评估模型,得到火-储耦合协同调频策略下飞轮储能系统的最优容量配置结果;最后选取某电厂实际一次调频数据进行仿真验证。

1 火-储耦合系统一次调频控制

1.1 系统拓扑结构

通过在电源侧配置飞轮储能系统主动参与一次调频,可以有效提升电网频率安全支撑能力^[16]。飞轮储能系统辅助火电机组参与一次调频的拓扑结构如图1所示。

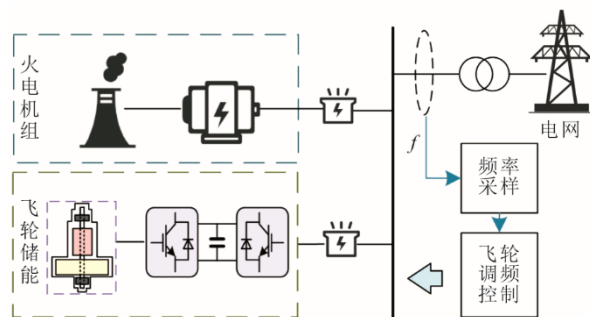


图1 火-储耦合调频系统拓扑结构

Fig.1 Topology structure of thermal power unit-flywheel energy storage coupling frequency modulation system

当发电侧与用户侧功率偏差导致电网频率出现波动时,火电机组协同飞轮储能系统根据频差信号快速响应,提供或吸收电网有功功率,减小电网频率偏差的波动量。目前工程实践中,飞轮储能系统通常通过扩建高压柜和升压变压器接入高压厂用母线,通过从高压厂用母线吸收和释放电能参与

一次调频, 储能系统的功率和火电机组发电机功率经过同步相量测量装置测量合成后上传至电网, 便于电网侧监测与考核^[17]。

1.2 汽轮机实时出力增量的动态预测

火电机组运行过程中内部耦合严重, 从多变量控制系统角度考虑, 通常认为主蒸汽热力参数的变化受到锅炉侧和汽轮机侧的共同影响。主蒸汽压力和进入汽轮机做功的主蒸汽流量变化影响因素有汽轮机调节阀的开度变化以及锅炉侧燃料量的输入能量改变 2 部分^[18]。由于一次调频时间尺度较短, 一般在 1 min 以内, 而燃料侧响应的时间较长, 因此燃料量的改变并不能达到快速弥补锅炉蓄能的效果, 其对于机组一次调频性能影响有限^[19]。本文分析时忽略机组燃料侧的影响, 认为一次调频过程中主蒸汽流量的增量变化主要由锅炉侧实时主蒸汽压力和汽轮机阀门开度变化共同决定。

基于火电机组实时主蒸汽压力和阀门开度的状态和变化量, 建立主蒸汽流量预测模型^[20]:

$$\Delta D_t = \int u_t dP_t + \int P_t du_t = \int (u_t \frac{dP_t}{dt} + P_t \frac{du_t}{dt}) dt \quad (1)$$

式中: ΔD_t 为主蒸汽流量实时增量, u_t 为汽轮机调节阀开度; P_t 为主蒸汽压力。

锅炉侧主蒸汽在压力作用下进入汽轮机做功, 联合汽轮机传递函数模型^[21], 可以得到汽轮机输出功率的增量预测模型:

$$\Delta P_{pre} = \frac{1+s\lambda T_{RH} F_{HP} + sT_{RH} F_{HP}}{(1+sT_{SC})(1+sT_{RH})} \Delta D_t \quad (2)$$

式中: ΔP_{pre} 为汽轮机输出功率实时增量; T_{SC} 、 T_{RH} 分别为高、中压蒸汽容积时间常数; F_{HP} 为高压缸功率系数; λ 为高压缸过调系数。

根据汽轮机输出功率的增量预测模型, 动态工况下机组的一次调频出力能够实现准确量化评估。飞轮的功率指令根据评估结果自适应地调整, 弥补机组调频出力的不足, 使得联合调频系统的出力满足电网频差需求。

1.3 飞轮储能系统协同调频控制

本文飞轮储能协同调频控制策略如图 2 所示。采用的协同调频控制策略在飞轮储能系统下垂控制的基础上, 考虑机组实时调频出力。根据机组预测出力值自适应地调整飞轮的功率指令, 弥补动态工况下机组调频能力的不足, 提高联合调频系统的合作出力, 该控制策略的有效性已在文献[22]中得到验证。由图 2 可见, 火电机组出力指令由频差信号经过死区与调差系数后产生, 飞轮储能系统的功率指令主要由下垂控制出力 P_s 和弥补火电机组出力的 ΔP 组成。

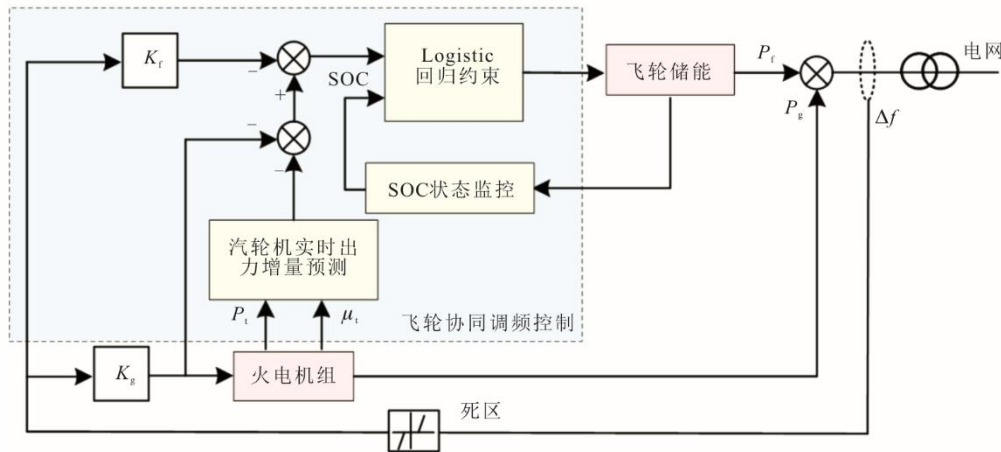


图 2 飞轮储能协同调频控制策略

Fig.2 Flywheel energy storage cooperative frequency modulation control strategy

飞轮储能系统对应 2 个部分出力计算公式为:

$$P_s = -K_f \Delta f \quad (3)$$

$$\Delta P = -K_g \Delta f - \Delta P_{pre} \quad (4)$$

飞轮储能系统的初始出力指令计算公式为:

$$P_r = P_s + \Delta P \quad (5)$$

相较化学电池, 飞轮储能系统具有循环充放电次数更多的优势, 但是这种能力并不是无限的。为了平滑储能出力, 尽可能避免过充过放, 提高运行寿命的同时留一定的备用容量来响应多次调频指令。本文引入逻辑回归函数, 根据飞轮的实时荷电

状态约束飞轮的实时充放电功率^[23]。计算公式为:

$$P_d(t) = \frac{KP_m P \times e^{\frac{r \times (S_{SOC} - S_{SOC, \min})}{b}}}{K + P_0 \times e^{\frac{r \times (S_{SOC} - S_{SOC, \min})}{b}}} \quad (6)$$

$$P_c(t) = \frac{KP_m P \times e^{\frac{r \times (S_{SOC, \max} - SOC)}{b}}}{K + P_0 \times e^{\frac{r \times (S_{SOC, \max} - SOC)}{b}}} \quad (7)$$

式中: $P_c(t)$ 为飞轮储能系统的实时最大充电功率, MW; $P_d(t)$ 为飞轮储能系统的实时最大放电功率, MW; P_m 为储能系统额定功率, MW; S_{SOC} 为储能系统当前荷电状态; $S_{SOC, \min}$ 为储能系统最小允许荷电状态; $S_{SOC, \max}$ 为储能系统最大允许荷电状态; K 、 P 、 P_0 、 b 、 r 为逻辑回归函数的特征参数, 具体取值见表 1。

表 1 Logistic 函数参数
Tab.1 Parameters of Logistic function

特征参数	数值
K	3.15
P	1/315
P_0	0.01
b	0.4
r	13

最终得到飞轮储能系统的实时功率指令:

$$P_r = \begin{cases} \min(P_d(t), P_r'), & \Delta f < -0.033 \text{ Hz} \\ -\min(|P_c(t)|, |P_r'|), & \Delta f > 0.033 \text{ Hz} \end{cases} \quad (8)$$

2 飞轮储能系统容量配置模型

2.1 目标函数

运营商对产品的选择不仅取决于飞轮储能系统的初始成本, 还要考虑产品在全生命周期内的投资、运维等费用。基于全生命周期成本理论并采用净现值将不同时间上的成本折算为现值^[24], 同时考虑飞轮参与一次调频的相关收益, 包括调频收益、环境收益以及节约煤耗收益, 建立飞轮储能系统辅助发电机组一次调频的经济评估模型。

2.1.1 全生命周期成本

根据飞轮储能系统的建设需求及储能特性, 本文考虑的全生命周期成本包括初始投资成本、运行维护成本和电量损失成本 3 项。对于飞轮储能系统, 其设备寿命一般为 20 年, 在全生命周期内无需更换, 因此不考虑其置换成本。

1) 初始投资成本

飞轮储能系统寿命长, 不像电池储能系统需要经常置换, 因此在其生命周期内, 其整体投资成本

只有初始投资成本 C_{inv} , 按照功率和容量分为功率投资成本以及容量投资成本。初始投资成本 C_{inv} 计算公式为:

$$C_{inv} = C_{pcs} P_{rated} + C_{fess} E_{rated} \quad (9)$$

式中: P_{rated} 为储能变流器 (PCS) 的额定功率, MW; E_{rated} 为储能的额定容量, MW·h; C_{pcs} 为 PCS 的单位功率成本, 万元/MW; C_{fess} 为单位容量的成本, 万元/(MW·h)。

2) 运行维护成本

与投资成本相同, 运行维护成本 $C_{O,M}$ 也分为功率维护成本及容量维护成本 2 部分。运维成本 $C_{O,M}$ 计算公式为:

$$C_{O,M} = C_{PO,M} P_{rated} + C_{EO,M} E_{rated} \quad (10)$$

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

因为运行维护成本按年度产生, 采用净现值方法可以将生命周期内全部成本折算为经济现值 $N_{CO,M}$, 转换计算公式为:

$$N_{CO,M} = C_{O,M} \frac{(1+r)^{T_{LCC}} - 1}{r(1+r)^{T_{LCC}}} \quad (11)$$

式中: T_{LCC} 为飞轮寿命周期, 本文取 20 年; r 为贴现率。

3) 损失电量成本

飞轮储能系统虽然采用了磁悬浮和真空系统减少能量损耗, 但在其充放电过程中, 仍有部分电量损耗, 损失电量成本 C_{el} 计算公式为:

$$C_{el} = P_{ef} \left[\int_{\{P_{FESS}(t) < 0\}} |P_{FESS}(t)| \left(\frac{1}{\eta_c} - 1 \right) dt + \int_{\{P_{FESS}(t) > 0\}} P_{FESS}(t) (1 - \eta_d) dt \right] \quad (12)$$

式中: $P_{FESS}(t)$ 为飞轮实时出力, MW; P_{ef} 为飞轮运行损失电量单价, 万元/(MW·h); η_c 、 η_d 分别为充、放电效率, %。

损失电量成本同样按年度产生, 其现值 N_{cel} 计算公式为:

$$N_{cel} = C_{el} \frac{(1+r)^{T_{LCC}} - 1}{r(1+r)^{T_{LCC}}} \quad (13)$$

综上分析, 可得飞轮储能系统在全生命周期内总成本 C_{LCC} 为:

$$C_{LCC} = C_{inv} + N_{CO,M} + N_{cel} \quad (14)$$

2.1.2 相关效益

1) 一次调频收益

各地区《发电厂并网两个细则》指出火电机组

参与调频要接受电网考核。与之相对应,未来的发展趋势下,发电侧机组如能提供额外的一次调频服务,有关部门也将给予补助奖励产生的服务价值,已有多地发布相关细则提出对火电机组辅助参与调频考虑提供补偿。因此本文考虑飞轮储能系统参与调频辅助服务,电力市场支付对应的费用予以鼓励。一次调频收益计算公式为:

$$Y_s = A_f \int |P_{FESS}(t)| dt \quad (15)$$

式中: A_f 为储能参与一次调频的收益单价, 万元/(MW·h)。

2) 火电机组节约成本收益

对于常规火电机组来说,飞轮储能系统参与并网调频,一方面可以减少机组频繁动作,延长寿命;另一方面可以减少火电机组一次调频期间发电量,有效节约机组煤耗,从而为机组运行节约成本^[25]。

常规火电机组因飞轮储能系统而减少的发电量 M 为:

$$M = \int (P_{G0}(t) - P_G(t)) dt \quad (16)$$

式中: $P_{G0}(t)$ 为常规火电机组单独参与调频时 t 时刻出力, MW; $P_G(t)$ 为火-储联合调频时火电机组在 t 时刻的出力, MW。

飞轮储能接入常规机组后所节省煤耗成本 Y_C 计算公式为:

$$Y_C = M P_C C_c \quad (17)$$

式中: Y_C 为减少火电机组煤耗成本, 万元; P_C 为火电机组煤耗水平, t/(MW·h); C_c 为燃煤平均价格, 万元/t。

3) 环境收益

飞轮储能系统可以在电网电量充裕时候充电,在电网电量短缺的时候放电,因此可以减少火电机组参与一次调频时的发电量,火电机组污染物排放量随之减少,环境治理成本降低,将其认定为飞轮储能系统参与一次调频的环境收益。当前火电机组主要产生的环境污染物为 SO_2 和 NO_x , 2 种气体对应的环境治理成本 Y_E 为:

$$Y_E = M(G_{SO_2} \times X_{SO_2} + G_{NO_x} \times X_{NO_x}) \quad (18)$$

式中: G_{SO_2} 和 G_{NO_x} 分别为单位电量下 SO_2 和 NO_x 气体排出量, kg/(MW·h); X_{SO_2} 和 X_{NO_x} 分别为单位 SO_2 和 NO_x 治理成本, 万元/kg。

采用净现值方法将飞轮运行寿命内的收益进行折现,最终得到飞轮储能系统辅助火电机组一次调频的综合效益为:

$$C = Y_s + Y_E + Y_C - C_{LCC} \quad (19)$$

本文采取全生命周期内的飞轮储能系统辅助火电机组一次调频综合收益最大化为优化目标,因此容量配置的优化目标函数为:

$$F = \max(C) \quad (20)$$

2.2 约束条件

1) 额定功率约束

本文考虑采用传统的额定功率通用计算方法对飞轮储能系统的功率上限进行限制,可将飞轮储能系统最大充放电功率设置为储能功率指令的最大值,该值在不同控制策略下进行仿真实验得到,因此其额定功率 P_{rated} 约束为:

$$0 < P_{rated} < P_{f \max} \quad (21)$$

式中: $P_{f \max}$ 为不同控制策略下飞轮储能系统功率指令的最大绝对值, MW。

2) 额定容量约束

电网对一次调频的考核周期一般为 60 s,为充分发挥飞轮调频能力,容量配置应保证电量充足的情况下飞轮可以多次参与一次调频。因此,本文考虑对飞轮留有一定调频裕量,飞轮额定放电时间初步设置为 3 min,因此设置其额定容量 E_{rated} 约束为:

$$0 < E_{rated} < P_{f \max} \times 3 \quad (22)$$

3) 实时充放电功率约束

飞轮储能系统辅助火电机组参与调频控制过程中,其实时充放电功率 P_f 都在其额定功率范围内:

$$-P_{rated} \leq P_f \leq P_{rated} \quad (23)$$

2.3 粒子群算法求解

粒子群算法在求解运算过程中具有操作简单方便、收敛速度快的优点^[26]。其初始粒子随机赋值,形成一个随机解,在后续过程中不断迭代更新。在每轮迭代中,每个粒子都会根据个体最优值和全局最优值进行更新,其位置和速度不断迭代,通过调节粒子的速度、位移大小,即可更新整个种群的位置,粒子的速度和位置更新公式为:

$$\begin{cases} v_{i,k+1} = \omega v_{i,k} + c_1 r_1 (P_{besti} - x_{i,k}) + c_2 r_2 (G_{best} - x_{i,k}) \\ x_{i,k+1} = x_{i,k} + v_{i,k+1} \end{cases} \quad (24)$$

式中: i 为粒子编号; k 为粒子迭代次数; v_i 为粒子速度; x_i 为粒子位置; P_{best} 为个体最优; G_{best} 为种群最优; ω 为粒子的惯性权重; c_1 、 c_2 均为学习因子; r_1 、 r_2 均为随机因数。

3 算例分析

取华北区域某 315 MW 机组 1 天内的一次调频

功率需求数据，具体如图 3 所示。

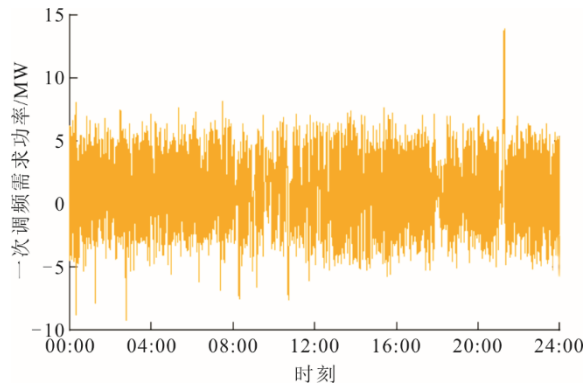


图 3 一次调频的功率指令信号
Fig.3 Power command signal of primary frequency modulation

数据采样间隔为 1 s，共得到 86 400 个实测数据。首先对所提控制策略下飞轮储能系统功率开展仿真，得到实际调频功率需求下飞轮储能系统的功率指令；然后针对建立的飞轮储能辅助火电机组一次调频的经济评估模型，采用粒子群算法进行最佳功率和容量的寻优，并对不同控制策略下的容量配置结果和调频效果进行分析；最后进行不同单位投资成本和调频收益系数下的灵敏度分析。

3.1 参数设置

基于 2.1 节，建立飞轮储能系统辅助火电机组一次调频的容量优化配置经济评估模型，参考文献[13]，该经济评估模型中所使用的相关参数设置见表 2。参考文献[25]，环境收益所涉及参数见表 3。

表 2 容量配置经济模型参数
Tab.2 Parameters of capacity allocation economic model

模型参数	数值
PCS 的单位功率成本 $C_{\text{PCS}}/(\text{万元}\cdot\text{MW}^{-1})$	125
单位容量成本 $C_{\text{fess}}/(\text{万元}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1})$	2 500
单位功率维护成本 $C_{\text{PO,M}}/(\text{万元}\cdot\text{MW}^{-1})$	6
单位容量维护成本 $C_{\text{EO,M}}/(\text{万元}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1})$	1
常规机组煤耗水平 $P_C/(\text{t}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1})$	0.3t
燃煤平均价格 $C/(\text{万元}\cdot\text{t}^{-1})$	0.056 2
贴现率 r	0.05
飞轮寿命周期 T_{LCC}/a	20
损失电量单价 $P_{\text{el}}/(\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	0.6
充、放电效率 $\eta/\%$	93
调频收益单价 $A_f/(\text{万元}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1})$	0.18

粒子群设置参数见表 4，搜索空间维度为自变量个数，在本文中即为飞轮储能系统功率与容量。

3.2 飞轮储能系统功率指令

基于本文所述协同调频控制策略，飞轮储能系

统的功率指令主要由下垂控制出力 P_s 和弥补火电机组出力 ΔP 组成，仿真得到图 3 所示 1 天的调频功率需求时飞轮储能系统的功率指令，结果如图 4 所示。

表 3 排放气体的环境成本参数
Tab.3 Environmental cost parameters of emission gases

气体	单位排放量/ $(\text{kg}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1})$	单位治理成本/ $(\text{万元}\cdot\text{kg}^{-1})$
SO ₂	0.427 8	0.000 6
NO _x	3.803 0	0.000 8

表 4 粒子群算法参数
Tab.4 Parameters of particle swarm optimization algorithm

项目	数值
学习因子 1	1.4
学习因子 2	1.4
惯性权重	0.8
种群粒子数	200
搜索空间维度	2
迭代次数	50

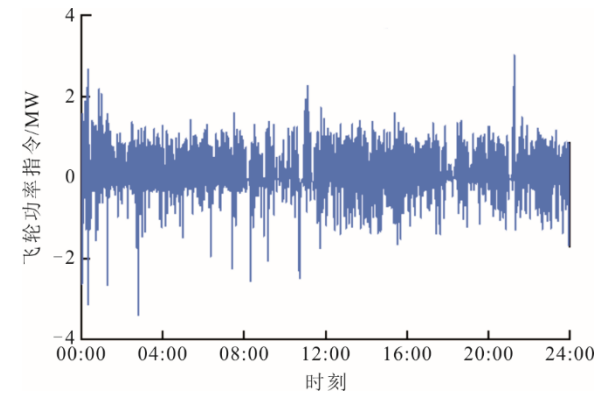


图 4 飞轮储能系统功率指令（协同策略）
Fig.4 Power command of flywheel energy storage system (cooperative strategy)

为比较说明飞轮储能系统的运行控制策略对于容量配置结果的影响，本文选取常见的虚拟下垂策略和 EMD 策略作为对比。得到不同策略下飞轮储能系统的实际功率进行容量优化配置。

下垂控制策略是飞轮储能系统辅助一次调频最常用的控制策略，以固定下垂控制系数跟踪电网的频率偏差，产生飞轮储能系统的功率指令，下垂控制下飞轮储能系统的功率指令如图 5 所示。由图 5 可见，功率指令幅值较小。

采用 EMD 算法对调频需求功率进行自适应分解，分解为不同频率的 IMF 信号分量，结果如图 6 所示。

飞轮储能系统具有可频繁充放电、寿命长和响应快的优势，适合响应高频信号；火电机组不适合

频繁动作，且响应速度具有一定限制，适合响应低频信号。因此采用 EMD 分解后的 IMF 分量进行线性重构，得到高频分量 P_H 和低频分量 P_L ，将其分别作为飞轮储能系统和火电机组的功率指令。重构后的高低频功率分量，即火电机组和飞轮储能系统的功率指令如图 7 所示。

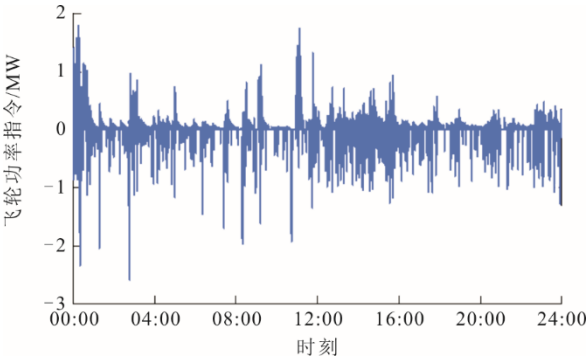


图 5 飞轮储能系统功率指令（下垂控制）
Fig.5 Power command of flywheel energy storage system (droop control)

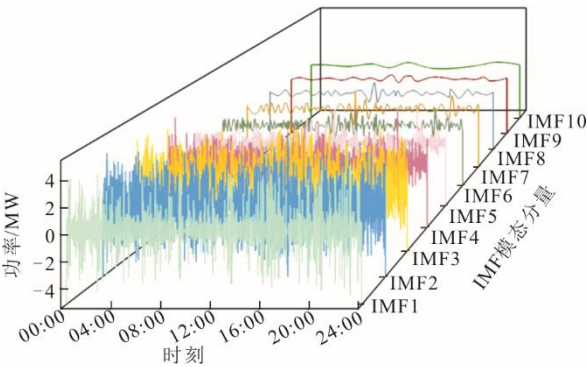


图 6 基于 EMD 的调频功率信号分量
Fig.6 Frequency modulation power signal component decomposed by EMD

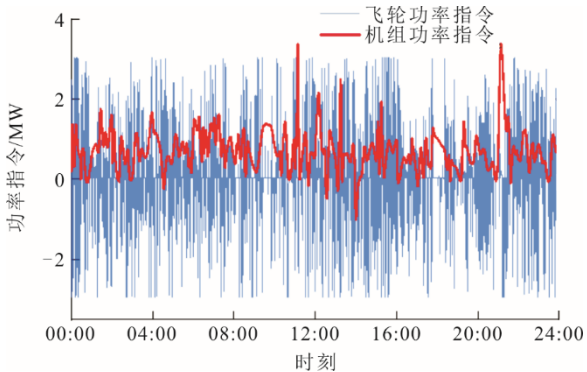


图 7 EMD 分解重构后功率指令
Fig.7 Power instructions after EMD decomposition and reconstruction

3.3 容量配置结果

采用粒子群算法进行多次寻优后，得到各种控

制策略下储能系统的平均容量配置结果、收益以及全生命周期成本，结果见表 5。由表 5 可知：在本文控制策略下，飞轮储能系统的最优容量配置结果为 1.179 MW/0.053 MW·h，在该配置下飞轮储能系统可以以额定功率充放电约 2.7 min，全生命周期内收益净现值 2295.82 万元，飞轮的投资回报年限为 3.57 年；虚拟下垂控制下储能系统的容量配置结果为 0.845 MW/0.022 MW·h，略小于本文策略，投资成本小，但是由于容量配置较小，系统的调频收益不高，约为本文控制策略下收益 44.25%，因此投资回报年限最长，为 4.75 年；在 EMD 控制下飞轮储能系统的容量配置最大，结果为 2.9 MW/0.127 MW·h，投资成本最大。分析其主要原因在于 EMD 分解算法只是对调频需求功率进行时频分解，分解后的火电机组和飞轮储能系统存在很多反向功率，反向叠加抵消后的总出力来满足调频需求，因此 EMD 策略下储能系统的出力幅值及波动频率都较大，从资源合理利用的角度并不合适。

表 5 不同策略下容量优化配置结果
Tab.5 Capacity optimization configuration results under different strategies

参数	虚拟下垂	EMD	本文策略
飞轮功率 P_f /MW	0.845	2.900	1.179
飞轮容量 E_f /(MW·h)	0.022	0.127	0.053
全生命周期成本 C_{LCC} /万元	160.70	679.86	409.78
一次调频收益 Y_s /万元	998.13	5 125.77	2 437.98
总收益 C /万元	1 015.92	4 475.49	2 295.82
投资回报年限/a	4.75	4.40	3.57

图 8 为在本文控制策略下，配置飞轮储能系统的各项成本与收益占比。

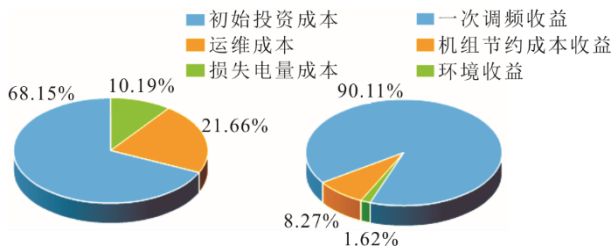


图 8 储能系统成本及收益占比
Fig.8 Cost and benefit ratio of energy storage system

从图 8 可以看出，在全生命周期成本中，初始投资成本占比最大，约占总成本的 68.2%，损失电量成本最小，占比约为 10.2%。随着飞轮技术发展及充放电效率的提高，飞轮储能系统可以进一步降低耗电成本。在储能系统 20 年的寿命内，系统参与一次调频的收益是配置储能系统辅助机组调频

的最大收益来源，占比达到 90%。随着国家政策及电力市场对一次调频收益补贴政策的进一步完善，储能的市场机制会更加科学，飞轮储能系统的市场化应用将具有良好前景。

3.4 调频效果对比

在 3.3 节的容量配置结果下，将调频需求指令作为扰动功率进行不同策略的连续仿真，得到在不同控制策略下飞轮储能系统辅助火电机组参与调频的系统频差及机组出力情况。为了更直观地对数据进行分析，截取 5 000 s 仿真数据进行展示，得到系统的频率偏差如图 9 所示，火电机组的调频出力如图 10 所示，在扰动下火电机组的主蒸汽压力波动情况如图 11 所示，统计这段时间内频差和机组出力的峰值及标准差见表 6。

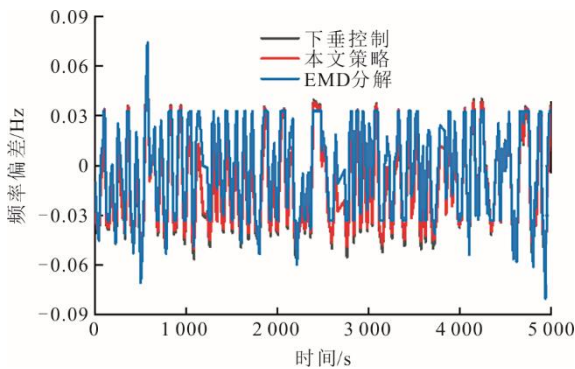


图 9 不同控制策略下系统频率偏差曲线
Fig.9 System frequency deviation curves under different control strategies

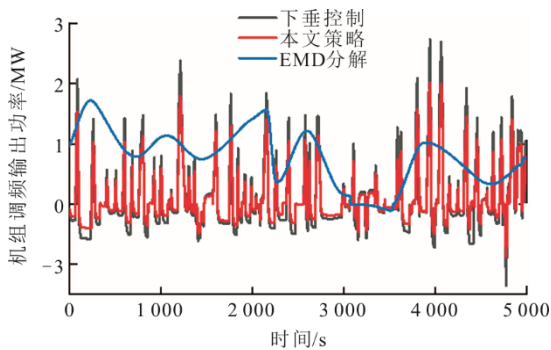


图 10 不同控制策略下火电机组调频出力曲线
Fig.10 Frequency regulation output curve of thermal power unit under different control strategies

由图 10 和表 6 可以看出，在不同控制策略下，配置储能后的联合系统调频效果都有改善。相比于下垂控制和 EMD 策略，本文策略在频率偏差的峰值和标准差上都明显下降，频差峰值相比 EMD 策略下降了 26.1%，相比下垂控制下降了 5.3%。本文策略频差的标准差最小，说明本文策略频率更加稳定，有

效改善了频率波动，电网频率稳定性有效提升。

结合表 6 和图 10 还可以看出：相比于下垂控制，本文控制策略下，火电机组的峰值出力更小，减少了 0.71 MW，出力波动更小，标准差降低 0.15 MW；在 EMD 的控制策略下，火电机组出力更加平缓，机组峰值出力也减小到 1.72 MW，主要原因在于火电机组功率指令由 EMD 分解后的低频分量重构得到，波动范围小。

由图 11 可见，与机组出力相对应，EMD 策略下机组的主蒸汽压力变化最为平缓，本文策略下的主蒸汽压力波动的幅值小于下垂控制，机组运行更安全。

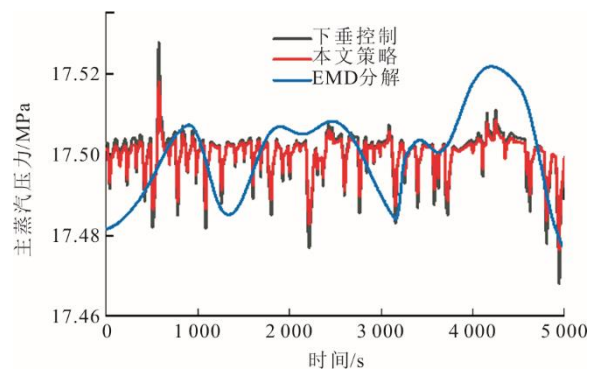


图 11 不同控制策略下火电机组主蒸汽压力变化曲线
Fig.11 Main steam pressure variation curve of thermal power unit under different control strategies

表 6 不同控制策略下系统频率偏差及机组出力情况
Tab.6 System frequency deviation and unit output power under different control strategies

控制策略	频率偏差/Hz		机组出力/MW	
	峰值	标准差	峰值	标准差
虚拟下垂	0.062 6	0.025 2	2.732 90	0.566 3
EMD	0.080 2	0.025 8	1.719 60	0.435 0
本文策略	0.059 3	0.024 8	2.018 38	0.418 5

3.5 敏感度分析

1) 初始投资成本系数

目前飞轮储能系统的成本仍然很高，由图 8 可知，在火-储联合调频成本中，储能系统的初始投资成本占比较大，随着科技进步和市场成熟，飞轮储能系统的初始投资成本将会逐步降低。表 7 和图 12 给出了飞轮储能系统的初始投资成本在本文参数的基础上降低 10%~40%情况下，对于储能系统容量配置结果、运行成本以及收益的影响。

由表 7 和图 12 可以看出，随着飞轮储能系统初始投资成本的下降，配置储能系统的功率和容量逐步增大，系统全生命周期成本受到储能容量和单

位容量成本的影响,在储能成本降低 10%和 20%的区间,投资成本及全生命周期成本都有所下降。随着成本进一步降低,储能系统配置容量增大,投资成本及全生命周期又有所回升。然而储能系统参与一次调频的收益随着储能容量的增大而增大,因此系统净收益随着成本降低逐步提高。储能系统的投资回报年限在储能成本下降 20%时达到最低,约为 3.1 年。综上,随着储能技术及其市场成熟,储能系统投资成本不断降低,有利于发电侧配置储能参与电网频率调节的应用推广。

表 7 不同储能成本下储能容量配置结果
Tab.7 Configuration results of energy storage capacity under different unit energy storage costs

储能成本降低/%	功率/MW	容量/(MW·h)	投资回报年限/年
0	1.179	0.053	3.570
10	1.206	0.053	3.333
20	1.230	0.053	3.088
30	1.248	0.101	3.550
40	1.272	0.100	3.179

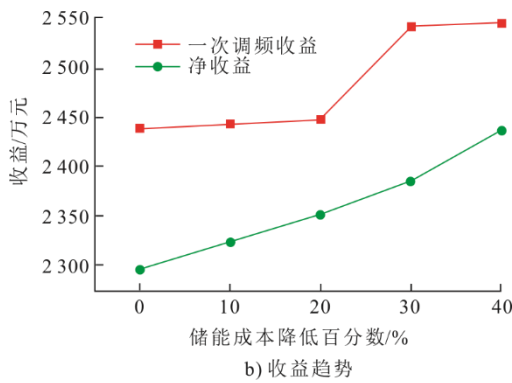
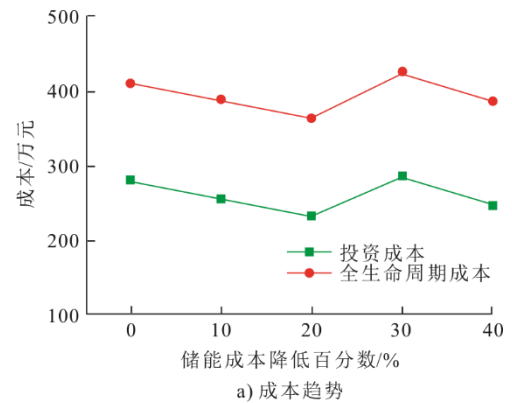


图 12 不同储能成本下投资收益和成本趋势
Fig.12 Investment income and cost trends under different energy storage costs

2) 一次调频收益单价系数

改变飞轮储能系统参与调频的收益单价 A_f , 取表 2 中收益单价的 0.8~1.2 倍, 得到飞轮储能系统的

容量配置结果和收益情况如表 8 和图 13 所示。由表 8 可以看出,随着储能参与调频的收益单价升高,储能系统的容量配置结果有进一步增大的趋势,投资成本逐步增大,系统的总收益提高,系统投资回报年限逐步降低。当收益单价为 1.2 倍时,只需要 3.03 年即可收回投资成本,相比原调频收益单价下,飞轮储能系统的功率配置增大了 5.26%,投资回报年限减少了 15%,净收益提高了 21.3%,配置储能系统的经济性进一步得到体现。从国家政策制定的方面来看,通过电力市场的机制激励,提高储能参与调频的辅助服务单价,有利于储能系统的推广应用。

表 8 不同一次调频收益单价下储能容量配置结果
Tab.8 Configuration results of energy storage capacity under different primary frequency regulation income coefficients

调频收益单价倍数	功率/MW	容量/(MW·h)	投资回报年限/年
0.8	1.103	0.050	4.275
0.9	1.149	0.053	3.933
1.0	1.179	0.053	3.570
1.1	1.212	0.053	3.281
1.2	1.241	0.053	3.034

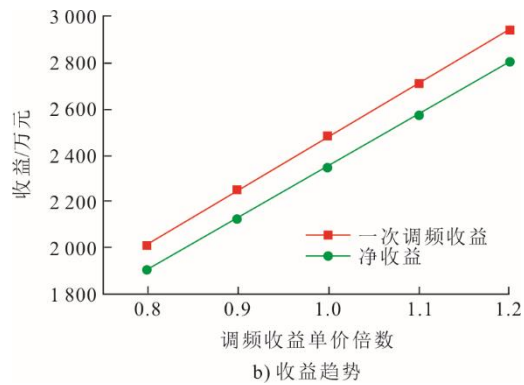
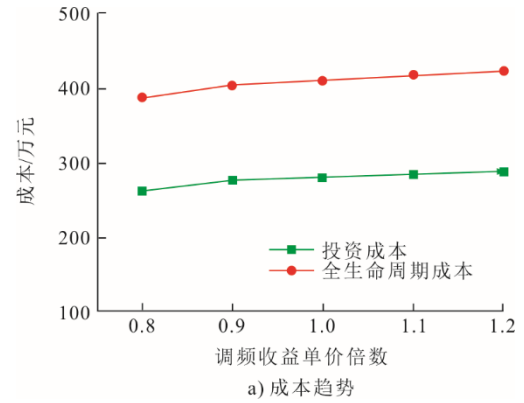


图 13 不同一次调频收益单价下投资收益和成本趋势
Fig.13 Investment income and cost trends under different primary frequency regulation income coefficients

4 结 论

火电机组合理的配置飞轮储能系统在改善电网频率安全的同时,可以提高电厂经济收益。本文针对储能参与调频的控制策略和容量配置优化问题,提出一种火-储耦合调频控制策略与容量配置一体化设计方案,基于机组出力预测的协同控制策略得到储能功率指令,然后考虑一次调频收益和火电机组节约煤耗收益,开展了储能容量优化配置研究,对经济效益和调频效果进行分析,得到以下结论。

1) 在协同调频控制策略下,飞轮储能系统的配置结果为 $0.179 \text{ MW}/0.053 \text{ MW}\cdot\text{h}$, 储能系统可以按额定功率充放电约 2.7 min , 整体投资回收年限为 3.57 年 , 相比下垂控制和 EMD 分解分别减少了 24.8% 和 18.9% 。

2) 火-储协同调频控制策略下, 储能系统的配置结果对于系统调频效果改善明显, 频率更加稳定, 火电机组出力波动平缓, 有利于机组安全运行。

3) 飞轮储能成本下降 20% 时, 投资回报年限降低至 3.1 年 。随着储能技术及其市场成熟, 储能投资成本的不断降低, 发电侧配置储能参与电网频率调节的应用推广将越来越有利。

4) 当调频收益单价变为 1.2 倍时, 系统投资回报年限减少了 15% , 净收益提高了 21.3% , 从政策制定方面, 通过电力市场的激励机制, 提高储能参与调频的辅助服务单价, 飞轮储能系统的应用经济性将会进一步得到体现。

[参 考 文 献]

- [1] 刘吉臻, 曾德良, 田亮, 等. 新能源电力消纳与燃煤电厂弹性运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5385-5394.
LIU Jizhen, ZENG Deliang, TIAN Liang, et al. Control strategy for operating flexibility of coal-fired power plants in alternate electrical power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5385-5394.
- [2] HERAS J, MARTIN M. Social issues in the energy transition: effect on the design of the new power system[J]. Applied Energy, 2020, 278: 115654.
- [3] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [4] 赵永亮, 许朋江, 居文平, 等. 燃煤发电机组瞬态过程灵活高效协同运行的理论与技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2080-2100.
ZHAO Yongliang, XU Pengjiang, JU Wenping, et al. Overview of theoretical and technical research on flexible

- and efficient synergistic operation of coal-fired power units during transient processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2080-2100.
- [5] 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): 6245-6259.
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): 6245-6259.
- [6] 孙伟卿, 王思成, 刘宇宸. 支撑新型电力系统的储能技术综述与政策解读[J]. 自动化仪表, 2022, 43(12): 1-6.
SUN Weiqing, WANG Sicheng, LIU Yuchen. Review and policy interpretation of energy storage technology supporting new power system[J]. Process Automation Instrumentation, 2022, 43(12): 1-6.
- [7] FARHADI M, MOHAMMED O. Energy storage technologies for high-power applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 1953-1961.
- [8] CRUZ M, FITIWI D Z, SANTOS S F, et al. A comprehensive survey of flexibility options for supporting the low-carbon energy future[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 97: 338-353.
- [9] 罗耀东. 飞轮储能参与电网一次调频控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2021: 1.
LUO Yaodong. Study on flywheel energy storage participates in primary frequency modulation control of power grid[D]. Jinan: Shandong University, 2021: 1.
- [10] 何林轩, 李文艳. 飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1679-1686.
HE Linxuan, LI Wenyan. Simulation analysis of primary frequency modulation process of thermal power units with auxiliary of flywheel energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1679-1686.
- [11] 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. Energy storage system participation in primary FM strategy based on weighting factor and charge state recovery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 63-72.
- [12] 李若, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能电池参与二次调频的综合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 74-82.
LI Ru, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Integrated control strategy considering the participation of energy storage batteries in secondary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 74-82.
- [13] 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. Flywheel energy storage participation in grid primary frequency regulation coordinated control strategy and capacity optimization allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 71-82.
- [14] 武鑫, 杨威鹏, 熊星宇, 等. 辅助核电机一次调频的飞轮储能阵列容量配置方法[J]. 动力工程学报, 2023, 43(7): 877-884.
WU Xin, YANG Weipeng, XIONG Xingyu, et al. Capacity configuration method of flywheel energy storage array for assisting primary frequency regulation of nuclear

- power units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(7): 877-884.
- [15] 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研究[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.
- [16] 涂伟超, 李文艳, 张强, 等. 飞轮储能在电力系统的工程应用[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 869-877.
- TU Weichao, LI Wenyan, ZHANG Qiang, et al. Engineering application of flywheel energy storage in power system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 869-877.
- [17] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29-34.
- MU Chunhua, WU Pengyue, SUN Ganghu, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29-34.
- [18] 丁宁, 廖金龙, 陈波, 等. 大功率火电机组一次调频能力仿真与试验[J]. 热力发电, 2018, 47(6): 85-90.
- DING Ning, LIAO Jinlong, CHEN Bo, et al. Primary frequency control ability of thermal power units with large capacity: simulation and experiment[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(6): 85-90.
- [19] 廖金龙, 陈波, 丁宁, 等. 考虑一次调频能力的火电机组负荷优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 168-174.
- LIAO Jinlong, CHEN Bo, DING Ning, et al. Load optimal distribution of thermal units considering primary frequency control ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Suppl.1): 168-174.
- [20] 曾德良, 刘吉臻. 汽包锅炉的动态模型结构与负荷/压力增量预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 75-79.
- ZENG Deliang, LIU Jizhen. Drum boiler dynamic model and load/pressure increment predict model[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 75-79.
- [21] 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.
- [22] 洪烽, 梁璐, 逢亚蕾, 等. 基于机组实时出力增量预测的火电-飞轮储能系统协同调频控制研究[J/OL]. 中国电机工程学报. (2022-12-27) [2023-05-15]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222304>.
- HONG Feng, LIANG Lu, PANG Yalei, et al. Research on coordinated frequency control of thermal power-flywheel energy storage system based on the real-time prediction of output increment[J/OL]. Proceedings of the CSEE. (2022-12-27) [2023-05-15]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222304>.
- [23] 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.
- [24] 刘仲民, 齐国愿, 高敬更, 等. 基于自适应 VMD 的混合储能容量优化配置研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 75-81.
- LIU Zhongmin, QI Guowan, GAO Jingqian, et al. Research on optimal allocation of hybrid energy storage capacity based on adaptive VMD[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(4): 75-81.
- [25] 刘鑫, 李欣然, 谭庄熙, 等. 基于不同种类储能电池参与一次调频的最优策略经济性对比[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1403-1410.
- LIU Xin, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Economic comparison of optimal strategies based on different types of energy storage batteries participating in primary frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1403-1410.
- [26] 牛瑞杰, 郭俊文, 李晓博, 等. 风光储联合发电系统储能控制策略[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 150-155.
- NIU Ruijie, GUO Junwen, LI Xiaobo, et al. Energy storage control strategy of wind-photovoltaic-storage hybrid system[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 150-155.

(责任编辑 杜亚勤)