



混合储能辅助火电机组AGC调频优化配置双层模型

张小科, 张少锋, 尤 顺, 高越纪, 赵 晨

(国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450000)

摘要: 为实现火电机组自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 调频性能提升与储能系统全生命周期成本降低的双重目标, 本文提出一种由能量型磷酸铁锂储能 (LiFePO_4 , LFP) 与功率型钛酸锂储能 ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO) 构成的混合储能系统辅助火电机组参与 AGC 调频的双层优化配置与协调控制方法。上层模型以全生命周期净收益最大化为核心目标, 完成混合储能容量的优化配置并为下层模型提供约束边界; 下层模型聚焦火电-混合储能协同调频响应, 设计基于 AGC 性能考核的精细化三阶段控制策略与计及储能状态的功率分配机制。通过自适应混沌粒子群算法求解模型, 实现容量配置与运行控制的动态耦合优化, 经仿真求解得到混合储能最优配置方案为 LFP 1.16 MW/1.75 MWh、LTO 3.08 MW/1.72 MWh。结果表明: 相较于传统差额分配策略, 所提策略及容量配置可使联合系统 AGC 综合调节性能指标提升 0.9%, 日均收益提升 1230.23%, 有效避免储能系统频繁承担剧烈波动功率响应, 显著提升火储联合调频系统的技术性能与经济收益, 为优化混合储能系统辅助传统电源调频的配置方案提供参考。

关键词: AGC; 混合储能; 全生命周期成本; 优化配置双层模型

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1154

中图分类号: TM 621

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2269-12

Two-layer model for optimal configuration of hybrid energy storage-assisted thermal power units in AGC frequency regulation

ZHANG Xiaoke, ZHANG Shaofeng, YOU Shun, GAO Yueji, ZHAO Chen

(State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: To achieve the dual goals of improving the automatic generation control (AGC) performance of thermal power units and reducing the life-cycle cost of energy storage systems, this study proposes a bi-level optimal configuration and coordinated control method for a hybrid energy storage system (HESS) to assist thermal power units with AGC frequency regulation. The HESS comprises energy-type lithium iron phosphate (LFP) and power-type lithium titanate (LTO) batteries. The upper-level model maximizes the life-cycle net profit to optimize the HESS capacity and provide constraint boundaries for the lower-level model. The lower-level model focuses on the coordinated frequency regulation response of the thermal-HESS, employing a refined three-stage control strategy based on AGC performance

收稿日期: 2025-12-25; 修改稿日期: 2026-02-25。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52476009)。

第一作者及通信联系人: 张小科 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为网源协调、并网电源涉网性能优化技术, E-mail: zxx5511@126.com。

引用本文: 张小科, 张少锋, 尤顺, 等. 混合储能辅助火电机组AGC调频优化配置双层模型[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2269-2280.

Citation: ZHANG Xiaoke, ZHANG Shaofeng, YOU Shun, et al. Two-layer model for optimal configuration of hybrid energy storage-assisted thermal power units in AGC frequency regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2269-2280.

assessment and a state-of-charge-aware power allocation mechanism. The model is solved using the adaptive chaotic particle swarm optimization algorithm, realizing the dynamic coupling optimization of the capacity configuration and operational control. The simulation results yield the optimal HESS configuration scheme: 1.16 MW/1.75 MWh for LFP and 3.08 MW/1.72 MWh for LTO. The comparative results indicate that compared with the conventional differential power sharing strategy, the proposed strategy and capacity configuration increase the AGC comprehensive regulation performance index of the combined system by 0.9% and the daily average revenue by 1230.23%. The proposed method effectively prevents the energy storage system from frequently bearing power fluctuations with high volatility, significantly enhancing the technical performance and economic benefits of the thermal-HESS frequency regulation system. This study provides a valuable reference for optimizing HESS configurations to facilitate frequency regulation in conventional power plants.

Keywords: AGC; hybrid energy storage; life cycle cost; bi-level optimal configuration model

随着我国“双碳”目标提出,光伏发电和风力等新能源发电装机容量不断提升,燃煤火电机组已经从主力电源向支撑性和调节性电源转变^[1]。传统火电机组具有大迟延、大惯性等特征,在跟踪自动发电控制(automatic generation control, AGC)指令过程中响应较慢,无法满足新型电力系统下频率调节的需求^[2-3]。配置储能系统辅助火电机组联合响应AGC指令是改善火电机组调频能力不足的方法之一^[4-5]。

在现有储能技术应用方案中,电化学储能系统已成为主流选择。依据其性能特点,该类储能主要分为能量型与功率型两种^[6]。其中,能量型储能具有初始投资成本相对较低、能量密度较高等优势,但在循环寿命方面通常较短;而功率型储能虽然能量密度相对较小,但循环寿命更长,缺点在于投资成本一般较高。基于二者特性的差异,将两种储能按一定容量比例进行合理配置,可以实现性能互补,从而更有效地满足电网调频等应用需求^[7-8]。磷酸铁锂电池(LiFePO_4 , LFP)作为能量型储能已被广泛应用,钛酸锂电池($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO)作为功率型储能,无论是安全性、倍率性能以及循环寿命均能在辅助火电机组调频工况下发挥其所有优点^[9-10]。基于上述分析,本工作将采用能量型储能LFP与功率型储能LTO共同构建混合储能系统,以辅助火电机组进行AGC调频。

在现有火储联合调频储能容量配置相关研究中,文献[11]采用一阶滤波器将区域调频控制信号分解为高频、中频和低频三个分量,并将滤波时间

常数作为优化变量,结合粒子群优化算法,实现储能容量配置与功率分配的协同优化,同时兼顾系统经济性。文献[12-13]则提出通过经验模态分解法(empirical mode decomposition, EMD)对储能目标功率进行分解与重构,初步确定混合储能系统配置方案,之后以归一化全生命周期成本为优化目标,完成储能系统的最终容量配置。上述研究在混合储能容量配置方面进行了积极探索,但未充分考虑系统AGC调频性能要求以及各调频性能分指标计算与系统功率输出之间的关系,致使系统配置结果难以兼顾调频性能与投资效益。

为更高效地平衡储能系统长期规划与短期运行之间的耦合关联,已有部分研究人员搭建了具备更强整合性与实用性的双层优化模型。文献[14]提出的模型同时涵盖了容量规划与运行优化,以系统综合收益最大化为目标生成配置与调度方案;文献[15]引入元模型构建双层框架,显著提升了复杂模型的求解效率。然而,上述研究在容量优化过程中,未充分考虑储能在实际运行中的边界约束,即当储能单元处于过充或过放状态时,其将无法继续响应调频指令,从而导致理论上的最优配置在实际系统中难以持续发挥预期效能。此外,LFP和LTO均属于电化学储能,其寿命衰减特性对系统经济运行影响显著^[16],需在容量配置中结合调频收益进行一体化建模与优化。

综上所述,本工作致力于研究混合储能系统辅助火电机组提升AGC性能的优化配置与协调控制问题,提出混合储能系统辅助火电机组参与AGC

调频的双层优化配置与协调控制方法。上层模型为以全生命周期净收益最大为目标的混合储能容量优化配置模型，为底层模型提供容量配置约束；下层模型为火电-混合储能调频响应模型，设计基于AGC性能考核的精细化三阶段控制策略以及计及储能SOC分区的动态功率分配策略，并向上层反馈各调频资源出力与SOC变化曲线。通过双层模型框架，将精细化的实时控制对系统性能和经济性的影响，有效地反馈到前期的容量配置决策中，确保整个系统在全生命周期内达到技术性能与经济性的最优平衡。

1 火电机组-混合储能联合AGC调频系统模型

火电机组-混合储能联合调频系统如图1所示^[17]，其核心功能模块包括火电机组、LFP与LTO构成的混合储能系统等。在该系统中，调度中心下发的AGC指令在抵达电厂远程测控终端后，将同步传送至火电机组的分散控制系统与混合储能协调控制单元。协调控制单元通过融合AGC指令与机组实时出力信息，计算出所需的补偿功率，并动态分配给LFP与LTO系统进行协同响应，从而有效支撑电网频率安全。

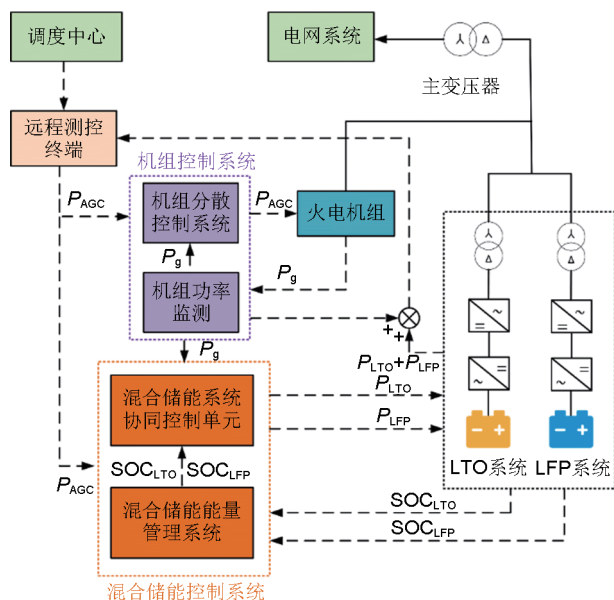


图1 火电机组-混合储能联合调频系统
Fig. 1 Thermal power unit-hybrid energy storage joint frequency modulation system

2 混合储能优化配置双层模型

构建的储能系统配置双层模型如图2所示。其中，上层模型为容量配置优化模型，用于确定混合储能系统的最优额定功率与容量；下层为火电机组-混合储能协调控制模型，依据控制策略分配火电机组和混合储能系统对AGC指令的响应出力。在优化过程中，将AGC指令输入至下层模型，得到的混合储能SOC、系统出力等数据反馈至上层模型；上层模型基于反馈数据利用混沌粒子群算法进行求解，并将优化得到的配置容量作为更新后的边界条件重新传递至下层模型。通过多次迭代优化，最终实现对混合储能系统配置的全局优化。

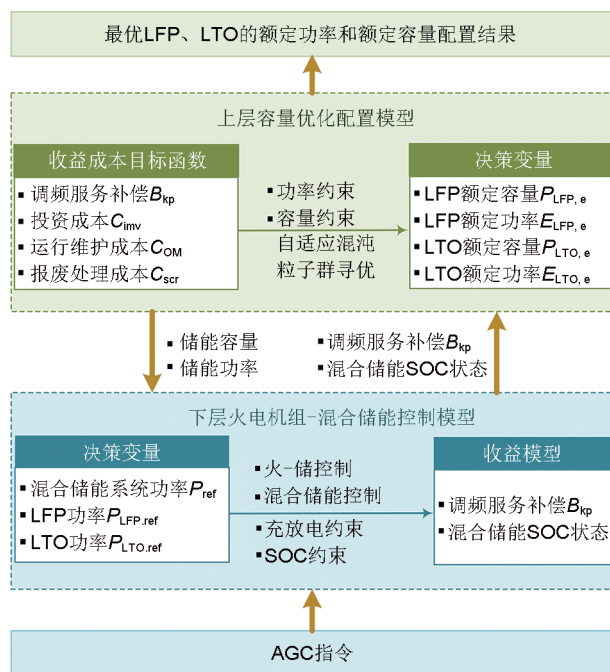


图2 混合储能优化配置双层模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the two-layer model for optimal configuration of hybrid energy storage

2.1 下层火电机组-混合储能充放电控制

2.1.1 火电-储能系统AGC控制策略

《调频辅助服务市场交易规则》中规定了火电机组参与AGC调节性能计算方法并用于辅助服务补偿，具体指标包括调节速率指标 K_1 、调节精度指标 K_2 和响应时间指标 K_3 。

调节速率是指机组在AGC指令方向，出力越过响应死区到进入调节死区这段时间的速率。调节速率对应 K_1 指标：

$$K_1 = 2 - \frac{\text{标准调节速率}}{\text{调节速率}} \quad (1)$$

式中, 标准调节速率一般取机组额定有功功率的1.5%。

调节精度是指机组进入调节死区到下次指令开始这段时间内实际出力 and 设点出力之间的差值。调节精度对应 K_2 指标:

$$K_2 = 2 - \frac{\text{调节精度}}{\text{调节允许的偏差量}} \quad (2)$$

式中, 调节允许的偏差量为机组额定有功功率的1%。

响应时间是指 AGC 系统发出指令之后, 机组出力在原出力的基础上, 可靠地跨出与指令方向一致的响应死区所用的时间。响应时间对应 K_3 指标:

$$K_3 = 2 - \frac{\text{响应时间}}{\text{标准响应时间}} \quad (3)$$

式中, 火电机组 AGC 标准响应时间应小于1分钟。

调节性能综合指标 K_p 计算公式如式(4)所示:

$$K_p = \alpha_1 \frac{K_1}{K_{b1}} + \alpha_2 \frac{K_2}{K_{b2}} + \alpha_3 \frac{K_3}{K_{b3}} \quad (4)$$

式中, α_1 、 α_2 、 α_3 为对应调节速率指标、调节精度指标、响应时间指标的权重系数, 分别取0.5、0.25、0.25; K_{b1} 、 K_{b2} 、 K_{b3} 为机组调节速率指标、调节精度指标、响应时间指标基准值。

为补偿火电机组实际出力对 AGC 指令的跟踪偏差, 工程上通常将此差值作为混合储能系统的功率指令来源, 然而当火储联合出力达到一定程度后, 对 AGC 性能指标改善有限, 从而造成部分储能能量的浪费。为了尽可能降低储能系统容量, 提出一种火储联合系统三阶段控制策略, 将 AGC 指令响应过程划分为响应阶段、爬坡阶段以及维持阶段, 如图3所示。当 AGC 指令发生变化后, 对三个阶段分别设计控制策略得到火电机组和混合储能系统功率指令。

(1) 响应阶段

响应阶段如图3中 $t_0 - t_1$, 该阶段下混合储能系统需要快速提供功率支撑, 使得联合系统快速跨出响应死区以提升响应时间 K_3 。该阶段储能系统输出功率指令为:

$$P_{\text{ref}}^k = P_{\text{AGC}}^{k-1} + P_x - P_g^k \quad (5)$$

式中, P_{AGC}^{k-1} 是第 $k-1$ 段 AGC 指令, MW; P_g^k 为火电机组输出功率, MW; P_x 为响应死区, “两

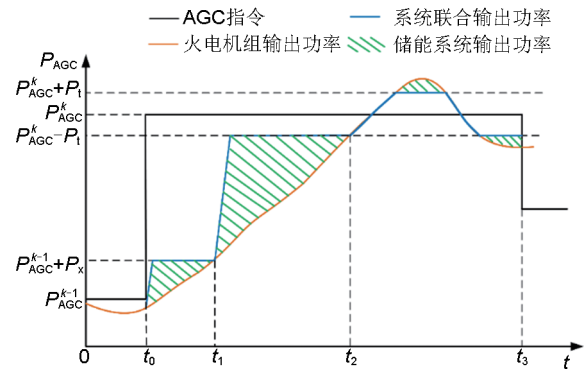


图3 混合储能系统辅助机组联合响应 AGC 调节曲线
Fig. 3 Regulation curve of hybrid energy storage system assisting units in joint response to AGC

个细则”中规定对于火电机组响应死区设为额定容量的1.0%^[18-19]。

(2) 爬坡阶段

爬坡阶段如图3中 $t_1 - t_2$, 该阶段混合储能系统重新快速提供功率支撑, 使得联合系统调频出力进入调节死区, 从而提高联合系统的调节速率 K_1 。该阶段储能系统输出功率指令为:

$$P_{\text{ref}}^k = P_{\text{AGC}}^k - P_t - P_g^k \quad (6)$$

式中, P_{AGC}^k 是第 k 段 AGC 指令, MW; P_t 是调节死区, “两个细则”中规定火电机组调节死区设为额定容量的0.5%^[18-19]。

(3) 维持阶段

维持阶段如图3中 $t_2 - t_3$, 混合储能系统不断修正功率输出, 维持联合系统出力处于调节死区范围之内以提高调节精度指标 K_2 。该阶段储能系统输出功率指令为:

$$P_{\text{ref}}^k = \begin{cases} P_{\text{AGC}}^k - P_t - P_g^k, & P_g^k < P_{\text{AGC}}^k \\ P_{\text{AGC}}^k + P_t - P_g^k, & P_g^k \geq P_{\text{AGC}}^k \end{cases} \quad (7)$$

2.1.2 混合储能功率分配策略

为了充分发挥不同储能优势的同时保证系统安全性, 提出基于 SOC 分区的功率分配策略, 也即根据两种电池 SOC 状态分别控制其充放电, 具体分区如图4所示。

图中, S_{LFP} 和 S_{LTO} 分别表示 LFP 和 LTO 的 SOC 状态; $S_{\text{LFP},h}$ 和 $S_{\text{LFP},l}$ 分别表示 LFP 的 SOC 高限和低限; $S_{\text{LTO},h}$ 和 $S_{\text{LTO},l}$ 分别表示 LTO 的 SOC 高限和低限。上述的高限和低限阈值的设定综合考虑了两类电池的电化学特性、工作稳定性及系统安全要求等因素, 使储能系统在高效运行的同时避免过充、过放等风险^[20-22]。在实际应用中, 若储能类型发生改

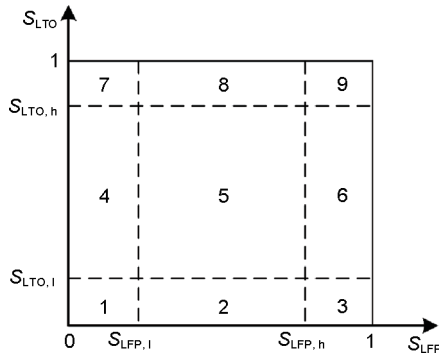


图4 混合储能的SOC分区

Fig. 4 SOC partitioning of hybrid energy storage

变, 可依据其技术特性与系统运行需求, 对SOC上下限阈值进行相应调整, 从而保障储能系统的长期可靠性与安全性。根据以上限制共得到9个SOC的状态区间, 以第 k 段AGC指令为例设计充放电策略:

(1) 储能处于充电状态 ($P_{\text{ref}}^k < 0$)

状态1、2和5下, 系统采用LTO优先的充电策略。若总充电需求未超过LTO的额定功率, 则由其独立响应; 否则, LTO以其额定功率为限进行充电, 而剩余的功率部分则由LFP承担, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = P_{\text{ref}}^k \\ P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = \min(P_{\text{ref}}^k - P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k, 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k$ 、 $P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k$ 分别表示LFP和LTO的出力指令; P_{ref}^k 为混合储能系统出力指令。

在状态4下, 系统采用LFP优先的充电策略。若总充电需求未超过LFP的额定功率, 则由其独立响应; 否则, LFP以其额定功率为限进行充电, 剩余功率部分则由LTO承担, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = P_{\text{ref}}^k \\ P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = \min(P_{\text{ref}}^k - P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k, 0) \end{cases} \quad (9)$$

在状态3和6下, 系统由LTO独立响应充电指令, LFP不参与充电过程, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = P_{\text{ref}}^k \\ P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = 0 \end{cases} \quad (10)$$

在状态7和8下, 系统限制LTO充电功能 (直至其SOC恢复至状态5范围), 转而由LFP优先响应充电指令, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = P_{\text{ref}}^k \\ P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = 0 \end{cases} \quad (11)$$

在状态9下, 系统禁止LFP与LTO执行充电操作, 直至其SOC回落至允许范围内, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = 0 \\ P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = 0 \end{cases} \quad (12)$$

(2) 储能处于放电状态 ($P_{\text{ref}}^k > 0$)

在状态5、8和9下, 系统采用LTO优先的放电策略。若总放电需求未超过LTO的额定功率, 则由其独立响应; 否则, LTO以其额定功率为限进行放电, 剩余功率部分由LFP承担, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = P_{\text{ref}}^k \\ P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = \max(P_{\text{ref}}^k - P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k, 0) \end{cases} \quad (13)$$

在状态2和3下, 因LTO的SOC偏低, 系统由LFP独立响应放电指令, LTO不参与放电过程, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = P_{\text{ref}}^k \\ P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = 0 \end{cases} \quad (14)$$

在状态4和7下, 因LFP的SOC偏低, 系统由LTO独立响应放电指令, LFP不参与放电过程, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = P_{\text{ref}}^k \\ P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = 0 \end{cases} \quad (15)$$

在状态6下, 系统采用LFP优先的放电策略。若总放电需求未超过LFP的额定功率, 则由其独立响应; 否则, LFP以其额定功率为限进行放电, 剩余功率部分由LTO承担, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = P_{\text{ref}}^k \\ P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = \max(P_{\text{ref}}^k - P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k, 0) \end{cases} \quad (16)$$

在状态1下, 因LFP与LTO的SOC均低于低位警戒值, 系统禁止两者执行任何放电操作, 直至其SOC恢复至允许范围, 即:

$$\begin{cases} P_{\text{LFP}, \text{ref}}^k = 0 \\ P_{\text{LTO}, \text{ref}}^k = 0 \end{cases} \quad (17)$$

2.1.3 下层AGC收益模型

下层收益模型主要是指机组参与AGC过程的调频服务经济补偿, 并按贡献日计算费用:

$$B_{\text{kp}} = Y_{\text{AGC}} \times K_{\text{pd}} \times D_{\text{t}} \quad (18)$$

式中, Y_{AGC} 为AGC补偿价格; K_{pd} 为当日调节性能指标; D_{t} 为日调节深度, 即当日所有调节量的累计值, 计算式为:

$$D_{\text{t}} = \sum_{k=1}^n D_k \quad (19)$$

式中, n 为当日调节总次数; D_k 为第 k 次系统调节深度, 若接收下次AGC指令时已达到目标功率, 则 $D_k = |P_{\text{A}} - P_{\text{sk}}|$, 若未达到目标功率, 则

$D_k = |P_{ek} - P_{sk}|$; P_{sk} 、 P_{ek} 、 P_A 分别为第 k 次 AGC 调节开始时的系统出力、结束时的系统出力及目标功率。

2.1.4 下层模型约束

(1) 储能充放电功率约束

LFP 和 LTO 的实际充放电功率需在各自额定功率范围内。

$$\max \left\{ -P_{LFP,e}, -\frac{E_{LFP,e}[1 - S_{LFP}(t)]}{\Delta t \eta_{LFP}} \right\} \leq P_{LFP}(t) \leq \min \left[P_{LFP,e}, \frac{E_{LFP,e} S_{LFP}(t)}{\Delta t} \eta_{LFP} \right] \quad (20)$$

$$\max \left\{ -P_{LTO,e}, -\frac{E_{LTO,e}[1 - S_{LTO}(t)]}{\Delta t \eta_{LTO}} \right\} \leq P_{LTO}(t) \leq \min \left[P_{LTO,e}, \frac{E_{LTO,e} S_{LTO}(t)}{\Delta t} \eta_{LTO} \right] \quad (21)$$

式中, $P_{LFP,e}$ 、 $E_{LFP,e}$ 分别为配置的 LFP 功率和容量; $P_{LTO,e}$ 、 $E_{LTO,e}$ 分别为配置的 LTO 功率和容量; $P_{LFP}(t)$ 、 $P_{LTO}(t)$ 分别为 LFP 和 LTO 在 t 时刻的实时出力; $S_{LFP}(t)$ 、 $S_{LTO}(t)$ 分别为 LFP 和 LTO 在 t 时刻的实时 SOC; η_{LFP} 、 η_{LTO} 分别为 LFP 和 LTO 的充放电效率。

(2) 储能 SOC 约束

$$S_{LFP}(t) = S_{LFP}(t-1) + P_{LFP}(t) \times \Delta t \quad (22)$$

$$S_{LTO}(t) = S_{LTO}(t-1) + P_{LTO}(t) \times \Delta t \quad (23)$$

$$S_{LFP,min} \leq S_{LFP}(t) \leq S_{LFP,max} \quad (24)$$

$$S_{LTO,min} \leq S_{LTO}(t) \leq S_{LTO,max} \quad (25)$$

式中, $S_{LFP,max}$ 、 $S_{LFP,min}$ 分别为 LFP 最大、最小 SOC; $S_{LTO,max}$ 、 $S_{LTO,min}$ 分别为 LTO 最大、最小 SOC。

2.2 上层混合储能容量优化配置

2.2.1 电池等效寿命模型

LFP 与 LTO 的寿命均受到充放电深度的影响, 频繁进行高倍率充放电会加快电池老化, 从而缩短其使用寿命, 并导致在全生命周期内电池更换次数增多。电池的运行寿命可以通过计算最大充放电次数与每日等效充放电次数的比值来得到。

假设电池在一次充放电循环中, 荷电状态从充电起始时的 $S(t_0)$ 升至充电结束时的 $S(t_1)$, 随后在放电过程中由 $S(t_1)$ 降至 $S(t_0)$, 将这一过程所对应的 SOC 变化幅度定义为该次循环的放电深度 DOD。LFP 和 LTO 充放电深度计算式分别为:

$$DOD_{LFP} = S_{LFP}(t_1) - S_{LFP}(t_0) = -\frac{\int_{t_0}^{t_1} P_{LFP}(t) dt}{E_{LFP,e}} \quad (26)$$

$$DOD_{LTO} = S_{LTO}(t_1) - S_{LTO}(t_0) = -\frac{\int_{t_0}^{t_1} P_{LTO}(t) dt}{E_{LTO,e}} \quad (27)$$

根据文献[23], 通过对不同充放电深度下的最大充放电次数实验数据进行拟合, 得到了 LFP 充放电深度与最大充放电次数之间的函数关系, 具体表达式为:

$$N_{LFPm}(DOD_{LFP}^i) = N_{LFPr} \left(\frac{DOD_{LFP}^i}{DOD_{LFP}^r} \right)^{0.19} e^{1.69 \left(1 - \frac{DOD_{LFP}^i}{DOD_{LFP}^r} \right)} \quad (28)$$

式中, DOD_{LFP}^i 为第 i 次放电过程中 LFP 对应的放电深度; N_{LFPr} 为 LFP 额定放电深度对应的额定循环次数; DOD_{LFP}^r 为 LFP 的额定放电深度。

LTO 寿命对放电深度敏感性低于 LFP, 其充放电深度与最大充放电次数的关系如下:

$$N_{LTOm}(DOD_{LTO}^i) = N_{LTOr} \left(\frac{D_{LTO}^i}{DOD_{LTO}^r} \right)^{0.1} e^{2.2 \left(1 - \frac{DOD_{LTO}^i}{DOD_{LTO}^r} \right)} \quad (29)$$

式中, DOD_{LTO}^i 为第 i 次放电过程中 LTO 对应的放电深度; N_{LTOr} 为 LTO 额定放电深度对应的额定循环次数; D_{LTO}^r 为 LTO 的额定放电深度。

等效充放电系数 α 表示在特定充放电深度 x 下进行一次充放电操作, 相当于在完全充放电条件下所折合的循环次数, 其取值范围为 (0,1), 则 LFP 和 LTO 等效充放电系数表达式分别为:

$$\alpha_{LFP}(x) = \frac{N_{LFPm}}{N_{LFPm}(x)} \quad (30)$$

$$\alpha_{LTO}(x) = \frac{N_{LTOm}}{N_{LTOm}(x)} \quad (31)$$

式中, $N_{LFPm}(x)$ 和 $N_{LTOm}(x)$ 分别表示 LFP 和 LTO 在充放电深度为 x 时的最大可循环次数; N_{LFPm} 和 N_{LTOm} 则分别对应两者在完全充放电条件下的最大循环次数。

采用雨流计数法对一天内的充放电深度进行统计, 并结合式(22)~(27)进行计算, 可得到 LFP 与 LTO 储能每日的等效充放电次数分别为:

$$N_{LFPday} = \sum_{k=1}^n \alpha_{LFP}(x_k) \quad (32)$$

$$N_{LTOday} = \sum_{k=1}^n \alpha_{LTO}(x_k) \quad (33)$$

式中, n 为一天充放电次数; x_k 为第 k 次充放电深度。

LFP 和 LTO 电池运行年限分别为:

$$T_{\text{LFP life}} = \frac{N_{\text{LFPm}}}{N_{\text{LFPday}} \times 365} \quad (34)$$

$$T_{\text{LTO life}} = \frac{N_{\text{LTOm}}}{N_{\text{LTOday}} \times 365} \quad (35)$$

LFP 和 LTO 在全生命周期内的更换次数分别为:

$$N_{\text{LFP}} = \frac{T_{\text{FLC}}}{T_{\text{LFP life}}} \quad (36)$$

$$N_{\text{LTO}} = \frac{T_{\text{FLC}}}{T_{\text{LTO life}}} \quad (37)$$

式中, T_{FLC} 为系统全生命周期。

2.2.2 上层优化模型目标函数

下层混合储能容量配置模型的优化目标是使配置混合储能后经济效益最大化。其中, 系统成本包括混合储能投资成本 C_{inv} 、运行维护成本 C_{OM} 、报废处理成本 C_{scr} , 收益则为上层模型的 AGC 调频收益。优化模型目标函数设为储能全生命周期内的收益成本之差, 具体如下:

$$\max C = B_{\text{kp}} - (C_{\text{HESS}} + C_{\text{r}} + C_{\text{B}} + C_{\text{F}}) \quad (38)$$

(1) 混合储能投资成本 C_{inv}

$$C_{\text{LFP, inv}} = \alpha_{\text{LFP}} P_{\text{LFP, e}} + \sum_{k=0}^{N_{\text{LFP}}} \beta_{\text{LFP}} E_{\text{LFP, e}} (1+r)^{-\left(\frac{kT_{\text{FLC}}}{N_{\text{LFP}}+1}\right)} \quad (39)$$

$$C_{\text{LTO, inv}} = \alpha_{\text{LTO}} P_{\text{LTO, e}} + \sum_{k=0}^{N_{\text{LTO}}} \beta_{\text{LTO}} E_{\text{LTO, e}} (1+r)^{-\left(\frac{kT_{\text{FLC}}}{N_{\text{LTO}}+1}\right)} \quad (40)$$

$$C_{\text{inv}} = C_{\text{LFP}} + C_{\text{LTO}} \quad (41)$$

式中, $C_{\text{LFP, inv}}$ 、 $C_{\text{LTO, inv}}$ 分别为 LFP、LTO 投资成本; α_{LFP} 、 α_{LTO} 分别为 LFP、LTO 单位功率成本系数; β_{LFP} 、 β_{LTO} 分别为 LFP、LTO 单位能量成本系数; r 为贴现率。

(2) 混合储能运行维护成本 C_{OM}

$$C_{\text{OM}} = c_{\text{LFP, PO}} P_{\text{LFP, e}} + c_{\text{LTO, PO}} P_{\text{LTO, e}} + c_{\text{LFP, EO}} E_{\text{LFP, e}} + c_{\text{LTO, EO}} E_{\text{LTO, e}} \quad (42)$$

式中, $c_{\text{LFP, PO}}$ 、 $c_{\text{LTO, PO}}$ 分别为 LFP 和 LTO 单位功率容量的运行维护成本系数; $c_{\text{LFP, EO}}$ 、 $c_{\text{LTO, EO}}$ 分别为 LFP 和 LTO 单位容量维修成本系数。

(3) 混合储能报废处理成本 C_{scr}

$$C_{\text{LFP, scr}} = c_{\text{LFP, Psc}} P_{\text{LFP, e}} (1+r)^{-T_{\text{FLC}}} + \sum_{k=0}^{N_{\text{LFP}}+1} c_{\text{LFP, Esc}} E_{\text{LFP, e}} (1+r)^{-\left(\frac{kT_{\text{FLC}}}{N_{\text{LFP}}+1}\right)} \quad (43)$$

$$C_{\text{LTO, scr}} = c_{\text{LTO, Psc}} P_{\text{LTO, e}} (1+r)^{-T_{\text{FLC}}} + \sum_{k=0}^{N_{\text{LTO}}+1} c_{\text{LTO, Esc}} E_{\text{LTO, e}} (1+r)^{-\left(\frac{kT_{\text{FLC}}}{N_{\text{LTO}}+1}\right)} \quad (44)$$

$$C_{\text{scr}} = C_{\text{LFP, scr}} + C_{\text{LTO, scr}} \quad (45)$$

式中, $C_{\text{LFP, scr}}$ 和 $C_{\text{LTO, scr}}$ 分别表示 LFP 和 LTO 两

种储能的报废处理成本; $c_{\text{LFP, Psc}}$ 、 $c_{\text{LTO, Psc}}$ 分别对应其单位功率报废处理成本系数; $c_{\text{LFP, Esc}}$ 和 $c_{\text{LTO, Esc}}$ 则表示各自的单位能量报废处理成本系数。

2.2.3 上层模型约束

为求解上述目标函数, 需给出 LFP 和 LTO 容量配置的约束条件。LFP 的造价成本低于 LTO 的造价成本, 应令 LFP 容量大于 LTO 容量。因此容量配置的约束条件如下所示:

$$P_{\text{LFP, e}} \geq 0 \quad (46)$$

$$P_{\text{LTO, e}} \geq 0 \quad (47)$$

$$E_{\text{LFP, e}} \geq E_{\text{LTO, e}} \quad (48)$$

2.2.4 模型求解

自适应混沌粒子群算法^[24]是对标准粒子群优化框架的增强版本, 其核心改进在于引入了混沌映射机制与动态惯性权重调整策略。该算法借助混沌系统的遍历特性与随机性, 能够在解空间中生成更为丰富的候选解集, 并通过在当前最优解邻域构建混沌序列进行精细化局部搜索。这一机制在维持种群多样性的同时, 有效抑制了算法早熟收敛, 从而显著提高了获得全局最优解的概率。自适应混沌粒子群算法基本流程图如图 5 所示, 所提算法的执行流程如下。

S1, 初始化阶段。输入典型日内 AGC 指令、火电机组功率以及混合储能系统的 SOC 等输入条件, 设置目标函数 C 中的相关参数以及自适应混沌粒子群算法的运行参数。

S2, 种群生成。随机产生初始向量, 通过 Logistic 混沌映射生成混沌序列, 并将各分量映射到优化变量的取值区间, 形成初始粒子位置 $x = [P_{\text{LFP, e}}, E_{\text{LFP, e}}, P_{\text{LTO, e}}, E_{\text{LTO, e}}]$, 同时随机初始化粒子速度。

S3, 参数与状态更新。根据当前粒子适应度与种群整体表现, 自适应调整惯性权重参数, 更新所有粒子的速度和位置, 平衡算法的全局探索与局部开发能力。

S4, 适应度评价。计算每个粒子在目标函数 $C(x)$ 下的适应度值, 评估其对应的混合储能系统配置性能。

S5, 最优解更新。比较当前适应度值与历史记录, 更新个体最优解 p_{best} 和全局最优解 g_{best} 。

S6, 混沌优化。对当前全局最优位置施加混沌扰动, 生成质量更优的新解, 并以此替换种群中任一随机粒子的位置。

S7, 终止判断。检验是否满足最大迭代次数或收敛精度要求。若满足, 则输出全局最优解对应的混合储能最优配置参数与目标函数值; 否则, 返回步骤 S3 继续迭代。

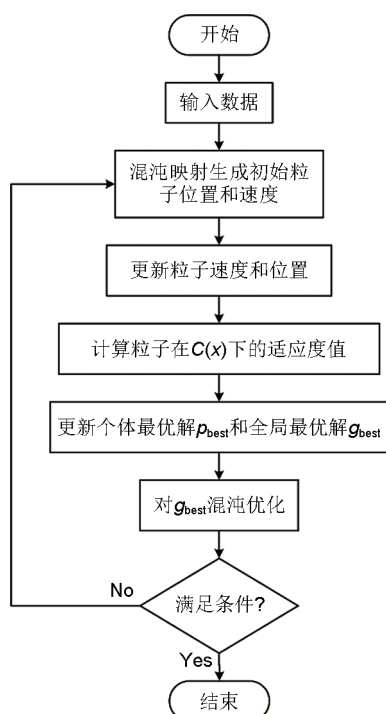


图5 自适应混沌粒子群算法基本流程图

Fig. 5 Basic flow chart of adaptive chaotic particle swarm optimization algorithm

3 仿真实验

3.1 下层控制策略验证

以某实际工程中 330 MW 燃煤发电机组一日厂级 AGC 指令数据进行仿真, 为验证储能系统控制策略的有效性, 给定一组容量配置结果, 设 LFP 配置为 2 MW/4 MWh, LTO 配置为 4 MW/1 MWh。图 6 为本工作策略下系统跟踪单个 AGC 指令的响应曲线以及混合储能的出力曲线, 可以看出, 20 s 时, AGC 指令由 10 MW 上升至 20 MW, 联合储能系统进入响应阶段, 此时火电机组输出功率为 9 MW, 为加速联合系统输出功率跨出响应死区, 混合储能系统输出功率为 4.3 MW; 20~38 s, 随着火电机组响应 AGC 指令输出功率增加, 混合储能系统输出功率逐渐降为 0 直至响应阶段结束; 38~62 s, 联合储能系统进入爬坡阶段, 此时火电机组输出功率为 13 MW, 为加速联合系统进入调节死区, 混

合储能系统重新开始出力, 输出功率 5.35 MW, 随着火电机组响应 AGC 指令输出功率增加, 混合储能系统输出功率逐渐降为 0 直至爬坡阶段结束; 62 s 之后, 联合系统进入维持阶段, 维持联合系统出力处于调节死区范围之内。LFP 和 LTO 的输出功率则在基于 SOC 的混合储能功率分配策略上, 按照 LTO 优先的规则输出。

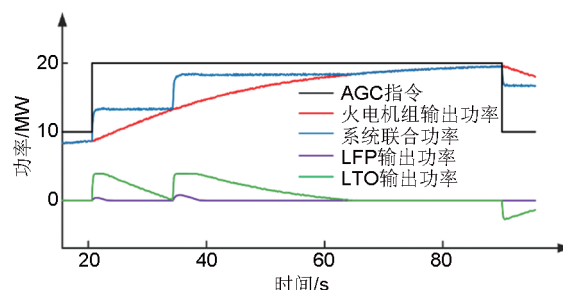


图6 单个AGC指令响应曲线

Fig. 6 Response curve of a single AGC command

为全面评估本策略在长时间尺度下避免混合储能系统频繁承受功率波动的效果, 选取一整日的连续 AGC 指令进行仿真分析。混合储能系统的响应曲线以及 LFP 与 LTO 的实际输出功率曲线分别如图 7(a)、(b)所示。由图可知, 混合储能系统总功率指令由三阶段控制策略生成, 通过基于 SOC 分区的动态功率分配策略, 高频、剧烈的功率波动主要由循环寿命长、倍率性能好的 LTO 承担, 而 LFP 则更多地响应平缓、持续的能量型功率需求。这种协同分配模式, 使得 LFP 避免了频繁的功率冲击, LTO 也发挥了其适于处理波动的特性。

为进一步凸显本工作精细化三阶段控制策略以及计及储能 SOC 分区的动态功率分配策略的优势, 采用目前常用的差额分配策略作为对比, 差额分配策略下由 LTO 优先动作, LFP 随后动作。两种策略作用下 LFP 与 LTO 的 SOC 变化曲线分别如图 7(a)、(b)所示。由图 8 可以看出, 本工作所提策略通过对每条指令的功率分配进行精细化处理, 有效避免了不必要的功率输出, 并结合 LFP 和 LTO 的实时 SOC 状态合理分配功率指令, 使得两者的 SOC 始终维持在 0.3~0.7 的最佳运行区间内。相比之下, 差额分配策略直接将 AGC 指令与火电机组出力之差作为混合储能系统的功率输入, 导致混合储能系统频繁承担剧烈波动的功率响应, 进而引起 SOC 大幅波动, 出现因 SOC 不足而退出调频的情况,

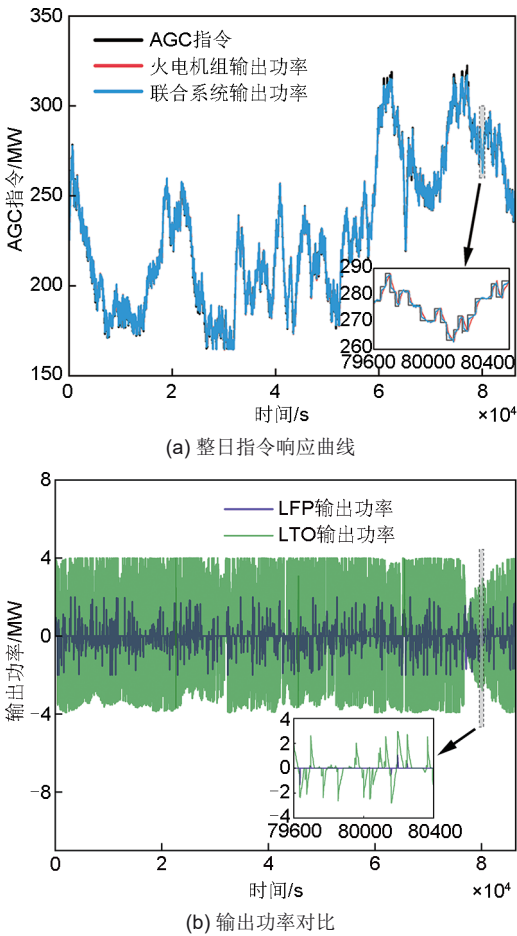


图7 整日指令下各调频资源输出功率
Fig. 7 Output of each frequency regulation resource under the all-day dispatch instruction

不利于储能寿命的保持。

3.2 上层储能容量配置验证

采用表1所示的经济性参数，通过自适应混沌粒子群算法求解上层模型，得到最优容量配置方案。求解过程的适应度曲线如图9所示，得到最优配置方案为：LFP配置1.16 MW/1.75 MWh，LTO配置3.08 MW/1.72 MWh。

为验证所提双层优化模型的有效性，本研究设置了两种对比方案：其一为采用本工作三阶段控制策略的单一储能配置（分别仅采用LFP或LTO），其二为采用差额分配策略的混合储能配置，对比方案均未计及SOC分区动态管理。将上述方案采用与本工作同样的优化方法进行容量配置，表2展示了不同方案下的优化配置结果。各配置方案下的指标对比如表3所示。由上表可知，在调频性能方面，利用本工作三阶段控制策略的单一LFP方案、

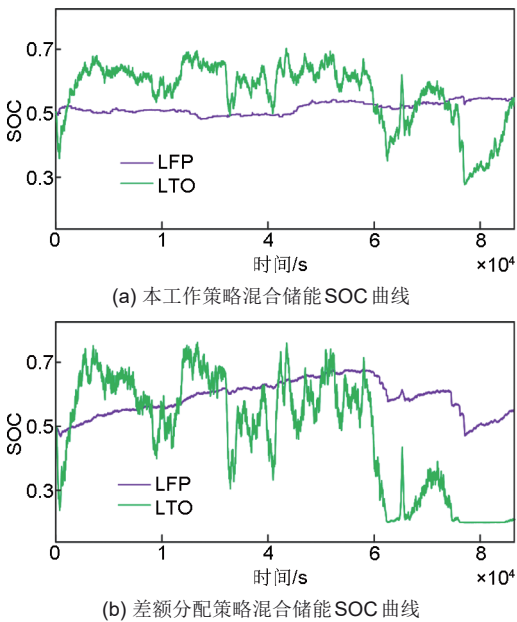


图8 不同策略下混合储能SOC曲线对比
Fig. 8 Comparison of hybrid energy storage SOC curves under different strategies

表1 系统参数
Table 1 System parameters

参数	参数取值	参数	参数取值
η_{LFP}	0.8	T_{FLC}	20/年
η_{LTO}	0.95	r	0.05
$S_{LFP,max}$	0.8	$C_{LFP,PO}$	6万元/MW
$S_{LFP,min}$	0.2	$C_{LTO,PO}$	15万元/MW
$S_{LTO,max}$	0.8	$C_{LFP,E0}$	0.1万元/MWh
$S_{LTO,min}$	0.2	$C_{LTO,E0}$	0.2万元/MWh
Y_{AGC}	1元/MW	$C_{LFP,Psc}$	0.72万元/MW
α_{LFP}	50万元/MW	$C_{LTO,Psc}$	0.72万元/MW
α_{LTO}	100万元/MW	$C_{LFP,Esc}$	0.4万元/MWh
β_{LFP}	100万元/MWh	$C_{LTO,Esc}$	0.6万元/MWh
β_{LTO}	250万元/MWh	$N_{LFP,r}$	3000
$N_{LTO,r}$	20000		

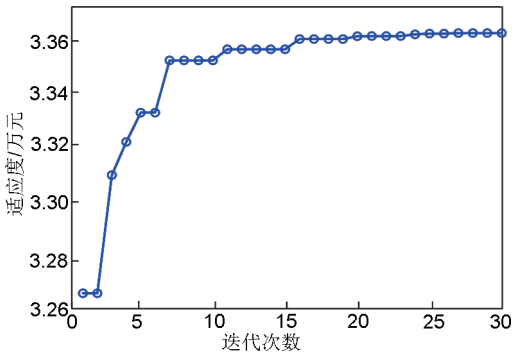


图9 适应度曲线
Fig. 9 Fitness curve

单一 LTO 方案以及混合储能方案的 K_p 指标均高于差额分配策略，相较之下分别提升 2.93%、0.45%、0.9%。说明本策略在优化配置的同时，未牺牲 AGC 指令跟踪精度，能够满足调频性能要求。日均收益是综合效益的核心体现，本策略的日均收益大幅领先于其他方案，较单一 LFP 方案、单一 LTO 方案以及差额分配策略分别提升 37.94%、92.85% 以及 1230.23%。综上，本工作所提双层优化模型通过三阶段控制与 SOC 分区动态功率分配策略，实现了储能配置的精准优化与运行效益的最大化。在保障 AGC 调频性能不劣于对比方案的前提下，不仅显著降低了储能系统的投资与报废处理成本，更通过高效的协同运行大幅提升了日均收益，验证了模型的优越性。

表2 不同方案储能配置结果

Table 2 Energy storage configuration results

方案	LFP 功率 /MW	LFP 容量 /MWh	LTO 功率 /MW	LTO 容量 /MWh
单一 LFP	5.82	7.24	0	0
单一 LTO	0	0	5.58	3.54
差额分配策略	1.27	2.01	3.52	1.94
本策略	1.16	1.75	3.08	1.72

表3 不同配置方案指标对比

Table 3 Comparison of indicators for various configuration schemes

方案	K_p	日均运维 成本/元	日均投资 成本/元	日均报废处 理成本/元	日均收 益/元
单一 LFP	4.56	19530	23782	98	24423
单一 LFP	4.45	46141	2028	7.54	17468
差额分配策略	4.43	21101	11644	46	2534
本策略	4.47	29413	3199	12	33688

4 结 论

本工作提出了一种混合储能优化配置双层模型，上层为容量配置优化模型，负责求解混合储能系统的最优额定功率与容量；下层为火电机组-混合储能协调控制模型，依据设计的控制策略分配火电机组与混合储能的出力指令，所得结论如下。

(1) 本策略通过对每条 AGC 指令的功率分配进行精细化管控，同时结合储能实时 SOC 状态动态调整出力指令，可将 LFP 与 LTO 的 SOC 始终稳定在最佳运行区间，与传统差额分配策略相比，有效避免储能系统频繁承担剧烈波动功率响应，提升

了系统的调频性能。

(2) 本工作所提双层优化模型实现了上层容量配置与下层协调控制的深度协同，在保障调频性能的前提下，显著提升了系统综合经济效益。

(3) 本工作双层优化模型为混合储能参与火电机组 AGC 调频的工程应用提供了可靠的技术方案，既通过精细化控制策略保障了调频响应质量，又通过精准的容量配置实现了全生命周期内的效益最大化，可为储能系统的规划设计与运行控制提供可靠的理论支撑与实践指导。

参 考 文 献

- [1] 杨水丽, 林伟芳, 崔艳妍, 等. 基于功率和容量补偿的火/储 AGC 调频可行性分析与启示[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(1): 299-311.
YANG S L, LIN W F, CUI Y Y, et al. Analysis and enlightenment of AGC modulation for combined fire and storage system based on power and capacity compensation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(1): 299-311.
- [2] 杨勇平, 陈衡, 郝俊红, 等. "双碳"目标下我国燃煤发电转型升级发展路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6900-6909, I0015.
YANG Y P, CHEN H, HAO J H, et al. Development pathways for the transformation and upgrading of China's coal-fired power generation under the goals of carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6900-6909, I0015.
- [3] 时雨, 张忠, 杨晶莹, 等. 储能电池系统提供 AGC 调频的机会成本建模与市场策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(7): 2366-2373. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0581.
SHI Y, ZHANG Z, YANG J Y, et al. Opportunity cost modelling and market strategy of energy storage participating in the AGC market[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2366-2373. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0581.
- [4] LV Y, SUN H, WANG T H, et al. A frequency modulation capability enhancement strategy of thermal power units by the integration of a hybrid energy storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 278: 127441. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127441.
- [5] 李秀慧, 崔炎. 考虑调峰调频需求的新能源电网储能优化配置[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3594-3602. DOI: 10.12147/j.cnki.1671-3508.2023.05.072.
LI X H, CUI Y. Optimal allocation of energy storage in renewable energy grid considering the demand of peak and frequency regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(11): 3594-3602. DOI:10.12147/j.cnki.1671-3508.2023.05.072.
- [6] 梁志宏, 刘吉臻, 洪烽, 等. 电力级大功率飞轮储能系统耦合火电机组调频技术研究及工程应用[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8518-8530. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.231472.
LIANG Z H, LIU J Z, HONG F, et al. Research and engineering application of frequency modulation technology of power-level high-power flywheel energy storage system coupled with thermal

- power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8518-8530. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.231472.
- [7] 戴中华, 王琨玥, 曹蓓, 等. 基于CEEMDAN功率分解的火电厂混合储能容量优化配置[J]. 电气工程学报, 2024, 19(1): 57-66. DOI: 10.11985/2024.01.006.
- DAI S H, WANG K Y, CAO B, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage capacity in thermal power plants based on CEEMDAN power decomposition[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(1): 57-66. DOI:10.11985/2024.01.006.
- [8] 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. DOI:10.19666/j.rld.202410243.
- LI J H, WU P Y, HUANG F Q, 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. DOI: 10.19666/j.rld.202410243.
- [9] 黄任飞. 钛酸锂电池在兆瓦级储能系统中的应用分析[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(3): 290-294. DOI: 10.3969/j. issn. 2095-4239.2015.03.008.
- HUANG R F. Analysis for the applications of lithium titanate battery in the MW-class energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(3): 290-294. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2015.03.008.
- [10] 李晓峰, 涂伟超, 马丽, 等. 功率型储能技术在新能源场站一次调频中的作用及应用研究[J]. 太阳能, 2024(2): 76-85. DOI:10.19911/j.1003-0417.tyn20221214.01.
- LI X F, TU W C, MA L, et al. Research on role and application of power type energy storage technology in primary frequency modulation of new energy stations[J]. Solar Energy, 2024(2): 76-85. DOI:10.19911/j.1003-0417.tyn20221214.01.
- [11] 孟杰, 丁泉, 陈孝煜, 等. 基于寿命模型的混合储能参与二次调频的经济性研究[J]. 现代电力, 2021, 38(2): 205-212.
- MENG J, DING Q, CHEN X Y, et al. Economic feasibility in secondary frequency regulation considering hybrid energy storage cycle life model[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(2): 205-212.
- [12] 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[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 496-503. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0588.
- SONG J, GENG L X, SANG Y F, 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. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0588.
- [13] 张雯雯, 魏震波, 郭毅, 等. 含混合储能的交直流配电网日经济优化运行[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 565-574. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20210923.
- ZHANG W W, WEI Z B, GUO Y, et al. Optimal daily economic operation of AC/DC distribution network with hybrid energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 565-574. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210923.
- [14] 刘佳玲, 秦博宇, 孙颖, 等. 面向清洁低碳转型的隧道智慧能源系统框架设计及储能容量优化配置[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2563-2572. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20220823.
- LIU J L, QIN B Y, SUN Y, et al. Framework design of tunnel intelligent power system and optimal planning method of energy storage capacity for low carbon transition[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2563-2572. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20220823.
- [15] 何俊强, 师长立, 马明, 等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 157-164. DOI: 10.16081/j.epae.202007001.
- HE J Q, SHI C L, MA M, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 157-164. DOI:10.16081/j.epae.202007001.
- [16] 于会群, 戚明鑫, 彭道刚, 等. 储能-火电联合一次调频的双层控制策略[J]. 热能动力工程, 2023, 38(6): 48-57. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.06.006.
- YU H Q, QI M X, PENG D G, et al. Double-layer control strategy of combined primary frequency regulation for battery energy storage system and thermal power unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6): 48-57. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.06.006.
- [17] XIE X R, GUO Y H, 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. DOI:10.1109/TSG.2016.2599579.
- [18] 马斌, 李一鹏. AGC机组性能指标及考核补偿计算方法[J]. 河北电力技术, 2014, 33(6): 6-8, 37. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-9898.2014.06.003.
- MA B, LI Y P. Performance indicators and calculation method of evaluation compensation in AGC unit[J]. Hebei Electric Power, 2014, 33(6): 6-8, 37. DOI:10.3969/j.issn.1001-9898.2014.06.003.
- [19] 孙丙香, 李旻熙, 龚敏明, 等. 参与AGC辅助服务的锂离子电池储能系统经济性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4048-4061. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191151.
- SUN B X, LI Y X, GONG M M, et al. Study on the economy of energy storage system with lithium-ion battery participating in AGC auxiliary service[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4048-4061. DOI: 10.19595/j. cnki. 1000-6753.tces.191151.
- [20] 李浩然, 王子滔. 基于电池储能SOC特性的配电网供电恢复有功控制方法[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(7): 2833-2843. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0108.
- LI H R, WANG Z T. Active control method for power restoration in distribution networks considering the characteristics of distributed energy storage SOC[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(7): 2833-2843. DOI: 10.19799/j. cnki. 2095-4239.2025.0108.
- [21] 韩旭, 仲宣宇, 刘仲稳. 基于双层优化模型的火-储协同调频性能研究[J]. 热力发电, 2026, 55(2): 75-85. DOI:10.19666/j.rld.202511015.
- HAN X, ZHONG X Y, LIU Z W. Research on the performance of

- fire-storage coordinated frequency modulation based on a bi-level optimization model[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55 (2): 75-85. DOI:10.19666/j.rld.202511015.
- [22] 丁佳欣, 罗日忠, 何毅, 等. 基于电池储能系统寿命的 SOC 反馈的自适应电厂调频策略[J]. 动力工程学报, 2025, 45(3): 391-398, 419.
- DING J X, LUO R Z, HE Y, et al. Adaptive frequency modulation strategy of power plant based on SOC feedback of battery energy storage system life[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(3): 391-398, 419.
- [23] 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): 3965-3976. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20230219.
- LI J H, JIA C Q, ZHU X X, 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): 3965-3976. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230219.
- [24] 康鑫, 时玮, 陈洪涛. 基于锂离子电池简化电化学模型的参数辨识[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 969-978. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0273.
- KANG X, SHI W, CHEN H T. Parameter identification based on simplified electrochemical model of lithium ion battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 969-978. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0273.