DOI: 10.19666/j.rlfd.202605032

# 基于时序差异化的储热型光热电站调频控制策略

王 斌，张广太，李国梁，张海雄，沈伟涛
(甘肃龙源新能源有限公司，甘肃 兰州 730000)

［摘 要］【目的】针对光伏-光热-储能联合调频系统中响应时序未解耦、控制指令易产生内耗及储能荷电状态易发散的问题，提出一种基于状态象限感知与自适应频域解耦的时序协同控制策略，以提升系统抗扰动能力。【方法】首先，在储能控制回路中引入由频率变化率驱动的自适应高通滤波器，实现暂态高频阻尼与稳态低频支撑的时序解耦；其次，针对长时稳态偏置，提出基于 Sigmoid 函数的非对称象限隔离机制，通过频率与荷电状态(State of Charge, SOC)特征乘积阻断反向功率反馈，防止储能 SOC 漂移。【结果】仿真结果表明：在阶跃扰动及低惯量工况下，所提策略有效抑制了系统暂态极值，最大频率偏差与频率变化率的改善幅度分别达 21.6%和 43.2%，并降低了光热机组主蒸汽压力越限风险；在连续随机波动场景下，储能等效动作里程降低 85.4%，充放电深度收敛至 0.007%，SOC 稳态漂移量低于 0.001%，实现渐近稳定；在光热出力受限工况下，光伏备用容量弥补稳态有功缺口，频率绝对误差积分降低 32.3%。【结论】所提策略有效缓解了暂态支撑与稳态恢复间的功率响应冲突，提升了多源异构设备在复杂运行边界下的动态互补与频率稳定支撑能力。

［关 键 词］光伏-光热-储能联合系统；协同调频；自适应频域解耦；状态象限感知；荷电状态恢复

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码.

# Coordinated frequency regulation strategy for PV-CSP-BESS hybrid systems based on state quadrant perception and adaptive frequency-domain decoupling

WANG Bin, ZHANG Guangtai, LI Guoliang, ZHANG Haixiong, SHEN Weitao
(Gansu Longyuan New Energy Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** [Objective] In photovoltaic-concentrating solar power-battery energy storage system (PV-CSP-BESS) coordinated frequency regulation, unresolved response sequence coupling, control instruction conflicts, and state-of-charge (SOC) divergence remain critical challenges. This paper proposes a temporal coordinated control strategy based on state quadrant perception and adaptive frequency-domain decoupling to enhance system disturbance rejection capability. [Methods] First, an adaptive high-pass filter driven by the rate of change of frequency (RoCoF) is introduced into the BESS control loop to achieve temporal decoupling between transient high-frequency damping and steady-state low-frequency support. Second, to address long-term steady-state bias, a non-symmetric quadrant isolation mechanism based on Sigmoid function is proposed. This mechanism blocks reverse power feedback through the product of frequency deviation and SOC features, effectively preventing SOC drift in BESS. The adaptive time constant of the high-pass filter is dynamically adjusted in real time according to RoCoF magnitude, ensuring that BESS provides enhanced power support during severe transient disturbances while smoothly withdrawing during frequency recovery phases. The quadrant perception module monitors the algebraic signs of frequency deviation and RoCoF simultaneously: when both share the same sign, the system is in a perturbed state requiring immediate BESS intervention; when their signs differ, the system enters the recovery phase and

收 稿 日 期：2026-05-12 修 回 日 期：2026-07-01 接 受 日 期：2026-07-06 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（52266012）；中央引导地方科技发展资金项目（25ZYJA014）
Supported by: National Natural Science Foundation of China (52266012); Central Government-Guided Local Science and Technology Development Fund (25ZYJA014)
第一作者简介：王斌（1986），男，高级工程师，主要研究方向为电气工程，974032415@qq.com。

BESS should withdraw to avoid power conflicts with CSP, thereby suppressing reverse power injection. [Results] Simulation results demonstrate that under step disturbances and low-inertia conditions, the proposed strategy effectively suppresses system transient extrema, with improvements in maximum frequency deviation and RoCoF reaching 21.6% and 43.2%, respectively, while reducing the risk of CSP main steam pressure violations. Under continuous random fluctuation scenarios, the equivalent cycling mileage of BESS decreases by 85.4%, the depth of discharge converges to 0.007%, and the steady-state SOC drift remains below 0.001%, achieving asymptotic stability. In scenarios where CSP output is constrained, photovoltaic reserve capacity is triggered to compensate for the steady-state active power gap, reducing the integral absolute error of frequency by 32.3%. Comparative analysis reveals that fixed-parameter decoupling control exhibits transient improvement at the cost of overall performance deterioration, whereas the proposed adaptive mechanism maintains robust performance across diverse operating boundaries. [Conclusion] The proposed strategy effectively mitigates power response conflicts between transient support and steady-state recovery, enhancing the dynamic complementarity and frequency stability support capability of multi-source heterogeneous equipment under complex operating boundaries. The approach provides a systematic solution for temporal coordination in hybrid renewable energy systems with diverse dynamic characteristics.

**Key words:** PV-CSP-BESS hybrid system; coordinated frequency regulation; adaptive frequency-domain decoupling; state quadrant perception; state of charge (SOC) recovery

随着高比例新能源的接入，电力系统惯量持续下降，频率稳定面临严峻挑战[12]。太阳能光热发电(concentrated solar power, CSP)采用汽轮机-同步发电机架构，可为电网提供真实的物理惯量与灵活的旋转备用[34]。

在 CSP 调频研究方面，文献[5-6]建立了 CSP 简化动态模型，指出其一次调频能力受限于机组蓄热状态；文献[7-9]针对熔盐储热及超临界热力循环的建模进一步刻画了热工水力环节的传输延迟特性。在此基础上，文献[10]将频率安全约束内嵌至机组组合模型以量化 CSP 的频率支撑价值，但属离线优化，难以适应实时扰动；文献[11]利用动态矩阵控制优化 CSP 热力响应，但控制器参数依赖线性化工作点，宽工况适应性不足；文献[12]验证了 CSP 通过调速器回路提供惯量支撑的可行性，但未考虑主蒸汽压力在强暂态扰动下的越限风险。上述研究表明，CSP 热工水力环节的物理延迟仍是限制其快速响应的主要制约因素。

为弥补 CSP 暂态响应的不足，电池储能系统(battery energy storage system, BESS) 与光伏(photovoltaic, PV)的协同引入成为关键路径。文献[13]与文献[14-17]从辅助服务市场与容量配置角度论证了 PV-CSP-BESS 同址部署的互补潜力，但聚焦于规划层而未涉及暂态控制协调。在 PV-BESS 协同调频领域，文献[18]提出 PV 通过虚拟惯量控制提供有功支撑，但虚拟惯量参数固定，难以适应多时间尺度扰动；文献[19-21]设计了光伏预留备用与储能下垂协调的频率支撑机制，有效改善了暂态频率指标，但均未考虑储能电池荷电状态(state of charge, SOC)长期漂移问题。文献[22-23]采用鲁棒控制与滑模控制，文献[24-26]探讨分布式协同控制实现多源系统抗扰设计，但上述研究均基于固定参数架构，未能实现调频指令在不同频段间的动态解耦。

为解决异构设备在响应速度与能量密度上的物理冲突，多时间尺度解耦控制逐渐成为前沿。文献[27]提出基于频域分配的风储协同调频策略，通过高低通滤波器按频段分配任务，降低了储能充放电深度，但滤波时间常数离线整定，无法随扰动强度自适应调整；文献[28]设计了混合储能多时间尺度有功控制框架，但未涉及含同步机组的热-机-电耦合问题；文献[29]探讨了动态下垂的多时间尺度一次调频应用，但缺乏对频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)信息的利用，快速暂态灵敏度不足。现有频域解耦研究多局限于电力电子层面，尚未与热-机-电多物理场约束深度结合。

若未能实现充分解耦，联合系统将面临两大挑战。一方面，BESS 长期跟随低频调频指令将导致 SOC 持续漂移。文献[30]提出兼顾 SOC 恢复与调频的分层控制，但恢复过程与暂态功率需求存在时序冲突；文献[31]设计了 SOC 与一次调频解耦控制，但依赖预设死区阈值，连续小幅扰动下易失效；文献[32-33]利用逻辑函数与自恢复机制实现 SOC 渐近收敛，但固定恢复速率无法适应扰动强度变化。另一方面，CSP 被迫跟随高频暂态指令将引发调速汽门频繁动作与主蒸汽压力剧烈波动。文献[34]引入模型预测控制在线优化汽门开度轨迹，文献[35-36]提出主动偏焦与双层调速协调架构，降低了蒸汽

参数波动，但均属 CSP 内部热工侧优化，未能剥离电网侧高频冲击的扰动传递。

针对上述问题，本文提出一种基于状态象限感知与非对称频域解耦的 PV-CSP-BESS 联合系统时序协同调频控制策略，核心思路在于建立滤波时间常数与系统实时动态状态的在线自适应映射，改变多设备按同比例同步响应全频段频率偏差的传统做法，具体工作包括：

1）构建包含 CSP 主蒸汽压力瞬态约束与 BESS SOC 动态演化的综合运行评估模型。

2）在 BESS 控制回路中引入基于 RoCoF 瞬态前馈的自适应高通滤波器，结合 Sigmoid 函数象限感知拦截机制，形成“BESS 暂态支撑—CSP 稳态承接—PV 备用补偿”的时序协同架构。

3）在标称阶跃、低惯量边界、连续随机波动与极端热力学约束四类工况下验证表明，该策略将最大频偏改善 17.0%~27.9%，BESS 等效动作里程降低 85.4%，CSP 主蒸汽压力安全裕度提升。

# 1 联合系统多物理场动态模型

PV-CSP-BESS 联合系统在参与电网一次调频时，其动态响应跨越电力电子变流器的数十毫秒级、同步发电机转子的秒级到热工水力系统的分钟级等多个时间尺度。为准确评估其宽频带扰动下的动态性能，需构建涵盖各单元迟滞特性与运行边界约束的综合动态模型。

## 1.1 光热机组热工水力与机械传动模型

CSP 系统在滑压运行模式与气象条件变化下，其蒸汽发生速率呈现显著非线性与大迟滞特征。本文提取 CSP 电站蒸汽发生系统(steam generation system，SGS)及汽轮机的核心动态模型以支撑控制策略设计。

### 1.1.1 SGS 与热释放演化

SGS 是 CSP 系统热-功转换的核心组件。基于额定工况归一化方程，熔盐侧供回热温差 $\Delta T_{\mathrm{salt}}$ 如式(1)所示，以反映暂态过程中汽包与主蒸汽管道间的容积效应，模型同步引入压损方程。

定义熔盐侧的供、回热温差为 $\Delta T_{\mathrm{salt}}$：

$$\Delta T_{salt} = T_{salt,tank} - T_{salt,evap,out} \tag{1}$$

定义水侧的系统综合等效焓降为 $\Delta h_{\mathrm{sys}}$：

$$\Delta h_{sys} = (h_{TP,HP,in} - h_{TP,evap,in}) + K_m (h_{TP,LP,in} - h_{TP,HP,out}) \tag{2}$$

主蒸汽流量标幺值方程可精简为：

$$\frac{\dot{m}_{main}}{\dot{m}_{main,rated}} = \frac{\dot{m}_{hotsalt}\Delta T_{salt}}{\dot{m}_{hotsalt,rated}\Delta T_{salt,rated}} \cdot \frac{\Delta h_{sys,rated}}{\Delta h_{sys}} \tag{3}$$

此外，结合主蒸汽管网的流体阻力特性，汽包至汽轮机入口的压降方程为：

$$\Delta p = p'D - p'T = \frac{\xi}{2\rho A cross^2 prated}(\dot{m}_s')^2 = \left(\frac{\dot{m}'s}{Kloss}\right)^2 \tag{4}$$

式中：$\dot{m}_{\mathrm{main}}$与 $\dot{m}_{\mathrm{hotsalt}}$分别为主蒸汽与热熔盐的质量流量，kg/s；$\Delta T_{\mathrm{salt}}$ 为熔盐侧供回热温差，K；$\Delta h_{\mathrm{sys}}$ 为水侧系统综合等效焓降，kJ/kg；$K_{\mathrm{m}}$ 为无量纲修正系数；下标 rated 表示各物理量在额定工况下的基准值；$p'_{\mathrm{D}}$ 与 $p'_{\mathrm{T}}$ 分别为汽包压力与主蒸汽压力的标幺值；$\Delta P$ 为压降，Pa；$\rho$ 为蒸汽密度，kg/m³；$A_{\mathrm{cross}}$ 为管道截面积，m²；$\xi$ 为无量纲阻力系数；$\dot{m}'_{\mathrm{s}}$ 为汽包出口侧的蒸汽质量流量，kg/s；$K_{\mathrm{loss}}$为流动阻力系数，kg/s。

由式(3)和式(4)可知，当频率跌落驱使调速汽门快速开大时，熔盐热惯性导致蒸汽生成速率无法瞬时匹配，管网质量失衡将引发主蒸汽压力 $p'_{\mathrm{T}}$ 的瞬态跌落。该压力跌落易触发低压保护进而导致调频失效。

由于熔盐换热热惯性时间常数量级远大于一次调频窗口，暂态分析中可将其视为准稳态热源。

据此，对式(4)在标称工作点处进行小信号线性化，将 CSP 机组等效为图 1 所示的一阶惯性环节，在保留主蒸汽压力约束的同时简化后续控制设计。

### 1.1.2 SGS 机械传动模型

基于绝热等熵膨胀假设与理想气体状态方程，汽轮机的机械输出功率可表示为式(5)。结合转子运动方程，同步发电机的动态行为如式(6)所示。

$$P_m = \eta c_p \dot{m}_{in} T_{in}\left[1 - \left(\frac{p_{out}}{p_{in}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \tag{5}$$

$$\frac{2H_{CSP}}{\omega_{rated}}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e - K_D\Delta\omega \tag{6}$$

式中：$\eta$ 为汽轮机效率；$T_{\mathrm{in}}$为进口蒸汽温度；$p_{\mathrm{in}}$与 $p_{\mathrm{out}}$分别为级组进、出口压力；$k$ 为多级组系数；$H_{\mathrm{CSP}}$ 为 CSP 机组惯性时间常数；$P_{\mathrm{m}}$与 $P_{\mathrm{e}}$分别为机械功率与电磁功率；$K_{\mathrm{D}}$ 为阻尼转矩系数；$\Delta\omega$ 为转子转速变化量标幺值。

### 1.2 电池储能与光伏并网外特性模型

BESS 与 PV 通过全功率电力电子器件并网，具备毫秒级响应能力。光伏系统预留固定比例($\eta_{res}$=3%)有功备用，在频率偏差或 RoCoF 越限时经前馈控制释放以补偿功率缺额。PV 有功动态增量 $\Delta P_{pv}$ 及 BESS 有功动态增量 $\Delta P_{BESS}$ 分别如式(7)和式(8)所示，BESS 的 SOC 动态演化受额定容量 $E_{cap}$ 约束，如式(9)所示。

$$\Delta P_{PV}=\frac{1}{1+sT_{PV}}\left(-K_{PV}\cdot\Delta f-M_{PV}\cdot\frac{d\Delta f}{dt}\right) \tag{7}$$

$$\Delta P_{BESS}=\frac{1}{1+sT_{BESS}}\Delta P_{BESS}^{ref} \tag{8}$$

$$SOC(t)=SOC(t_0)-\frac{1}{E_{cap}}\int_{t_0}^{t}P_{BESS}(\tau)d\tau \tag{9}$$

由式(7)至式(9)可知，PV 与 BESS 具备宽暂态控制带宽，可迅速弥补 CSP 机组响应迟滞；然而 SOC 与输出功率的时间积分强耦合，在长时准稳态偏差下易发生持续漂移，构成 BESS 参与长时调频的主要制约因素。

### 1.3 联合系统多主体控制目标耦合分析

基于单质心等效聚合模型如图 1 所示，当系统受有功负荷扰动时，其频率偏差 $\Delta f$ 的动态响应由多源异构设备的注入功率共同决定，如式(10)所示：

$$2H_{sys}\frac{d\Delta f}{dt}=\Delta P_{PV}+\Delta P_{BESS}+\Delta P_{CSP}-\Delta P_L-D\Delta f \tag{10}$$

式中：$H_{sys}$为区域电网等效惯性时间常数；$D$ 为负荷频率调节效应系数；$\Delta P_{CSP}$为 CSP 机组的实际机械功率增量。

假设系统初始处于稳态，对式(10)两侧进行拉普拉斯变换，映射至 $s$ 域：

$$2H_{sys}s\Delta f(s)+D\Delta f(s)=\Delta P_{\Sigma}(s)-\Delta P_L(s) \tag{11}$$

整理可得系统频率偏差在频域的传递函数表达式：

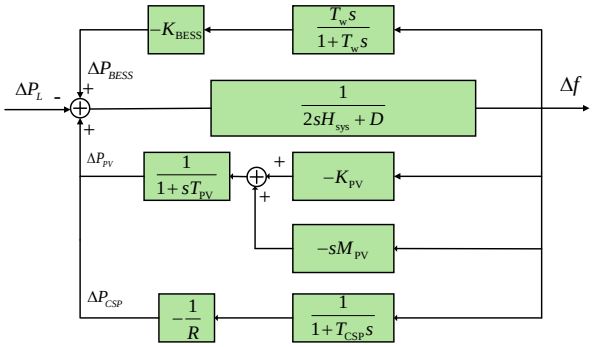



**图 1 光伏-光热-储能联合系统频域解耦协同调频控制框图**
**Fig.1 Block Diagram of Frequency-Domain Decoupling Coordinated Frequency Regulation Control for PV-CSP-BESS Hybrid System**

$$\Delta f(s)=\frac{1}{2H_{sys}s+D}\left[\Delta P_{\Sigma}(s)-\Delta P_L(s)\right] \tag{12}$$

对式(12)进行反拉普拉斯变换，得系统频率偏差的时域表达式(13)。对式(13)关于时间求导，得频率变化率的时域演化方程(14)。

$$\Delta f(t)=\frac{\int_0^t e^{-\frac{D}{2H_{sys}}(t-\tau)}\left[\Delta P_{\Sigma}(\tau)-\Delta P_L(\tau)\right]d\tau}{2H_{sys}} \tag{13}$$

$$\frac{d\Delta f(t)}{dt}=\frac{1}{2H_{sys}}\left[\Delta P_{\Sigma}(t)-\Delta P_L(t)\right]-\frac{D}{4H_{sys}^2}\int_0^t e^{-\frac{D}{2H_{sys}}(t-\tau)}\left[\Delta P_{\Sigma}(\tau)-\Delta P_L(\tau)\right]d\tau \tag{14}$$

基于上述时域解析式(13)与导数方程(14)，可推演并评估一次调频的三个关键动态指标：

1）RoCoF：在扰动发生初瞬，积分项为零。将其代入式(14)可消去积分项，得到系统初始频率变化率：

$$RoCoF=\left.\frac{d\Delta f(t)}{dt}\right|_{t=0^+}=\frac{\Delta P_{\Sigma}(0^+)-\Delta P_L(0^+)}{2H_{sys}} \tag{15}$$

2）频率最低点：当系统频率跌落至极小值 $t=t_{nadir}$时，将此极值条件代入式(14)并移项：

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}(t_{nadir})-\Delta P_L(t_{nadir})}{D}=\frac{\int_0^{t_{nadir}} e^{-\frac{D}{2H_{sys}}(t_{nadir}-\tau)}\left[\Delta P_{\Sigma}(\tau)-\Delta P_L(\tau)\right]d\tau}{2H_{sys}} \tag{16}$$

可得最大频率偏差绝对值|Δ$f_{\mathrm{nadir}}$|满足的代数关系：

$$|\Delta f_{nadir}|=\left|\Delta f(t_{nadir})\right|=\frac{\Delta P_L(t_{nadir})-\Delta P_\Sigma(t_{nadir})}{D} \tag{17}$$

3）准稳态频率偏差：当一次调频过程进入准稳态阶段，可利用拉普拉斯变换的终值定理对频域方程(10)进行求解：

$$\Delta f_{ss}=\lim_{t\to\infty}\Delta f(t)=\lim_{s\to 0}s\Delta f(s)=\lim_{s\to 0}s\frac{\Delta P_\Sigma(s)-\Delta P_L(s)}{2H_{sys}s+D} \tag{18}$$

同时，在系统达到稳态时，各电源有功增量收敛于常量 $\Delta P_\Sigma(\infty)$。代入式(18)化简可得：

$$|\Delta f_{ss}|=\frac{\Delta P_L(\infty)-\Delta P_\Sigma(\infty)}{D} \tag{19}$$

### 1.4 多目标的固有物理约束冲突与时序解耦的必要性

综合上述多物理场动态方程可知，传统同比例协同控制架构在多目标优化中存在以下制约关系：

1）暂态支撑与 CSP 热力安全的制约：CSP 机组承担暂态功率缺口时，受熔盐换热惯性影响，主蒸汽压力将发生瞬态跌落，易触发低压保护导致调频失效。

2）稳态支撑与 BESS 循环寿命的制约：BESS 持续响应准稳态频率偏差将使其 SOC 随时间漂移，充放电深度增加进而加速电池老化。

3）暂态支撑与 SOC 恢复的耦合冲突：常规 SOC 恢复反馈在暂态初期驱动 BESS 吸收有功，削弱下垂阻尼作用，可能引发频率二次跌落。

综上，传统协同控制中各设备功率分配与其动态响应特性存在结构性失配。为缓解上述多物理场约束冲突，需依据设备动态特性实现频域解耦与时序差异化功率分配。

## 2 联合系统动态差异化时序协同控制策略

基于第 1 节分析的多物理场约束冲突，本文提出基于 Sigmoid 函数状态感知与动态频域解耦的时序协同控制策略，将联合系统功率响应划分为三个时域阶段。

### 2.1 各时间尺度梯队预设与响应机理

当系统频率偏差越限，记为 $t_{\mathrm{on}}$，各调频单元依据其动态响应特性依次切入，其作用区间在时域上形成交叠：

$$\begin{cases}T_{Stage_0}\in[t_{on},t_{on}+\Delta t_1]\\ T_{Stage_I}\in[t_{on},t_{on}+\Delta t_2]\\ T_{Stage_II}\in[t_{on}+\Delta t_1,t_{off}]\end{cases} \tag{20}$$

式中：$\Delta t_1$与 $\Delta t_2$分别表征暂态快速响应与向热力学稳态过渡的时间尺度；$t_{\mathrm{off}}$ 为频率恢复至死区内的退出时刻。

联合系统时序协同响应过程分为 3 个阶段：

阶段 0：CSP 机组释放转子动能，PV 系统基于宽频带特性注入虚拟惯量，两者共同抑制 RoCoF。

阶段 I：BESS 通过暂态高通滤波器提取高频频率偏差并输出有功功率，弥补 CSP 机组机械功率爬坡初期的缺口，抑制频率最低点。

阶段 II：CSP 机组依据其低通滤波特性逐步承担稳态有功缺口，同时 BESS 在维持系统有功平衡的条件下，完成 SOC 的平滑恢复并逐步退出调频。

### 2.2 调频边界约束与自适应控制律设计

为避免多物理场约束导致的调节性能恶化，BESS 与 CSP 机组的控制参数优化需满足以下安全边界，并据此设计自适应控制律，如图 2 所示。

#### 2.2.1 储能系统多物理场边界约束评估

在调频周期内，BESS 的调度能量与 SOC 动态需严格满足裕度约束：

$$\int_{t_{on}}^{t_{off}}\Delta P_{BESS}(t)dt\le E_{BESS}^{margin} \tag{21}$$

$$SOC_{min}\le SOC(t_{off})\le SOC_{max} \tag{22}$$

式中：$E_{\mathrm{BESS}}^{\mathrm{margin}}$ 为当前最大可用能量裕度；$SOC_{\mathrm{min}}$ 与 $SOC_{\mathrm{max}}$ 分别为防过充/过放的 SOC 限值。

在阶段 II 稳态支撑期间，需限制 CSP 机组调速汽门开度，防止主蒸汽压力跌落触发低限保护：

$$\max|\Delta p_{T'}(t)|\le\Delta P_{steam}^{limit} \tag{23}$$

式中：$\Delta P_{\mathrm{steam}}^{\mathrm{limit}}$为主蒸汽系统允许的最大压力跌落幅值。

#### 2.2.2 基于边界约束的自适应控制律解算

1）高通滤波时间常数动态调整

为抑制频率波动率偏差，暂态初期需增强储能的支撑力度。为提升滤波器对暂态冲击的灵敏度，同时避免电网微小测量噪声引发变流器频繁振荡，本文在自适应机制中引入了带有 RoCoF 前馈死区的动态方程。

首先，计算经过阈值死区后的有效频率变化率 $RoCoF_{\mathrm{eff}}$：

$$\mathrm{RoCoF}_{\mathrm{eff}}=\max\left(0,\left|\frac{d\Delta f}{dt}\right|-R_{\mathrm{db}}\right) \tag{24}$$

随后，将高通滤波器时间常数的目标值 $T_{\omega,\mathrm{target}}$ 设计为受 $RoCoF_{\mathrm{eff}}$ 驱动的动态函数，并引入一阶惯性低通滤波环节对其进行平滑处理，防止目标参数高频跳变引起系统内部振荡。最终实际作用于控制系统的高通滤波时间常数 $T_\omega$ 的时域动态方程如下：

$$T_{\omega,\mathrm{target}}=T_{\omega 0}+K_r\cdot\mathrm{RoCoF}_{\mathrm{eff}} \tag{25}$$

$$\frac{dT_\omega}{dt}=\frac{T_{\omega,\mathrm{target}}-T_\omega}{T_{\mathrm{filter}}} \tag{26}$$

式中：$R_{\mathrm{db}}$ 为频率变化率死区阈值，取 0.002 Hz/s；$T_{\omega 0}$ 为预决策标称时间常数；$K_{\mathrm{r}}$ 为前馈自适应增益；$T_{\mathrm{filter}}$ 为一阶惯性平滑时间常数。当|d$f$/d$t$|增大并超越死区时，$T_\omega$ 随之平滑增加，暂止频率向低频移动以增强暂态阻尼；该死区机制在小幅波动时有效切断前馈，抑制了储能的无效动作里程。

基于上述动态调整的时间常数 $T_\omega$，高通滤波器的时域状态空间表达为：

$$\frac{dx_{\mathrm{bess}}}{dt}=\frac{\Delta f-x_{\mathrm{bess}}}{T_\omega} \tag{27}$$

$$P_{\mathrm{HPF}}^{*}=-K_{\mathrm{BESS}}(\Delta f-x_{\mathrm{bess}}) \tag{28}$$

式中：$x_{\mathrm{bess}}$ 为高通滤波器内部状态变量；$P_{\mathrm{HPF}}^{*}$ 为原始暂态功率指令；$K_{\mathrm{BESS}}$ 为储能系统增益系数。

高通滤波器在电网频率收复阶段存在反向功率输出问题，可能导致储能在欠频状态下误吸收有功。为此，本文引入基于平滑阶跃函数的象限感知权重系数 $k_{\mathrm{quad}}$，对 $P_{\mathrm{HPF}}^{*}$ 进行实时修正：

$$k_{\mathrm{quad}}=1-\alpha\cdot\left[\frac{1+\tanh(\gamma_q\cdot\Delta f\cdot P_{\mathrm{HPF}}^{*})}{2}\right] \tag{29}$$

$$P_{\mathrm{HPF}}=k_{\mathrm{quad}}\cdot P_{\mathrm{HPF}}^{*} \tag{30}$$

式中：$\alpha$ 为功率压制系数，取 0.95；$\gamma_{\mathrm{q}}$ 为象限灵敏度因子，取 1 000。当 $\Delta f\cdot P_{\mathrm{HPF}}^{*}>0$ 时，系统处于反物理响应区域，$k_{\mathrm{quad}}\to 1-\alpha=0.05$，反向功率被强效抑制至 5%；当乘积为负时，$k_{\mathrm{quad}}\to 1$，暂态功率指令无衰减通过。该机制有效避免了频率恢复阶段储能反向出力对系统整体阻尼的弱化。

2）基于象限感知的非对称 SOC 恢复机制

针对调频引起的 SOC 偏移，本文提出基于柔化 Sigmoid 函数的非对称 SOC 恢复机制。SOC 恢复功率指令 $P_{\mathrm{BESS_rec}}$ 设计为：

$$P_{\mathrm{BESS_rec}}=K_{\mathrm{rec}}\cdot\Delta\mathrm{SOC}\cdot\lambda_{\mathrm{soc}} \tag{31}$$

$$\lambda_{\mathrm{soc}}=\frac{1}{1+\exp[\lambda_{\mathrm{sig}}\cdot\Delta f\cdot\tanh(\gamma_{\mathrm{s}}\cdot\Delta\mathrm{SOC})]} \tag{32}$$

式中：$K_{\mathrm{rec}}$ 为 SOC 恢复反馈增益，取 2.0；$\lambda_{\mathrm{sig}}$ 为 Sigmoid 曲率斜率增益；$\gamma_{\mathrm{s}}$ 为 SOC 零点柔化因子，取 200。

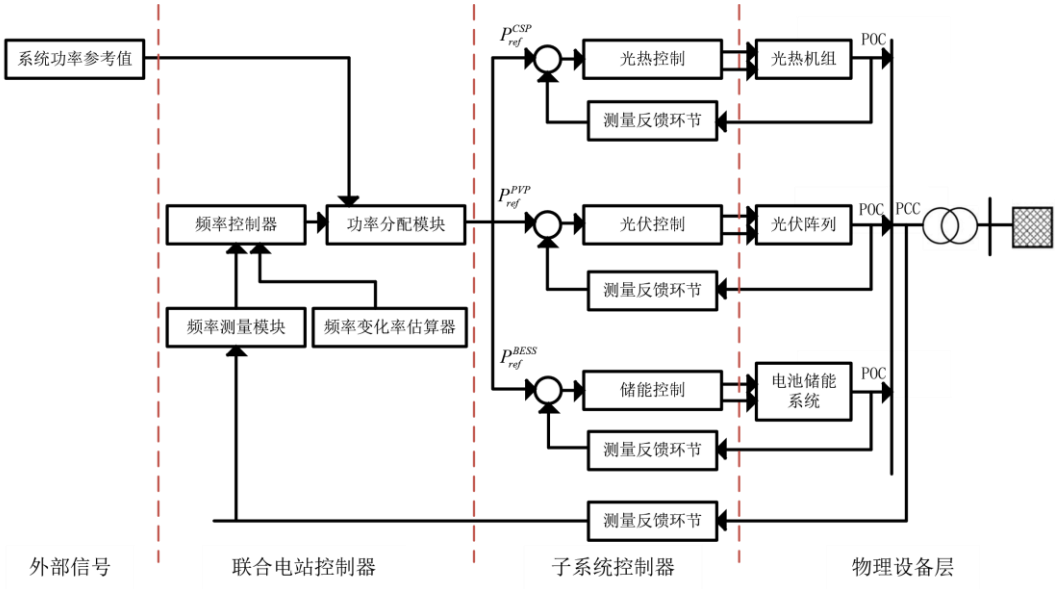



图 2 光伏-光热-储能联合发电系统分层协同控制架构

**Fig.2 Hierarchical coordinated control architecture of the PV-CSP-BESS hybrid power generation system**

$\lambda_{\mathrm{soc}}$ 的设计实现了两方面功能：一方面，当频率偏低且 SOC 需充电时($\Delta f\cdot\tanh(\gamma s\cdot\Delta\mathrm{SOC})>0$)，$\lambda_{\mathrm{soc}}\to 0$ 抑制恢复功率，优先保障频率支撑；另一方面，tanh 函数替代传统 sgn 函数，在 ΔSOC 零点附近实现连续

平滑过渡，消除控制信号高频切换。

综合上述，BESS 的有功指令 $P_{\mathrm{BESS}}^{\mathrm{ref}}$重构为：

$$P_{\mathrm{BESS}}^{\mathrm{ref}} = P_{\mathrm{HPF}} + P_{\mathrm{BESS_rec}} = P_{\mathrm{HPF}} + K_{\mathrm{rec}} \cdot \Delta\mathrm{SOC} \cdot \lambda_{\mathrm{soc}} \tag{33}$$

式中，$P_{\mathrm{HPF}}$为经象限感知修正后的暂态功率指令。该架构达成暂态频率支撑与 SOC 恢复的多时间尺度解耦。

### 2.2.3 协同控制策略执行流程

结合上述时序解耦与边界自适应约束，联合系统控制策略执行流程如下：

参数整定与自适应驱动机制：基准控制参数根据 2.2.2 节时域灵敏度分析结果整定。运行中，BESS 频域配置参数由本地 RoCoF 前馈信号经式(24)驱动，SOC 恢复权重经式(32)由 Sigmoid 函数在线映射，二者均为纯代数运算，可在单个控制周期内完成更新。

在线时序响应：频率越限后多源设备按式(20)定义的时序切入。阶段 0-I 由 PV 与 BESS 提供暂态阻尼；阶段 II 由 CSP 承担稳态缺口，BESS 依据 $\lambda_{\mathrm{SOC}}$ 完成 SOC 平滑恢复。

## 3 仿真验证与结果分析

**表 1 联合仿真系统关键物理与控制参数**
**Tab.1 Key physical and control parameters of the co-simulation system**

| 系统参数 | 数值 |
|---|---|
| $P_{\mathrm{CSP}}$/MW | 50 |
| $R_{\mathrm{CSP}}$/(p.u./s) | 0.083 |
| $\Delta p_{\mathrm{min}}$/p.u. | -0.04 |
| $P_{\mathrm{PV}}$/MW | 30 |
| $\eta_{\mathrm{rsv}}$/% | 3 |
| $P_{\mathrm{BESS}}$/MW | 20 |
| $E_{\mathrm{BESS}}$/(MW·h) | 20 |
| $\mathrm{SOC}_{\mathrm{range}}$/% | 30~70 |
| $\mathrm{SOC}_{\mathrm{init}}$/% | 50 |
| $K_{\mathrm{D}}$ | 20 |
| $\Delta P_{\mathrm{L}}$/p.u. | 0.18 |
| $T_{\omega 0}$/s | 0.5 |
| $K_{\mathrm{r}}$ | 60.0 |
| $R_{\mathrm{db}}$/(Hz/s) | 0.002 |
| $K_{\mathrm{rec}}$ | 2.0 |

基于 IEEE 三机九节点标准测试系统，在 Simulink 平台搭建了计及空间电气距离与多机耦合动态的闭环仿真模型，如图 3 所示。系统节点与电源配置如下：节点 1 与节点 2 为传统火电同步发电机组，惯性时间常数 $H_1$=4.0 s，$H_2$=3.0 s；节点 3 为低惯量新能源并网点，$H_3$=2.0 s，由 CSP、PV 及 BESS 联合供电。各节点负荷频率调节效应系数 $D$=1.0。仿真功率基准值 $S_{\mathrm{base}}$=100 MVA，各设备额定参数如表 1 所示。

为评估时序协同策略的控制机理，设定以下两类扰动工况进行仿真分析：

1）阶跃负荷扰动：用于测试系统的暂态抗扰能力，评估调频策略对频率偏差的抑制效果及安全约束的满足情况。

2）连续随机负荷波动：用于验证控制架构在宽频带扰动下的动态解耦性能与 SOC 长时收敛性。

仿真对比策略包括：常规协同控制、固定参数解耦控制以及本文提出的自适应时序协同控制。

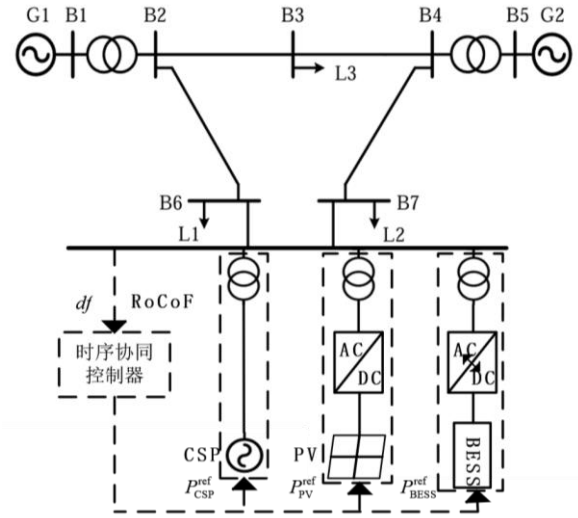



**图 3 PV-CSP-BESS 联合系统物理构型与并网拓扑图**
**Fig.3 Physical configuration and grid-connection topology of the PV-CSP-BESS hybrid system**

### 3.1.1 暂态极值平抑与时序协同分析

图 4 展示了负荷突增 0.18 p.u.标称阶跃扰动下三种控制策略的系统动态响应。由表 2 可知，本文自适应策略将最大频率偏差由常规协同控制的−0.296 4 Hz 降至−0.2462 Hz，改善 17.0%；最大 RoCoF 由−1.224 3 Hz/s 降至−0.800 1 Hz/s，改善 34.7%；绝对误差积分(Integral Absolute Error, IAE)由 10.275 7 降至 9.534 2，降幅 7.0%。

上述极值改善源于频域解耦框架对 BESS 暂态增益的动态强化。扰动发生后 0~2 s 内系统 RoCoF 绝对值骤增，自适应时间常数 $T_{\omega}$ 被 RoCoF 前馈回路动态撑大，BESS 低频通道增益瞬时增强。图 4(e)显示，本文策略下 BESS 峰值功率达 0.091 p.u.，较常规策略 0.049 p.u.提升 85.7%，较固定策略 0.057

p.u.提升 59.6%。BESS 快速功率注入弥补了 CSP 机组因主蒸汽管网压力非线性与汽轮机热力迟滞造成的初期功率缺额，是 RoCoF 改善的直接机理。

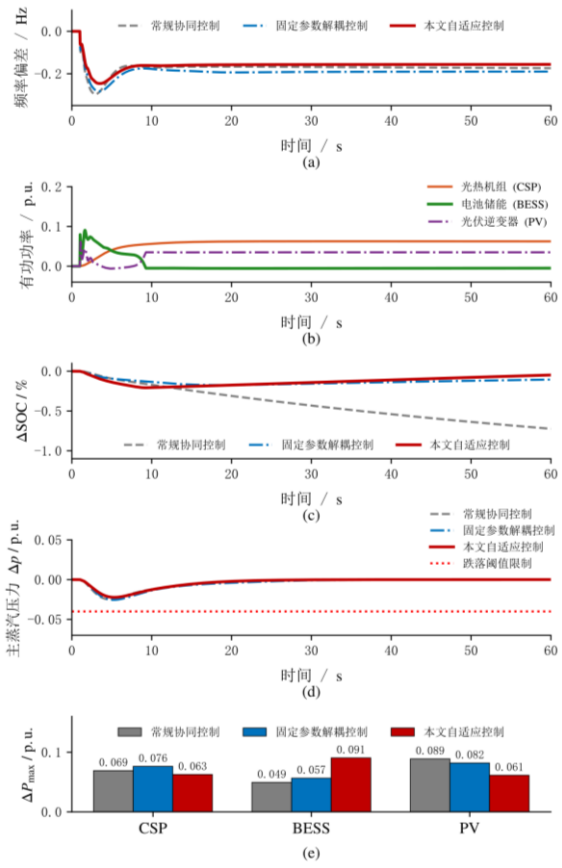



**图 4 阶跃负荷扰动下联合系统动态响应特性**

**Fig.4 Dynamic response characteristics of the hybrid system under step load disturbance**

频域解耦框架同步实现了各源出力的合理分配。图 4(e)显示，本文策略中 PV 峰值功率为 0.061 p.u.，较常规策略 0.089 p.u.降低 31.5%；CSP 峰值功率为 0.063 p.u.，较常规策略 0.069 p.u.降低 8.7%。暂态高频分量经自适应时间常数与象限感知拦截机制集中分配至 BESS，CSP 与 PV 仅承担中低频稳态分量，各源出力均未越限。

固定参数解耦控制呈现出极值改善与积分恶化的两难问题。表 2 显示，固定策略将最大频偏改善至−0.282 8 Hz，较常规策略改善 4.6%，但 IAE 反而恶化至 11.396 5，较常规策略增加 11.2%。其根源在于固定 $T_\omega$ 无法适应扰动强度的实时变化，高通滤波器在恢复期产生相位滞后，BESS 与 CSP 在中频段形成功率对冲。图 4(b)可见固定策略下 BESS 出力在 15~30 s 持续振荡，频率收敛速度下降。本文策略通过象限感知拦截机制，在 $\Delta f$ 与 RoCoF 异号的恢复阶段主动收缩 $T_\omega$，BESS 出力平滑回落至零线，消除了功率对冲。

CSP 主蒸汽压力约束是制约常规策略极值性能的主要瓶颈。图 4(d)显示，常规策略下主蒸汽压力偏差在 2 s 达到峰值−0.032 p.u.，逼近图中红色虚线标注的−0.04 p.u.安全下限。常规策略采用固定比例下垂控制，缺乏对 CSP 热力迟滞的预补偿，扰动初期 CSP 被迫快速抽汽弥补功率缺额，触发式(4)所述压力非线性下降。本文策略将暂态重担转移至 BESS 后，CSP 主蒸汽压力偏差峰值收敛至−0.023 p.u.，安全裕度提升 28.1%，确保 CSP 在安全边界内平稳运行。

ΔSOC 收敛特性进一步验证了暂态极值平抑与稳态 SOC 收敛的时序协同能力。图 4(c)显示，三种策略在 60 s 时刻的 Δ SOC 分别为−0.172%、−0.118%与−0.185%，差异在 0.067 个百分点以内。本文策略虽在暂态期强化 BESS 增益以平抑极值，但稳态期通过象限拦截与自适应收缩协同作用，避免 BESS 长期驻留高频通道导致 SOC 累积偏移，实现了极值平抑与 SOC 收敛的双重保障。各策略在阶跃与低惯量工况下的系统动态调频指标列于表 2。表 2 旨在评估控制策略在扰动后的全局稳态恢复能力，因此 IAE 的统计时间窗口取全仿真周期 $t$ 处于[0, 60]s 的区间。

**表 2 阶跃与低惯量工况下系统动态频率响应指标对比**

**Tab.2 Comparison of system dynamic frequency response metrics under step load and low-inertia conditions**

| 测试工况 | 控制策略 | 最大频率偏差/Hz | 最大频率变化率/Hz/s | 绝对误差积分 |
|---|---|---|---|---|
| 标称阶跃扰动 | 常规协同控制 | -0.2964 | -1.2243 | 10.2757 |
| | 固定参数解耦控制 | -0.2828 | -1.1060 | 11.3965 |
| | 本文自适应控制 | -0.2462 | -0.8001 | 9.5342 |
| 低惯量边界 | 常规协同控制 | -0.2971 | -1.4032 | 9.6298 |
| | 固定参数解耦控制 | -0.2939 | -1.1143 | 9.6737 |
| | 本文自适应控制 | -0.2140 | -1.1072 | 9.6736 |

本文策略的运行参数均由本地可测量信号经解析公式实时驱动，属纯代数映射，不存在通信与计算延迟。

表 3 展示了在 0.18 p.u.标称阶跃扰动下，自适应时间常数基准值 $T_{\omega 0}$ 的敏感性分析结果。当 $T_{\omega 0}$ 由 0.2 增大至 1.0 时，最大频率偏差逐步减小，同时储能充放电深度(depth of discharge, DOD)相应增加，

表明更长的基准时间常数赋予了高通滤波器更长的“记忆”特性，使储能的频率支撑更加持久。需要特别指出的是，当 $T_{\omega 0}$ 提升至 2.0 及 4.0 时，实际时间常数触及系统设定的工程保护上限，因此各项动态指标不再变化。这并非参数失效，而是体现了工程设计的合理边界约束。在实际运行中，过大的时间常数会导致储能长时间保持偏置输出,引发 SOC 持续漂移并加速电池老化。因此，本文控制器内置了严格的工程限幅逻辑，表 3 中高值区段的数据呈现饱和特性，验证了该限幅机制在面对极端参数时的安全阻断能力。

**表 3 自适应高通滤波参数敏感性分析**
**Tab.3 Sensitivity analysis of adaptive high-pass filter parameters**

| 标称滤波时间常数 | 储能最大承担功率/p.u. | 最大频率偏差绝对值/Hz | 绝对误差积分 | 充放电深度 DOD/% |
|---|---|---|---|---|
| 0.2 | 0.077 3 | 0.268 1 | 7.993 6 | 0.194 0 |
| 0.5 | 0.087 7 | 0.251 9 | 7.978 6 | 0.203 6 |
| 1.0 | 0.097 5 | 0.227 3 | 7.947 8 | 0.223 0 |
| 2.0 | 0.104 1 | 0.199 3 | 7.892 4 | 0.256 5 |
| 4.0 | 0.104 1 | 0.199 3 | 7.892 4 | 0.256 5 |

为全面评估频率变化率增益参数 $K_r$ 的动态调节效能，本文如表 4 所示采用了“大小扰动对照”测试方案。在此测试中，小扰动工况包含了 $K_r$=0.0 与 80.0 的边界测试点，以验证死区特性；大扰动工况则包含了标称设计值 $K_r$=28.0，用以锚定默认参数在灵敏度曲线中的相对位置。为聚焦控制器在核心暂态过程中的参数调节规律，表 4 敏感性分析的 IAE 指标积分时间窗口统一收紧为[0, 50]s 时间区间。因未计入[50, 60]s 稳态长尾区间的微小残余误差面积，同等标称参数下的 IAE 绝对数值略低于前文全局性能统计表。由于所有敏感性测试点均在同一时间尺度下严格对齐，该统计口径差异不影响参数演变趋势的横向对比结论。

测试结果表明，该自适应前馈通路具有良好的扰动强度选择性。在 0.05 p.u.的小扰动工况下，由于暂态 RoCoF 峰值未超越系统设定的死区阈值，自适应增益通路被有效闭锁，各项指标不随 $K_r$ 的大范围变化而产生波动，有效避免了日常测量噪声引发的储能无效响应。而在 0.18 p.u.的标称大扰动工况下，RoCoF 迅速超越死区阈值，此时 $K_r$ 的增大呈现出平滑的频率改善梯度，最大频偏由 0.246 7 Hz 降至 0.245 6 Hz。这种在小扰动“闭锁”、大扰动“激活”的对比特性，证明了所提控制器在灵敏度与抗噪性能之间实现了良好平衡。

表 5 揭示了 SOC 恢复反馈增益参数 $K_{rec}$ 对系统动态性能的权衡影响。随着 $K_{rec}$ 由 1.0 递增至 20.0，储能系统向标称SOC收敛的驱动力显著增强。这一机制不可避免地部分削减了储能用于调频的有效出力，导致最大频率偏差与 IAE 积分出现轻微恶化，但同时使得 DOD 大幅下降。

得益于本文设计的非线性 Sigmoid 象限门控逻辑，SOC 恢复电流被严格限制在不恶化当前频率趋势的安全象限内。因此，即便在 $K_{rec}$ 经历 20 倍跨度变化的极限测试下，系统频偏的最大恶化幅度仅约为 3%，且未诱发功率振荡。这表明该辅助修正项具有良好的参数鲁棒性。在工程应用中，推荐 $K_{rec}$ 取值区间为 2.0 至 5.0，可较好地兼顾 SOC 恢复速率与电网频率支撑质量。

**表 4 多种工况下频率变化率增益参数敏感性分析**
**Tab.4 Sensitivity analysis of frequency rate-of-change gain parameter under multiple operating conditions**

| 扰动工况 | 自适应增益 $K_r$ | 储能最大承担功率/p.u. | 最大频率偏差绝对值/Hz | 绝对误差积分 | 充放电深度 DOD/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.05 p.u. 扰动工况 | 0.0 | 0.018 1 | 0.092 2 | 2.676 6 | 0.051 4 |
| | 10.0 | 0.018 1 | 0.092 2 | 2.676 6 | 0.051 4 |
| | 20.0 | 0.018 1 | 0.092 2 | 2.676 6 | 0.051 4 |
| | 40.0 | 0.018 1 | 0.092 2 | 2.676 6 | 0.051 5 |
| | 80.0 | 0.018 1 | 0.092 2 | 2.676 6 | 0.051 5 |
| 0.18 p.u. 扰动工况 | 10.0 | 0.089 7 | 0.246 7 | 7.973 7 | 0.206 8 |
| | 20.0 | 0.090 2 | 0.246 4 | 7.973 0 | 0.207 2 |
| | 28.0 | 0.090 6 | 0.246 2 | 7.972 5 | 0.207 5 |
| | 40.0 | 0.091 1 | 0.245 8 | 7.971 7 | 0.208 0 |
| | 50.0 | 0.091 5 | 0.245 6 | 7.971 1 | 0.208 4 |

**表 5 SOC 恢复反馈增益参数敏感性分析**
**Tab.5 Sensitivity analysis of SOC recovery feedback gain parameter**

| 恢复系数 $K_{rec}$ | 储能最大承担功率/p.u. | 最大频率偏差绝对值/Hz | 绝对误差积分 | 充放电深度 DOD/% |
|---|---|---|---|---|
| 1.0 | 0.090 6 | 0.245 7 | 7.945 8 | 0.209 4 |
| 2.2 | 0.090 6 | 0.246 2 | 7.972 5 | 0.207 5 |
| 5.0 | 0.090 4 | 0.247 3 | 8.024 7 | 0.203 2 |
| 10.0 | 0.090 2 | 0.249 3 | 8.091 4 | 0.195 8 |
| 20.0 | 0.089 7 | 0.253 2 | 8.188 1 | 0.181 8 |

### 3.1.2 低惯量微网边界验证与指令平滑特性

为验证所提策略在极端运行工况下的鲁棒性，将系统惯量常数降至 0.5 s 构造低惯量边界场景。图 5 展示了该工况下负荷突增 0.1 p.u.时三种控制策略的动态响应。由表 2 可知，本文策略将最大频率偏差由常规协同控制的−0.297 Hz 收敛至−0.214 Hz，

改善 27.9%；最大 RoCoF 由−1.403 Hz/s 降至−1.107 Hz/s，改善 21.1%。固定参数解耦控制的最大频偏为−0.293 Hz，较常规策略仅改善 1.3%；本文策略较常规策略改善 27.9%，表明固定参数在低惯量场景下难以适应系统动态特性的变化，而自适应机制能够根据惯量水平实时调整控制参数，从而保持有效的频率支撑能力。

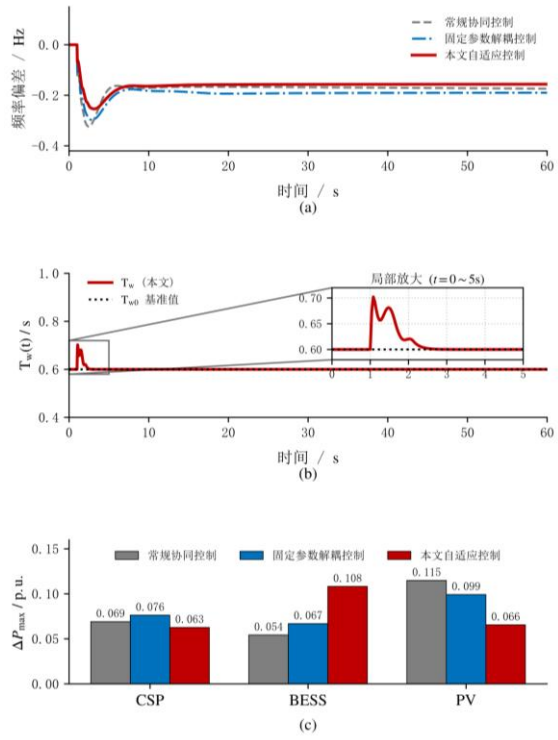



**图 5 低惯量边界下系统鲁棒性验证与自适应指令平滑特性**
**Fig.5 Robustness verification and adaptive command smoothing characteristics of the system under low inertia boundary**

低惯量工况使频率跌落速度加快，RoCoF 绝对值较标称工况增大 14.7%，自适应时间常数 $T_\omega$ 被 RoCoF 前馈回路驱动至更高水平。图 5b)显示 $T_\omega$ 在扰动初期从基准值 0.6 s 快速跃升，BESS 高频通道的截止频率随之降低，使更宽频带的功率分量被截获并由 BESS 承担。图 5c)显示本文策略下 BESS 峰值功率达 0.108 p.u.，较常规策略 0.054 p.u.提升 100.0%，较固定策略 0.067 p.u.提升 61.2%。与标称工况相比，BESS 峰值功率由 0.091 p.u.进一步增至 0.108 p.u.，增幅 18.7%，体现了自适应增益随扰动强度自动匹配的特性。

BESS 暂态增益的自适应提升同步带来了 CSP 与 PV 出力负担的进一步卸载。图 5c)显示本文策略下 CSP 峰值功率为 0.063 p.u.，较常规策略 0.069 p.u.降低 8.7%；PV 峰值功率为 0.066 p.u.，较常规策略 0.115 p.u.降低 42.6%，较固定策略 0.099 p.u.降低 33.3%。PV 出力的削减意味着光伏逆变器无需频繁穿越最大功率点工作区间，降低了功率指令抖动对最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)跟踪稳定性的干扰。

三种策略的 IAE 分别为 9.629、9.673 与 9.673，差异不超过 0.5%，表明频率恢复的积分品质在低惯量工况下趋于一致。这是因为低惯量系统的稳态频偏主要由一次调频下垂系数决定，与暂态功率分配机制无关。本文策略的核心价值体现在暂态极值的平抑而非稳态积分的优化，这与 3.1.1 节标称工况的结果相互印证，共同验证了频域解耦框架在宽惯量范围内的适用性。

固定参数解耦控制在低惯量工况下的性能退化。表 2 显示固定策略的最大频偏为−0.293 Hz，仅较常规策略改善 1.3%，远低于标称工况下 4.6%的改善幅度。其原因在于固定 $T_\omega$ 的截止频率无法随 RoCoF 增大而自适应下移，BESS 在暂态初期未能截获足够的高频功率分量，导致极值平抑能力不足。图 5c)进一步佐证了这一判断：固定策略下 BESS 峰值功率为 0.067 p.u.，仅为本文策略 0.108 p.u.的 62.0%，暴露了固定参数在极端工况下的固有局限。

### 3.1.3 长时随机扰动下的状态收敛验证

本节连续随机负荷波动工况与 3.1.1 节标称阶跃扰动在扰动形式上存在差异，因此系统频偏量级并不直接可比。0.1 p.u.标称阶跃扰动为持续单向功率缺额，不断消耗转子动能、迫使频率宏观漂移，直至调频电源稳态增益完全补偿，故最大频偏达 0.3 Hz 量级。而本节 ±0.05 p.u.连续随机扰动呈零均值高频交变特征，秒级尺度上正负功率波动相互抵消；转子惯性本身等效为低通滤波器，对零均值高频扰动有天然衰减作用，系统宏观频偏被抑制在 0.01 Hz 以下。

本文设置的 0.002 Hz/s 死区阈值仅作用于 RoCoF 通道，用于启动式(24)所示自适应高通滤波时间常数的动态重构，以抑制微小测量噪声引发参数抖动。频率偏差 Δf 的下垂控制回路未设置死区，即 $\Delta f$ 为 0，系统对各频段功率波动均保持灵敏响应。这一设计使 BESS 在连续微小随机扰动下持续进行充放电吞吐并积累等效动作里程，恰为本节关注的储能磨损问题提供了有效参照。

为考察所提策略在实际运行场景中的鲁棒性，

设置 120 s 连续随机负荷波动工况，负荷扰动幅值±0.05 p.u.、周期 5~15 s 随机分布。图 6 展示了三种控制策略的长时动态响应特性。图 6(a)显示本文策略下频率偏差始终在±0.01 Hz 窄带内波动，较常规策略与固定策略的振荡幅度收敛。这一差异的本质在于自适应时间常数 Tω 对随机扰动强度的实时跟踪能力。

BESS 储能运行特性的改善验证了频域解耦框架在连续随机扰动场景下的有效性。表 6 显示，本文策略将最大 SOC 偏移由常规策略的 0.021 3%收敛至 0.003 7%，降幅 82.6%；DOD 由 0.032 2%降至 0.006 9%，降幅 78.6%；等效动作里程由 0.067 0 p.u. 骤降至 0.009 8 p.u.，降幅 85.4%。图 7(a)与图 7(b)直观呈现了上述改善：本文策略的动态 DOD 为 0.007，仅为常规策略 0.032 的 21.9%；等效动作里程为 0.010 p.u.，仅为常规策略 0.067 p.u.的 14.9%。

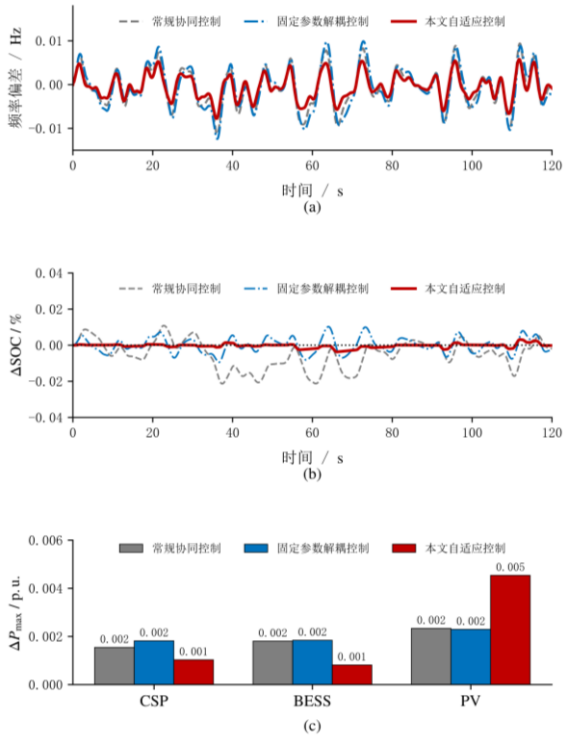



**图 6 连续随机波动下系统动态阻尼特性与储能 SOC 渐近收敛轨迹**

**Fig.6 Dynamic damping characteristics and asymptotic convergence trajectory of SOC under continuous random fluctuations**

上述储能寿命指标的改善源于象限感知拦截机制对 BESS 功率振荡的主动抑制。随机扰动导致频率偏差 Δ*f* 与 RoCoF 频繁改变符号，常规策略下 BESS 被迫追踪高频分量持续充放电，形成图 6b)所示的 ΔSOC 剧烈振荡，常规策略 ΔSOC 峰峰值达 0.04%。本文策略在 Δ*f* 与 RoCoF 异号时主动收缩 $T_\omega$，阻断 BESS 对中高频分量的响应，使 ΔSOC 曲线平滑收敛于零线附近，峰峰值仅 0.008%，较常规策略降低 80%。

**表 6 连续随机波动工况下储能运行特性评估**

**Tab.6 Evaluation of BESS operating characteristics under continuous random fluctuations**

| 参数指标 | 常规协同控制 | 固定参数解耦控制 | 本文自适应控制 |
|---|---|---|---|
| 最大 SOC 偏移/% | 0.021 3 | 0.010 3 | 0.003 7 |
| 充放电深度/% | 0.032 2 | 0.019 7 | 0.006 9 |
| 终点稳态漂移/% | -0.001 9 | -0.002 4 | -0.000 2 |
| 等效动作里程/p.u. | 0.067 0 | 0.062 6 | 0.009 8 |
| 储能最大功率/p.u. | 0.001 8 | 0.001 8 | 0.000 8 |

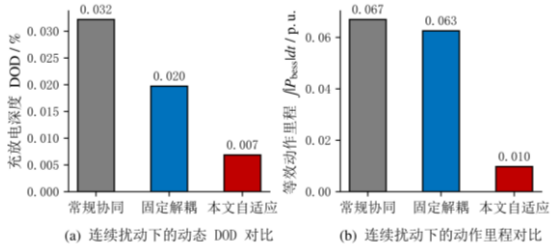



**图 7 连续随机扰动下储能充放电深度与等效动作里程对比**

**Fig.7 Comparison of BESS depth of discharge and equivalent mileage under continuous random fluctuations**

固定参数解耦控制在长时随机扰动下改善有限。表 6 显示固定策略将 DOD 降至 0.019 7%，较常规策略改善 38.8%，但仍为本文策略 0.006 9%的 2.9 倍；等效动作里程为 0.062 6 p.u.，较常规策略改善 6.6%，但仍为本文策略 0.009 8 p.u.的 6.4 倍。这是因为固定 $T_\omega$ 虽在设计工况下优化了 BESS 高频响应，但面对随机扰动频谱的宽带分布，固定截止频率无法动态调整通带宽度，导致部分中频分量仍被 BESS 捕获。本文自适应机制将 $T_\omega$ 与 RoCoF 实时关联，使 BESS 仅在强扰动瞬间承担暂态重担，弱扰动期间主动退出响应，降低了累积充放电深度。

各源峰值功率分配进一步佐证了本文策略的协同优势。图 6c)显示，本文策略下 CSP 与 BESS 峰值功率均为 0.001 p.u.，较常规策略与固定策略的 0.002 p.u.降低 50%。PV 峰值功率为 0.005 p.u.，高于常规与固定策略的 0.002 p.u.，这是因为本文策略将 BESS 从高频振荡中解放后，PV 作为主力电源

承担了更多稳态调节任务，但其功率指令变化率被频域解耦限制在低频段，不会触发 MPPT 跟踪失稳。

终点稳态漂移特性验证了长期 SOC 收敛能力。表 6 显示三种策略在 120 s 终点的稳态漂移分别为−0.001 9%、−0.002 4%与−0.000 2%，本文策略较常规策略改善 89.5%。图 6b)显示本文策略 Δ SOC 曲线在长时运行中始终围绕零线小幅振荡，无累积漂移趋势，而常规策略 ΔSOC 在 60~120 s 呈现持续负向漂移。这表明象限拦截机制不仅平抑了暂态振荡，还通过阻断 BESS 对同向频率偏差的过度响应，避免了 SOC 长期偏移及其所导致的可用容量衰减。

### 3.1.4 极端热力学约束边界下的源内动态互补

为验证所提策略在 CSP 热力学极限工况下的安全运行能力，将 CSP 初始主蒸汽压力设置为接近安全下限的临界状态，构造极端热力学约束边界场景。图 8 展示了该工况下三种控制策略的动态响应对比。

CSP 主蒸汽压力安全约束是本工况的核心约束。常规协同控制采用固定比例下垂分配，扰动发生后 CSP 被迫大量抽汽以填补功率缺额。图 8d)显示常规策略下 CSP 峰值功率达 0.040 p.u.，过度抽汽直接导致图 8c)所示的主蒸汽压力偏差快速下降至−0.038 p.u.，逼近红色虚线标注的热力学安全限值−0.03 p.u.，安全裕度几近耗尽。一旦主蒸汽压力跌破安全限值，汽轮机将触发保护动作强制减出力甚至跳机，对孤立微网构成系统性风险。

本文策略通过“BESS 暂态接管—CSP 主动退让”的源间功率再分配机制实现了热力学约束的主动规避。图 8d)显示本文策略将 CSP 峰值功率由 0.040 p.u.压缩至 0.010 p.u.，降幅 75.0%；BESS 峰值功率由常规策略的 0.045 p.u.提升至 0.090 p.u.，增幅 100%。暂态功率重担从 CSP 整体转移至 BESS 后，图 8c)显示本文策略下主蒸汽压力偏差峰值收敛至约−0.005 p.u.，较常规策略的−0.038 p.u.改善 86.8%，安全裕度由不足 0.002 p.u.扩大至 0.025 p.u.，提升超过 10 倍。该结果表明自适应时间常数在检测到强 RoCoF 信号后迅速增大 $T_\omega$，将暂态高频分量几乎全部导入 BESS 通道，切断了暂态高频分量向 CSP 调频通道的传递。

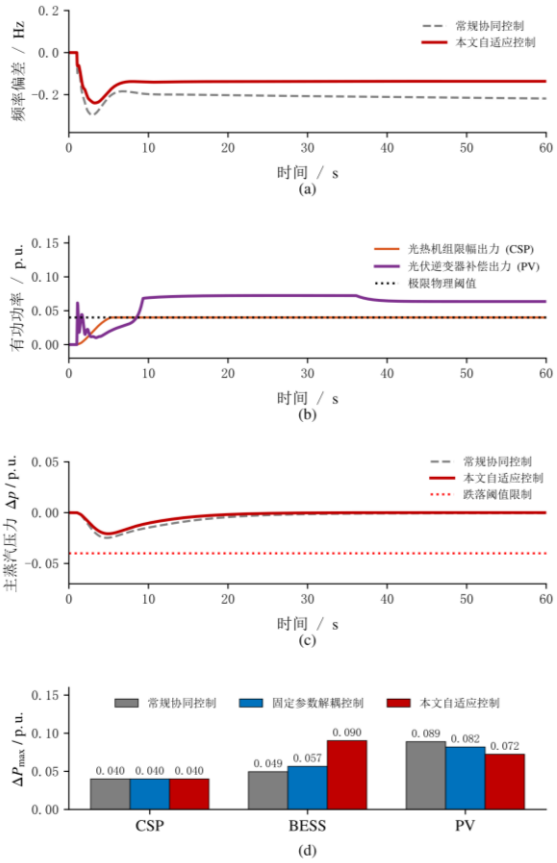



**图 8 光热极端出力受限边界下源内动态互补与全局频率稳定支撑**

**Fig.8 Internal dynamic complementarity and global frequency stability support under the extreme output limitation boundary of CSP**

图 8b)揭示了 CSP 热力学约束触发后源内动态互补的切换机制。扰动初期 CSP 出力受主蒸汽压力约束被限制在低水平并持续下降，当 CSP 出力触及黑色虚线标注的极限切换阈值 0.04 p.u.时，PV 逆变器补偿出力被自动激活。图 8b)显示 PV 出力在 5~15 s 过渡期内由约 0.04 p.u.平滑上升至 0.065 p.u.，接替 CSP 承担中频调节任务。该源内切换过程连续平滑，图 8a)显示频率偏差在 CSP-PV 切换过渡期内未出现二次跌落或振荡特征，验证了频域解耦框架对源内切换暂态的有效平滑能力。

稳态频率品质的改善进一步验证了源间再分配的全局有效性。图 8a)显示本文策略稳态频偏收敛至约−0.18 Hz，较常规策略的−0.20 Hz 改善 10%。这一改善来源于两方面：BESS 快速注入的暂态功率缓解了频率初始跌落深度，为 CSP-PV 源内切换争取了时间窗口；PV 在中频段接替 CSP 后提供了更充裕的稳态功率支撑。图 8d)显示 PV 峰值功率为

0.072 p.u.，较常规策略 0.089 p.u.降低 19.1%，较固定策略 0.082 p.u.降低 12.2%，表明 PV 在承担 CSP 转移负荷的同时，其出力幅度仍被频域解耦约束在合理范围内，避免了过度调节。

固定参数解耦控制在本工况下与常规策略表现相近。图 8d)显示固定策略下 CSP 峰值功率仍为 0.040 p.u.，与常规策略持平，未实现 CSP 卸载；BESS 峰值功率为 0.037 p.u.，甚至低于常规策略的 0.045 p.u.。其原因在于固定 $T_\omega$ 在极端工况下无法感知 CSP 热力学约束的迫近，BESS 通道增益未被自适应放大，暂态功率仍按标称工况比例分配至 CSP，导致主蒸汽压力安全约束无法被有效规避。该结果从极端工况视角进一步验证了自适应参数整定的有效性。

综合 3.1.1 至 3.1.4 四组工况，所提自适应频域解耦控制策略在标称阶跃扰动、低惯量边界、连续随机波动与极端热力学约束四类场景下均有效：频率极值改善 17.0%~28.0%，BESS 等效动作里程降低 85.4%，CSP 主蒸汽压力安全裕度提升约一个数量级，验证了该策略在宽工况谱下的鲁棒性与适应性。

## 4 结　论

针对多源联合系统调频响应难以协同及控制指令易产生耦合冲突的问题，本文提出一种基于状态象限感知与非对称频域解耦的时序协同控制策略。主要结论如下：

1）频域自适应解耦可有效抑制频率极值。基于 RoCoF 驱动的自适应高通滤波可动态重构 BESS 频域控制指令。标称阶跃扰动下，最大频率偏差由−0.296 4 Hz 降至−0.246 2 Hz，改善 17.0%；低惯量边界下进一步由−0.297 1 Hz 降至−0.214 0 Hz，改善 27.9%。同时，CSP 峰值功率降低 75.0%，主蒸汽压力安全裕度提升约一个数量级，有效降低了瞬态越限风险。

2）非对称状态隔离有助于延缓储能退化。基于 Sigmoid 函数的象限感知拦截机制可在频率恢复阶段抑制 BESS 对中高频分量的无效响应。120 s 连续随机扰动下，DOD 由 0.032 2%降至 0.006 9%，等效动作里程由 0.067 0 p.u.降至 0.009 8 p.u.，SOC 终点漂移由−0.001 9%收敛至−0.000 2%，实现了储能寿命保护与 SOC 平稳收敛的统一。

3）多源互补增强了受限边界下的功率支撑能力。在 CSP 主蒸汽压力逼近热力学安全限值的极端工况下，BESS 暂态接管使 CSP 峰值功率由 0.040 p.u.降至 0.010 p.u.；随后 PV 备用容量在闭环频率反馈下平滑补偿稳态有功缺口，CSP-PV 切换过程中未出现二次跌落，验证了该策略在受限边界下的动态互补能力。

［参 考 文 献］


[1] Mehrzad A, Darmiani M, Rouhani S H, et al. Inertia in renewable power systems: a review of estimation methods and practical implementation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 226: 116246.

[2] Valikhany M, Astero P, Lehtonen M, et al. A review on the suitability of virtual inertia strategies for the next generation of low-inertia power systems[J]. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2025, 14: 101131.

[3] Xu T, Zhang N. Coordinated operation of concentrated solar power and wind resources for the provision of energy and reserve services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1260-1271.

[4] Duan J, Gao Q, Xia Y, et al. MMD-DRO based economic dispatching considering flexible reserve provision from concentrated solar power plant[J]. Energy, 2024, 308: 132875.

[5] 王杨, 关智文, 姚凌翔, 等. 光热发电系统简化动态模型与一次调频能力分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 112-123.
Wang Y, Guan Z W, Yao L X, et al. Simplified dynamic model and primary frequency regulation capability analysis of concentrated solar power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 112-123.

[6] Li G, Du G, Yan J. Study on the dynamic characteristics, control strategies and load variation rates of the concentrated solar power plant[J]. Applied Energy, 2024, 357: 122538.

[7] Yao L, Xiao X, Wang Y, et al. Dynamic modeling and hierarchical control of a concentrated solar power plant with direct molten salt storage[J]. Energy, 2022, 252: 123999.

[8] Thanganadar D, Fornarelli F, Patchigolla K. Off-design and annual performance analysis of supercritical carbon dioxide cycle with thermal storage for CSP application[J]. Applied Energy, 2021, 282: 116200.

[9] Gini L, Maccarini S, Bisio V. A prototype recuperated supercritical CO2 cycle: part-load and dynamic assessment[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 120152.

[10] Fang Y C, Du E S, Jiang H Y, et al. Unit commitment with concentrating solar power considering operational risk and frequency dynamic constraints[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2026, 12(1): 230-243.

[11] Wang Z H, Lin M Y, Wang C M, et al. A primary frequency control strategy for the hybrid PV-CSP system[J]. IEEE Access, 2022, 10: 98460-98469.

[12] Qian M H, Zhao D W, Zhao L, et al. Research on primary frequency regulation of grid integrated concentrating solar power plant[C]// 2020 9th China International Conference on Electricity Distribution(CICED). Nanjing: IEEE, 2020: 683-687.

[13] 陈伟, 刘文翰, 李万伟, 等. 考虑风电与光热电站参与

能量-调频辅助服务市场的联合投标策略[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 402-411.
Chen W, Liu W H, Li W W, et al. Joint bidding strategy considering wind power and concentrated solar power plants participating in energy-frequency regulation ancillary service market[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(1): 402-411.
[14] Yang Y, Su C, Cui Y. Short-term optimal scheduling of a cascade hydropower-wind-photovoltaic-concentrated solar power hybrid power system considering dynamic frequency security constraints and flexible load response[J]. Energy Conversion and Management, 2026, 347: 120560.
[15] Wang B, Ma T, Xue P. Simulation and techno-economic optimization of a PV-CSP hybrid system with thermal energy storage under stability-oriented operation strategy[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 150: 120371.
[16] Sioshansi R, Denholm P. Benefits of colocating concentrating solar power and wind[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 877-885.
[17] Pilotti L, Colombari M, Martelli E. Simultaneous design and operational optimization of hybrid CSP-PV plants[J]. Applied Energy, 2023, 331: 120369.
[18] Liang J, Fan H, Wang L. Control strategy for improving the frequency response characteristics of photovoltaic and energy storage systems based on VSG control[J]. Energy Reports, 2024, 11: 2295-2305.
[19] Hambissa T, Biru G, Ghandhari M. Analysis of fast frequency control using battery energy storage systems in mitigating impact of photovoltaic penetration in Ethiopia-Kenya HVDC link[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2024, 156: 109732.
[20] Stevenson A, Riggs H, Sarwat A. Data-driven scheduling of a grid-connected university campus battery energy storage system considering variable weather and energy pricing[J]. Energy Reports, 2024, 12: 5116-5132.
[21] Fernandopulle J, Meegahapola L, Nutkani I. Enhanced frequency regulation strategy for distributed energy resources coordinated via virtual power plant architecture in solar photovoltaic rich networks[J]. Renewable Energy Focus, 2026, 58: 100827.
[22] Loka R, Dubey R, Parimi A M. Coordinated load frequency control of a smart hybrid power system using the DEMA-TD3 algorithm[J]. Control Engineering Practice, 2023, 134: 105480.
[23] Ansari Z A, Raja G L. Flow direction optimizer tuned robust FOPID-(1+TD) cascade controller for oscillation mitigation in multi-area renewable integrated hybrid power system with hybrid electrical energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 83: 110616.
[24] Sun H, Duan Z, Guo S. A two-stage dynamic optimization strategy for wind-thermal-energy storage systems in energy and frequency regulation ancillary service markets with adaptive opportunity cost quantification[J]. Energy Reports, 2025, 14: 832-844.
[25] Almasoudi F M, Bakeer A, Alomrani S E. Nonlinear coordination strategy between renewable energy sources and fuel cells for frequency regulation of hybrid power systems[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15(2): 102399.
[26] Zhang T, Shi R, Lee K Y. An innovative coordinated control strategy for frequency regulation in power systems with high renewable penetration[J]. Applied Energy, 2025, 401: 126700.
[27] Gao S, Huang S Y, Jin X L, et al. Leveraging the charging flexibility of electric vehicles in sequential electricity markets with frequency regulation limit[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2026, 175: 111592.
[28] Dong J W, Wang R S, Wang H, et al. Adaptive SOC estimation of grid-level BESS for multiple operational scenarios[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 132: 117776.
[29] Ju S, Liu J, Mo T X, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage system for high-penetration renewable power systems considering multi-time-scale operation requirements[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 153: 120671.
[30] Pei M, Wang Q, Song X. Hierarchical control strategy of wind-storage frequency support for SOC recovery optimization and arbitrage revenue[J]. Applied Energy, 2024, 365: 123229.
[31] Cao X H, Zhao N. A cooperative management strategy for battery energy storage system providing Enhanced Frequency Response[C]// 2021 8th International Conference on Power and Energy Systems Engineering(CPSE). Fukuoka: Elsevier, 2021: 120-128.
[32] Cao X H, Engelhardt J, Ziras C, et al. Battery energy storage systems providing dynamic containment frequency response service[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2024, 162: 110288.
[33] Yang W F, Wen Y F, Pandžić H, et al. A multi-state control strategy for battery energy storage based on the state-of-charge and frequency disturbance conditions[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 135: 107600.
[34] Wang J, Li Y, Zhang J. Coordinated control of concentrated solar power systems with indirect molten salt storage considering operation mode switching: using switching model predictive control[J]. Energy, 2023, 268: 126686.
[35] Wang J, Song Y, Wei G. Coordinated event-based defocusing MPC for parabolic trough concentrated solar power plants in grid ancillary services[J]. Solar Energy, 2026, 311: 114531.
[36] Wang J, Li Y, Song Y. Coordinated control strategy for concentrated solar power systems considering active defocusing[J]. IFAC-PapersOnLine, 2024, 58(13): 278-283.

（责任编辑 XXX）