



锂电协同抽蓄参与二次调频的运行策略与容量优化

张云飞¹, 叶滨¹, 全风云², 李子龙², 孙晓霞¹, 张瞳², 郑永², 李玲²
(¹国网新源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院, 北京 100053; ²国网新源集团有限公司湖北分公司, 湖北省 武汉 430070)

摘要: 为提升抽蓄响应自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 指令的性能与经济性, 提出了一种考虑抽蓄磨损的锂电 (Lithium-ion capacitor, LiC) 协同抽蓄的运行策略与容量优化方法。首先, 以 LiC 的荷电状态 (state of charge, SOC) 偏差、抽蓄功率变化及 AGC 跟踪误差最小为目标, 提出了一种自适应模型预测控制 (model predictive control, MPC) 策略, 以提升系统 AGC 响应性能并降低 LiC 能量受限导致的功率突变。然后, 基于抽水蓄能机组核心部件的磨损机理构建了以机组功率变化量及变化率为决策变量的抽蓄磨损模型。进一步, 以最大化项目规划期内系统年化净收益为目标建立了 LiC 的容量配置模型。最后, 通过运行策略与容量配置的联合迭代, 实现二者协同优化。算例结果表明, 所提自适应 MPC 策略下, 联合系统的日收益较未配置 LiC 提高了 21.4%。采用最优容量方案可使抽蓄磨损降低 23%, 并使联合系统的年化净收益提升了 18.0%。

关键词: AGC 调频; 锂电; 模型预测控制; 抽蓄磨损模型; 容量配置

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0410

中图分类号: TM 761

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-12

Operation Strategy and Capacity Optimization of Li-ion Capacitor Coordinated Pumped Storage for Secondary Frequency Regulation

ZHANG Yunfei¹, YE Bin¹, QUAN Fengyun², LI Zilong², SUN Xiaoxia¹, ZHANG Tong²,
ZHENG Yong², LI Ling²

(¹State Grid Xin Yuan Pumped-Storage Technological & Economic Research Institute, Beijing 100053, Beijing, China; ²Hubei Branch of State Grid Xin Yuan Group Co., Ltd., Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: To improve the performance and economic efficiency of pumped storage hydropower in responding to automatic generation control (AGC) signals, a coordinated operation strategy and capacity optimization method for pumped storage hydropower and Lithium-ion capacitors (LiC), considering pumped storage wear impact, is proposed. First, an adaptive model predictive control (MPC) strategy is proposed with the objectives of minimizing the Lithium-ion capacitor (LiC) state of charge (SOC) deviation, pumped storage power fluctuation, and AGC tracking error, thereby improving the AGC response performance of the system and reducing power fluctuations caused by the energy limitation of the LiC. Then,

收稿日期: 2026-05-13; 修改稿日期: 2026-07-06。

基金项目: 国网新源集团有限公司科技项目资助 (SGXYKJ-2025-020)。国网新源集团有限公司科技项目资助 (SGXYKJ-2025-020)。

第一作者: 张云飞, 男, 硕士, 高级经济师, 研究方向为抽水蓄能技术开发与经济优化决策。E-mail: zhangyunfei_0512@163.com。通信作者: 叶滨, 男, 就职于国网新源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院, E-mail: 。

引用本文: 张云飞, 叶滨, 全风云, 等. 锂电协同抽蓄参与二次调频的运行策略与容量优化[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(X): 1-12.

Citation: ZHANG Yunfei, YE Bin, QUAN Fengyun, et al. Operation Strategy and Capacity Optimization of Li-ion Capacitor Coordinated Pumped Storage for Secondary Frequency Regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(X): 1-12.

based on the wear mechanisms of the core components of pumped storage units, a pumped storage wear model is constructed with the unit power variation and power ramp rate as decision variables. Furthermore, a LiC capacity configuration model is established with the objective of maximizing the annualized net profit of the system over the project planning horizon. Finally, the coordinated optimization of the operation strategy and capacity configuration is achieved through joint iterative optimization. Case study results show that, under the proposed adaptive MPC strategy, the daily profit of the system increases by 21.4% compared with the case without LiC configuration. Moreover, the optimal capacity configuration scheme reduces pumped storage wear by 23% and increases the annualized net profit of the hybrid system by 18.0%.

Keywords: AGC frequency regulation; Lithium-ion capacitor (LiC); model predictive control (MPC); pumped storage wear model; capacity configuration

0 引言

近年来,我国“双碳”战略持续推进,新能源消纳水平不断提升,同时也加剧了电力系统的频率波动^[1-2]。自动发电控制(automatic generation control, AGC)指令的调节更加快速和剧烈。为此,国家发改委、能源局及各地方也纷纷出台政策,推动多类型调节资源参与电力系统辅助服务^[3-4]。抽蓄机组具备大范围功率调节能力和良好的动、静态响应特性,然而其频繁功率调节仍会加速机械零部件磨损,增加检修频率和运行成本^[5]。目前,储能联合火电机组参与AGC调频过程中,锂电池受限于响应速度和循环寿命,而超级电容因成本较高导致容量配置受限,这些因素均制约了系统调频性能与经济性^[6]。相比之下,抽蓄机组具备更优的调频性能,可显著降低储能的容量需求。锂电容(Lithium-ion capacitor, LiC)兼具高功率密度与长循环寿命,适用于高频功率支撑场景。相较于传统锂离子电池,LiC成本适中^[7],且在频繁充放电工况下具有更优的寿命衰减特性,从而可降低全生命周期运维成本。因此,在高频调频与AGC功率快速补偿场景中,LiC可作为功率型储能与抽蓄协同配置,以提升系统动态响应性能并降低抽蓄寿命损耗。近年来,随着电极材料、制造工艺及功率变换技术的发展,LiC已逐步由实验室研究走向工程应用,并在轨道交通、电网储能及新能源汽车等领域开展示范应用^[8],整体处于向规模化应用过渡阶段。未来,随着新型电力系统建设推进及频率调节需求增长,LiC在混合储能及联合调频场景中具有

良好的应用潜力。为此,合理的LiC容量配置与协同运行策略成为提升LiC-抽蓄联合系统性能与经济性关键问题。

目前,储能参与二次调频的研究主要集中在两个方面:一是从调度系统层面研究储能与其他调节资源的协调调度策略^[9];二是聚焦于储能辅助调频资源(如火电机组)响应调频指令的协调方法^[10]。文献[11]提出了一种飞轮辅助抽水蓄能调频的控制策略,从区域系统层面生成各调频资源的调度指令,从而实现飞轮储能与抽水蓄能的协调互补运行,提升区域系统调频能力。文献[12]针对分布式储能集群二次调频过程中所面临的能量不足、荷电状态(state of charge, SOC)不均衡等问题,提出一种储能集群多状态区间优化策略,以提高储能响应二次调频的能力。文献[13]提出了一种基于多目标遗传算法的飞轮-火电联合二次调频策略,以兼顾调频成本、飞轮损耗与运行经济性。目前,储能参与二次调频或考虑系统级的调度策略,或基于火电机组响应功率不变为前提进行研究。与火电机组相比,抽蓄机组功率响应性能优异,可在小功率范围内调整并跟踪AGC指令。这使得抽蓄机组能够进行功率重新分配,从而联合储能提高响应AGC指令的性能。然而,目前关于储能联合抽蓄功率调整以响应AGC指令的研究仍较少,其协同响应策略有待深入研究。

由于储能投资成本高且循环寿命有限,在当前电力市场条件下,合理的容量配置是保障其调频性能的关键^[14-15]。文献[16]针对超级电容-锂电池混合储能的容量配置问题,提出了基于实际AGC指令

的容量配置方法，并对三种典型方案的调频性能和经济性进行了对比，并确定了最优方案及其工程可行性。文献[17]针对混合储能辅助火电机组的二次调频容量配置，提出基于小波变换的电池与压缩空气储能功率分配方法，并结合成本效益模型对优化配置的经济性和调频效果进行了分析。文献[18]提出一种基于变分模态分解的混合储能系统二次调频运行策略及其容量配置方法，并构建了考虑全生命周期成本与调频收益的混合储能系统经济模型，以实现净收益最大化。目前，储能参与二次调频的容量配置问题主要关注配置后的调频收益提升及其配置成本。然而，当抽蓄配置储能后，原抽蓄响应功率可重新分配以降低磨损，从而减少额外的抽蓄运维成本。然而，鲜有研究考虑利用抽蓄功率再分配来降低运维成本，并据此进行储能的容量配置与经济性分析。

综上所述，为提升抽蓄机组响应AGC指令的性能与经济性，本文构建了锂电容协同抽蓄的AGC功率响应模型，并提出自适应模型预测控制(model predictive control, MPC)方法，以提高AGC指令跟踪的性能并降低抽蓄磨损。在此基础上，建立了抽水蓄能的磨损模型，并提出了考虑抽水蓄能年化磨损成本的LiC容量配置方法，实现了LiC-抽蓄系统调频性能与经济性的协同提升。

1 LiC-抽蓄联合系统优化框架

锂电容兼具高功率特性和较高能量密度，循环寿命优于典型锂离子电池，因此在高频充放电场景下具有良好的经济性。基于此，本文构建了LiC-抽蓄联合系统以响应AGC指令，并提出了考虑抽蓄磨损的联合系统运行策略及LiC容量配置方法，所提方法框架如图1所示。

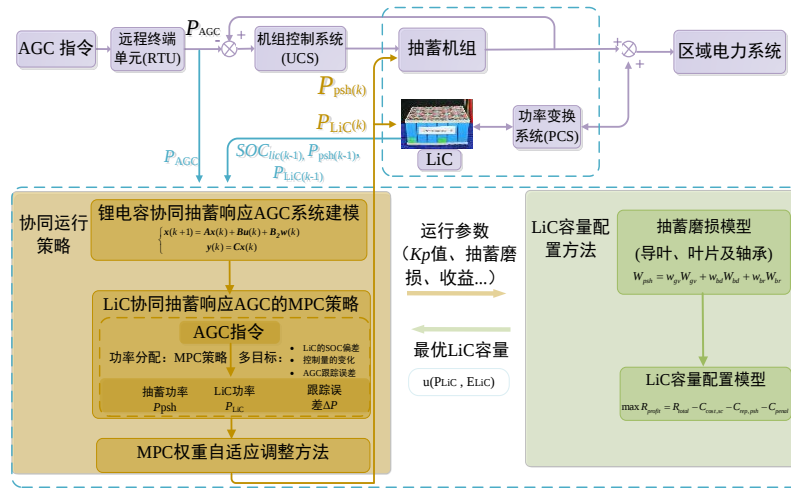


图1 所提方法框架图

Fig. 1 Proposed method framework diagram

首先，构建了LiC-抽蓄联合系统响应AGC指令的运行模型。在此基础上，以LiC的SOC偏差、抽蓄功率变化及AGC跟踪误差最小为目标，提出了联合系统响应AGC指令的多目标MPC策略。其中，AGC指令作为系统输入，MPC策略根据系统运行状态对LiC与抽蓄的输出功率进行滚动优化分配，并生成相应控制指令。通过调整不同优化目标的权重，实现LiC与抽蓄的协同响应，充分发挥LiC快速调节和抽蓄能量支撑优势，兼顾AGC跟踪性能与系统运行平稳性。进一步，针对LiC能量受限易频繁退出导致系统输出功率突变问题，提出了

MPC权重自适应调整方法，以提升AGC跟踪性能和运行平滑性。

然后，分析了抽蓄核心零部件（导叶、叶片及轴承）的磨损机理，并构建了以机组功率变化量和变化率为决策变量的抽蓄磨损模型，以实现抽蓄运行损耗的定量评估。随后，以最大化项目规划期内LiC-抽蓄联合系统年化净收益为目标建立了LiC的容量配置模型。最后，通过运行策略与容量配置的联合迭代，实现LiC容量配置与运行策略联合优化。

2 LiC协同抽蓄响应AGC的运行策略

相较于火电机组，抽蓄机组具有快速且高精度的响应特性，因此可构建与LiC协同的功率分配策略，以提升联合系统响应AGC指令的性能。

2.1 LiC协同抽蓄响应AGC系统建模

为描述LiC协同抽蓄对AGC指令的跟踪过程，首先建立LiC-抽蓄联合系统的离散状态空间模型。设采样时刻为 k ，选取LiC的荷电状态 $\text{SOC}_{\text{lic}}(k)$ 与抽蓄输出功率 $P_{\text{psh}}(k)$ 作为状态量。则在采样周期 ΔT 下，其状态量在相邻采样时刻间的更新如下：

$$\begin{cases} \text{SOC}_{\text{lic}}(k+1) = \text{SOC}_{\text{lic}}(k) - \frac{P_{\text{lic}}(k)}{E_{\text{lic}}} \cdot \Delta T \\ P_{\text{psh}}(k+1) = P_{\text{psh}}(k) + \Delta P_{\text{psh}}(k) \end{cases} \quad (1)$$

其中， $P_{\text{lic}}(k)$ 为LiC在 k 时刻的输出功率（约定LiC及抽蓄发电为正）； E_{lic} 为LiC的额定容量； $\Delta P_{\text{psh}}(k)$ 为抽蓄在时刻 k 的功率调节量。

$$\min J = \sum_{k=1}^{N_p} (q_{\text{sc}} (\text{SOC}_{\text{lic}}(k) - \text{SOC}_{\text{lic,ref}}(k))^2) + \sum_{k=0}^{N_p-1} (r_{\text{lic}} P_{\text{lic}}^2(k) + r_{\text{psh}} (\Delta P_{\text{psh}}(k))^2) + \sum_{k=0}^{N_p-1} (w (P_{\text{AGC}}(k) - P_{\text{lic}}(k) - P_{\text{psh}}(k))^2) \quad (3)$$

其中， $\text{SOC}_{\text{lic,ref}}$ 为LiC的SOC参考值； q_{sc} 、 r_{sc} 、 r_{psh} 、 w 分别为SOC偏差项、控制项、AGC跟踪误差权重，且均大于等于0。 N_p 为预测时域。

上述目标函数中，分别通过加权最小化LiC的SOC偏差、控制量的变化，及最小化AGC跟踪误差，兼顾LiC能量的可持续性、抽蓄功率平滑性和AGC的跟踪精度，从而实现多目标协同控制。其中，将SOC偏差作为控制目标之一，以维持LiC的能量处于合理状态，避免其因SOC越限而频繁退出调节，从而保证其可用率，提高抽蓄与LiC的协同响应性能。

为了实现LiC联合抽蓄响应AGC指令的MPC策略，系统须满足SOC、功率、系统模型等约束：

(1) 每个控制周期 k 必须满足LiC的运行约束：

$$\begin{cases} \text{SOC}_{\text{lic}}^{\min} \leq \text{SOC}_{\text{lic}}(k) \leq \text{SOC}_{\text{lic}}^{\max} \\ P_{\text{lic}}^{\min} \leq P_{\text{lic}}(k) \leq P_{\text{lic}}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

其中， $\text{SOC}_{\text{lic}}^{\max}$ 、 $\text{SOC}_{\text{lic}}^{\min}$ 分别为LiC的SOC上、下限； $P_{\text{lic}}^{\min}$ 与 $P_{\text{lic}}^{\max}$ 分别为LiC的最小、最大输出功率。

(2) 每个控制周期 k 必须满足抽蓄的运行约束：

根据式(1)，选取LiC的功率 $P_{\text{lic}}(k)$ 和抽蓄的功率变化 $\Delta P_{\text{psh}}(k)$ 作为控制量，可得到LiC-抽蓄联合系统的状态空间模型如下：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \text{SOC}_{\text{lic}}(k+1) \\ P_{\text{psh}}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SOC}_{\text{lic}}(k) \\ P_{\text{psh}}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta T}{E_{\text{lic}}} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\text{lic}}(k) \\ \Delta P_{\text{psh}}(k) \end{bmatrix} \\ y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SOC}_{\text{lic}}(k+1) \\ P_{\text{psh}}(k+1) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 LiC协同抽蓄响应AGC的自适应MPC策略

模型预测控制能够在考虑LiC-抽蓄联合系统状态及多重运行约束的前提下，通过滚动时域优化实现对AGC指令的精确跟踪，同时协调各储能单元的协同运行。为此，构建以AGC跟踪性能与联合系统运行特性为核心的优化目标函数，实现联合系统的整体协调优化控制。目标函数如下：

$$\begin{cases} P_{\text{psh}}^{\min} \leq P_{\text{psh}}(k) \leq P_{\text{psh}}^{\max} \\ |\Delta P_{\text{psh}}(k)| \leq \Delta P_{\text{psh}}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

其中， $P_{\text{psh}}^{\min}$ 与 $P_{\text{psh}}^{\max}$ 分别为抽水蓄能机组的最小、最大功率； $\Delta P_{\text{psh}}^{\max}$ 为抽蓄 ΔT 的功率调节最大量。

(3) 为避免LiC协同抽蓄内部出现功率环流，需约束抽蓄功率 $P_{\text{psh}}(k)$ 与LiC功率 $P_{\text{lic}}(k)$ 同号：

$$\begin{cases} P_{\text{AGC}}(k) \cdot P_{\text{lic}}(k) \geq 0 \\ P_{\text{AGC}}(k) \cdot P_{\text{psh}}(k) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

在式(3)的目标函数中，不同权重设置会在跟踪AGC指令精度与储能功率分配之间相互平衡。具体地，增加 w 可以使得LiC-抽蓄联合系统总出力更好跟踪AGC功率需求，提高跟踪精度；增加 r_{lic} 、 q_{lic} 可以减少LiC的分配功率，在其可用容量有限情况下缓解其负荷压力；而提高 r_{psh} 则有助于降低抽蓄的功率波动，延缓其长期运行中的磨损。

由于LiC的能量有限，在高频或长周期AGC指令下其SOC易短时逼近容量上下限。固定权重可能导致其阶段性“退出调节”，导致抽蓄机组承担突增功率负荷，同时引起联合系统功率突变，严重影响AGC跟踪性能，降低系统运行平滑性。

为缓解上述问题，引入MPC权重自适应调整策略。即，根据系统运行状态，调整式(3)的各

子目标权重，以提高LiC的可用率并改善联合系统的功率响应性能。MPC权重自适应如下：

$$\begin{cases} q_{lic}(k) = q_{lic0} \cdot \exp(-\alpha_q \cdot d), \\ d = \min(\text{SOC}_{lic}(k) - \text{SOC}_{\min}, \text{SOC}_{\max} - \text{SOC}_{lic}(k)) \\ r_{lic}(k) = r_{lic0} \cdot (1 + \beta_1 |P_{lic}(k)|^p) \\ r_{psh}(k) = r_{psh0} \cdot (1 + \beta_2 |\Delta P_{psh}(k)|^q) \\ w(k) = w_0 \cdot \exp(\alpha_w \cdot |P_{AGC}(k) - P_{lic}(k) - P_{psh}(k)|) \end{cases} \quad (7)$$

其中， $q_0, w_0, R_{1,0}, R_{2,0}$ 为基准权重系数； $\alpha_q, \alpha_w, \beta_1, \beta_2$ 为调节权重因子； p, q 为幂指数系数。

式(7)中， $q_{lic}(k)$ 随LiC的SOC与其上下限距离的减小而增大，从而在SOC接近边界时降低越界风险。同理， $r_{lic}(k)$ 与 $r_{psh}(k)$ 分别随 $|P_{lic}(k+i)|$ 与 $|\Delta P_{psh}(k+i)|$ 非线性增大，从而抑制过大的LiC功率输出与抽蓄功率突变，以降低抽蓄功率波动与等效磨损，并提升系统运行平滑性。 $w(k)$ 随跟踪误差的增大而增大，以在误差增大时优先实现AGC指令的快速精确跟踪。

上述权重的自适应调节可能存在相互制约关系。可依据系统实际跟踪AGC性能、设备功率/变化率约束以及SOC_{lic}安全区间等进行综合设定，以提高运行性能。

式(1)~(7)所提优化问题可以转化为标准二次规划(quadratic programming, QP)问题来得到控制量 $[P_{lic}(k), \Delta P_{psh}(k)]$ ，进一步即可求得LiC-抽蓄联合系统的输出功率 P_{lic} 和 P_{psh} ，实现对AGC指令的实时协同响应。

3 LiC协同抽蓄响应AGC的容量配置方法

本节首先构建了抽蓄的年化磨损成本模型，为LiC容量配置及联合系统的经济性优化提供量化依据。进一步建立了计及调频性能的LiC系统容量配置模型，最后给出了LiC的双层容量配置方法。

3.1 抽水蓄能的年化磨损成本模型

抽蓄机组主要通过导叶开度变化和水力工况调整实现输出功率控制。在频繁调节过程中，抽蓄机组关键部件(如导叶机构、叶片及轴承)会承受反复机械应力与水力冲击，进而产生磨损与疲劳损伤。尤其在AGC指令的高频调节下，机组的功率变化量(ΔP)反映了调节幅度，而功率变化率

($\Delta P/\Delta t$)表征了调节频率与冲击强度，二者综合影响抽蓄机组关键部件的磨损。

为此，构建以机组功率变化量(ΔP)及功率变化率($\Delta P/\Delta t$)为决策变量的机组磨损模型，用于定量评估抽蓄的运行损耗。为便于对不同机组部件的磨损进行统一量分析，首先对磨损指标 ΔP 和 $|\Delta P/\Delta t|$ 进行归一化：

$$\begin{cases} \Delta P_{N,i} = \Delta P_i / \Delta P_i^{\max} \\ (\Delta P/\Delta t)_{i,N} = (\frac{\Delta P}{\Delta t})_i / (\frac{\Delta P}{\Delta t})_i^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中， i 分别为导叶机构、叶片及轴承等关键损耗部件。 $\Delta P_i^{\max}$ 和 $(\frac{\Delta P}{\Delta t})_i^{\max}$ 分别为部件 i 最大变化量。

(1) 导叶磨损模型 W_{gv} 。导叶是机组出力调节的关键执行部件，其开度变化直接影响输出功率。 ΔP 和 $|\Delta P/\Delta t|$ 分别表征导叶的调节幅度与动作速度，共同决定了导叶在调节过程中的摩擦、冲击及载荷突变程度。通常，导叶磨损与功率变化量及变化率的累积效应正相关。为此，可构建其磨损模型如下：

$$W_{gv} = \sum_{T_a} \left[a_1 |\Delta P_{N,j}| + a_2 \left(\frac{\Delta P}{\Delta t} \right)_{N,m} \right] \quad (9)$$

其中， T_a 为统计周期； $\Delta P_{N,j}$ 和 $(\frac{\Delta P}{\Delta t})_{N,m}$ 分别为 T_a 内标么化后的第 j 次的功率变化和第 m 次的功率变化率。 a_1, a_2 为不同类型下的磨损系数，并反映各自的相对权重。

(2) 叶片磨损模型 W_{bd} 。作为机组直接受力的关键部件，叶片磨损主要由功率调节幅值引起的水力冲击和应力决定。在响应AGC指令过程中， ΔP 会使水轮机运行点频繁偏离稳定工况，增加叶片承受的非定常水动力冲击，从而加剧磨损。为此，叶片的磨损主要由 ΔP 决定。构建叶片磨损模型如下：

$$W_{bd} = \sum_{T_a} b \Delta P_{N,j} \quad (10)$$

其中， b 为磨损系数。

(3) 轴承磨损模型 W_{br} 。轴承作为机组转动部件的关键支撑，其寿命对转矩波动高度敏感。由于转矩与功率 P 成正比。抽蓄响应AGC指令过程中，功率快速变化会导致转矩剧烈波动，产生冲击载荷和高频振动，从而加剧轴承磨损。为此，轴承的磨

损主要由功率变化率 $|\Delta P/\Delta t|$ 决定。构建轴承磨损模型如下：

$$W_{br} = \sum_{T_s} c \left(\frac{\Delta P}{\Delta t} \right)_{N,m} \quad (11)$$

其中， c 为磨损系数。

基于抽蓄机组关键部件（导叶、叶片和轴承）的运行特性及磨损机理，可构建其关键部件的整体寿命损耗模型如下：

$$W_{psh} = w_{gv} W_{gv} + w_{bd} W_{bd} + w_{br} W_{br} \quad (12)$$

其中， w_{gv} 、 w_{bd} 、 w_{br} 分别为导叶、叶片和轴承的权重系数，用于量化各分量对抽蓄磨损的影响，且：

$$w_{gv} + w_{bd} + w_{br} = 1 \quad w_{gv}, w_{bd}, w_{br} \geq 0 \quad (13)$$

进一步，基于所建立的抽蓄磨损模型，可通过对比传统单抽蓄下的累积磨损 W_{conv} 与LiC-抽蓄联合运行策略下的累积磨损 W_{hyb} ，定量评估LiC参与AGC对抽蓄关键部件磨损的减缓效果。并据此折算抽蓄的等效检修周期，以评估经济性。在联合LiC策略下，抽蓄的等效检修周期 T_{rep}^{act} 可表示为：

$$T_{rep}^{act} = T_{rep}^N \cdot W_{conv} / W_{hyb} \quad (14)$$

其中， T_{rep}^N 为传统单抽蓄下的寿命检修周期。

因此，在项目规划期 T_r 内，抽蓄的寿命检修次数 n_{rep}^{psh} 可由 T_{rep}^{act} 得到：

$$n_{rep}^{psh} = \text{ceil}(T_r / T_{rep}^{act}) - 1 \quad (15)$$

其中， $\text{ceil}()$ 函数表示上取整。

进一步，为考虑项目规划期内检修费用的时间价值，将各次检修成本按贴现率折现后换算为年化成本。抽蓄的年化检修成本可表示为：

$$C_{rep,psh} = \sum_{j=1}^{n_{rep}^{psh}} (C_{rep,1} \cdot \frac{1}{(1+\gamma)^j \cdot T_{rep}^{act}}) \cdot \gamma_{CRF} \quad (16)$$

其中， $C_{rep,1}$ 为单次检修成本， γ_{CRF} 为：

$$\gamma_{CRF} = (1+\gamma)^{T_r} / ((1+\gamma)^{T_r} - 1) \quad (17)$$

其中， γ 为资本贴现率。

3.2 计及调频性能的LiC容量配置方法

LiC容量配置的目标在于，通过优化其容量，使LiC-抽蓄联合系统在项目规划期内实现年化运行净利润最大。进一步，为提升联合系统对AGC指令的响应能力，引入调频响应性能对系统经济性的影响，构建计及调频性能的LiC-抽蓄联合系统全寿命周期年化运行净利润模型，即：

$$\max R_{profit} = R_{total} - C_{cost,lic} - C_{rep,psh} - C_{penal} \quad (18)$$

其中， R_{total} 为项目规划期内联合系统的年化总

收益； $C_{cost,lic}$ 为LiC的年化成本； C_{penal} 为响应AGC性能偏差导致的年化惩罚成本。

(1) 抽蓄电站的年收入 R_{total} 。 R_{total} 为LiC-抽蓄系统参与AGC调频的日收益并折算到年收入：

$$R_{total} = R_{em}^{day} \cdot 365 \cdot \phi \quad (19)$$

其中， R_{em}^{day} 为系统参与AGC调频的日收益。 ϕ 为系统的年运行率。

(2) LiC的年化运行成本 $C_{cost,lic}$ 。 $C_{cost,lic}$ 由年化初始投资成本、更换成本、年维护成本及残值：

$$C_{cost,lic} = C_{cap,lic} + C_{rep,lic} + C_{maint,lic} - C_{rec,lic} \quad (20)$$

其中， $C_{cap,lic}$ 为LiC的年化初始投资成本； $C_{rep,lic}$ 为项目期内LiC的年化更换成本； $C_{maint,lic}$ 为年维护成本； $C_{rec,lic}$ 年均残值。其中， $C_{cap,lic}$ 为：

$$C_{cap,lic} = (c_{lic} \cdot P_{lic} + c_{elc} \cdot E_{lic}) \cdot \gamma_{CRF} \quad (21)$$

其中， c_{lic} 、 c_{elc} 分别为LiC的单位功率成本与单位能量成本； E_{lic} 为LiC的容量。

同理， T_r 内LiC的更换次数 n_{rep}^{lic} 可根据其使用寿命得到：

$$n_{rep}^{lic} = \text{ceil}(T_r / T_{lt,lic} - 1) \quad (22)$$

其中， $T_{lt,lic}$ 为LiC的等效使用寿命（年）。工程应用中， $T_{lt,lic}$ 通常可依据生产厂商提供的寿命指标确定，或采用预设年限值。

为此， T_r 内LiC的年化更换成本为：

$$C_{rep,lic} = \sum_{j=1}^{n_{rep}^{lic}} ((c_{psc} \cdot P_{lic} + c_{esc} \cdot E_{lic}) \cdot \frac{1}{(1+\gamma)^j \cdot T_{lt,lic}}) \cdot \gamma_{CRF} \quad (23)$$

LiC的年均残值成本为：

$$C_{rec,lic} = (c_{psc} \cdot P_{lic} + c_{esc} \cdot E_{lic}) \cdot \mu_{lic} \cdot (n_{rep}^{lic} + 1) / T_r \quad (24)$$

其中， μ_{lic} 为LiC的残值率。

LiC的年维护成本 $C_{maint,lic}$ 为：

$$C_{maint,lic} = c_{lic}^{maint} \cdot P_{lic} \quad (25)$$

其中， c_{lic}^{maint} 分别为单位功率的LiC年维护成本。

(3) 运行性能的惩罚成本 C_{penal} 。系统参与AGC调频时，其运行性能主要体现在调频性能指标 K_p 以及一日的响应失败率 r_{fail} 等关键参数上。为量化运行性能偏差对系统经济性的影响，构建如下惩罚成本函数：

$$C_{penal} = C_{kp} + C_{rfail} \quad (26)$$

其中， C_{kp} 为调频性能不足导致的惩罚成本， C_{rfail} 为因响应失败事件导致的惩罚成本。二者共同构成运行性能惩罚成本 C_{penal} 。其中， C_{kp} 如下：

$$C_{kp} = c_{penal,kp} \cdot \exp(-\alpha_{kp} \cdot (K_p - K_{ref})) \quad (27)$$

其中, K_{ref} 为参考调频值, $c_{penal, kp}$ 为惩罚系数, α_{kp} 为惩罚调节因子。

同理, 响应失败事件导致的惩罚成本 C_{fail} 如下:

$$C_{fail} = c_{penal, fail} \cdot \exp(\alpha_{fail} \cdot (r_{fail} - r_{fail, ref})) \quad (28)$$

其中, $r_{fail, ref}$ 为一日的失败率参考值, $c_{penal, fail}$ 、 α_{fail} 分别为惩罚系数和惩罚调节因子。

在 LiC 的容量配置模型中, 为了满足每日运行的功率、能量平衡等要求须满足一定约束:

(1) LiC 的最小配置容量约束。

$$\begin{cases} E_{lic}^{min} \leq E_{lic} \leq E_{lic}^{max} \\ P_{lic}^{min} \leq P_{lic} \leq P_{lic}^{max} \end{cases} \quad (29)$$

其中, E_{lic}^{max} , E_{lic}^{min} 与 P_{lic}^{max} , P_{lic}^{min} 分别为 LiC 的能量容量与额定功率上、下限。

(2) LiC 的容量和功率配置应满足一定的约束:

$$\beta_1 \cdot E_{lic} < P_{lic} < \beta_2 \cdot E_{lic} \quad (30)$$

其中, β_1 与 β_2 分别为 LiC 的功率能量比 P_{lic}/E_{lic} 的下限与上限, 用于限定其倍率范围, 从而保证配置的 LiC 满足工程可实现性。

LiC 容量优化配置模型的决策变量为 LiC 的容

量配置参数 (P_{lic} , E_{lic})。LiC 容量优化方法采用双层结构。容量配置层与运行策略层通过运行参数的交换实现迭代优化。首先, 下层基于历史运行数据采用所提自适应 MPC 策略模拟 LiC - 抽蓄联合系统的单日 AGC 响应, 并计算得到其年化运行参数。上层在得到系统年化运行参数后 (如调频性能指标 K_p 与日响应失败率 r_{fail}), 通过优化容量配置模型得到 LiC 的最优容量结果。进一步, 通过容量配置层与运行策略层的迭代, 最终确定 LiC 的最优容量方案。

4 算例分析

为了验证所提 LiC 协同抽蓄参与二次调频的运行策略与容量优化方法, 基于我国南方某抽蓄电站历史数据, 并依据国家能源局山西监管办的二次调频规则设计考核结算场景, 以评估所提方法的有效性。所提策略和模型等均通过 MATLAB 优化工具箱实现。参数设置如表 1^[19]所示。

表 1 仿真参数设置

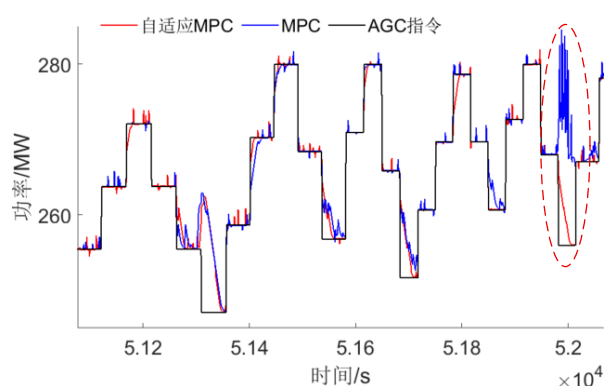
Table 1 Simulation parameter settings

变量	定义	值
a. 运行参数设置		
$SOC_{lic}^{max}, SOC_{lic}^{min}$	LiC 的 SOC 最大、最小值	0.9, 0.1
P_{psh}^N	抽蓄的额定容量/MW	300
ΔP_{psh}	抽蓄的最大功率变化/MW/s	10
C_{price}	单位里程的收益/MW/元	12
K_{pmax}	当日各机组的最大 K_p 性能	5.8
ΔT	采样控制周期/s	1
b. 配置参数设置		
T_{rt}	项目全寿命周期 (年)	20
γ	资本贴现率	0.05
ϕ	抽蓄的年利用率	0.6
C_{lic}, C_{elic}	LiC 的单位功率成本 (CNY/kW) 和单位能量成本 (CNY/kWh)	3000, 1200
μ_{lic}	LiC 的残值率	0.05
C_{lic}^{maint}	单位容量的 LiC 年维护成本 (CNY/kW)	5
K_{ref}	惩罚参考 K_p 值	4.8
r_{fail}	日调频响应失败率参考值	0.05
T_{rep}^N	抽蓄额定检修周期/a	6

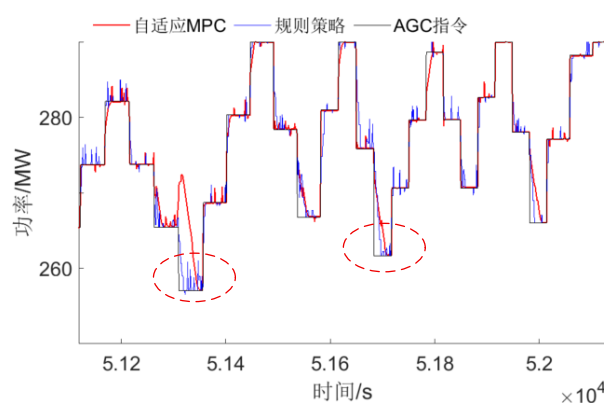
4.1 所提自适应 MPC 策略结果及分析

为了验证所提自适应 MPC 策略的有效性, 首先以固定的 LiC 容量进行仿真分析, 其中, LiC 采用经验容量 10 MW/0.16 MWh。进一步, 为评估所提方法的性能, 设计以下对比场景: (1) 场景 A1,

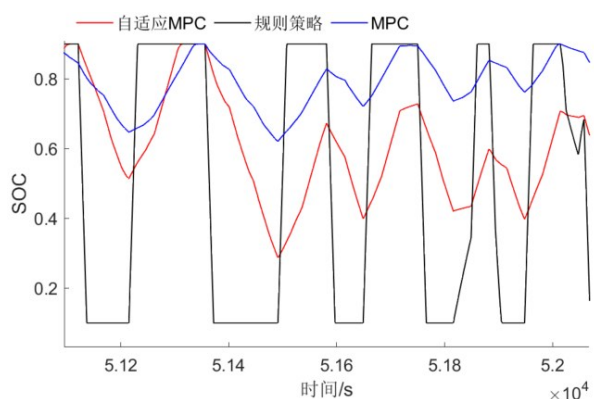
采用所提自适应 MPC 策略; (2) 场景 A2, 采用所提 MPC 策略, 权重系数固定; (3) 场景 A3, 基于规则策略, 即抽蓄按照原设定响应 AGC 指令, LiC 补偿剩余缺额功率。(4) 场景 A4, 仅抽蓄响应 AGC 指令。不同场景下的结果如表 2 和图 2 所示。



(a) 场景A1和场景A2对比结果



(b) 场景A1和场景A3对比结果



(c) 场景A1、A2、A3下的锂电SOC对比结果

图2 不同方法下的响应AGC指令结果图

Fig. 2 The response results under different methods

由图2及表2可知,所提自适应MPC策略具有更好的调频性能。其一日的 K_p 值相比于固定参数MPC以及规则策略法分别提高了4.56%和8.87%。这主要归因于所提自适应MPC方法能够更有效地协调抽蓄和LiC的能量管理。

首先,相较于场景A3,由于缺乏对AGC所需功率的预测,LiC在响应AGC指令的初期阶段过度

表2 不同方法下的调频结果

Table 2 Frequency regulation results under different methods

	场景A1	场景A2	场景A3	场景A4
日 K_p	5.27	5.04	4.84	4.24
日 K_1	1.57	1.56	1.61	1.51
日 K_2	1.72	1.70	1.64	1.62
LiC吞吐量/MWh	36.52	33.44	31.09	-
日调频收益/万元	10.23	9.89	9.42	8.42

补偿导致其稳态可用容量下降。图2(c)显示了不同方法下LiC的SOC变化对比:基于规则的策略在初期快速释放或吸收能量,使SOC迅速达到上下限,而所提自适应MPC策略则通过预测协调抽蓄与LiC功率分配,使SOC保持在合理范围内,保留了一定的备用容量。这使得在响应AGC指令的初期,场景A3平均 K_1 值虽因LiC快速响应而提高2.5%,但在系统稳定阶段,基于规则策略的LiC容量不足,其功率波动增大甚至可能退出调节,导致日平均 K_2 值下降4.9%(如图2b虚线所示),从而降低系统整体 K_p 性能指标。相比之下,所提自适应MPC策略通过合理维持SOC区间,保证了LiC在稳态阶段持续参与功率调节,从而提升了系统的综合AGC调节性能。

在此基础上,所提方法通过对MPC权重参数进行自适应调整,使得 K_p 性能进一步提高。该自适应策略在跟踪指令精度、LiC功率以及抽蓄功率变化之间进行动态权衡,更有效提高了联合系统的能量管理效率。如图2a虚线所示,在固定参数下,由于LiC容量约束,系统响应功率出现振荡导致跟踪失败;而在参数自适应方法下,所提策略能够根据LiC的SOC提前调整抽蓄功率,有效避免跟踪失败,从而提升本次 K_p 性能。

所提策略下的参数调整结果如图3所示。针对LiC参数 q_{lic} 及跟踪精度参数 w 进行了大幅度调整,从而增强了MPC策略对这两个关键状态量的跟踪调节能力。通过调整LiC功率调节的参与度,能够提高LiC的能量吞吐效率,从而提高响应性,并降低抽蓄功率波动。如表2所示,一日内LiC吞吐量相比固定参数MPC和规则法分别提高约9.21%和17.46%。

进一步,为了验证目标函数中LiC的SOC偏差项的作用,在固定权重系数下,给出了不同SOC

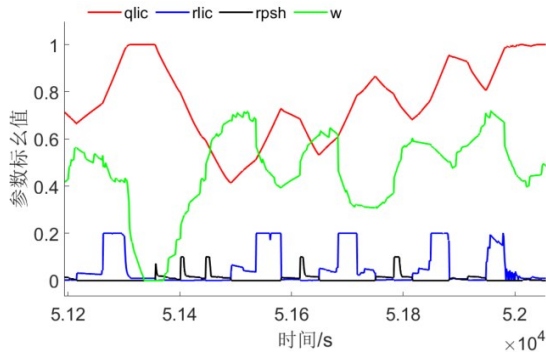


图3 参数自适应的变化结果

Fig. 3 The variation results of parameter adaptation

偏差权重下的响应特性，如图4所示。

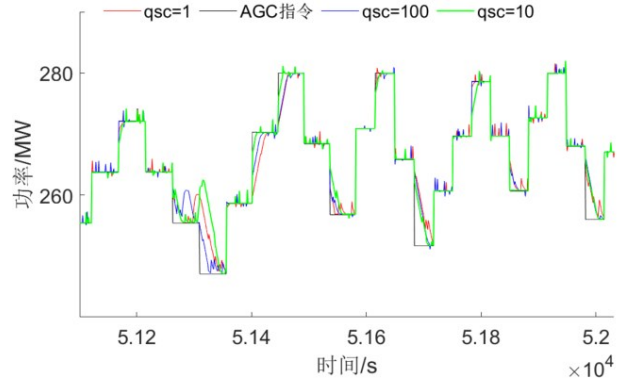
从图4(a)的AGC响应结果可以看出，当提高LiC的SOC偏差权重 q_{sc} 时，LiC在部分时段（如 5.13×10^4 s）受到SOC约束的影响，导致该时段的AGC跟踪效果下降甚至出现响应失败。然而，通过图4(b)和4(c)的功率响应曲线可以发现，权重增加并不总是导致LiC使用减少。这是因为目标函数中的SOC偏差项是相对于SOC等于0.5进行比较：在某些时段，为了将SOC恢复至参考值，LiC仍可能增加输出功率。另一方面，SOC偏差权重提高后，使抽蓄承担了更多能量补偿任务，如图4c的 5.12×10^4 s时段所示。同时也相对削弱了其他目标项在功率分配中的优先性。因此，SOC偏差权重的设置需要在保持LiC的SOC在合理区间，并与协调抽蓄功率分配之间进行权衡。合理的权重设置才能保证LiC与抽蓄的协同调节，实现整体系统的最佳响应性能。

进一步，不同方法下的抽蓄功率分配对比结果如图5及表3所示。

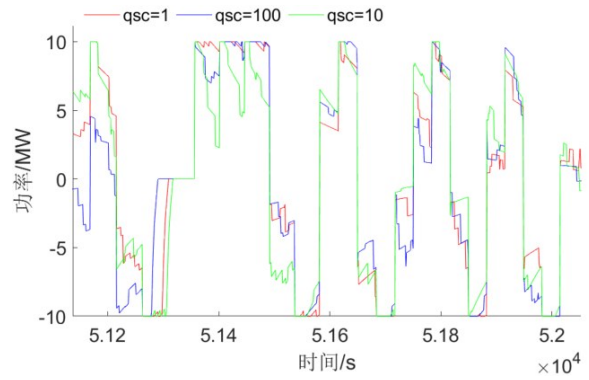
由图5和表3可知，所提自适应MPC策略下抽蓄的功率变化幅度 ΔP 和变化速率 $\Delta P/\Delta T$ 明显低于基于规则的方法。

在功率变化事件次数与单次变化幅度方面，自适应MPC方法下功率变化事件次数为10891次，略低于固定参数MPC的10991次，远低于简单规则的14854次，表明自适应策略减少了不必要的频繁调节。此外，无论是平均单次 ΔP 还是最大单次 ΔP ，所提方法均低于未调整抽蓄的策略（场景A3/A4）。这使得所提方法下的累计功率变化 ΔP 相比规则法降低了51.6%。

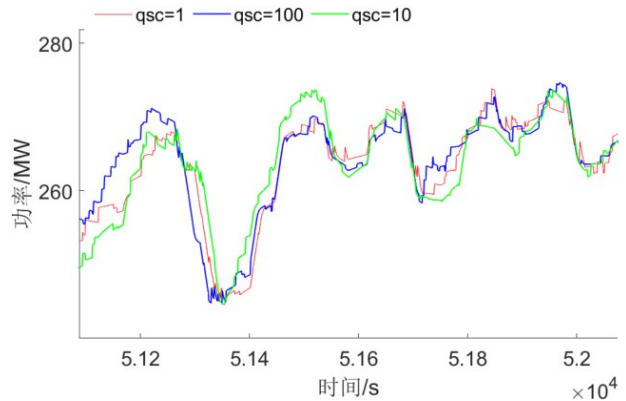
在功率变化速率 $\Delta P/\Delta T$ 方面，自适应MPC方法



(a) 不同权重下的响应AGC指令结果



(b) 不同权重下LiC的输出功率



(c) 不同权重下的抽蓄的输出功率

图4 不同权重下响应AGC指令结果图

Fig. 4 The response results under different weight

的平均功率变化速率 $\Delta P/\Delta T$ 为0.318 MW/s，相比固定参数MPC和未调整抽蓄的策略（场景A3/A4）分别降低了6.7%和41.0%。同时，所提方法的最大功率变化速率为1.438 MW/s，同样低于固定参数MPC的1.579 MW/s和场景A3/A4的1.733 MW/s。

结果表明，在提高调频性能的同时，自适应MPC策略使抽蓄的功率输出更平滑，减少了快速调节引起的动态应力，从而降低抽蓄的机械磨损和

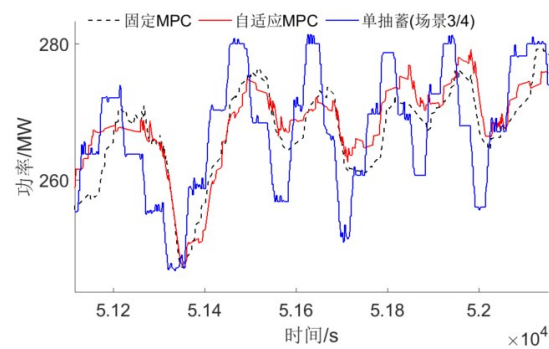


图5 不同方法下的抽蓄功率结果
Fig. 5 The pumped storage power results under different methods

应力，相比固定参数 MPC 和单抽蓄响应更具性能和设备保护优势。

4.2 LiC 容量配置结果及分析

在计及调频性能影响的前提下，构建以下四种 LiC 容量配置场景进行对比分析：（1）场景 B1：所

表3 不同方法下的抽蓄功率变化结果
Table 3 The pumped storage power results under different methods

	场景A1	场景A2	场景A3/A4
功率变化事件次数	10891	10991	14854
平均单次 $\Delta P/MW$	1.30	1.38	1.97
最大单次 $\Delta P/MW$	4.97	4.47	5.20
累计 $\Delta P/MW$	14174.09	16587.58	29301.45
平均功率变化速率 $\Delta P/\Delta T/（MW/s）$	0.318	0.341	0.539
最大 $\Delta P/\Delta T/（MW/s）$	1.438	1.579	1.733

提 LiC 容量配置策略；（2）场景 B2：按照经验设置容量，即场景 A1 的 10 MW/0.25 MWh。（3）场景 B3：基于场景 A3 的规则策略并进行最优容量配置。（4）场景 B4：仅抽蓄响应 AGC 指令，不配置 LiC。（5）场景 B5：采用锂电池，容量为 10 MW/10 MWh，并基于场景 A3 的规则策略。各配置方案下的详细结果如下表 4 和表 5 所示。

表4 不同LiC配置方案下的结果
Table 4 LiC configuration results under different methods

	场景B1	场景B2	场景B3	场景B4	场景B5
LiC 容量配置结果（MW/MWh）	4.92/0.0943	10/0.16	6.87/0.21	-	-
初始投资（万元）	1589.1	3019.2	2086.2	-	1100
检修周期/a	7.12	7.86	6	6	6
K_p	5.03	5.27	5.12	4.24	5.41
年总收益（万元）	1752.4	1883.5	1814.8	1436.9	1927.5
年化净收益（万元）	1407.5	1316.3	1329.8	1191.7	1342.7

表5 不同方法下的抽蓄功率变化结果
Table 5 The pumped storage power results under different methods

	场景B1	场景B2	场景B3/B4
功率变化事件次数	11018	10891	14854
平均单次 $\Delta P/MW$	1.58	1.30	1.97
平均功率变化速率 $\Delta P/\Delta T/（MW/s）$	0.357	0.318	0.539
综合磨损值	1.10	1.01	1.31
大修周期/a	7.12	7.86	6

从表4~表5结果可知，在经济性方面，最优容量方案下年化净收益为1407.5万元，分别比经验容量方案和规则策略方案提高了6.9%和5.8%。年化净收益的提升主要源于两个方面：一是调频性能的提高带来的额外收益，二是延长检修周期降低了

全生命周期内抽蓄的检修成本。因此，相较于单抽蓄响应方案，所提方法的经济性提高了18.1%。

此外，与经验容量方案相比，所提方法的 LiC 容量有所降低。虽然这导致调频性能和年化收益略有下降，但同时也降低了 LiC 的配置成本，从而使年化净收益提升6.9%。相比于抽蓄功率不调整的场景 B3，经济性提升主要有两方面原因：一方面，所提方法在能量管理效率上优于规则策略；另一方面，通过降低抽蓄的年化检修成本，使年化净收益提高了约5.8%。结果表明，所提 LiC 容量配置方案在运行性能、经济性以及抽蓄寿命损耗等方面表现出较好的综合性能，尤其是年化净收益方面，优于经验容量方案和单抽蓄方案。

相比于配置锂电池的基于规则策略。由于基于规则的策略对锂电池，多数能量用了但是性能却提

高没多少。造成了锂电池的寿命衰减，这导致在项目期内需要更换3次，降低了其经济效益。使得场景A5比所提方法下的5.2%。虽然LiC的初始投资成本较大，但依然相比于场景A5具有一定的优势。

由于场景B5采用基于规则的响应策略，即锂电池用于补偿抽蓄剩余缺额功率，导致大量能量被消耗而系统性能提升有限，同时加速了电池寿命衰减。这使得在项目期内需要更换锂电池3次，降低了整体经济效益。所提方法比场景B5的年化净收益提高了4.8%。尽管LiC的初始投资成本高于锂电池，但其循环寿命显著更长，可避免项目周期内频繁更换所带来的额外成本。结合所提LiC功率补偿策略，使其在全寿命周期内表现出更优的经济性。

在抽蓄磨损方面，最优容量方案在功率变化事件次数、平均单次功率变化及平均功率变化速率等指标上均介于经验容量方案与单抽蓄方案之间。通过构建的磨损模型结果可知，所提方案的磨损值为1.10，介于经验容量方案的1.01和单抽蓄方案的1.31。这使得相应的检修周期延长至7.12年，比单抽蓄方案增加了1.12年。这主要由于经济性目标驱动的容量配置，使经济性目标与运行策略、容量配置相耦合。在考虑LiC配置成本的同时，通过合理配置LiC的容量延长抽蓄检修周期，减少全寿命周期的检修次数，从而提高联合系统的年化经济效益。该结果表明，所提出的双层LiC容量配置方法能够兼顾容量配置的经济性与运行策略。同时，通过量化抽蓄机组的寿命磨损，为LiC容量配置提供了依据，同时可为检修计划制定及系统经济成本评估提供量化参考。

5 结 论

为提升抽蓄机组参与AGC的性能与经济性，本文引入锂电容协同抽蓄运行，提出了基于自适应模型预测控制的LiC-抽蓄的功率分配策略，并计及抽水蓄能年化磨损成本对LiC进行容量配置，实现了联合系统调频性能与经济性的协同提升。主要结论如下：

(1) 以LiC的SOC偏差、抽蓄功率变化及AGC跟踪误差最小为目标，提出了多目标下的LiC-抽蓄联合系统响应AGC指令的模型预测控制策略。进一步，针对LiC能量受限，易频繁退出导致系统输出突变问题，提出一种MPC权重自适应调

整方法，以提升AGC跟踪性能与运行平滑性。算例结果表明，所提自适应MPC策略下的一日调频收益较配置LiC前提高了21.4%。日运行性能 K_p 值也较固定参数MPC和规则策略分别提高了4.56%和8.87%。同时，抽蓄功率变化 ΔP 及变化速率 $\Delta P/\Delta T$ 均明显降低，从而有效降低了抽蓄磨损。

(2) 在此基础上，分析了抽蓄核心零部件导叶、叶片及轴承的磨损机理，并构建了以机组功率变化量 ΔP 和变化率 $\Delta P/\Delta T$ 为决策变量的抽蓄磨损模型，以对抽蓄运行磨损定量评估。进一步，提出了计及调频性能的LiC容量配置模型。最后通过容量配置层与运行策略层联合迭代，得到LiC的最优容量方案。算例结果表明，在经济性方面，最优容量方案下年化净收益分别比经验容量方案和规则策略方案提高了6.9%和5.8%。相较于单抽蓄方案，抽蓄磨损降低了23%，同时收益提高了21.9%，使得联合系统较单抽蓄方案下的净收益提高了18%。

参 考 文 献

- [1] Merve Bulut, Evrencan Özcan, How to build a state-of-the-art battery energy storage market? Challenges, opportunities, and future directions, *Journal of Energy Storage*, 2024, 86, 111174.
- [2] 徐彩莹,唐毓振,李秋雨,等.用于电力系统调频的超级电容储能系统[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(8): 3078-3089.
XU C Y, TANG Y Z, LI Q Y, et al. Supercapacitor energy storage systems for frequency regulation applications in power systems [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(8): 3078-3089.
- [3] 国家能源局. 加快推动新型储能产业发展[EB/OL]. (2024-05-24). https://www.nea.gov.cn/2024-05/24/c_1310775889.htm
National Energy Administration. (2024). Accelerating the Development of New Energy Storage Industry. https://www.nea.gov.cn/2024-05/24/c_1310775889.htm.
- [4] 国家能源局. 2025年能源工作指导意见政策解读[EB/OL]. (2025-02-27) <https://www.nea.gov.cn/20250227/105a07a9be2c4727b7fe12c11c7b84cf/c.html>
National Energy Administration. (2025). Policy Interpretation of the 2025 Energy Work Guidelines. <https://www.nea.gov.cn/20250227/105a07a9be2c4727b7fe12c11c7b84cf/c.html>.
- [5] LIU W, ZHENG Y, ZHOU X, et al, Enhanced frequency regulation in pumped hydro storage integrated power systems: An innovative modeling method and GPC-PI control strategy[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 103, Part A, 114251.
- [6] 王圣,延寒,李健,等. 计及电池寿命的储能系统参与二次调频功率分配策略[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(9): 95-101.
WANG S, YAN H, LI J, Power distribution strategy of energy storage system auxiliary secondary frequency regulation

- considering battery life [J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(9): 95-101.
- [7] 孔妍妍, 张熊, 安亚斌, 等. MOF衍生多孔碳基材料的制备及其在锂离子电池负极中的应用进展[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(8): 2665-2678.
- KONG Y Y, ZHANG X, AN Y B, et al. Recent advances in preparation of MOF-derived porous carbon-based materials and their applications in anodes of lithium-ion capacitors[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(8): 2665-2678.
- [8] 徐艺, 李晨, 任祥, 等. 低温锂离子电池研究进展[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(8): 1509-1520.
- XU Y, LI C, REN X, et al. Research progress in low-temperature lithium-ion capacitors[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(8): 1509-1520.
- [9] 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 L L, SI R H, CHANG Q Q, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation based on area control error[J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41 (8): 1129-1136.
- [10] 章艳, 沈杨, 朱瑞, 等. 面向东北地区调频指标两段式火储联合调频策略[J]. *电网技术*, 2025, 49(9): 3623-3632, 中插 21-中插 27.
- ZHANG Y, SHEN Y, ZHU R, et al. Two-stage frequency regulation strategy of the combined heat and power plant with energy storage basing regulation indicators in Northeast grid[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(9): 3623-3632, 中插 21-中插 27.
- [11] 秦昊, 秦立军, 白雪辰, 等. 辅助抽水蓄能调频的飞轮控制策略[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(12): 3915-3925.
- QIN H, QIN L J, BAI X C, et al. A control strategy of flywheel energy storage system participating frequency regulation with pumped storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(12): 3915-3925.
- [12] 段潇涵, 孙丹, 赵琛, 等. 计及调频能力和经济效益的储能集群多状态区间优化策略[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(5): 58-67.
- DUAN X H, SUN D, ZHAO C, Multi-state interval optimization strategy for energy storage clusters considering frequency regulation capability and economic benefits. *Automation of Electric Power Systems*. 2024.48(5):58-67.
- [13] 房方, 刘渝斌, 王冰玉, 等. 基于 NSGA-II 的飞轮-火电联合二次调频最优负荷分配策略[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(12): 79-88.
- FANG F, LIU Y B, WANG B Y, Optimal load allocation strategy of flywheel-thermal power coordinated secondary frequency regulation based on non-dominated sorting genetic algorithm-II. *Automation of Electric Power Systems*. 2024.48(12):79-88.
- [14] 荆锴, 吴依梦, 陈玮祺, 等. 基于 PSO-VMD 的电-氢混合储能容量优化配置[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(12): 4644-4653.
- JING K, WU Y M, CHEN W Q, et al. Optimized allocation of electric-hydrogen hybrid energy storage capacity based on PSO-VMD[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(12): 4644-4653.
- [15] 牟雪鹏, 蔡权, 周依然, 等. 基于深度强化学习和多目标粒子群优化的储能容量配置方法[J]. *储能科学与技术*, 2026, 15(2): 583-590.
- MOU X P, CAI Q, ZHOU Y R, et al. Energy storage capacity configuration method based on deep reinforcement learning and multi-objective particle swarm optimization[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2026, 15(2): 583-590.
- [16] 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 J H, WU P Y, HUANG F Q, 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.
- [17] 杨鼎平, 魏平. 基于小波变换的混合储能二次调频容量优化配置方法研究[J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(10): 24-35.
- YANG D Q, WEI P, A Study on the optimal capacity configuration method for secondary frequency regulation of hybrid energy storage based on wavelet transform[J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(10): 24-35.
- [18] Ta Z, Min Y, Qin W, Capacity allocation method for a hybrid energy storage system participating in secondary frequency regulation based on variational mode decomposition. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 167. 2025, 110631.
- [19] 山西能源监管办公室. 山西电力二次调频辅助服务市场交易实施细则 (V15.0) [EB/OL]. (2025-04-22) [2026-03-23]. <https://sxb.nea.gov.cn/xxgk/zcfb/202504/P020250429646208103709.pdf>
- Shanxi Energy Regulatory Office. Implementation Rules for Secondary Frequency Regulation Ancillary Service Market in Shanxi Power System (V15.0) [EB/OL]. (2025-04-22) [2026-03-23]. <https://sxb.nea.gov.cn/xxgk/zcfb/202504/P020250429646208103709.pdf>