

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305098

# 基于提升自动发电控制性能指标的飞轮 储能系统调频控制策略研究

魏波<sup>1</sup>, 罗志炜<sup>1</sup>, 肖峰<sup>1</sup>, 禹梅<sup>1</sup>, 梁璐<sup>1</sup>, 丁浩天<sup>2</sup>, 洪烽<sup>1</sup>

(1.华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2.国家电网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250000)

**[摘要]** 飞轮储能系统耦合火电机组参与调频能够有效提高自动发电控制调频性能, 解决火电机组跟踪二次调频指令时响应时间长、爬坡速率慢、调节精度低等问题, 获取调频辅助收益。考虑西北电网“两个细则”对自动发电控制爬坡性能的要求, 提出一种适用于工程实践的飞轮储能系统控制策略, 保留飞轮电量的同时提高联合系统参与自动发电控制调频的性能指标。将此策略在实际工程中开展验证, 结果表明: 所提策略下火-储联合调频系统参与自动发电控制调频性能得到提升, 电厂经济效益得到明显提升, 控制策略的成功应用对飞轮储能系统联合火电机组参与自动发电控制调频的工程实践具有重要现实意义。

**[关键词]** 飞轮储能; 火电机组; 自动发电控制; 调频控制

**[引用本文格式]** 魏波, 罗志炜, 肖峰, 等. 基于提升自动发电控制性能指标的飞轮储能系统调频控制策略研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 112-120. WEI Bo, LUO Zhiwei, XIAO Feng, et al. Flywheel energy storage system frequency regulation control strategy based on improving AGC performance index[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 112-120.

## Flywheel energy storage system frequency regulation control strategy based on improving AGC performance index

WEI Bo<sup>1</sup>, LUO Zhiwei<sup>1</sup>, XIAO Feng<sup>1</sup>, YU Mei<sup>1</sup>, LIANG Lu<sup>1</sup>, DING Haotian<sup>2</sup>, HONG Feng<sup>1</sup>

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

2.State Grid Shandong Electric Power Company Research Institute of Electric Power, Jinan 250000, China)

**Abstract:** The coupling of thermal units with flywheel energy storage system can effectively improve the frequency regulation performance of AGC, solve the problems of long response time, slow climbing rate and low regulation accuracy of thermal units when tracking AGC commands, and obtain the auxiliary revenue of frequency regulation. This paper proposes a flywheel energy storage system control strategy for engineering practice, taking into account the requirements of the "two rules" of the Northwest Power Grid on AGC climbing performance, to improve the performance index of the combined system participating in AGC frequency regulation while preserving flywheel power. The results show that the proposed strategy improves the performance of the combined thermal power units and storage systems in AGC, and the economic efficiency of the power plant is significantly improved.

**Key words:** flywheel energy storage; thermal power units; AGC; frequency control

《“十四五”可再生能源发展规划》针对发电目标提出, 2025年可再生能源年发电量达到3.3万亿kW·h左右, “十四五”期间, 可再生能源发电量增量在全社会用电量增量中的占比超过50%<sup>[1]</sup>。电网

系统中可再生能源的装机容量到一定规模时, 其功率输出的间歇性及随机性会导致系统出力与负荷之间的动态不平衡, 引起系统频率偏差<sup>[2-4]</sup>。

自动发电控制(AGC)是指发电机组在规定的出

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(52060021N00P)

Supported by: Headquarters Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52060021N00P)

第一作者简介: 魏波(1987), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为分布式控制与决策, 群体智能理论及应用, 新能源电力系统, bowei@ncepu.edu.cn。

通信作者简介: 禹梅(1975), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源并网建模及分析, 多智能体系统, 网络控制系统, meiyu@ncepu.edu.cn。

力调整范围内,按照一定调节速率实时调整有功功率跟踪调度指令,以满足电网系统供需功率平衡<sup>[5]</sup>。大比例可再生能源并网对作为调频主力的传统燃煤机组提出了更高的 AGC 性能要求,调度中心下发的 AGC 指令日益复杂<sup>[6]</sup>,如何提高电网内参与 AGC 调频机组的运行性能是关系到配电网能源节能、网络运行效率的关键<sup>[7]</sup>。火电机组受安全运行的局限性影响以及设备磨损等,存在响应时滞长、机组爬坡速率低等问题,往往不能快速跟踪 AGC 指令<sup>[8-10]</sup>,耦合其他辅助设备参与调频可以有效解决这一问题。

飞轮储能作为一种高效率、瞬时功率强、维护成本低、寿命长且环保的机械类储能技术<sup>[11-13]</sup>,具备响应速度快、跟随负荷变化精准等优点,相较于火电机组有着较快的功率调节速度<sup>[14]</sup>。其通过物理方法进行储能,飞轮储能内部通过电动/发电互逆式双向电机与飞轮进行耦合。充电时,利用电能驱动飞轮高速旋转,将电能转换为机械能存储起来;放电时,通过飞轮惯性拖动电机发电,将储存的机械能转变为电能<sup>[15]</sup>。得益于电力电子技术的发展,飞轮储能的功率输出控制变得更加精准,因此可以精确有效地平抑不可预测的功率波动<sup>[16-19]</sup>,适合辅助机组参与调频任务。飞轮储能群组参与电网调频的项目已在多地建成并进行工程示范<sup>[20-22]</sup>。

相较于火电机组响应 AGC 信号的滞后性,飞轮储能可以在数毫秒内快速响应功率指令,火电机组配备飞轮储能可以提升自身的响应特性,提高机组调节性能。隋云任等<sup>[23]</sup>通过建立并分析飞轮储能和燃煤机组仿真模型,验证了飞轮储能辅助燃煤机组可以提高调频质量,减少负荷出现扰动时对机组的影响,维持锅炉蒸汽压力的稳定。王军等<sup>[24]</sup>使用 MATLAB 建模仿真了 10 MW 飞轮储能参与 320 MW 供热机组调频过程,结果显示飞轮储能的参与可以提高机组运行灵活性、稳定性以及安全性。储能设备辅助机组调频时的功率控制问题是当前研究的一大热点。丁冬等<sup>[25]</sup>提出了一种基于模糊控制策略的电池储能系统辅助 AGC 调频方法,通过区域控制偏差的变化来计算电池储能系统的输出功率,通过电池储能功率的输出以改善火电机组的调频性能。于昌海等<sup>[26]</sup>考虑了储能系统的容量限制以及自身特性,提出储能系统配合常规机组调频使用优先调用的方式以降低慢速常规发电机组的调节动作。胡泽春等<sup>[27]</sup>基于离散傅里叶算法将 AGC 调频信号分为高频和低频 2 种,提出考虑 AGC 调频信号频

次下的 2 种飞轮储能参与调频控制策略,通过仿真研究了不同策略的适用环境以及各自优劣。Xie 等人<sup>[28]</sup>利用电池储能辅助火电机组提升 AGC 调频性能,并在石景山火电机组进行应用,将火电机组调频性能综合性能指标由 3.77 提升到 4.68。

上述研究从仿真方面验证了飞轮储能系统辅助火电机组参与调频可以有效提高火电机组调频性能。相较于电池储能,飞轮储能辅助火电机组参与 AGC 调频还未得到实际应用,因此一些研究提出的飞轮辅助参与 AGC 调频的控制策略没有考虑到储能系统在实际运行时面临的问题:1)飞轮储能作为功率型储能设备,其自身储电量相较于 AGC 指令调节时所需电量较小,以 AGC 指令与机组偏差作为飞轮储能的功率指令,飞轮储能全程参与调节会导致飞轮储能偏离最优运行电量区域;2)上述控制策略并没有考虑机组响应 AGC 时的考核细则,未能充分考虑电厂运行经济效益且并未在工程实践中加以应用。

本文基于西北区域发电厂并网“两个细则”,结合飞轮储能系统的功率型储能特性,提出一种飞轮储能分段参与辅助火电机组 AGC 调节的控制方法;基于考核指标以及机组实时状态,飞轮储能分阶段辅助机组参与 AGC 调频;在此控制策略下,飞轮储能自适应辅助机组响应 AGC 调频过程,有限电量下最大化提升 AGC 调频的考核指标;并通过电厂工程实例验证其合理性及可行性,为飞轮储能辅助火电机组参与 AGC 调频控制方法提供参考。

## 1 火-储联合 AGC 调频系统

### 1.1 联合调频控制系统

火电机组-飞轮储能联合调频系统如图 1 所示。联合调频系统由火电机组、飞轮储能、远程测控终端以及火电机组侧 DCS 和飞轮能量管理系统组成。

火电机组为亚临界、一次中间再热直接空冷凝汽式机组,额定功率为 600 MW。飞轮储能系统额定容量为 22 MW/4.5 MW·h,由 36 台飞轮单体组成。飞轮单体额定功率为 630 kW,储电量为 125 kW·h。

飞轮储能系统以电缆形式接入 10 kV 厂用段。飞轮系统充电时,厂用段电压经过储能干式变压器转化为 660 V,再由飞轮储能配备的网侧变流器将交流电转化为直流电,随后由机侧变流器将直流电转化为 380 V 的交流电驱动电机加速旋转。飞轮储能放电时,飞轮转子转速下降,动能转化为电能释放回厂用段。

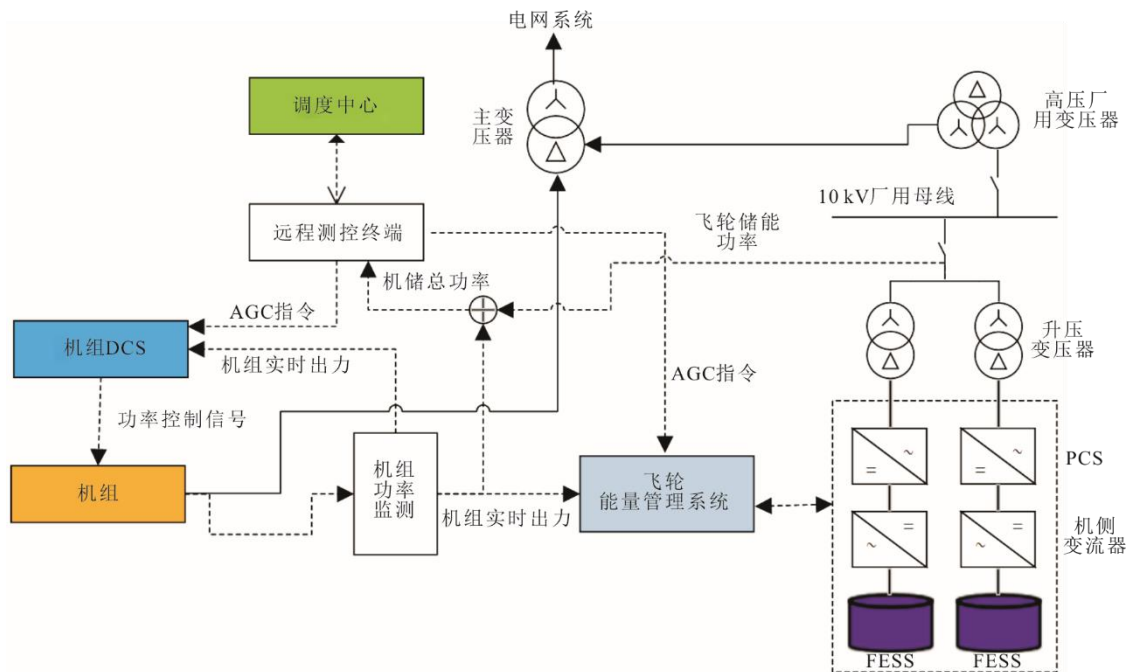


图1 火电机组-飞轮储能联合系统示意

Fig.1 Schematic diagram of combined thermal power unit-flywheel energy storage system

联合调频系统控制方式如下：火电机组侧 DCS 检测到 AGC 指令变化后，改变机组负荷目标，机组出力向设定负荷目标变化。储能能量管理系统根据 AGC 指令以及机组实时出力来决定飞轮储能系统输出的功率大小。具体过程为：AGC 指令下发给机组侧 DCS 和储能能量管理系统，储能侧根据从机组侧传来的机组实时出力以及电网下发的 AGC 指令，在储能能量管理系统计算后将得到的功率指令作为飞轮储能的总功率指令，将总功率指令等比例分发至每个飞轮单体，群组内飞轮充放电状态保持一致。飞轮储能系统依照储能能量管理系统下发的总功率指令进行输出，火电机组输出功率和飞轮储能功率叠加后传输至远程测控终端。联合调频系统中，飞轮储能系统响应指令速度快。相较于机组的功率输出特性，飞轮储能可以在收到指令后迅速改变自身功率输出，因此飞轮储能辅助火电机组进行 AGC 调频可以弥补机组本身响应输出特性的不足，进而提升调频能力，改善调频效果。

## 1.2 AGC 性能考核指标

根据西北电网“两个细则”，机组参与 AGC 调频爬坡性能考核涉及指标分别是调节速率 ( $k_1$ )、响应时间 ( $k_2$ )、调节精度 ( $k_3$ ) 以及综合爬坡性能指标 ( $K_p$ )。

### 1.2.1 调节速率 $k_1$

调节速率  $k_1 = \text{AGC 实际速率} / \text{标准调节速率}$ 。其

中实际速率计算如式(1)所示：选取负荷变化至 AGC 负荷指令目标变化幅度 10% 和 90% 的 2 个负荷点  $M_{10\%}$  与  $M_{90\%}$ ，其连线斜率的绝对值即为实际速率。直吹式制粉系统的汽包炉火电机组标准调节速率为每分钟机组装机容量的 1.5%。

$$v = \left| \frac{M_{90\%} - M_{10\%}}{T_{90\%} - T_{10\%}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$M_{10\%} = P_0 + (P_{\text{AGC}} - P_0) \times 10\% \quad (2)$$

$$M_{90\%} = P_0 + (P_{\text{AGC}} - P_0) \times 90\% \quad (3)$$

式中： $P_0$  为 AGC 指令变化时机组初始出力值，机组出力值等于  $M_{10\%}$  与  $M_{90\%}$  的时间分别记作  $T_{10\%}$  与  $T_{90\%}$ ； $P_{\text{AGC}}$  为 AGC 指令变化后的值； $v$  为 AGC 实际速率。

### 1.2.2 响应时间 $k_2$

响应时间指 AGC 单元响应 AGC 控制指令的时间延迟。响应时间指标  $k_2 = 1 - (\text{AGC 单元响应延迟时间} / 5 \text{ min})$ 。机组响应 AGC 指令动作指的是机组出力变化幅度超过稳态偏差允许范围。火电机组偏差允许范围为装机容量的  $\pm 0.5\%$ 。

### 1.2.3 调节精度 $k_3$

调节精度指机组响应 AGC 指令的精度，指 AGC 单元机组响应 AGC 控制指令的精准度。调节精度指标  $k_3 = 1 - (\text{AGC 单元调节误差} / \text{AGC 单元调节允许误差})$ 。AGC 单元调节误差指 AGC 单元响

应 AGC 控制指令后实际出力值与控制指令值的偏差量。AGC 单元调节允许误差为其额定出力 1.5%。

### 1.2.4 综合爬坡性能指标 $K_p$

综合爬坡性能指标指 AGC 单元响应 AGC 控制指令的综合性能表现，计算公式如式(4)所示。不同时期内 AGC 单元综合爬坡性能指标的算术平均数即对应统计周期内的综合爬坡性能指标。

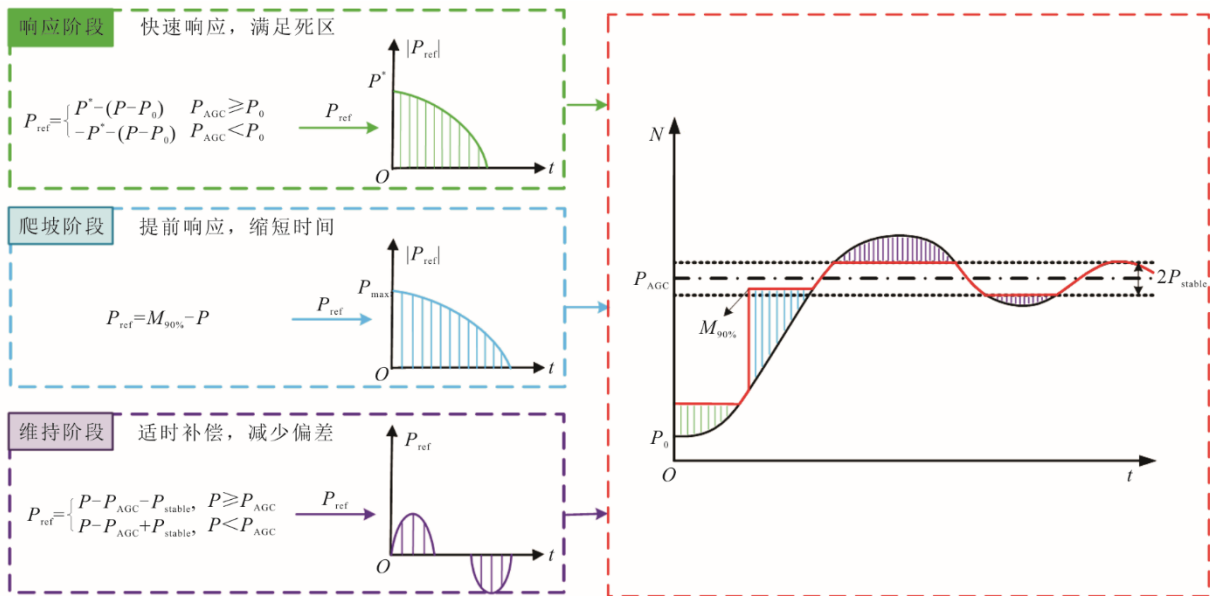
$$K_p = 0.2 \times (3 \times k_1 + k_2 + k_3) \quad (4)$$

## 2 基于提升 AGC 性能考核的控制策略

工程应用中大多以火电机组实际功率与 AGC 功率指令偏差作为飞轮储能功率指令，控制策略中

难以表现单个 AGC 功率指令变化后火电机组的跟踪过程，没有与 AGC 性能指标相结合。本文以 AGC 功率指令变化作为飞轮储能动作标志，将火电机组跟踪 AGC 功率指令变化过程拆解为多个 AGC 功率指令下火电机组跟踪过程。根据考核指标将飞轮储能辅助火电机组跟踪单个 AGC 功率指令过程分为响应阶段、爬坡阶段以及维持阶段。每个阶段都有单独的触发条件以及结束条件，并且根据实时火电机组以及飞轮储能相关信息计算出对应阶段飞轮储能的输出功率指令。AGC 指令发生变化后，3 个阶段按条件依次触发计算飞轮储能功率指令。

飞轮储能辅助机组控制策略如图 2 所示。



$P_{ref}$ —飞轮储能功率指令； $P^*$ —火电机组允许稳态偏差； $N$ —机储联合功率； $P$ —火电机组实际功率； $P_{stable}$ —火电机组调节允许误差。

图 2 飞轮储能辅助机组调频控制策略示意

Fig.2 Schematic diagram of frequency control strategy of flywheel energy storage auxiliary unit

### 2.1 响应阶段

响应阶段作为 AGC 指令变化后飞轮储能首先进入的阶段，对应考核指标中的响应时间 ( $k_2$ )，该阶段下飞轮储能需要快速响应 AGC 指令变化。

大容量的火电机组采用单元制运行方式：1 台汽轮发电机组和 1 台锅炉组成相对独立的系统。在响应外部负荷变化时，系统不但要保障负荷平衡要求，同样要维持内部参数稳定。火电机组在进行 AGC 调频中通过协调控制系统 (CCS) 使机组能够快速安全地响应外界负荷变化。系统在接到负荷变化请求，对锅炉侧燃烧率进行控制，进而改变机组出力的变化，其过程中有较大的延迟和惯性。飞轮储能系统对接收到的功率指令可以完成毫秒级响应，通过控制飞

轮快速响应 AGC 指令的变化可以有效提升机组参与 AGC 调频下的响应时间指标。

响应阶段将 AGC 指令变化作为飞轮储能系统的动作开始标志。AGC 指令变化后，飞轮储能快速响应 AGC 指令变化，提供快速功率支撑，使得火-储联合调频系统出力变化幅度快速超过稳态偏差允许范围。随着机组调整自身出力，机组出力变化后，飞轮储能功率指令不断减少直至为 0，飞轮储能退出响应阶段，保持电量。

响应阶段飞轮储能输出功率指令为：

$$P_{ref} = \begin{cases} P^* - (P - P_0) & P_{AGC} \geq P_0 \\ -P^* - (P - P_0) & P_{AGC} < P_0 \end{cases} \quad (5)$$

## 2.2 爬坡阶段

联合系统出力到达实际速率计算终点并维持联合出力不变的阶段记作爬坡阶段, 爬坡阶段对应考核指标中的调节速率( $k_1$ ), 调节速率主要受限于机组本身的爬坡速率。燃煤机组的爬坡速度一般低于燃气发电组和燃油发电组。对于一些燃煤机组, 其炉内燃烧稳定性差, 需在调峰过程中缓慢调整炉内热量, 不适合快速加煤, 机组爬坡速率低。

计算机组实时出力与 AGC 指令的偏差大小, 将该偏差与飞轮储能系统的实时最大充放电功率比较。当飞轮储能系统的可充放电功率能够弥补指令偏差时 ( $|M_{90\%}-P| < P_{\max}$ , 其中  $P_{\max}$  为飞轮储能最大输出功率), 储能系统快速动作, 使得火-储联合系统调频出力快速达到目标变化负荷, 从而提高联合系统的调节速率, 有效提升爬坡阶段考核指标。当火电机组实际负荷达到 AGC 指令的目标区间时, 飞轮储能系统退出。

爬坡阶段飞轮储能系统的输出功率指令为:

$$P_{\text{ref}} = M_{90\%} - P \quad (6)$$

爬坡阶段控制策略下, 飞轮储能以最大化提升调节速率方式辅助机组进行 AGC 调频, 随着机组出力变化直至等于  $M_{90\%}$ , 飞轮储能功率指令置零。

## 2.3 维持阶段

机组出力与 AGC 指令相等后, 飞轮储能维持机组出力处于调节允许误差范围的阶段记为维持阶段。维持阶段用于提升考核指标中的调节精度( $k_3$ )。

由于燃煤机组自身存在的延迟和惯性, 在机组

出力变化至 AGC 指令值后, 其出力变化趋势并不会立刻消失, 因此容易造成超调行为。此外, 在火电机组出力维持在 AGC 指令值运行时, 其机组内部也有许多扰动影响机组最终的出力, 造成机组实时负荷在 AGC 指令附近波动。当机组出力值超出 AGC 指令值, 飞轮储能可以进行充电以吸收多发的电量; 当机组出力低于 AGC 指令值, 飞轮储能可以及时放电以维持减小火电机组实时负荷 AGC 指令的偏差, 提升调节精度。

飞轮储能在维持阶段的功率指令为:

$$P_{\text{ref}} = \begin{cases} P - P_{\text{AGC}} - P_{\text{stable}}, & P \geq P_{\text{AGC}} \\ P - P_{\text{AGC}} + P_{\text{stable}}, & P < P_{\text{AGC}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{stable}}$  为火电机组调节允许误差。

## 3 控制策略运行效果验证

### 3.1 控制策略验证

某西北电厂火电机组额定功率为 600 MW, 飞轮储能额定功率为 22 MW。控制策略按照西北电网的‘两个细则’设计参数, 将控制策略下装至飞轮储能能量管理系统, 火-储联合系统投入 AGC 调频模式跟踪电网系统下发的 AGC 指令。

图 3 为电厂实际火-储联合调频系统跟踪 AGC 指令运行曲线。图 3 中, 红色线为 AGC 指令, 绿色线为机组功率, 蓝色线为火-储联合系统功率。由图 3 可见, 火电机组配备飞轮储能系统后跟踪 AGC 指令效果显著, 有效改善了火电机组的调频性能, 机组实时出力与 AGC 指令偏差减小。

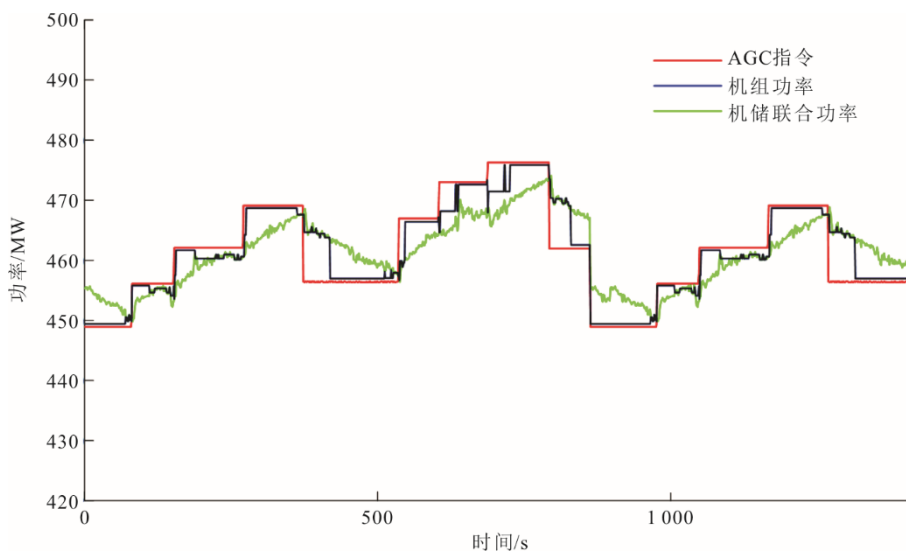


图 3 电厂实际跟踪 AGC 指令响应曲线

Fig.3 Combined thermal power unit-flywheel energy storage system tracking AGC command operation curve

相较于以火电机组功率与 AGC 指令偏差为飞轮储能参考功率指令的控制方法, 本文所提控制策略能够实现对单个性能指标的提升, 在实际应用中可以分别设计 3 个阶段的人工手动触发开关, 实现人工选择飞轮储能辅助参与提升的性能考核指标。此外, 本文所提控制策略结合 AGC 性能考核指标统计方法, 可以在有限的电量下最大程度提升火电机组 AGC 性能考核指标。

图 4 为系统跟踪单个 AGC 指令响应曲线。由图 4 可见: 12 s 时, AGC 指令由 313.4 MW 升为 332.2 MW, 此时飞轮储能开始进入响应阶段; 13 s 时检测到飞轮储能的输出功率为 3.34 MW; 18~30 s, 火电机组响应 AGC 指令升高负荷, 飞轮储能功率逐渐降为 0 进而退出响应阶段; 31 s 时, 火电机组出力为 316.8 MW, 此时飞轮储能最大输

出功率为 15 MW, 火电机组出力与  $M_{95\%}$  间相差 14.7 MW, 小于飞轮储能最大充放电功率, 飞轮储能进入爬坡阶段并输出爬坡阶段对应的功率指令, 联合调频系统在该点的出力为 331.3 MW, 提前进入目标负荷。

在该 AGC 指令变化内,  $M_{90\%}$  值为 329.7 MW, 105 s 时机组出力为 329.7 MW, 飞轮储能退出爬坡阶段。在该 AGC 指令变化阶段, 火电机组配备飞轮储能系统参与 AGC 调频后, 单元响应延迟时间由 18 s 提升至 1 s, 到达负荷目标值  $M_{90\%}$  的时间由 93 s 减少至 19 s, 联合系统实际调节速率较机组实际调节速率提升 321%。

图 5 为系统跟踪 AGC 指令局部响应曲线, 可显示出多个 AGC 指令变化下火-储联合调频系统各部分的响应过程。

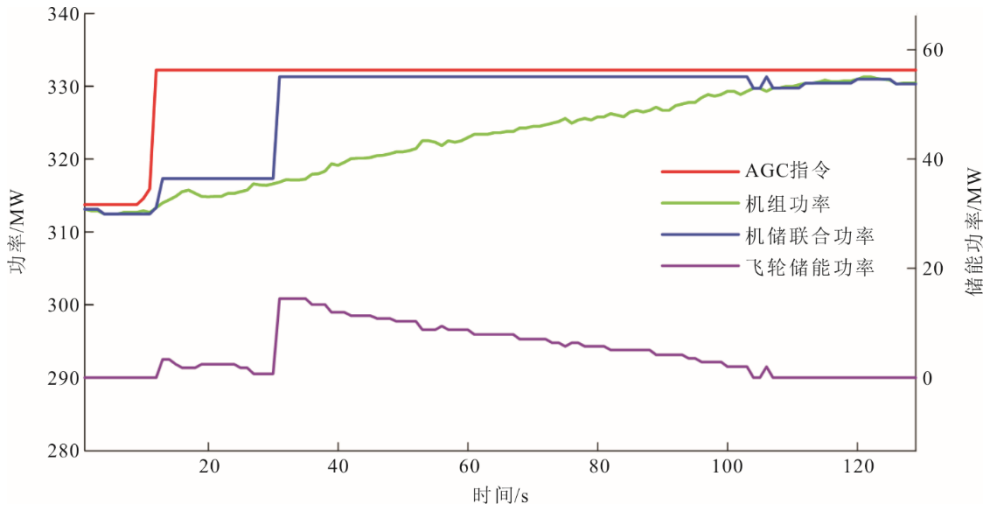


图 4 联合调频系统跟踪单个 AGC 指令响应曲线  
Fig.4 System tracks individual AGC command response curves

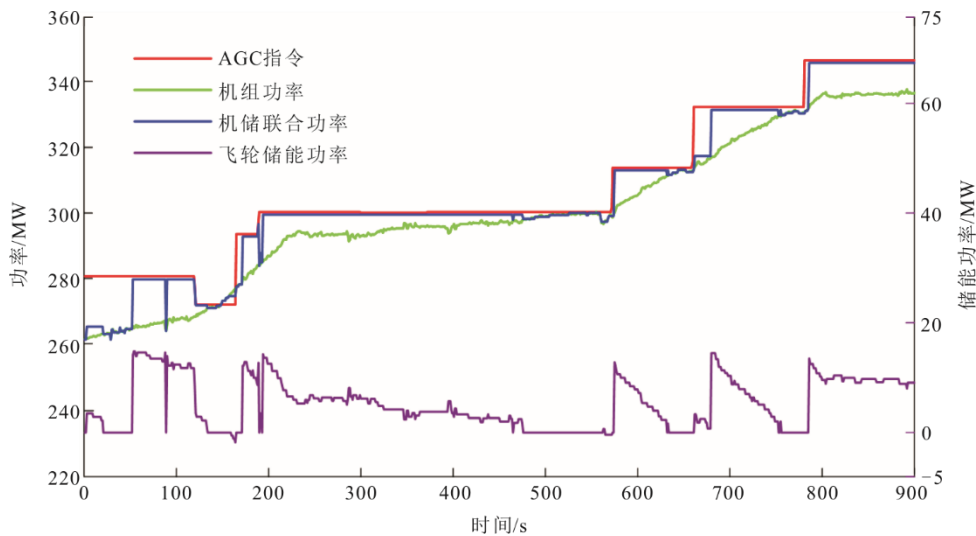


图 5 联合调频系统跟踪 AGC 指令局部响应曲线  
Fig.5 System tracking AGC command local response curve

由图 5 可见,本控制策略从单个指令下扩展为多个 AGC 指令下依旧可以完成设定控制目标。飞轮储能参与辅助火电机组调频后,联合系统相较于火电机组本身能够更快响应 AGC 指令变化,并且能够提升火电机组爬坡速率。

### 3.2 AGC 性能提升

#### 3.2.1 爬坡性能指标

火电机组联合飞轮储能投入 AGC 调频,在本文所提控制策略下运行,火-储联合系统相较于火电机组性能见表 1。由表 1 可知:飞轮储能的参与极大地提高了机组自身的调节速率,很好地改善了 AGC 的跟踪效果,响应时间提升 2.6%,调节速率提升 18.3%;并且由于机组自身出力变化引起的波动,飞轮储能的参与可以及时进行补偿,调节精度

提升 24.4%,整体  $K_p$  指标提升 16.4%。

#### 3.2.2 积分电量

实际积分电量为 AGC 指令下发期间机组实际出力与指令变化时出力差值的积分。理论积分电量为机组处于标准调节速率下,指令下发期间机组实际出力与指令变化时出力差值的积分。表 2 为不同 AGC 指令变化阶段下各系统的积分电量情况。由表 2 数据可知,飞轮储能对于积分电量的提升与 AGC 指令变化幅值以及持续时长有关。AGC 指令变化幅值大且持续时间较短时,飞轮储能系统对于积分电量的提升较大,最高可提升 376.82%。经过计算,飞轮储能参与 AGC 调频日均积分电量可达 32 MW·h,按西北电网考核细则计算电厂月收入预计可提高 42 万。

表 1 爬坡性能指标  
Tab.1 Climbing performance indicators

项目	调节速率 $k_1$	响应时间 $k_2$	调节精度 $k_3$	$K_p$ 值
机组独立调频	1.09	0.75	0.49	0.902
火储联合调频	1.29	0.77	0.61	1.05
提升幅度/%	18.3	2.6	24.4	16.4

表 2 积分电量  
Tab.2 Points power

序号	AGC 变化幅值/MW	AGC 指令持续时间/s	火电机组积分电量/(kW·h)	联合系统积分电量/(kW·h)	积分电量提升幅度/%
1	5.646	60	95.596	129.199	35.15
2	17.834	36	43.953	106.425	142.13
3	6.744	60	95.349	122.401	28.37
4	7.312	51	87.352	109.510	25.37
5	9.343	33	41.001	73.763	79.90
6	3.453	51	66.298	72.799	9.81
7	8.978	27	33.234	57.943	74.35
8	7.719	54	65.092	102.240	57.07
9	8.369	148	311.431	357.149	14.68
10	8.287	19	11.028	37.941	244.04
11	7.109	16	6.011	28.664	376.82
12	8.531	44	42.000	74.160	76.57
13	8.328	67	125.008	156.791	25.42
14	15.640	106	310.549	427.276	37.59
15	8.288	30	37.074	65.677	77.15

#### 3.2.3 调节容量

机组单日跟踪 AGC 指令下,统计实际最大出力与最小出力值,二者之间的差值为机组调节容量。表 3 为飞轮储能投运后 1 周内火-储联合系统调节容量统计。

由表 3 可以看出,调节容量平均由 201.54 MW

提升至 221.02 MW,提升幅值为 9.71%。

调节容量的变化与机组配备的储能容量大小和机组自身到达出力最大值与最小值时飞轮储能荷电状态有关,当机组出力到达上下限出力,飞轮储能荷电状态满足自身额定功率要求且响应对应的满功率充放电指令,调节容量可以有进一步的提升。

表3 调节容量  
Tab.3 Adjustment capacity

序号	机组最大出力/MW	机组最小出力/MW	联合最大出力/MW	联合最小出力/MW	机组调节容量/MW	联合调节容量/MW	容量提升幅度/%
1	483.744	285.688	491.841	274.693	198.056	217.148	9.64
2	461.038	289.866	466.932	281.562	171.172	185.37	8.29
3	518.131	283.237	527.015	271.299	234.894	255.716	8.86
4	517.716	294.634	527.021	285.812	223.082	241.209	8.13
5	461.191	293.759	470.861	284.137	167.432	186.724	11.52
6	497.284	292.688	504.709	278.985	204.596	225.724	10.33
7	473.134	261.559	483.48	248.263	211.575	235.217	11.17
平均	487.462	285.918	495.979	274.964	201.543	221.015	9.71

## 4 结 论

1) 本文控制策略下, 飞轮储能辅助火电机组调频可以有效提升 AGC 的考核指标, 综合爬坡性能指标提升 16.4%。飞轮储能系统辅助火电机组参与 AGC 调频, 可以有效弥补机组响应延迟大、调节速率低以及功率波动等问题。

2) 相比于火电机组单独参与调频, 火-储联合调频系统下 AGC 指令变化过程的积分电量和每日调节容量明显改善, 其中积分电量最高提升 376.82%, 调节容量平均提升 9.71%, 有利于提升电厂经济效益。

3) 本策略成功实现工程应用, 能够大幅度改善机组调频性能, 支持大电网安全稳定运行, 对飞轮储能系统在电力调频领域的应用推广具有重要意义。

### [参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. “十四五” 可再生能源发展规划 [Z]. [2022-06-01][2023-05-31]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601\\_1326720.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html?code=&state=123). National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Renewable Energy Development Plan for the 14th Five-Year Plan[Z]. [2022-06-01][2023-05-31]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601\\_1326720.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html?code=&state=123).
- [2] California Energy Commission. 2011, 2020 Strategic analysis of energy storage in California[EB/OL]. (2023-05-31). [www.energy.ca.gov/research/](http://www.energy.ca.gov/research/).
- [3] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103. CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103.
- [4] 边晓燕, 姜莹, 赵耀, 等. 高渗透率可再生能源微电网的风柴荷协调调频策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 102-109.

- BIAN Xiaoyan, JIANG Ying, ZHAO Yao, et al. Coordinated frequency regulation strategy of wind, diesel and load for microgrid with high-penetration renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 102-109.
- [5] 颜伟, 赵瑞锋, 赵霞, 等. 自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 149-155. YAN Wei, ZHAO Ruifeng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 149-155.
- [6] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 8-13. HOU Yuting, LI Xiaobo, LIU Chang, et al. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 8-13.
- [7] 赵征, 孙赫宇, 陈江丽. 基于 AGC 负荷指令优化分解的火电机组蓄能综合利用[J]. 动力工程学报, 2023, 43(5): 575-581. ZHAO Zheng, SUN Heyu, CHEN Jiangli. Optimized decomposition of AGC load command for comprehensive utilization of energy storage in the thermal power unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(5): 575-581.
- [8] 丁玉崑, 邵程安, 顾海英, 等. 基于 AGC 指令状态判断的火电机组变速率负荷控制策略研究[J]. 能源工程, 2023, 43(1): 1-5. DING Yiyin, SHAO Chengan, GU Haiying, et al. Research on variable rate load control strategy of thermal power units based on AGC state judgment[J]. Energy Engineering, 2023, 43(1): 1-5.
- [9] 陈喜龙, 白阳振, 林丽君. 浙江省火储联合调频必要性及配置研究[J]. 电工技术, 2023, 588(6): 186-188. CHEN Xilong, BAI Yangzhen, LIN Lijun. Research on necessity and configuration of joint frequency modulation of electrical energy storage and thermal power units in Zhejiang Province[J]. Electric Engineering, 2023, 43(1): 1-5.
- [10] 牟春华, 居文平, 黄嘉骊, 等. 火电机组灵活性运行技术综述与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 1-7. MU Chunhua, JU Wenping, HUANG Jiasi, et al. Review and prospect of technologies of enhancing the flexibility of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 1-7.
- [11] VAZQUEZ S, LUKIC S M, GALVAN E, et al. Energy

- storage systems for transport and grid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 3881-3895.
- [12] 赵萌, 杜平, 张秀海, 等. 新型磁悬浮飞轮储能实验装置的设计及应用[J]. 现代机械, 2023, 235(3): 11-15. ZHAO Meng, DU Ping, ZHANG Xiuhai, et al. Design and application of a new magnetically suspended flywheel energy storage experimental device[J]. Modern Machinery, 2023, 235(3): 11-15.
- [13] GARCÍA-PEREIRA H, BLANCO M, MARTÍNEZ-LUCAS G, et al. Comparison and influence of flywheels energy storage system control schemes in the frequency regulation of isolated power systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 37892-37911.
- [14] SUN M, XU Y, HAN K. Structure and optimization design of cup winding permanent magnet synchronous machine in flywheel energy storage system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 59(5): 1-5.
- [15] MOUSAVI G, FARAJI F, MAJAZI A, et al. A comprehensive review of flywheel energy storage system technology[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 477-490.
- [16] DINCER I, ROSEN M A, KHALID F. Comprehensive energy systems[J]. Comprehensive Energy Systems, 2018, 3: 335-379.
- [17] 陈大宇, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 9-13. CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, et al. Development of energy storage in frequency regulation market of united states and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 9-13.
- [18] ZHAO H, WU Q, HU S, et al. Review of energy storage system for wind power integration support[J]. Applied Energy, 2015, 137: 545-553.
- [19] ARANI A A K, KARAMI H, GHAREHPETIAN G B, et al. Review of flywheel energy storage systems structures and applications in power systems and microgrids[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 9-18.
- [20] Beacon Power 20 MW Flywheel Frequency Regulation Plant[EB/OL]. (2023-05-31). [https://www.sandia.gov/ess-ssl/docs/pr\\_conferences/2010/arseneaux.pdf](https://www.sandia.gov/ess-ssl/docs/pr_conferences/2010/arseneaux.pdf).
- [21] PEI Y L, CAVAGNINO A, VASCHETTO S, et al. Flywheel energy storage systems for power systems application[C]//2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Santa Margherita Ligure, Italy, 2017: 492-501.
- [22] LAZAREWICZ M L, RYAN T M. Integration of flywheel-based energy storage for frequency regulation in deregulated markets[C]// Power & Energy Society General Meeting, IEEE, 2010.
- [23] 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): 2597-2606. SUI Yunren, LIANG Shuangyin, HUANG Dengchao, et al. Simulation study on frequency modulation process of coal burning plants with auxiliary of flywheel energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2597-2606.
- [24] 王军, 薛飞宇, 乔天舒, 等. 320 MW 供热机组耦合飞轮储能调频研究[J]. 电工技术, 2022, 579(21): 220-222. WANG Jun, XU Feiyu, QIAO Tianshu, et al. Research on frequency regulation of coupled flywheel energy storage for 320 MW heating unit[J]. Electric Engineering, 2022, 579(21): 220-222.
- [25] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 81-87. DING Dong, LIU Zongqi, YANG Shuili, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 81-87.
- [26] 于昌海, 吴继平, 杨海晶, 等. 规模化储能系统参与电网调频的控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 68-73. YU Changhai, WU Jiping, YANG Haijing, et al. Frequency regulation strategy for power grid incorporating large-scale energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 68-73.
- [27] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5080-5087. HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080-5087.
- [28] XIE X, GUO Y, WANG B, et al. Improving AGC performance of coal-fueled thermal generators using multi-MW scale BESS: a practical application[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1769-1777.

(责任编辑 刘永强)