

DOI: 10.19666/j.rlfed.202410243

超级电容混合储能辅助火电机组 AGC 调频 容量配置方案研究与应用

李菁华¹, 兀鹏越¹, 黄富强², 房方³, 康祯¹, 洪烽³,
解晶莹⁴, 杨恩东⁵, 寇水潮¹, 王小辉¹
(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;
2.上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240;
3.华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;
4.上海空间电源研究所, 上海 200245;
5.南通江海储能技术有限公司, 江苏 南通 226300)

[摘要] 新型电力系统“双高”特性使其频率稳定性面临巨大挑战, 储能辅助火电机组调频技术已成为保障新型电力系统稳定运行的关键核心技术。该技术所采用的主流储能形式——锂电池储能, 在使用中存在寿命短和安全性差的问题, 超级电容储能自身高功率、长循环寿命、高安全性的特性极其契合火储调频对储能的要求, 但对连续单向指令响应效果较差, 需要探索混合储能技术路线实现 2 种储能优势互补。针对超级电容-锂电池混合储能容量配置问题进行研究, 考虑功率型储能器件和能量型储能器件特性, 设计了基于实际自动发电控制 (AGC) 调频指令的储能容量配置方法, 对比了 3 种典型容量配置方案的调频性能和经济性, 确定了最优方案并进行了工程验证。实际运行数据表明, 超级电容混合储能系统可提升机组调频性能 59.77%, 延长锂电池使用寿命至 3.6 倍, 提升系统经济性。

[关键词] 超级电容; 混合储能; AGC 调频; 容量配置

[引用本文格式] 李菁华, 兀鹏越, 黄富强, 等. 超级电容混合储能辅助火电机组 AGC 调频容量配置方案研究与应用[J]. 热力发电, 2025, 54(7): 101-110. LI Jinghua, WU Pengyue, HUANG Fuqiang, et al. Research and application of AGC frequency regulation capacity allocation scheme for supercapacitor hybrid energy storage assisted thermal power unit[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(7): 101-110.

Research and application of AGC frequency regulation capacity allocation scheme for supercapacitor hybrid energy storage assisted thermal power unit

LI Jinghua¹, WU Pengyue¹, HUANG Fuqiang², FANG Fang³, KANG Zhen¹, HONG Feng³,
XIE Jingying⁴, YANG Endong⁵, KOU Shuichao¹, WANG Xiaohui¹
(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2.School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3.School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
4.Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China;
5.Nantong Jianghai Energy Storage Technology Co., Ltd., Nantong 226300, China)

Abstract: The “double high” characteristics of new power system make its frequency stability face a huge challenge. Energy storage assisted thermal power unit frequency regulation technology has become a key core technology to ensure the stable operation of the new power system. The mainstream form of energy storage used in this technology, lithium battery storage, suffers from short lifespan and poor safety in use. The features of

修回日期: 2024-12-28

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ22-H12, HNKJ24-H30); 陕西省自然科学基金项目 (2024JC-YBMS-419)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-H12, HNKJ24-H30); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2024JC-YBMS-419)

第一作者简介: 李菁华 (2000), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为储能技术, ljhdshy@163.com。

supercapacitor energy storage like high power, long cycle life, and high security, are highly compatible with the energy-storage requirements of frequency regulation of the energy storage assisted thermal power unit, but the supercapacitor's response to the continuous unidirectional command is poor. Therefore, it is necessary to explore the technical route of hybrid energy storage to achieve complementary advantages of the two types of energy storage. The hybrid energy storage capacity configuration of supercapacitor and lithium battery was studied, the energy storage capacity configuration method based on the actual AGC frequency regulation command was designed, considering the characteristics of power-type energy storage devices and energy-type energy storage devices. Moreover, the frequency regulation performance and economy of three typical capacity configuration schemes were compared, and the optimal scheme was determined. Finally, engineering verification was carried out. The actual operation data show that, the supercapacitor hybrid energy storage system can improve the frequency regulation performance of the thermal power unit by 59.77%, extend the service life of the lithium battery to 3.6 times, and improve the system economy.

Key words: supercapacitor; hybrid energy storage; AGC frequency regulation; capacity allocation

随着光伏、风电等新能源大规模接入电网,我国电力系统正向着“高比例可再生能源接入与高比例电力电子设备应用”方向发展^[1]。电源侧高比例新能源的随机性、间歇性、波动性,电网侧电力电子变换器的接入以及负荷侧用电设备的随机性、自趋利性等特点,导致系统的功率-能量平衡问题日益突出^[2]。自动发电控制(AGC)调频是指发电机组提供足够的可调节容量和调节速率,在允许的调节偏差下实时跟踪频率变化,维持电力系统频率稳定。传统火电机组响应AGC存在调频指令时滞长、爬坡速率低、不能准确跟踪调度指令等现象^[3]。

通过配置储能系统,可大幅提升火电机组的综合电力调频性能^[4],增强新能源消纳能力^[5]。锂电池作为目前主流的火电调频技术路线,存在寿命短和安全性差的问题。超级电容作为一种新型储能技术,自身特性与火电厂短时高频的功率补充需求高度契合,但存在对部分连续上升或连续下降的单向指令无法完全响应的问题。因此,需要探索混合储能技术路线,将功率型储能器件超级电容和能量型储能器件锂电池按照一定的容量配比,实现优势互补,达到更好地响应调频指令的目的。

目前鲜有文献针对超级电容混合储能在火电调频场景下应用的容量配置问题展开研究,已有的火电厂调频用储能容量配置文献研究所用的储能形式多为锂电池储能^[6](二次调频)和飞轮储能^[7](一次调频)。文献[8]分别计算储能在不同功率和时长配置下的每日净收益,寻找不影响电池寿命情况下净收益更高的电池容量配置方案;文献[9]以全寿命周期收益净现值为目标函数,通过穷举法总结效益与飞轮容量的关系实现容量优化配置。以上文献研究储能类型单一,未将功率型储能器件和能量型储能器件结合以发挥各自优势,且均仅通过仿真,未能从工程应用角度验证所提方法的可行性。

现有已投运的储能辅助火电调频项目中所配置储能容量均依据工程经验,按照火电机组装机容量的3%进行配置^[10],未与电厂实际调频需求相结合。

基于上述分析,本文针对满足火电调频需求的超级电容混合储能容量配置方案开展研究,考虑功率型储能器件和能量型储能器件特性,设计了一种基于实际AGC指令的储能容量配置方法,对3种不同容量配置方案进行了调频效果仿真与经济性研究,确定了最优配置方案,并以华能罗源电厂超级电容混合储能系统实际运行数据验证了超级电容混合储能调频配置方案的有效性和经济性。

1 背景介绍

1.1 火电机组 AGC 指令特性

AGC 调频指令具有短时高频的特点,具体表现为波动周期在 10 s 至 2~3 min,幅值在 0.05~0.50 Hz,主要由冲击负荷变动引起^[11]。图 1 为某火电厂 2 h 内 AGC 调频指令,据统计,电厂每日接收到的 AGC 调频指令约 200~400 次,每年约 6 万~12 万次。

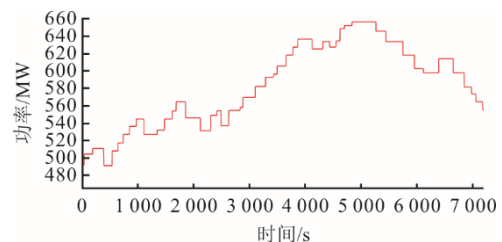


图 1 某火电机组 2 h 内 AGC 调频指令曲线
Fig.1 AGC frequency regulation command curve for a thermal power unit within two hours

1.2 储能辅助火电机组调频技术应用现状与问题

储能辅助火电机组调频技术是一种通过储能与火电机组协同出力实现灵活快速响应调频指令的技术^[12]。储能辅助火电机组 AGC 调频原理如图 2 所示。

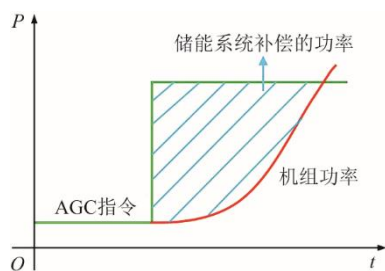


图 2 储能辅助火电机组 AGC 调频原理

Fig.2 Working principle of AGC frequency regulation for a storage-assisted thermal power unit

目前, 全国已有 130 余个储能辅助火电机组调频项目投入运行, 其中采用磷酸铁锂电池技术路线的项目占到了 90% 以上, 代表性工程项目见表 1。

表 1 全国储能辅助火电机组调频代表性工程项目
Tab.1 Representative projects of energy storage assisted frequency modulation of thermal power units in China

项目名称	储能规模	设计功能	投运时间
广东阳西电厂	52.5 MW/55.9 MW·h 锂电池	一次调频	2023 年
国能灵武电厂	22 MW/4.5 MW·h 飞轮储能	一次调频	2023 年
上海外高桥第三发电厂	10 MW/10 MW·h 锂电池	二次调频	2021 年
佛山恒益电厂	10 MW/10 MW·h 锂电池	二次调频	2020 年
内蒙古金山电厂	10 MW/5 MW·h 锂电池	二次调频	2020 年
山西兆光电厂	15 MW/7.5 MW·h 锂电池	二次调频	2019 年
华润电力海丰电厂	30 MW/14.93 MW·h 锂电池	二次调频	2019 年
内蒙古上都电厂	18 MW/8.957 MW·h 锂电池	二次调频	2018 年
京能石景山热电厂	2 MW 锂电池	二次调频	2013 年

但是在实际运行中, 磷酸铁锂电池的寿命短和安全性差问题日益突出。目前, 磷酸铁锂电池的实际循环寿命仅为 3 000~5 000 次, 严重不满足调频需求, 长期工作在频繁充、放电场景下还会对电池寿命带来负面影响^[13]。目前工程应用项目均基于锂电池工作于浅充浅放状态下可以大幅增加寿命周期内充、放电次数的原理, 通过超额配置较长时长的储能容量的方式来保证锂电池寿命, 造成了一定程度的容量冗余; 此外, 锂电池在大电流高频充、放电的工况下易发生热失控现象, 给火电厂安全生产带来较大隐患。随着新型储能技术的发展, 探索新型储能辅助火电机组调频技术路线成为解决问题的关键。

1.3 超级电容替代锂电池的可行性与制约因素

超级电容是一种新型储能器件, 循环寿命长、安全性高^[14], 可快速进行高功率输出, 具备替代锂电池的可行性。超级电容储能响应频繁上下波动指令波形如图 3 所示, 响应单向连续上升指令波形如图 4 所示。

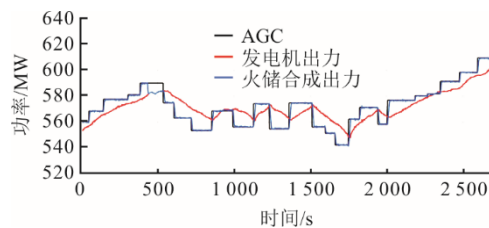


图 3 超级电容储能响应频繁上下波动指令波形
Fig.3 Waveforms of supercapacitor energy storage responding to frequently fluctuating up and down commands

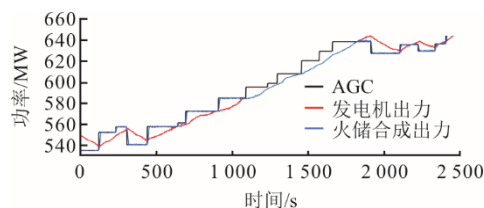


图 4 超级电容储能响应单向连续上升指令波形
Fig.4 Waveforms of supercapacitor energy storage responding to unidirectional continuous rising commands

根据指令响应仿真波形图 3 可知, 超级电容对频繁上下波动的指令响应效果较好, 可以以较小的容量较好地承担调频任务。但是对于图 4 中 1 500 s 单向连续上升的指令, 超级电容由于时长配置较短, 无法完全响应。由于超级电容价格与锂电池相比较为昂贵, 进一步延长时长会导致成本大幅上升, 为了尽可能多地响应调频指令, 需要探索混合储能配置方案, 将功率型储能器件超级电容短时高频的优点和能量型储能器件锂电池稳定放电时长较长的优点相结合来解决此问题。

2 基于 AGC 调频指令的混合储能容量配置方法

2.1 混合储能容量配置计算方法

火储调频项目储能容量需根据 AGC 指令需求进行配置, 要确定的主要参数是储能的功率和时长, 即储能功率要基本覆盖 AGC 指令与机组功率差值, 储能时长要满足 AGC 指令持续时长。本文所提出的储能容量计算方法首先以 1 s 为采样间隔, 对机组 DCS 中的大量 AGC 指令和发电机运行功率的差值进行统计分析, 确定储能系统额定功率; 其次通过对 AGC 指令持续时间、连续增减个数等指令特性进行统计, 确定储能时长的大致范围; 最后对典型配置方案进行仿真, 以 2 种储能 SOC 状态同时到达上下限值的持续时间占比近似表征 AGC 不响应率, 作为评判性能的标准, 以 10 年运行周期净利

润作为评判经济性的标准，确定最优储能配置方案，方法见图 5。

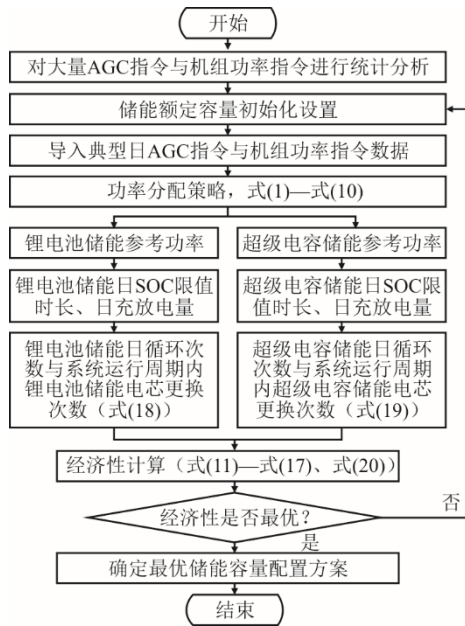


图 5 基于 AGC 调频指令的储能容量优化配置方法
Fig.5 Block diagram of the optimized allocation method for energy storage capacity based on AGC frequency-regulation commands

基于 AGC 调频指令的储能容量优化配置方法具体步骤如下：

- 1) 统计以 1 s 为采样间隔的大量机组 AGC 指令与发电机运行功率数据中的特征参数, 包括 AGC 调频指令与发电机运行功率的差值幅值分布、AGC 调频指令持续时间、AGC 调频指令连续增减个数等, 确定储能总功率和时长范围;
- 2) 初始化设置储能容量;
- 3) 导入典型日 AGC 指令与机组功率数据;
- 4) 将典型日 AGC 指令与机组功率的差值作为储能功率输入功率分配模块, 按照本文设计的基于超容优先与电池荷电状态 (SOC) 分区保护的功率分配策略, 按式(1)—式(10)计算超级电容与锂电池参考功率;
- 5) 统计 2 种储能 SOC 均处在限值的时长和储能日充放量, 其中 SOC 限值时长用以表征不同容量配置下储能响应 AGC 调频指令的能力;
- 6) 按式(18)、式(19)计算储能日循环次数, 计算储能电芯更换年限与规划使用周期内更换次数;
- 7) 按式(11)—式(17)、式(20)进行规划使用周期内经济性计算, 确定最优容量配置方案。

2.2 功率分配策略

本文基于超级电容循环寿命长, 可高频充、放

电, 锂电池循环寿命短, 浅充浅放有利于提升循环次数, 减少更换成本的特点, 设计出基于超容优先与电池 SOC 保护的功率分配策略, 即超级电容储能优先响应调频功率指令, 不足由锂电池储能补充; 同时对锂电池储能 SOC 状态区间进行更细致的划分, 减少锂电池储能 SOC 越限。

2.2.1 储能 SOC 区间划分

将超级电容储能 SOC 划分为 3 个区间, 锂电池储能 SOC 划分为 5 个区间, 具体如图 6 所示。

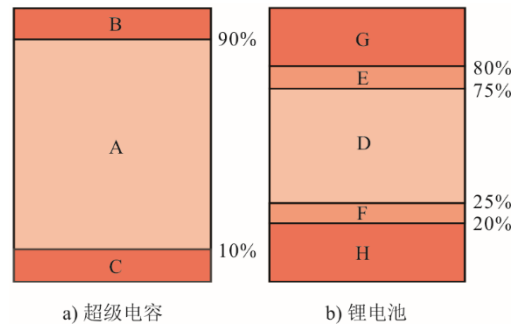


图 6 储能 SOC 分区
Fig.6 Energy storage SOC partitioning

各区间划分原则与储能充、放电特性如下。

- 1) 超级电容正常充、放电区 A 当 $0.1 < SOC_{cap} < 0.9$ 时, 超级电容可正常响应充、放电指令, 超级电容最大充、放电功率 $P_{cap-max} = P_{n-cap}$ 。
- 2) 超级电容禁止充电区 B 当 $0.9 \leq SOC_{cap} \leq 1.0$ 时, 超级电容正常响应放电指令, 不响应充电指令。
- 3) 超级电容禁止放电区 C 当 $0 \leq SOC_{cap} \leq 0.1$ 时, 超级电容正常响应充电指令, 不响应放电指令。
- 4) 锂电池正常充、放电区 D 当 $0.25 < SOC_{bat} < 0.75$ 时, 锂电池可正常响应充、放电指令, 锂电池最大充、放电功率 $P_{bat-max} = P_{n-bat}$ 。
- 5) 锂电池限制充电区 E $0.75 \leq SOC_{bat} < 0.80$ 时, 电池电量较高, 已不适合响应较大功率充电指令。可正常响应放电指令, 仅可部分响应充电指令。
- 6) 锂电池限制放电区 F $0.20 < SOC_{bat} \leq 0.25$ 时, 电池电量较低, 已不适合响应较大功率放电指令。可正常响应充电指令, 仅可部分响应放电指令。
- 7) 锂电池禁止充电区 G 当 $0.8 \leq SOC_{cap} \leq 1.0$ 时, 锂电池可正常响应放电指令, 不响应充电指令。
- 8) 锂电池禁止放电区 H 当 $0 \leq SOC_{cap} \leq 0.2$ 时, 锂电池可正常响应充电指令, 不响应放电指令。

2.2.2 储能功率控制策略

基于储能 SOC 分区的混合储能系统工况见表 2, 根据不同工况控制超级电容和锂电池充、放电功率。

表2 基于SOC分区的混合储能系统工况
Tab.2 Working conditions of the hybrid energy storage system based on SOC partitioning

	D	E	F	G	H
A	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
B	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀
C	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅

以储能放电段, 即储能功率 $P_{es}=P_{AGC}-P_{Gen}>0$ 时为例, 分析不同工况下储能系统功率, 储能充电段与之同理。

当处于 S₁、S₂、S₄、S₆、S₇、S₉ 工况时, 超级电容优先响应放电指令, 不足的功率由锂电池补充, 2种储能充、放电功率如下:

$$P_{cap} = \begin{cases} P_{es}, 0 < P_{es} \leq P_{n-cap} \\ P_{n-cap}, P_{n-cap} < P_{es} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{bat} = \begin{cases} 0, 0 < P_{es} \leq P_{n-cap} \\ P_{es} - P_{n-cap}, P_{n-cap} < P_{es} \leq P_{n-cap} + P_{n-bat} \\ P_{n-bat}, P_{n-cap} + P_{n-bat} < P_{es} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{cap} 为超级电容响应的功率, MW; P_{n-cap} 为超级电容的额定功率, MW; P_{bat} 为锂电池响应的功率, MW; P_{n-bat} 为锂电池的额定功率, MW。

当处于 S₃、S₈ 工况时, 超级电容优先响应放电指令, 不足的功率由锂电池补充, 此时锂电池仅可完全响应部分指令, 2种储能充、放电功率如下:

$$P_{cap} = \begin{cases} P_{es}, 0 < P_{es} \leq P_{n-cap} \\ P_{n-cap}, P_{n-cap} < P_{es} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{bat} = \begin{cases} 0, 0 < P_{es} \leq P_{n-cap} \\ P_{es} - P_{n-cap}, P_{n-cap} < P_{es} \leq P_{n-cap} + \alpha P_{n-bat} \\ \alpha P_{n-bat}, P_{n-cap} + \alpha P_{n-bat} < P_{es} \end{cases} \quad (4)$$

式中: α 为锂电池功率限制因子, 取 0.7。

当处于 S₅、S₁₀ 工况时, 超级电容优先响应放电指令, 锂电池处于禁止放电区, 2种储能充、放电功率如下:

$$P_{cap} = \begin{cases} P_{es}, 0 < P_{es} < P_{n-cap} \\ P_{n-cap}, P_{es} \leq P_{n-cap} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{bat} = 0 \quad (6)$$

当处于 S₁₁、S₁₂、S₁₄ 工况时, 超级电容处于禁止放电区, 由锂电池响应调频指令, 2种储能充、放电功率如下:

$$P_{cap} = 0 \quad (7)$$

$$P_{bat} = \begin{cases} P_{es}, 0 < P_{es} < P_{n-bat} \\ P_{n-bat}, P_{es} \leq P_{n-bat} \end{cases} \quad (8)$$

当处于 S₁₃ 工况时, 超级电容处于禁止放电区, 由锂电池响应调频指令, 此时锂电池仅可完全响应部分指令, 2种储能充、放电功率如下:

$$P_{cap} = 0 \quad (9)$$

$$P_{bat} = \begin{cases} P_{es}, 0 < P_{es} \leq \alpha P_{n-bat} \\ \alpha P_{n-bat}, \alpha P_{n-bat} < P_{es} \end{cases} \quad (10)$$

当处于 S₁₅ 工况时, 超级电容和锂电池均处于禁止放电区, 放弃响应指令。

2.3 经济性计算方法

容量优化配置模型中的经济性分析以系统运行周期净利润最大为判断依据, 计算方法依据《福建省电力调频辅助服务市场交易规则》^[15](下称《规则》)进行。调频辅助服务的收益由 AGC 调用补偿、AGC 基本补偿和考核费用奖励 3 部分组成, 具体计算方法如下。

1) AGC 调用补偿 即每月根据机组 AGC 调节容量被调用时增发或少发的电量按一定的标准进行补偿, 计算公式如下:

$$R_{inv} = 30 \cdot M \cdot D_{day} \cdot K \cdot P^* \quad (11)$$

式中: M 为调节系数, 按《规则》取 1; D_{day} 为机组日均调频里程, MW; K 为机组 AGC 调频性能综合指标, 由全省机组最高 K 值 0.95 按 AGC 响应率进行折算; P^* 为市场出清价格, 取 10.5 元/MW。

2) AGC 基本补偿 即每月根据机组 AGC 的可用率和 AGC 可调节容量的乘积按照一定标准进行补偿, 计算公式如下:

$$R_{basic} = \delta_{AGC} \cdot P_{AGC} \cdot \gamma_1 \quad (12)$$

式中: δ_{AGC} 为机组 AGC 的可用率, 按规定不允许小于 95%, 取 98%; P_{AGC} 为机组 AGC 可调节容量, MW, 按照罗源电厂实际机组容量取 330 MW; γ_1 为 AGC 基本补偿的补偿标准, 元/(MW·h), 按《规则》取 960 元/(MW·h)。

3) 日平均调频里程

$$D_{day} = \beta D_{re} \quad (13)$$

式中: β 为机组 AGC 响应率; D_{re} 为机组历史日均接收到的 AGC 指令里程, 取 5 668 MW。

4) 考核费用奖励

$$R_{ass} = \frac{D_{day}}{D_{re}} \cdot R_0 \quad (14)$$

式中: R_0 为未加装储能前机组平均考核费用奖励, 根据罗源电厂历史数据, 取 20 万元/月。

5) 调频精度考核减免 据历史精度考核费估算, 储能投运后每月可减免调频精度考核费 15 万元。

$$R_{re} = 15 \quad (15)$$

6) 初始投资成本

$$C_{inv} = C_{cap} E_{cap, rated} + C_{bat} E_{bat, rated} + C_0 \quad (16)$$

式中: $E_{cap, rated}$ 为超级电容储能的额定容量, $MW \cdot h$; $E_{bat, rated}$ 为锂电池储能的额定容量, $MW \cdot h$; C_{cap} 为超级电容储能的单位容量成本, 取 1 800 万元/($MW \cdot h$); C_{bat} 为锂电池储能的单位容量成本, 取 880 万元/($MW \cdot h$); C_0 为储能系统其他投资, 取 2 000 万元。

7) 储能电芯更换成本

$$C_{exc} = T_{cap} C_{cap} E_{cap, rated} + T_{bat} C_{bat} E_{bat, rated} \quad (17)$$

$$\begin{cases} T_{bat, day} = \frac{Q_{bat, day}}{1000 \cdot E_{bat, rated}} \\ T_{bat} = \frac{T_{oc}}{T_{bat, total}} \cdot T_{bat, day} \cdot T_0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} T_{cap, day} = \frac{Q_{cap, day}}{1000 \cdot E_{cap, rated}} \\ T_{cap} = \frac{T_{oc}}{T_{cap, total}} \cdot T_{cap, day} \cdot T_0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: T_{cap} 为超级电容储能的更换次数; T_{bat} 为锂电池储能的更换次数; T_{oc} 为系统运行周期, 取 10 年; $T_{cap, total}$ 为超级电容全寿命循环次数, 取 100 000 次; $T_{bat, total}$ 为锂电池全寿命循环次数, 取 4 000 次; $T_{cap, day}$ 为超级电容日循环次数; $Q_{cap, day}$ 为电池日充放电量; $T_{bat, day}$ 为锂电池日循环次数; $Q_{bat, day}$ 为电池日充放

电量; T_0 为储能系统年运行天数, 取 300 天。

8) 系统运行周期净利润

$$\begin{cases} P = R - C \\ R = R_{basic} + R_{cal} + R_{ass} + R_{re} \\ C = C_{inv} + C_{exc} \end{cases} \quad (20)$$

式中: P 为系统运行周期净利润; R 为系统运行周期总收益; C 为系统运行周期总投资成本。

3 罗源项目储能容量配置分析

3.1 仿真分析

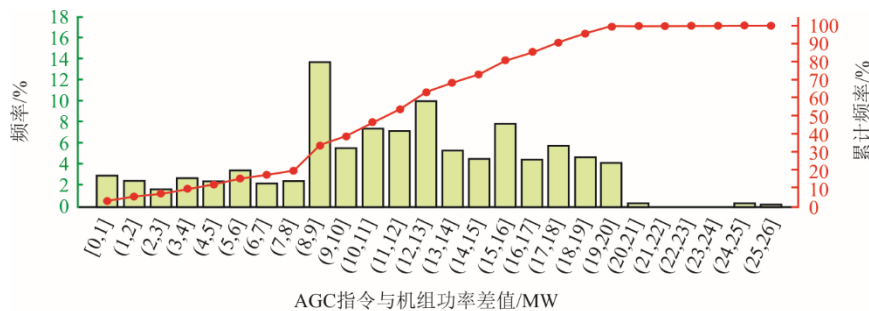
3.1.1 AGC 指令特性统计分析

1) 功率统计

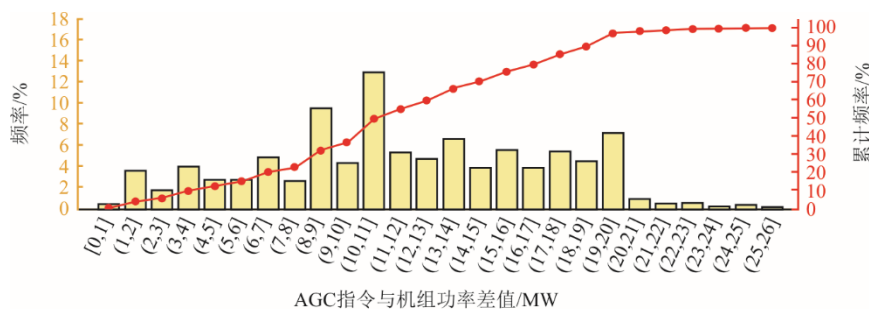
对华能罗源电厂 660 MW 燃煤发电机组 6—9 月所接收到的 AGC 指令与发电机运行功率的差值进行统计, 结果如图 7 所示。结果显示, 平均 97% 以上的指令幅值在 20 MW 及以下, 储能系统的额定输出功率设置为 20 MW 即可满足 97% 的调频指令, 因此混合储能系统总功率选择为 20 MW。

2) 时长统计

华能罗源电厂 660 MW 燃煤发电机组 6—9 月所接收到的 AGC 指令的时长统计结果见表 3。由表 3 可知, 单个 AGC 指令时长多在 4 min 以下。将连续增或连续减功率的指令视为一组, 统计每组内 AGC 指令个数见表 4, 可以看出, 单向增减指令的个数多为 1~2 个, 在配置混合储能容量时可按超级电容优先响应 1~2 个单向指令来进行时长选择。



a) 6月



b) 7月

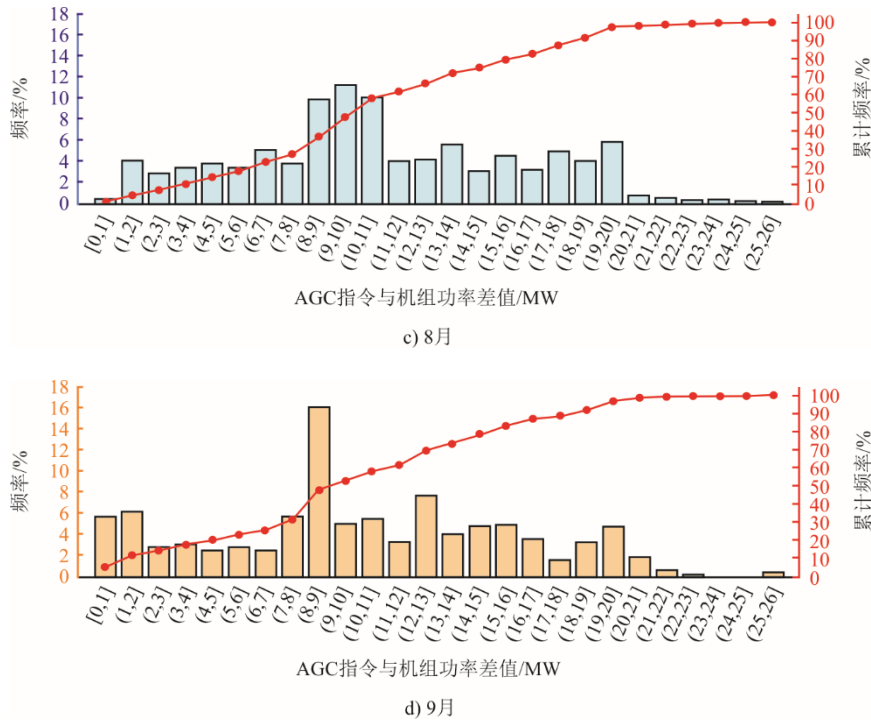


图 7 罗源电厂 6—9 月指令幅值分布

Fig.7 Distribution of command amplitudes in Luoyuan Power Plant from June to September

表 3 AGC 指令时长统计

Tab.3 Statistics of AGC command duration

月份	0~2 min 占比/%	2~4 min 占比/%	4 min 以上占比/%
6 月	45.91	38.96	15.13
7 月	64.97	30.08	4.95
8 月	41.72	44.91	13.37
9 月	37.21	45.20	17.59

表 4 AGC 指令中连续增减个数统计

Tab.4 Statistics of the number of consecutive increases and decreases in AGC commands

月份	1~2 个占比/%	3 个及以上占比/%
6 月	80.29	19.71
7 月	64.68	35.32
8 月	82.77	17.23
9 月	75.76	24.24

表 5 不同容量混合储能调频性能对比

Tab.5 The frequency-modulation performance of hybrid energy storage with different capacities

方案名称	储能容量	SOC 限值时长/h	SOC 限值时长占比/%	储能日循环次数
方案 1	5 MW/4 min 超级电容+15 MW/7.5 MW·h 锂电池	2.29	9.58	锂电 3.20 次 超容 31.00 次
方案 2	10 MW/6 min 超级电容+10 MW/5 MW·h 锂电池	2.50	10.42	锂电 3.24 次 超容 25.07 次
方案 3	15 MW/8 min 超级电容+5 MW/2.5 MW·h 锂电池	2.61	10.87	锂电 3.21 次 超容 20.18 次

3.1.2 混合储能容量配置方案性能仿真

基于对 AGC 指令的统计分析, 确定 3 组工程典型混合储能容量方案。配置方案中超级电容功率分别为混合储能系统总功率 20 MW 的 25%、50% 和 75%; 时长分别设置为可响应 1 个 4 min 以内的指令、可连续响应 1 个 4 min 以内的指令和 1 个 2 min 以内的指令、可连续响应 2 个 4 min 以内的指令, 即 3 组配置中超级电容时长分别为 4、6、8 min; 锂电池均采用 2C 锂电池。

本文以 1 s 为采样间隔, 选取典型日华能罗源电厂机组实际 AGC 指令和机组实际出力数据, 使用本文所建立的容量优化配置模型对 3 组超级电容与锂电池混合储能系统容量配置方案进行仿真, 统计 24 h 内 2 种储能 SOC 均达到限值的时长和储能日循环次数, 具体见表 5。

由表 5 可知, 方案 1 的 2 种储能同时处于 SOC 限值状态的时长最短, 占比为 9.58%。该方案响应 AGC 指令效果仿真波形如图 8、图 9 所示。由图 8、图 9 可以看出, 该混合储能配置既可以完全响应频繁上下波动的指令, 又可以完全响应连续单向的指令, 调频性能好。

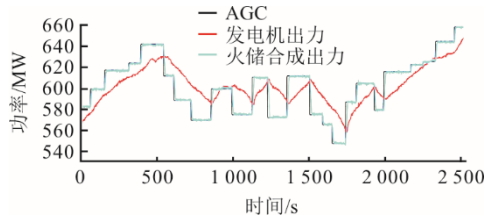


图 8 混合储能响应频繁上下波动指令波形
Fig.8 Waveforms of hybrid energy storage responding to frequent fluctuating commands

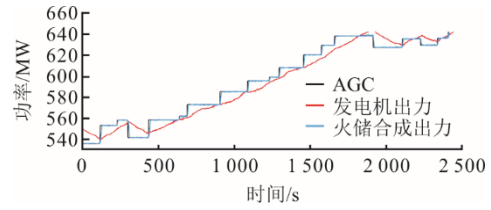


图 9 混合储能响应连续单向上升指令波形
Fig.9 Waveforms of hybrid energy storage responding to continuous unidirectional rising commands

3.1.3 混合储能容量配置方案综合评价

本文经济性计算方法相关参数与所计算出的各种储能配置方案的经济性见表 6。综合性能仿真和经济性计算可知, 3 种混合储能方案投资回收期相近, 方案 1 的性能最好, 年 AGC 补偿收益最高, 10 年运行周期净利润最高, 经济性最好。

表 6 不同储能配置方案经济性对比
Tab.6 Economic comparison of different energy storage configuration schemes

	方案 1	方案 2	方案 3
年平均出清价格/(元·MW ⁻¹)	10.5	10.5	10.5
年平均 K 值	0.85	0.84	0.84
日平均调频里程/MW	5 125.00	5 077.39	5 051.89
日 AGC 调用补偿/元	45 740.67	44 782.62	44 557.66
日 AGC 基本补偿/元	10 348.8	10 348.8	10 348.8
年 AGC 调频补偿收益/万元	1 682.68	1 653.94	1 647.19
年考核费用奖励/万元	380.02	376.49	374.60
年调频精度考核减免/万元	180	180	180
电池日循环次数	3.20	3.24	3.21
超级电容日循环次数	31.00	25.07	20.18
储能初始投资/万元	1 260	1 640	2 020
系统其他初始投资/万元	2 000	2 000	2 000
初始总投资/万元	3 260	3 640	4 020
储能电芯更换周期/a	4.20 (锂电池) 10.75 (超级电容)	4.10 (锂电池) 13.30 (超级电容)	4.10 (锂电池) 16.52 (超级电容)
储能电芯更换成本/万元	1 320	880	440
投资回收期(税前)/a	1.45	1.65	1.82
运行周期投资成本/万元	4 580	4 520	4 460
运行周期净利润/万元	17 847.05	17 584.33	17 557.93

3.2 工程应用效果

基于实际 AGC 指令特性, 综合考虑调频效果与经济性, 华能罗源发电有限责任公司选用 5 MW/4 min 超级电容+15 MW/7.5 MW·h 锂电池混合储能方案, 于 2023 年 2 月正式建成投运, 是全球首个应用超级电容的火电机组调频项目。

3.2.1 调频性能

图 10 为罗源电厂加装超级电容混合储能系统后 AGC 调频曲线。表 7 为机组调频性能指标, 由表 7 可知, 混合储能系统投运后, 机组调节速率 K_1 提升 19.16 倍, 调节精度 K_2 提升 2.87 倍, 响应时间指标 K_3 提升 2.85 倍, 机组综合性能指标 K 提升 59.77%。

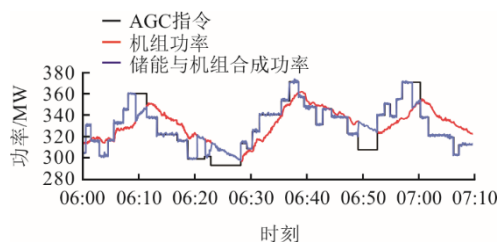


图 10 超级电容混合储能系统辅助机组 AGC 调频曲线
Fig.10 The AGC frequency regulation curves of supercapacitor hybrid energy storage system assisted unit

表 7 超级电容储能系统投运前后机组调频性能对比
Tab.7 The unit frequency regulation performance before and after the supercapacitor energy storage system is put into operation

性能指标	储能未投入	储能投入	提升幅度/%
调节速率 K_1	0.048 8	0.983 9	1 916.19
调节精度 K_2	1.322 8	5.119 9	287.05
响应时间 K_3	0.185 9	0.716 2	285.26
综合性能指标 K	0.540 6	0.863 7	59.77
综合性能要求	0.55	0.55	

3.2.2 运行寿命

示范项目储能日循环次数见表 8，2 月 10 日—2 月 22 日不考虑超级电容和锂电池自身特性，仅按容量分配功率独立响应调频指令，锂电池每日充、放电 5.70 次，寿命 2.3 年（按锂电池寿命 4 000 次，年运行 300 天计算），超级电容每日充、放电 16.48 次；3 月 14 日—3 月 26 日调整为本文所提出的超容优先与电池 SOC 分区保护的控制策略，调整后锂电池每日充、放电 1.61 次，寿命 8.3 年，超级电容每日充、放电 29.68 次。由此可知，本文所提控制策略及超级电容的加入使得锂电池的循环次数大大降低，使用寿命提升至 3.6 倍。

表 8 锂电池与超级电容日循环次数对比
Tab.8 Comparison of daily cycle times between lithium batteries and supercapacitors

日期	按容量分配独立响应指令策略		本文所提控制策略	
	锂电池循环次数	超级电容循环次数	锂电池循环次数	超级电容循环次数
第 1 天	0.01	0.06	0.95	12.92
第 2 天	3.21	15.86	0.27	7.41
第 3 天	3.92	19.73	2.66	40.53
第 4 天	3.98	11.20	0.08	5.07
第 5 天	5.32	17.87	2.27	40.72
第 6 天	5.23	17.54	2.49	44.54
第 7 天	7.43	22.70	0.98	13.67
第 8 天	7.15	21.17	1.94	39.39
第 9 天	5.38	17.05	0.85	29.34
第 10 天	10.10	25.07	0.83	28.38
第 11 天	9.96	18.79	0.99	32.37
第 12 天	9.95	18.45	3.81	50.83
第 13 天	2.49	8.73	2.76	40.62
平均值	5.70	16.48	1.61	29.68

3.2.3 运行安全性

锂电池与超级电容簇运行温差统计如图 11 所示。由图 11 可知，超级电容簇间最大温差为 5 °C，比锂电池低 5 °C，簇间一致性表现优于锂电池，运行温差显著小于锂电池，具有更高的安全性。

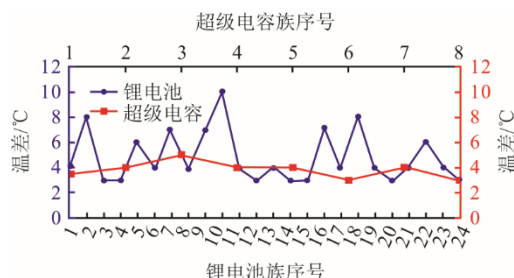


图 11 超级电容簇与锂电池簇运行温差
Fig.11 Operating temperature difference between supercapacitor cluster and lithium battery cluster

3.2.4 经济效益

截至 2024 年 2 月，华能罗源电厂超级电容混合储能系统投运 12 个月，累计调频收益 1 700 万元，预计全寿命周期（10 年）总收益 1.7 亿，节省锂电池更换费用约 2 100 万元，节约电费约 210 万元。

4 结 论

本文提出了一种基于 AGC 调频指令的混合储能容量配置方法，对 3 种典型配置的超级电容+锂电池混合储能进行了调频性能和经济性研究，对最优配置方案进行了工程验证。仿真分析与工程应用结果表明：超级电容混合储能辅助火电机组 AGC 调频技术切实可行。5 MW/4 min 超级电容+15 MW/7.5 MW·h 锂电池混合储能可以提升机组调频性能 59.77%。功率型储能器件超级电容的加入可以延长锂电池使用寿命至原有的 3.6 倍；且超级电容运行温差比锂电池低 5 °C，安全性高；混合储能系统投运 12 个月累计收益 1 700 万元，经济效益良好。

[参 考 文 献]

[1] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.

[2] 闵勇, 陈磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 855-868.
MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power

- system frequency dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 855-868.
- [3] 沈迎, 黄策, 胡锡东, 等. 锂离子电容器参与火电机组调频研究[J]. 电气技术, 2021, 22(10): 98-103.
SHEN Ying, HUANG Ce, HU Xidong, et al. Research on frequency regulation of thermal power unit with lithium-ion capacitor[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(10): 98-103.
- [4] 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.
- [5] 曾振松, 郑洁云, 魏鑫, 等. 微电网的氢-氨混合储能系统容量优化配置研究[J]. 广东电力, 2024, 37(7): 42-49.
ZENG Zhensong, ZHENG Jieyun, WEI Xin, et al. Research on capacity optimization configuration of hydrogen-ammonia hybrid storage system in microgrid[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(7): 42-49.
- [6] 于琳琳, 司瑞华, 常青青, 等. 基于区域控制偏差的电池储能参与电网二次调频的容量配置方法[J]. 可再生能源, 2023, 41(8): 1129-1136.
YU Linlin, SI Ruihua, CHANG Qingqing, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation based on area control error[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(8): 1129-1136.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 罗耀东, 田立军, 王垚, 等. 飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 71-82.
LUO Yaodong, TIAN Lijun, WANG Yao, et al. Coordinated control strategy and optimal capacity configuration for flywheel energy storage participating in primary frequency regulation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 71-82.
- [10] 孙培锋, 陆王琳, 白鹏, 等. 锂电池和超级电容混合储能辅助火电调频技术发展现状和趋势[J]. 动力工程学报, 2024, 44(3): 418-429.
SUN Peifeng, LU Wanglin, BAI Peng, et al. Development status and trends of lithium battery and supercapacitor hybrid energy storage assisted thermal power frequency regulation technology[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 418-429.
- [11] 王瑞琪, 刘吉臻, 高萌, 等. 火电机组 AGC 指令特性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 84-89.
WANG Ruiqi, LIU Jizhen, GAO Meng, et al. Characteristic analysis of AGC signals in thermal power unit[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(5): 84-89.
- [12] SAHOO S, TIMMANN P. Energy storage technologies for modern power systems: a detailed analysis of functionalities, potentials, and impacts[J]. IEEE Access, 2023, 11: 49689-49729.
- [13] MA Q, WEI W, WU L, et al. Life-aware operation of battery energy storage in frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3): 1725-1736.
- [14] LAKSHMI K C S, VEDHANARAYANAN B. High-performance supercapacitors: a comprehensive review on paradigm shift of conventional energy storage devices[J]. Batteries, 2023, 9(4): 202.
- [15] 国家能源局福建监管办公室. 福建省电力调频辅助服务市场交易规则(试行)(2019年修订版)[EB/OL]. (2019-12-31)[2024-09-25]. https://fjb.nea.gov.cn/xxgk/gkml/202311/t20231114_216604.html.
National Energy Administration Fujian Supervision Office. Fujian Provincial Power FM Auxiliary Service Market Trading Rules (Trial) (2019 Revision)[EB/OL]. (2019-12-31)[2024-09-25]. https://fjb.nea.gov.cn/xxgk/gkml/202311/t20231114_216604.html.

(责任编辑 邓玲惠)