

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403062

# 混合储能调频工程经济性提升 策略研究及应用

殷悦<sup>1</sup>, 孙钢虎<sup>1</sup>, 兀鹏越<sup>1</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 杨沛豪<sup>1</sup>, 郭昊<sup>1</sup>, 李菁华<sup>1</sup>

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.华能国际电力股份有限公司日照电厂, 山东 日照 276800)

**[摘要]** 储能系统辅助火电机组调频受到储能器件容量限制, 其输出功率无法长时间跟踪指令功率, 同时锂电池储能也存在安全隐患、循环寿命限制与提升机组调频收益增益有限等问题。为此, 利用超级电容高循环寿命、高安全性的特性, 在 Matlab/Simulink 中构建混合储能系统辅助燃煤火电机组调频的仿真模型。结合火电机组和储能系统运行状态, 进而设计了一套基于指标计算与模糊控制协同的控制策略, 实现了动态工况下混合储能系统输出的自适应调整。仿真验证表明该控制策略能够有效延长锂电池的使用年限并且高效利用混合储能的剩余电量。相比于传统的混合储能系统策略, 该控制策略降低了锂电池 60% 的日均使用次数, 调频性能综合指标提高 34%, 日均收益提高 2 万元, 具有较高的工程应用价值。

**[关键词]** 大容量超级电容; 使用寿命; 调频性能综合指标; 模糊控制; 指标计算

**[引用本文格式]** 殷悦, 孙钢虎, 兀鹏越, 等. 混合储能调频工程经济性提升策略研究及应用[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 81-89. YIN Yue, SUN Ganghu, WU Pengyue, et al. Research and application of economic improvement strategy for hybrid energy storage frequency modulation project[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 81-89.

## Research and application of economic improvement strategy for hybrid energy storage frequency modulation project

YIN Yue<sup>1</sup>, SUN Ganghu<sup>1</sup>, WU Pengyue<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, YANG Peihao<sup>1</sup>, GUO Hao<sup>1</sup>, LI Jinghua<sup>1</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Rizhao Power Plant, Huaneng International Power Co., Ltd., Rizhao 276800, China)

**Abstract:** Energy storage system assisted thermal power unit frequency regulation is limited by the capacity of storage device, and its output power can not track the command power for a long time. At the same time, lithium battery energy storage technology also exists problems in safety hazards, cycle life limitations, limited enhancement of unit frequency gain gain and other issues. For this reason, the characteristics of high cycle life and high safety of supercapacitor are used to construct the simulation model of hybrid energy storage system assisted coal-fired thermal power unit frequency regulation in Matlab/Simulink platform. Combining with the operating state of thermal power unit and energy storage system, a set of control strategy based on index calculation and fuzzy control synergy is designed to achieve the adaptive adjustment of hybrid energy storage system output under dynamic operating conditions. Simulations show that, the control strategy can effectively extend the service life of lithium batteries and efficiently utilize the residual power of the hybrid energy storage system. Compared with the conventional control strategy of hybrid energy storage system, the proposed control strategy reduces the average daily use time of lithium battery by 60%, improves the comprehensive index of frequency regulation performance by 34%, and increases the average daily revenue by 20 000 yuan, which has high engineering application value.

**Key words:** large-capacity supercapacitors; service life; comprehensive index of frequency modulation performance; fuzzy control; index calculation

收稿日期: 2024-03-19

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ22-H12)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-H12)

第一作者简介: 殷悦 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统调频, a499184652@outlook.com.

大规模新能源并网的迅速发展对电力系统的碳减排产生了深远影响,其本身所具备的间歇性、随机性和波动性对于电力系统的功率平衡与电网的灵活调度提出严峻的挑战<sup>[1-2]</sup>。我国电力系统仍以火电为主导<sup>[3]</sup>,火电发电容量大可持续高效稳定运行,作为当前电力系统主要调频电源之一<sup>[4-5]</sup>。但现役火电机组面临节能升级和灵活性改造,由发电型电源向基础保障性和系统调节性电源并重转型的重大挑战<sup>[6]</sup>。储能辅助火电机组调频变成为新兴的研究热点<sup>[7]</sup>,火电机组承担基础负荷与响应自动发电控制(automatic generation control, AGC)指令调度功能,辅以储能系统作为补充快速响应单元<sup>[8-9]</sup>,能够达到改善机组 AGC 性能的目的。

随着国家政策的扶持,火储调频技术成为研究热点。宋杰等<sup>[1]</sup>采取经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的混合储能容量规划方法,在考虑了功率高低频响应的前提下,进行储能容量配置与功率分配,但是未考虑储能系统的剩余电量与调频性能指标,对于调频性能的提升存在局限。王益斌等<sup>[5]</sup>在考虑了调频考核规则,建立了以调频性能最优为目标的优化模型,而且以储能 SOC 偏差最小作为二阶段优化模型的目的。但是未考虑锂电池系统自身的储能特性,对储能系统的使用寿命提升效果较低。王伟等<sup>[10]</sup>分析验证了超级电容混合储能对于机组一次调频节能收益显著。

火储调频的推广主要受限于参与调频辅助服务市场的经济性问题。提高火储调频的收益可以从两方面着手:首先是提高火电机组的调频性能综合指标  $K$ , 调频性能与火电机组的调频收益正相关;其次是降低储能系统的更换成本。目前国内绝大部分调频项目都是以锂电池作为主要的储能单元。但锂离子电池的循环寿命相对较短<sup>[11]</sup>,需要后期更换,增加后期维护成本,且存在安全隐患。超级电容器可以承担 30%~60% 日充放电量,有效降低锂电池日循环次数、最大温度与温差,提高安全性。

针对上述研究热点,本文首先建立了超级电容混合储能辅助火电机组调频模型;然后分析了指标计算算法与模糊控制算法的原理与优点。针对火电机组调频性能低的问题,采用指标计算算法控制储能系统参与调频的时间与功率,提高混合储能系统的利用效率及调频性能综合指标。针对超级电容运行稳定性及锂电池循环寿命低的问题,利用模糊控

制逻辑优化混合储能系统功率分配系数,使系统在保证运行稳定的前提下,最大限度延长锂电池使用寿命;最后通过模型仿真及实际运行数据验证,证明所提控制策略的有效性,验证对火电厂的调频收益提高的效果。

## 1 混合储能辅助火电机组调频技术

单一的能量型或功率型储能系统往往难以同时满足火力发电机组调频作业的短时高频特性与综合经济性要求<sup>[12]</sup>。超级电容与锂电池具有很强的互补性。锂离子超级电容器在保持超级电容器高功率密度与超高循环寿命的基础上大幅提升了能量密度,更加适合火电调频领域,超级电容与锂电池构成混合储能系统,降低锂电池深冲深放次数与日充放电量,更好保护储能系统安全性与经济性,大幅提高火电机组的调频性能。

### 1.1 超级电容混合储能

锂离子超级电容(lithium-ion capacitors, LICs)作为一种新型电化学储能器件,正极一般采用高比表面积活性炭,储能原理类似双电层储能机理。负极材料通常采用预埋锂的碳基材料,例如石墨或是硬碳,负极发生离子的嵌入/合金/转化等氧化还原反应。其工作的原理为:超级电容充电时,电解液会通过氧化还原反应解析出  $\text{Li}^+$  和  $\text{PF}_6^-$ , 阴离子与阳离子被正负极吸引,在这一过程中,正机侧形成双电层。放电则为锂离子从石墨负极脱嵌,再与电解液发生化学反应<sup>[13]</sup>。超级电容工作原理如图 1 所示。

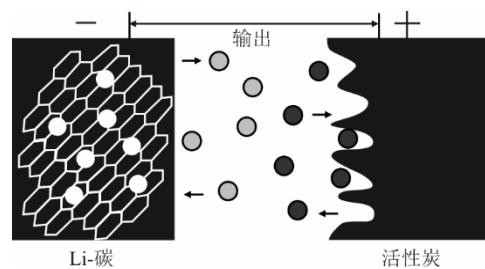


图 1 超级电容工作原理示意

Fig.1 Schematic diagram of working principle of supercapacitors

不同于仅依靠电化学反应的锂电池储能,超级电容混合储能系统可有效减轻运行温度、安全性与成本方面的弊端。电化学反应过程中涉及锂离子的插入与脱落,这一过程存在较大的能量转化为热量,这导致锂离子电池的运行温度通常较高,锂离子电池热失控的诱因大致可以分为机械滥用、电滥

用和热滥用 3 类, 诱因之间交互影响, 最终导致热失控<sup>[14]</sup>。LICs 兼具双电层储能和电化学储能, 运行温度相对较低。超级电容可在温度高达 60 °C 的情况下工作, 并能够忍受高达 70 °C 的储存温度, 极低概率出现热失控现象, 从而安全性相对较高。虽然超级电容储能系统相比于锂电池储能系统初期投入成本相对更高, 但每兆瓦的日充放电量相对更高, 循环寿命远超锂电池储能系统, 后期更换成本较低, 运行简单故障率低, 全寿命周期成本较低。因此采用超级电容混合储能辅助火电机组调频的策略被视为火电与储能协同的有效技术方案之一。

### 1.2 混合储能控制系统火储系统建模

AGC 通过调节区域内各发电机组的输出功率, 使得由负荷变化和发电机组功率波动引起的区域控制偏差 (area control error, ACE) 不断减小, 直至收敛到零, 来实现区域内的负荷频率控制。联络线功率频率偏差控制 (tie-line load frequency bias control, TBC) 是分析电网系统中有功功率、频率控制较为合理的方法之一<sup>[15]</sup>。

$$ACE_a = \Delta P_{tie-ab} + B_a \Delta f \quad (1)$$

$$ACE_b = \Delta P_{tie-ab} + B_b \Delta f \quad (2)$$

式中:  $ACE_a$  为区域  $a$  功率频率偏差值;  $ACE_b$  为区域  $b$  功率频率偏差;  $\Delta P_{tie-ab}$  为联络线交换功率;  $\Delta f$  为频率变化量;  $B_a$ 、 $B_b$  为频率偏差系数。相对于大规模电网, 两区域系统的模型较简单, 有利于理解和仿真分析。同时又包含了区域间电力流动的特点, 较为直观研究区域间功率流动和相互支援的规律。两区域负荷频率响应模型如图 2 所示。

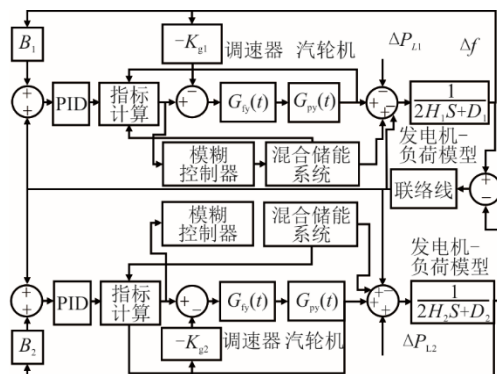


图 2 两区域负荷频率响应模型

Fig.2 The two-zone load frequency response model

对于单个大型燃煤发电机组的负荷控制, 通常采用单元机组协调控制系统 (unit coordinated

control system, CCS)。在 CCS 框架下, 锅炉和汽轮发电机作为机组的核心设备, 具有灵活响应负荷变化的能力。它们可以及时调整输出, 从而稳定主蒸汽系统压力, 同时保证机组长期高效和可靠运行。

基于火电机组频率动态特性主要受调速器和汽轮机参数影响, 对火电机组进行简化分析建模。当系统的频率发生变化后, 调速器开始动作, 通过调度阀门开度, 改变机械功率输出。在考虑调速器调频死区的前提下, 构建调速器模型传递函数<sup>[16]</sup>。

$$G_{ty}(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta f(s)} = \frac{K_G}{1 + sT_g} \quad (3)$$

式中:  $K_G$  为火电机组的频率调节系数;  $T_g$  为火电机组调速器的时间常数;  $\Delta Y(s)$  为汽轮机调速器控制阀开度变化量;  $\Delta f(s)$  为频率变化量。

对于再热汽轮机, 锅炉的高温高压蒸汽首先通过高压调节阀, 在高压缸内进行热功转换; 高压缸出口的二次蒸汽进入再热器冷段, 释放部分蒸汽份额; 随后进入再热器热段进行加热, 再进入中压缸工作; 经中压缸后, 低压蒸汽进入低压缸完成最后阶段的热功转换; 用于循环的乏汽从低压缸排出, 进入凝汽器冷却凝结。仿真建模可采用国内提出的一种引入自然过调系数的汽轮机模型<sup>[17]</sup>:

$$G_{py}(s) = \frac{(\lambda + 1)F_{HP}}{1 + sT_{CH}} + \frac{F_{IP} - \lambda F_{HP}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} + \frac{F_{LP}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})(1 + sT_{CO})} \quad (4)$$

式中:  $F_{HP}$  为汽轮机高压缸输出功率占比;  $F_{IP}$  为中压缸输出功率占比;  $F_{LP}$  为低压缸输出功率占比;  $T_{CH}$  为锅炉高压蒸汽时间;  $T_{RH}$  为再热蒸汽时间;  $T_{CO}$  为低压蒸汽时间。

LICs 与锂离子电池虽在内部化学反应的原理不同, 但是其外部特性相差不大, 采用一阶惯性环节描述, 能够表明储能系统快速响应的特点, 且能较好反应储能电池调频出力特征。

$$\Delta P_C(s) = \frac{1}{1 + T_C s} \Delta P_{AGC-C} \quad (5)$$

$$\Delta P_B(s) = \frac{1}{1 + T_B s} \Delta P_{AGC-B} \quad (6)$$

式中:  $\Delta P_C$ 、 $\Delta P_B$  分别为超级电容与锂电池的输出功率;  $\Delta P_{AGC-C}$ 、 $\Delta P_{AGC-B}$  分别为能量管理系统 (energy management system, EMS) 发给超级电容与锂电池的功率指令;  $T_C$ 、 $T_B$  分别为超级电容、电池储能系

统的时间常数。

## 2 调频经济性提升策略

储能系统辅助火电机组调频不仅能够提高电力系统的稳定,也能提高火电机组的收益。同时延长锂电池的使用寿命也是提高经济性的方法之一。为提高火储调频系统参与调频的经济性,本文设计了指标计算算法和模糊控制算法协同控制策略,用于优化储能系统和火电机组动作配合,具体如图3所示。

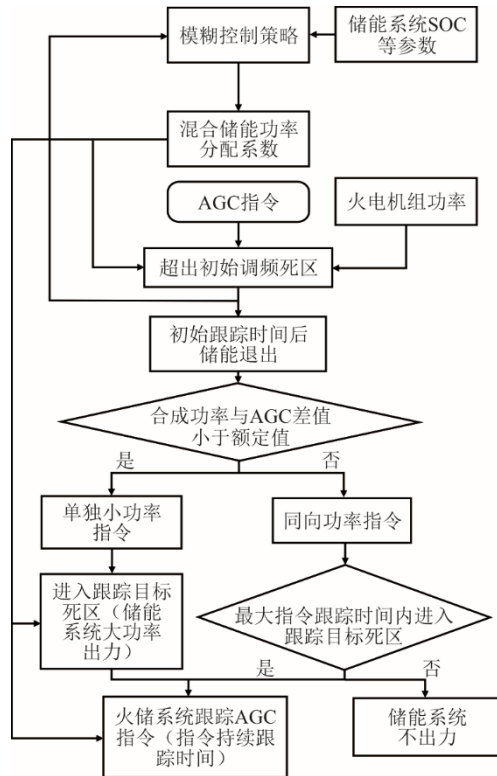


图3 AGC指令分配策略

Fig.3 The AGC instruction allocation strategy

首先深入分析调频性能综合指标中的调节速率、调节精度和响应时间3个指标,提出了基于指标计算的控制策略,根据初始调频死区及初始跟踪时间对响应时间指标精确优化;再通过跟踪目标死区和最大跟踪时间,对混合储能系统的投入条件及功率进行判断,实现多个AGC指令平均调频速率指标上升,高效地实现了平衡储能系统SOC与提高火电机组调频性能的目的;然后通过设置跟踪时长,在考核时间内合成功率精确跟踪AGC曲线;最后通过调度联调实验,进行参数优化。同时,通过模糊控制算法对混合储能系统的功率分配比例系数进行优化,提高系统安全性与运行稳定性,达到提高锂电池使用时间的目的。

### 2.1 实现调频性能提升的指标计算控制策略

针对福建省调频市场对于发电单元的考核和补偿机制,提出了基于指标计算的控制策略。结合联调试验研究发现,储能系统对于响应时间的提升较高,调节速率全过程响应影响较小。因此储能系统可以最大程度满足响应时间指标要求,同时将调频指令类型分为单独小功率指令与同向功率指令2种。对单独小功率指令,追求快速精确的跟踪响应;而对同向功率指令,需在SOC安全范围内跟踪,综合保障调频质量与系统安全。既保证对AGC指令的有效跟踪,又不会过度消耗储能,影响后续运行。

为充分利用储能系统快速响应的优点,提高响应时间指标。控制策略设为,当AGC指令变化时,储能系统辅助火电机组合成功率大于AGC指令变化前的合成功率加上调节动作死区,考虑到通讯延时与RTU数据传输为秒级,投入超出调节动作死区1.1倍的储能功率,响应时间为1s,稳定时间4s,防止因通讯延时导致合成功率未能超出初始调频死区影响响应时间指标,同时避免因储能系统快速反应,开始时间与结束时间重合导致收益受损<sup>[18]</sup>。

$$P_s(t_1) + P_G(t_1) > P_{D2} + P_s(t_2) + P_G(t_2) \quad (7)$$

式中:  $t_1$  为AGC指令变化时刻;  $t_2$  为AGC指令变化前时刻;  $P_G$  为机组功率;  $P_s$  为储能系统功率;  $P_{D2}$  为初始调频死区。

调节速率指标是调频性能综合指标的关键之一,功率变化幅值大,满充满放容易导致SOC过低或过高。考虑到混合储能系统的经济性与储能系统的容量,同向功率指令与单独小功率指令的主要区别在于在AGC指令持续时间内,能否实现合成功率与AGC指令偏差值符合式(8)的要求。

$$|P_{Smax} + P_G(t) - P_{AGC}(t)| \leq 0.9P_{D1} \quad (8)$$

式中:  $P_{Smax}$  为储能系统最大允许出力功率;  $P_{AGC}$  为AGC指令大小;  $P_{D1}$  为调节目标死区。

为避免火电机组功率波动影响,当最大合成功率与AGC指令功率差值的绝对值小于0.9倍调节目标死区时,储能系统最大程度跟踪AGC指令,该策略大幅提高了火电机组的调节速率指标。

EMS接受到同向功率指令时,由于多个同趋势调频指令的影响,火电机组功率输出与AGC指令产生较大偏差,故设置指令跟踪持续时间  $t_{trace}$  与最大跟踪时间  $t_{max}$  判断储能系统投入时间。

$$t_{trace} < t_{max} < t_{AGC} \quad (9)$$

在同向功率指令下,最大跟踪时间内可以满足

式(8), 储能系统最大功率投入跟踪 AGC 曲线。最大跟踪时间的设置实现了储能系统输出性能与使用寿命之间的平衡, 既满足了发电机组的调频需求, 又兼顾了储能系统的经济效益。

为满足调频精度指标, 储能系统最高精度跟踪 AGC 指令, 同时也设置指令跟踪持续时间为 1.5 min, 超出跟踪时间后储能系统退出, 保存储能系统剩余电量, 以便更好提高下一个指令的调频性能。

### 2.2 实现储能寿命提升的模糊控制策略

在火电储能系统中, 鉴于超级电容具有较长的使用寿命和出色的安全性能, 因此优先被用于参与调频任务。但是在混合储能系统投运 AGC 的连续充/放电过程中, 经常发生超级电容器与锂电池容量不足, 这会导致储能系统参与调频过程中出现反调现象, 不利于提高火电系统的调频能力与保护锂电池安全性及寿命。同时在超级电容器低 SOC 时, EMS 下发大放电指令, 对电压幅值影响较大(图 4), 触发欠压保护, 导致停机等现象。因此, 本文提出基于模糊控制理论, 结合储能系统 SOC 状态和 AGC 控制指令, 实现平稳控制火储系统输出幅值的控制策略。

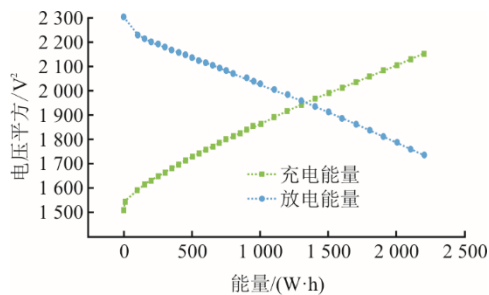


图 4 超级电容电压-能量特性曲线  
Fig.4 The voltage-energy characteristic curve of supercapacitors

为充分利用超级电容储能器件的高循环寿命并依据实际应用需求, 在考虑超级电容特性的基础上提出了以下策略: 混合储能系统放电时, 优先考虑由超级电容放电, 当超级电容的 SOC 状态为警戒区时, 限制超级电容输出功率, 由锂电池进行弥补功率缺额; 当混合储能系统充电时, 优先由超级电容充电, 当超级电容的 SOC 为警戒区时, 限制超级电容的输出功率, 由锂电池弥补功率缺额。

$$P_c(t) = C(t) \times P_{AGC-s}(t) \quad (10)$$

式中:  $P_c(t)$  为超级电容输出功率;  $P_{AGC-s}(t)$  为 EMS 下发给混合储能系统的输出功率;  $C(t)$  为储能系统

功率分配系数。

功率分配系数与 SOC 和输出功率相关, 非固定值, 模糊控制适用于这种情况。模糊控制器的输入输出隶属度函数如图 5 所示。

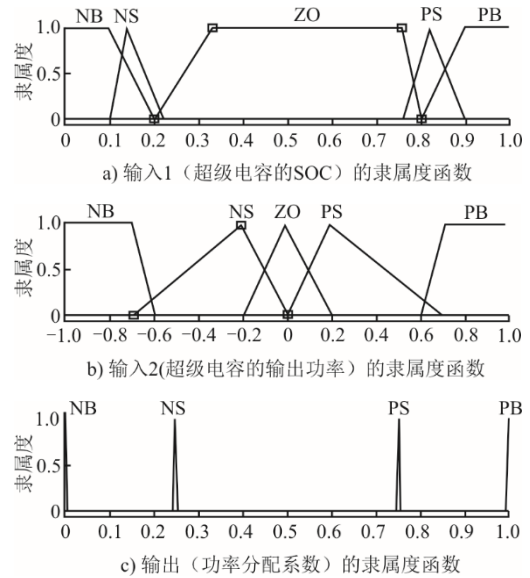


图 5 隶属度函数  
Fig.5 Membership functions

图 5 中, 选取 NB、NS、ZO、PS、PB 为模糊论域均为(0,1], 依次表示取值的负大、负小、中值、正小和正大。超级电容相对锂电池更加安全, 将其荷电状态的上、下限设置为 10%、90%, 并规定将  $0.1 < SOC_c(t) < 0.23$  和  $0.77 < SOC_c(t) < 0.90$  内设置为警戒区, 在警戒区的隶属度函数图形采用三角形隶属度函数, 较为尖锐, 表明模糊控制器对超级电容储能系统的充放电更加敏感, 更有效地实现控制目标。将超级电容器储能系统功率进行标幺化处理, 当  $0 < P_{AGC-s}(t) < 0.03$ , 表示系统放电; 当  $-0.03 < P_{AGC-s}(t) < 0$ , 表示系统充电。

为实现超级电容优先调用及在警戒区域内平滑混合储能系统输出功率的目的, 从而达成延迟锂电池使用寿命及超级电容稳定运行的任务。在考虑储能系统容量及 AGC 指令统计的基础上, 制定了模糊控制规则(表 1)。

表 1 模糊控制规则  
Tab.1 The fuzzy control rules

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	NS	NB	NB
NS	PB	PB	PS	NS	NB
ZO	PB	PB	PB	PB	PB
PS	NB	NS	PS	PB	PB
PB	NB	NB	NS	PB	PB

### 3 仿真分析及工程验证

在前文理论研究和分析的基础上,在 MATLAB/Simulink 平台建立混合储能辅助火电机组调频的模型。仿真验证机组面对扰动情况下,与传统的调频策略对比,通过指标计算与模糊控制控制策略实现火电机组与储能系统的合成功率较好跟踪 AGC 曲线提升调频性能,延长了锂电池的使用寿命,保证了超级电容 SOC 在警戒区时稳定功率输出,最后工程数据验证了提出控制策略有效性。其中火电机组及储能系统的相关参数见表 2。

表 2 仿真系统模型参数

Tab.2 Parameters of the model of simulation system

项目	数值	项目	数值
火电机组功率/MW	660	高压缸输出功率占比 $F_{HP}$	0.311
锂电池功率/MW	15	中压缸输出功率占比 $F_{IP}$	0.253
锂电池容量/(MW·h)	7.50	低压缸输出功率占比 $F_{LP}$	0.436
超级电容功率/MW	5	高压蒸汽时间 $T_{CH}/s$	0.271
超级电容容量/(MW·h)	0.33	再热蒸汽时间 $T_{RH}/s$	13.562
频率偏差系数 $B_a$ 、 $B_b$	31	低压蒸汽时间 $T_{CO}/s$	0.391
负荷单位调节率 $K_{g1}$ 、 $K_{g2}$	20	惯性时间常数 $H_1$ 、 $H_2$	6
调速器时间常数 $T_g$	0.08	负荷阻尼系数 $D1$ 、 $D2$	2

#### 3.1 火储调频系统调频性能提升验证

为了充分验证火储调频在动态工况下调频性能的提升效果,动态工况下设定负荷侧突然增加,在  $t=1$  s 改变 AGC 指令进行仿真,仿真时间 60 s,火储系统分别在本文所提策略、满充满放、储能系统阶梯式放电 3 种情况下跟踪 AGC 曲线,不同工况下 AGC 与输出功率变化量曲线如图 6 所示。

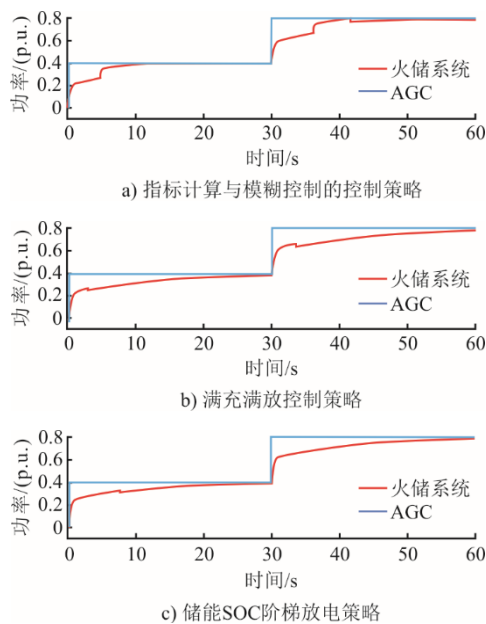


图 6 功率跟踪曲线

Fig.6 The power trace curves

考虑到单独小功率指标情况下 3 种控制策略均可以较好跟踪 AGC 指令,故将多个小指令合成设置为功率之和。当 AGC 曲线发生变化时(图 6a),满足式(7)储能系统快速动作,在初始跟踪时间内提高响应时间指标;之后由火电机组单独出力跟踪 AGC 曲线,直到满足式(8),储能系统投入,合成功率跟踪 AGC 曲线,提高了调节速率指标;跟踪 AGC 指标后,储能系统依然有剩余电量,可以高精度跟踪 AGC 曲线。如图 6b)与图 6c)所示,在满充满放与储能系统 SOC 阶梯放电策略下储能系统一直投入无退出,响应时间指标与本文策略提升效果一致,调频速率指标相对较差,9 s 后 2 种策略超级电容剩余电量全部耗尽,调节精度指标无法保证,阶梯放电策略输出相对平稳,但性能提升依然不高。因此,本文提出的基于指标计算与模糊控制的控制算法有效提升了调频性能。

为了深入研究调频性能指标,与发电系统调度开展调频响应实验。超级电容混合储能系统,大幅提高发电机组在调频过程中的各项性能指标。部分实验相关参数见表 3,可对相关参数细致优化。

表 3 AGC 联调实验数据对比

Tab.3 Comparison of AGC joint debugging experimental data

调频相关数据	调度侧	储能侧	火电侧
响应时间/s	6~12	1~3	17~22
调节时间/s	6~12	1~3	37~58
调频速率/(MW·min <sup>-1</sup> )	104.5 (升) /69.0 (降)	108.0 (升) /76.0 (降)	6.6~8.0
调节精度/MW	1.4~2.3	1.0~1.7	1.1~2.0

为验证该控制策略在实际工程中的应用价值,联合罗源电厂开展试验。采集火电机组功率、合成功率与 AGC 指令,结果如图 7 所示。

在图 7a)中,采取满充满放策略,在小指令的情况下基本可以满足 AGC 调频需求,同向指令只能完全响应 1~2 个指令,之后的指令储能系统由于容量限制,只能依靠火电机组的调频速率缓慢提。在很大程度上浪费了混合储能系统的快速响应的优点。采取指标计算的功率分配策略,在小指令的情况下,如图 7b)对调频性能综合指标的提高最为明显。在同向指令的情况,如图 7c)所示,储能系统优先满足响应时间指标,在无法满足公式(7)的情况下,在最大跟踪时间退出储能系统,延长储能系统的寿命。如

图 7d)所示,整体提高了当天的调频性能综合指标。

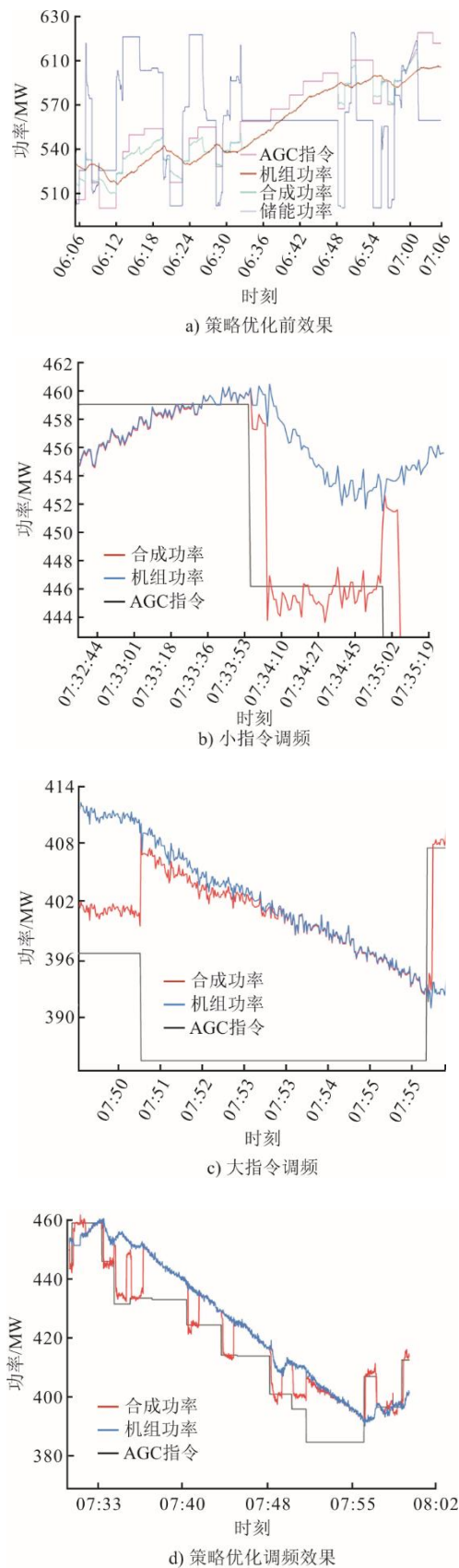


图 7 超级电容调频效果

Fig.7 Frequency modulation effect of supercapacitor

### 3.2 混合储能系统使用寿命提高验证

为了充分验证火储调频在不同工况下锂电池单次使用电量的降低效果,本文设置满充满放与储能 SOC 阶梯放电策略与本文策略进行对照,机组运行稳态情况下在 0 s 与 30 s 加入 0.4 p.u.的 AGC 指令仿真,仿真时间 60 s。得到随着时间的变化,混合储能系统的不同储能器件及策略下的 SOC 变化如图 8 所示。

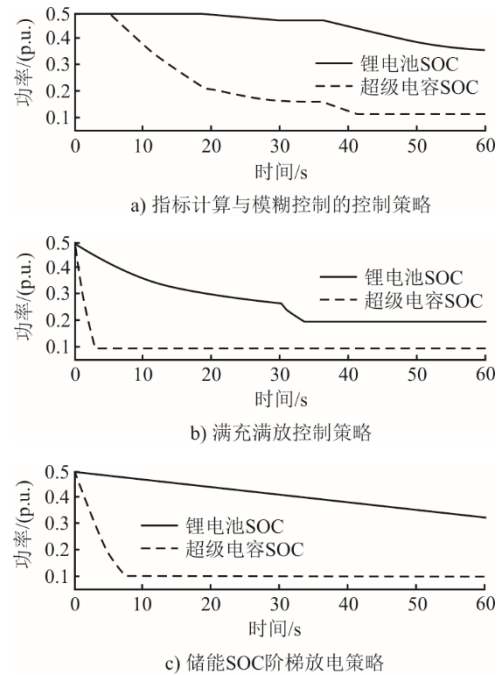


图 8 不同控制策略下 SOC 变化趋势

Fig.8 Variation trends of SOC with different control strategies

由图 8a)可知,当满足式(8)时,混合储能系统辅助火电机组参与 AGC 调频,此时超级电容处于健康状态,EMS 下发给混合储能系统的功率全部由超级电容响应。在 20 s 左右,锂电池参与辅助火电机组调频,同时超级电容的功率输出达到最大值;在 40 s 左右,超级电容的输出功率逐渐降低为 0,保证了系统的稳定性与安全性,但是用于稳定功率波动的时间相对更多,相对锂电池的日充放电量也会减少。由图 8b)知,满充满放策略的输出功率更大。在 5 s 时超级电容功率剩余电量降低到 0.1,此时超级电容功率变化较大,容易欠压停机,但是可以最短速度跟踪 AGC 指令,对于单次调频性能的提升更大。由图 8c)知,储能系统阶梯放电对于储能系统寿命的提升效果相对较好。综合比较,模糊控制有效降低了锂电池的日充放电量。

图 9 为某电厂 30 天内储能调频系统对超级电

容和锂电池进行充放电的次数统计结果。由图 9 可知, 尽管受自身容量限制, 但超级电容的循环次数仍有 10% 的增长。与此相比, 锂电池的循环次数下降得更加显著, 从每天 5.48 次降低到每天 2.18 次, 日均使用循环次数降低到原先 40%。这无疑大大延长了锂电池的使用寿命, 有利于减少后期更换电池成本。

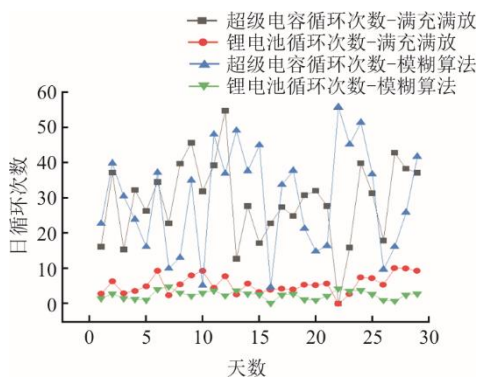


图 9 控制策略效果对比

Fig.9 Comparison of the effects of control strategies

## 4 系统调频收益分析

通过对超级电容混合储能系统运营 85 天的数据进行分析, 充分验证该系统在提高火力发电机组调频灵活性、实现高效辅助调频方面具有重要技术优势和广阔应用前景, 火电调频性能达福建省领先水平, 同时有效延长了锂电池的使用寿命, 获得更高的经济效益。

### 4.1 调频性能提高对调频收益的影响

对该超级电容混合储能系统按月分析了调频性能数据, 结果如图 10 所示, 图中  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别是机组调节速率、调节精度、响应时间指标。试运行期间采取满充满放策略,  $K_1$  提升约 15.6 倍,  $K_2$  提升约 2.77 倍,  $K_3$  提升约 2.82 倍,  $K$  提升约 1.22 倍, 位居福建省火电机组前列; 策略优化后,  $K$  值最高可达到 0.863 7, 相比于未投入储能系统提高了 1.62 倍,  $K_1$  达到 0.983 9,  $K_2$  达到 5.119 9,  $K_3$  达到 0.716 2, 相比于满充满放策略提升 34%, 火电机组调频性能进一步提升。

根据罗源电厂采用指标计算算法和模糊控制算法协同控制策略后的调频收益统计, 日均投入时长 15.8 h, 日均调频收益 6.07 万元。其中 6 月调频收益 182 万元, 日均调频收益 6.74 万元。该成果成功验证了超级电容混合储能系统在辅助服务市场具有巨大的优势。

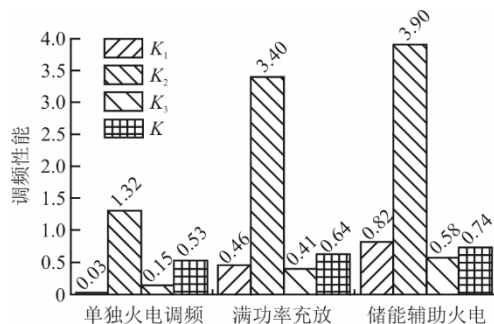


图 10 策略优化效果

Fig.10 Optimization effect of the control strategies

### 4.2 锂电池使用寿命提高对调频收益的影响

超级电容的循环次数可以达到 50 万次, 但是日均循环次数使用仅为 32 次, 不考虑故障维修及极端天气等不投入储能辅助调频情况下, 超级电容的使用次数仅为 11 万次, 这远低于产品指定的使用上限。因此, 在使用寿命规划内, 超级电容的维修保养成本可以忽略不计。与此相比, 锂电池的循环寿命仅为 5 000 次。采取模糊控制策略后, 通过合理调度 2 种储能设备, 锂电池的使用年限由 2.7 年延长至 6.3 年, 日均成本为 0.6 万元/天以下。相比普通的满充满放策略, 采用本文控制策略后调频收益减去设备日均成本提高了 2.04 万元。

## 5 结 论

本文研究了一种基于指标计算与模糊控制的超级电容与锂电池混合储能系统辅助火电机组调频的控制策略。通过模型验证与实际运行数据分析可以得到以下结论。

1) 比较于传统的“满充满放”控制策略, 提出的混合储能控制策略能有效延长锂电池的使用寿命, 日使用次数从 5.48 次/天降低到 2.18 次/天, 日均循环次数降低了 40%。

2) 新控制策略能够在满足运行稳定性的前提下, 提高整体火储系统的调频综合指标 34%, 日均收益大幅提升。

### [参 考 文 献]

- [1] 宋杰, 耿云霄, 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.
- [2] 牟春华, 居文平, 王洋, 等. “双碳”目标下清洁高效灵活煤电技术现状及煤电前景展望[J]. 热力发电, 2023,

- 52(9): 1-10.  
MU Chunhua, JU Wenping, WANG Yang, et al. Techniques status and perspective of efficient-flexible coal fired power generation under carbon peak and neutrality targets[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 1-10.
- [3] 焦盘龙. 储能辅助火电机组二次调频控制策略及容量优化配置研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020: 1.  
JIAO Panlong. Research on control strategy and capacity optimization configuration method of energy storage combined with thermal power unit in secondary frequency[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020: 1.
- [4] 王益斌, 陈飞雄, 邵振国, 等. 基于权重系数校正的火储两阶段联合调频方法[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 83-94.  
WANG Yibin, CHEN Feixiong, SHAO Zhenguo, et al. Two-stage frequency regulation method for energy storage coordinated with thermal power unit based on weight coefficient correction[J]. Electric Power, 2024, 57(3): 83-94.
- [5] 任燕燕, 曹惠琳, 姜海岩, 等. 基于聚类的火电机组深度调峰负荷优化分配研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 48-57.  
REN Yanyan, CAO Huilin, JIANG Haiyan, et al. Load optimal distribution of deep peak regulation for thermal power units based on clustering[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 48-57.
- [6] 王新令. 积极应对气候变化, 推动清洁低碳转型——《2030年前碳达峰行动方案》解读[J]. 中国电业, 2021(12): 22-25.  
WANG Xinling. Actively responding to climate change and promoting clean and low-carbon transformation: interpretation of the Action Plan for Carbon Peak before 2030[J]. China Electric Power, 2021(12): 22-25.
- [7] 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]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8366-8378.  
HONG Feng, LIANG Lu, PANG Yalei, et al. Research on coordinated frequency control of thermal power-flywheel energy storage system based on real-time prediction output increment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8366-8378.
- [8] 陶鑫, 刘志成, 祝建飞, 等. 基于改进粒子群算法的火储联合调频优化储能控制策略研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(3): 98-104.  
TAO Xin, LIU Zhicheng, ZHU Jianfei, et al. An optimal control strategy of thermal-energy storage frequency modulation based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3): 98-104.
- [9] 黄策, 燕云飞, 沈迎, 等. 超容储能辅助火电机组调频的电气问题研究[J]. 电气技术, 2022, 23(8): 103-108.  
HUANG Ce, YAN Yunfei, SHEN Ying, et al. Research on electrical problems of frequency modulation of thermal power units assisted by supercapacitor energy storage super capacitor aided fast frequency modulation technology of coal-fired unit[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(8): 103-108.
- [10] 王伟, 陈钢, 常东锋, 等. 超级电容辅助燃煤机组快速调频技术研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 111-116.  
WANG Wei, CHEN Gang, CHANG Dongfeng, et al. Super capacitor aided fast frequency modulation technology of coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 111-116.
- [11] 郭强, 陈崇德, 胡阳, 等. 飞轮和锂电池储能联合光伏发电一次调频控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(11): 1-9.  
GUO Qiang, CHEN Chongde, HU Yang, et al. Flywheel and lithium battery energy storage combined with photovoltaic power generation participating in primary frequency regulation control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(11): 1-9.
- [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): 3965-3980.  
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): 3965-3980.
- [13] 郑俊生, 吕心荣, 郑剑平. 锂离子电容器性能分析及其应用[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 775-783.  
ZHENG Junsheng, LYU Xinrong, ZHENG Jianping. Performance analysis and application of lithium-ion capacitors[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 775-783.
- [14] 潘崇超, 李悦, 李娜, 等. 锂离子电池热失控研究综述与文献计量分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10099-10107.  
PAN Chongchao, LI Yue, LI Na, et al. Research review and bibliometric analysis of thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(24): 10099-10107.
- [15] 韩健民, 薛飞宇, 梁双印, 等. 模糊控制优化下的混合储能系统辅助燃煤机组调频仿真[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(7): 2188-2196.  
HAN Jianmin, XUE Feiyu, LIANG Shuangyin, et al. Hybrid energy storage system assisted frequency modulation simulation of coal-fired unit under fuzzy control optimization[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2188-2196.
- [16] 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 units based on adaptive coordinated droop control[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 36-44.
- [17] 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(5): 39-44.  
TIAN Yunfeng, GUO Jiayang, LIU Yongqi, et al. A mathematical model for reheat turbine for power grid stability calculation[J]. Grid Technology, 2007(5): 39-44.
- [18] 王楠, 李振, 周喜超, 等. 发电厂 AGC 与储能联合调频特性及仿真[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 148-156.  
WANG Nan, LI Zhen, ZHOU Xichao, et al. Characteristics research on combined frequency modulation of AGC and energy storage in power plant and the simulation[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 148-156.

(责任编辑 邓玲惠)