DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.274 **中图分类号**：TM732 **文献标志码**：A

基于 SSA-VMD 和双层模糊控制的火储联合调频策略

于会群[1,2]，林 涛[1,2]，戚明鑫[1,2]
(1.上海电力大学自动化工程学院，上海 200090；2.上海发电过程智能管控工程技术研究中心，上海 200090)

摘要：可再生能源的大量并网给电网带来火电机组调频容量不足、调频效果不佳等一系列问题。为此，基于电池储能系统提出1种火储联合调频策略。首先，利用变分模态分解VMD(variational mode decomposition)对区域控制误差ACE(area control error)调频信号进行分解；结合未来负荷预测数据，通过麻雀搜索算法 SSA (sparrow search algorithm)滚动优化 VMD 算法中的分解模态数 K 和惩罚因子 α；将高频信号分配给储能系统，低频信号分配给火电机组。其次，设计双层模糊控制器，第 1 层模糊控制将区域控制误差高频信号及其变化率作为输入量，改善系统的动态调频性能；第 2 层模糊控制考虑荷电状态的影响，防止储能产生过充、过放的问题。最后通过仿真分析验证所提控制策略的有效性。

关键词：电池储能；调频；变分模态分解；麻雀搜索算法；双层模糊控制

Combined Frequency Modulation Strategy for Thermal Power and Energy Storage Based on SSA-VMD and Double-layer Fuzzy Control

YU Huiqun[1,2], LIN Tao[1,2], QI Mingxin[1,2]
(1. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Intelligent Management and Control for Power Generation Process, Shanghai 200090, China)

Abstract: The massive grid connection of renewable energy brings a series of problems to the power grid, such as an insufficient frequency modulation capacity of thermal power units and a poor frequency modulation effect. Aimed at these problems, a combined frequency modulation strategy for thermal power and energy storage based on a battery energy storage system is proposed. First, the frequency modulation signal of area control error (ACE) is decomposed using variational mode decomposition (VMD). Combined with the load forecast data in the future, the number of decomposition modes K and penalty factor α in the VMD algorithm are optimized by the sparrow search algorithm (SSA). The high-frequency signal is assigned to the energy storage system, while the low-frequency signal is assigned to the thermal power units. Second, a double-layer fuzzy controller is designed, in which the fuzzy control in the first layer takes the high-frequency signal of area control error and its changing rate as input to improve the system's dynamic frequency modulation performance, and the fuzzy control in the second layer takes into account the influence of state-of-charge to prevent the energy storage from encountering problems such as over-charging and over-discharging. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation analysis.

Keywords: Battery energy storage; frequency modulation; variational mode decomposition (VMD); sparrow search algorithm (SSA); double-layer fuzzy control

收稿日期：2022-06-05；**修回日期**：2022-07-31，2022-08-19；**录用日期**：2022-09-06；**网络首发日期**：2022-12-05
基金项目：上海市"科技创新行动计划"地方院校建设资助项目(20020500500)
This work is supported by Shanghai "Science and Technology Innovation Action Plan" Special Project for Capacity Building of Local Institutions under the grant 20020500500

为解决能源紧缺和环境污染等问题，风力、光伏等大量新能源得到了应用[1-3]。然而，新能源的

输出功率具有波动性和不确定性的特点，新能源的大量并网会对电网调频产生较大影响[4-6]。因此，解决新能源并网给调频工作带来的一系列问题不容忽视。

由于响应速度慢、爬坡率低等缺陷，火电机组难以满足调频需求[7]。电池储能系统 BESS(battery energy storage system)与火电机组相比，响应指令更加快速，出力更加精确。储能系统在调频市场中得到了越来越多的应用[8-9]。考虑经济性等诸多因素，目前储能还不能完全代替火电机组进行调频。火储联合参与调频，对于提升电网运行的安全性、提高电网对新能源的容纳能力具有不可忽略的优势[10-11]。诸多学者对火储联合参与调频的控制策略进行了一系列研究。文献[12]基于集合经验模态分解 EEMD(ensemble empirical mode decomposition)分解区域控制误差 ACE(area control error)信号，以净效益期望最大作为目标函数，对滤波阶数进行优化；文献[13]提出考虑调频成本和荷电状态 SOC (state-of-charge)恢复的双层优化策略，针对调频功率分配问题，根据电站调频成本和剩余调频能力进行优化，以 SOC 恢复为目标对功率进行再分配，提高了调频效果；文献[14]提出 1 种新的 BESS 控制策略，利用调节响应精度裕度评估自动发电控制 AGC(automatic generation control)性能，实现了全面的 SOC 控制，防止极端充电水平；文献[15]研究了 SOC 的修正和通信延迟问题，对 SOC 设计回归修正环节，同时设计系统鲁棒控制器，实现频率的快速恢复；文献[16]设计了 1 种火储联合调频的交易机制，对交易信息提出管理措施，提高了资源配置的有效性；文献[17]根据 AGC 考核指标的定义，制定储能充放电策略，采用 SOC 越限回归策略延长储能寿命，将净收益最大作为目标函数，建立经济性模型；文献[18]介绍了 ACE 调频方式的特点，提出对 ACE 信号及 SOC 进行分区控制的策略；文献[19]提出了 1 种考虑风、光、火、储多时间尺度的调度模型，以最低运行成本和最佳的功率输出为目标，对系统进行协调控制；文献[20]提出 1 种基于集合经验模态分解和多目标遗传算法的火储系统调频功率双层优化，构造火储调频功率优化层和多储能电站调频功率优化层，提升了区域电网调频效果；文献[21]提出 1 种基于调频信号优化的电池储能系统辅助火电机组参与二次调频的综合控制策略，以减小频率偏移和调频成本优化为目标，降低了系统频率偏差和储能的运行成本。

基于此，本文提出了基于麻雀搜索算法 SSA (sparrow search algorithm)进行参数优化的变分模态分解 VMD(variational mode decomposition)与双层模糊控制的调频策略。通过 VMD 算法对 ACE 信号进行分解，结合未来负荷预测数据，利用 SSA 优化 VMD 算法参数。同时设计双层模糊控制器，第 1 层模糊控制将 ACE 高频信号及其变化率作为输入量，改善系统的动态调频性能；第 2 层模糊控制器考虑 SOC 的影响，平滑储能的出力效果。

1　两区域互联调频系统仿真模型

1.1　火储联合调频结构

火储联合调频系统结构如图 1 所示。调度中心采集电网频率及联络线功率等数据，经过相应计算得到 ACE。运用本文的控制策略，得出火电机组和储能各自承担的调频信号。集散控制系统 DCS (distributed control system)和储能主控制器通过获取能量管理系统 EMS(energy management system)下发的指令，进而稳定系统的频率。

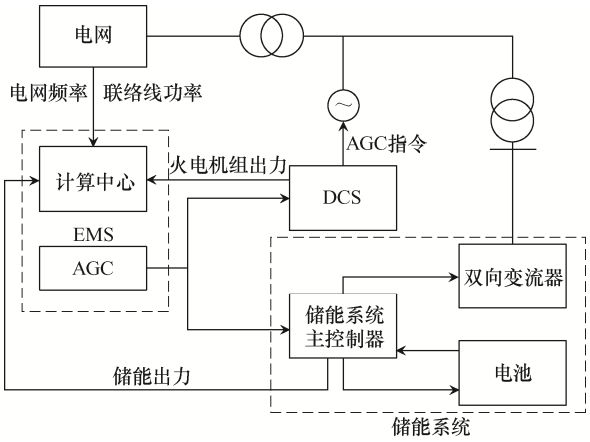


图 1　火储联合调频系统结构

Fig. 1 Structure of combined frequency modulation system of thermal power and energy storage

1.2 系统频率响应模型

本文以两区域互联系统作为研究对象，考虑联络线功率偏差对系统的影响，采用适用于互联区域的联络线功率和频率偏差控制模式，建立了两区域互联调频系统的仿真模型[22]。对区域 1 配置了电池储能系统，结合本文所提基于 SSA-VMD 和双层模糊的综合控制策略，辅助火电机组进行频率控制。两区域互联调频系统仿真模型如图 2 所示。

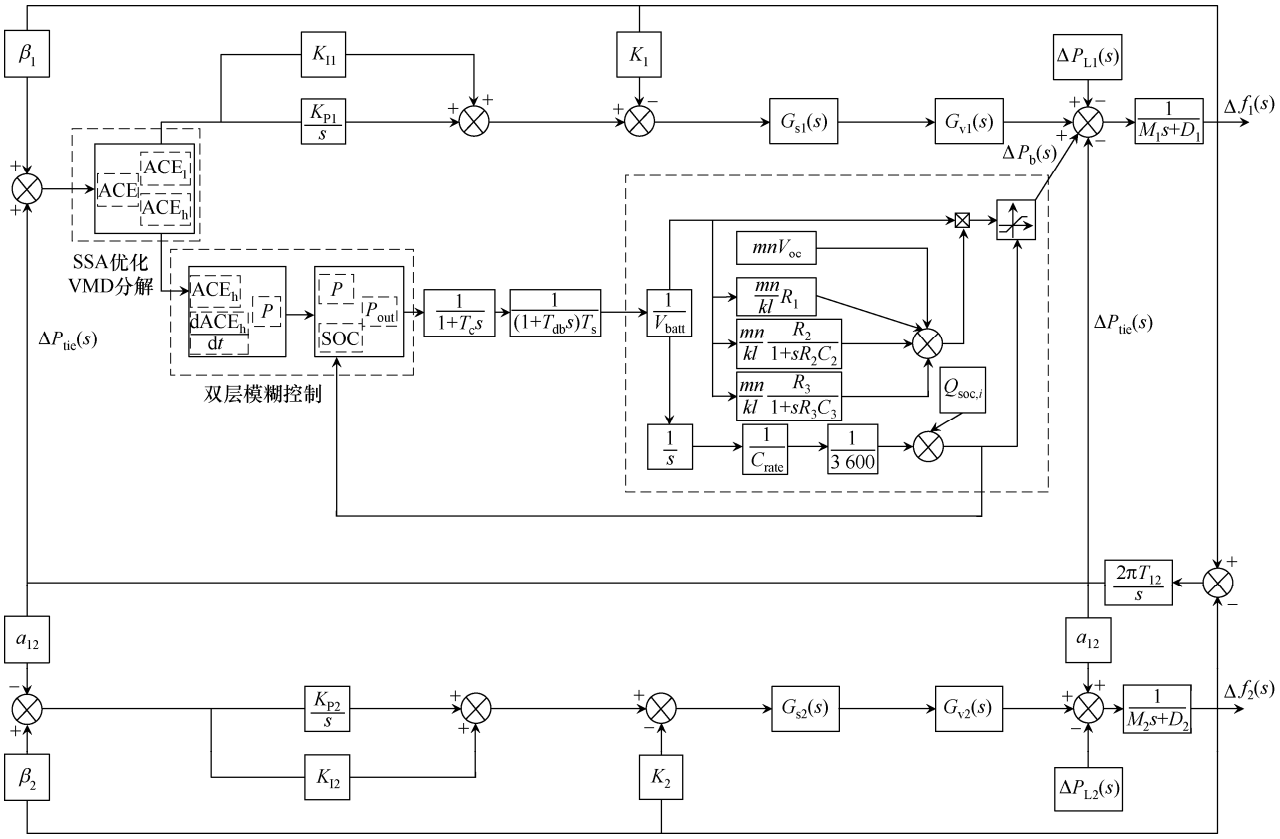


图 2 两区域互联调频系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of interconnected frequency modulation system of two regions

图 2 中：$\Delta P_{Li}(s)$ (i=1、2，分别代表 1、2 两区域，下同)为负荷扰动；$\Delta P_b(s)$ 为储能系统的输出功率；$\Delta f_i(s)$ 为系统频率偏差；$\Delta P_{tie}(s)$ 为联络线功率偏差；M_i 和 D_i 分别为系统的旋转惯量和阻尼系数；β_i 为电力系统的偏差系数；K_i 为一次调频的功率系数；K_{Pi} 和 K_{Ii} 分别为比例-积分控制器的比例参数和积分参数；a_{12} 为两区域容量换算系数；T_{12} 为联络线功率延迟系数；$\mathrm{ACE_h}$、$\mathrm{ACE_l}$ 分别为 SSA 优化 VMD 参数后进行分解的区域控制误差高频信号和低频信号；$G_{si}(s)$ 为热汽轮机组的模型；$G_{vi}(s)$ 为调速器的模型。$G_{si}(s)$ 和 $G_{vi}(s)$ 的表达式分别为

$$\begin{cases} G_{si}(s)=\dfrac{1+sF_{HP}T_{RH}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} \\ G_{vi}(s)=\dfrac{1}{1+sT_{li}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：T_{CH} 为汽轮机时间常数；T_{RH} 为再热器时间常数；F_{HP} 为再热器增益；T_{li} 为调速器时间常数。

1.3 电池储能模型

电池储能模型的准确建立是研究调频控制策略的关键环节。通用模型采用一阶惯性环节来简化电池储能模型，在研究一次调频中使用较多，对于二次调频而言，通用模型过于简单，不适合用于研究调频控制策略。本文对图 2 中的区域 1 配置了电池储能系统[23-25]，T_c 为 PCS 环节的时间常数，T_{db}

为响应延时−时间转换环节的时间常数，T_s 为转换系数。电池储能模型的传递函数如图 2 所示。V_{oc}、V_{batt}、C_{rate}、$Q_{SOC,i}$ 分别为开路电压、端电压、额定容量、初始荷电状态；m、n、k、l 分别为单体元件数量、电池包模块数量、电池柜数量、电池储能单元数量。R_1 为欧姆内阻，R_2、R_3 和 C_2、C_3 分别为描述不同时间尺度响应的电阻和电容。P 为第 1 层模糊控制后储能所需响应的功率；P_{out} 为第 2 层模糊控制后储能所需最终响应的功率。本文所配置的电池储能系统相较于一阶惯性环节而言，可以准确反应储能电池参与调频的动态性能；对电池储能系统的组成结构及二次调频的协调过程有较为全面的体现，能够精确地表征储能电池出力特点，满足电网二次调频仿真的需求。

2　火储联合调频策略的设计

2.1　火储联合调频策略

为了充分发挥储能电池响应速度快、跟踪能力精确的特点，本文采用基于 SSA-VMD 和双层模糊控制的调频策略，控制策略流程如图 3 所示。

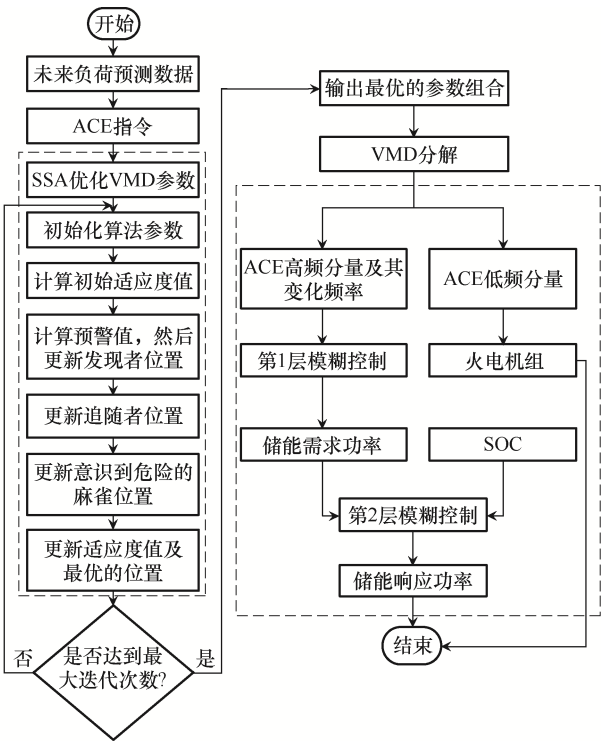


图 3　控制策略流程

Fig. 3 Flow chart of control strategy

系统的调频需求信号经过参数优化的 VMD 算法分解为 n 个固有模态函数 IMF(intrinsic mode function)，将重构的高频信号 P_H 交给储能系统承担，低频信号 P_L 交给常规机组承担。可表示为

$$\bar{u}_m = \text{mean}\left\{\sum_{i=1}^{m}\frac{u_i(t)-\text{mean}[u_i(t)]}{\text{std}[u_i(t)]}\right\} \quad 1\leqslant m\leqslant n \tag{2}$$

$$P_H(t)=\sum_{k=1}^{m-1}u_i(t) \tag{3}$$

$$P_L(t)=\sum_{k=m}^{n}u_i(t) \tag{4}$$

式中：$\bar{u}_m$ 为通过标准化模量累积均值计算后的 IMF 分量；$u_i(t)$ 为 VMD 分解后得到的 IMF 分量。

VMD 算法具有分解精度高、分解能力强、抗噪声干扰等优点，同时具有一定的数学理论基础和良好的鲁棒性。ACE 信号经过参数优化后的 VMD 算法分解后，利用标准化模量累积均值自适应选取滤波阶数 m [26]，从而确定火电机组与储能系统指令分配的分界点，计算式如式(2)。当 $\bar{u}_m$ 相对明显地偏离 0 时，则认为此时 VMD 分解的趋势开始变化，将此时计算得到的 m 作为信号重构的分界点，对前 $m-1$ 个高频 IMF 分量进行重构，计算式如式(3)，把重构的高频信号分配给储能电池承担。将其余 IMF 分量进行重构，计算式如式(4)，把重构的低频信号分配给常规机组承担。本文方法有效利用了常规机组及储能电池各自的优势，有利于改善系统的调频效果。

2.2　VMD 算法

VMD 算法是把变分问题作为全局构造的 1 种新颖的信号分解方法。VMD 算法的工作原理如下。

(1)通过 Hilbert 变换，得到各个模态函数 $u_k(t)$ 的单侧频谱为

$$\left[\delta(t)+\frac{\text{j}}{\pi t}\right]\times u_k(t) \tag{5}$$

式中：$\delta(t)$ 为脉冲函数；j 表示虚部。

(2)调制各个模态的频谱到对应的基频带为

$$\left[\delta(t)+\frac{\text{j}}{\pi t}\right]\times u_k(t)\times \text{e}^{-\text{j}\omega_k t} \tag{6}$$

式中，ω_k为中心频率。

(3)估计模态信号带宽，求解对应的变分问题，其目标函数为

$$\begin{cases}\min\left\{\left\|\sum_k \partial_t\left[\left(\delta(t)+\frac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)\times u_k(t)\right]\times \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_k t}\right\|^2\right\} \\ \text{s.t.}\sum_k u_k = f\end{cases} \tag{7}$$

(4)为了完成非约束性问题的转化，对惩罚因子α和拉格朗日乘法算子$\lambda(t)$进行对应的引用。扩展的表达式为

$$\begin{aligned}L(\{u_k\},\{\omega_k\},\lambda)=&\\ &\alpha\sum_k\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\frac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)\times u_k(t)\right]\times \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_k t}\right\|^2+\\ &\left\|f(t)-\sum_k u_k(t)\right\|_2^2+<\lambda(t),f(t)-\sum_k u_k(t)>\end{aligned} \tag{8}$$

(5)通过迭代更新得到模态函数$u_k(t)$和对应的中心频率ω_k。VMD 算法采用交替方向乘子法解决以上变分问题。

对模态函数的傅里叶变换$\hat{u}_i^1$、中心频率的傅里叶变换$\hat{\omega}_k^1$、拉格朗日乘子的傅里叶变换$\hat{\lambda}^1$进行初始化，模态函数$u_k(t)$及中心频率ω_k的更新方式可表示为

$$\hat{u}_k^{n+1}\leftarrow\frac{\hat{f}-\sum_{i<k}\hat{u}_i^{n+1}-\sum_{i>k}\hat{u}_i^n+\frac{\hat{\lambda}^n}{2}}{1+2\alpha(\omega-\omega_k^n)^2} \tag{9}$$

$$\omega_k^{n+1}\leftarrow\frac{\int_0^\infty\omega\left|\hat{u}_k(\omega)\right|^2\mathrm{d}\omega}{\int_0^\infty\left|\hat{u}_k(\omega)\right|^2\mathrm{d}\omega} \tag{10}$$

每次更新模态函数和中心频率后，拉格朗日乘子算子也可更新，即

$$\hat{\lambda}^{n+1}\leftarrow\lambda^n+\tau(\hat{f}-\sum_k u_i^{n+1}) \tag{11}$$

式中，τ为更新步长。

继续进行上述更新迭代，直至满足

$$\frac{\sum_k\left\|\hat{u}_k^{n+1}-\hat{u}_k^n\right\|_2^2}{\left\|\hat{u}_k^n\right\|_2^2}<\varepsilon \tag{12}$$

式中，ε为采用标准VMD默认值的收敛准则的容差。

2.3 SSA 优化 VMD 参数

SSA 是基于麻雀寻找食物及躲避被捕食的行为而提出的。在每次迭代过程中，发现者的位置更新公式可描述为

$$X_{i,j}^{i+1}=\begin{cases}X_{i,j}^i\exp\left(-\dfrac{i}{\omega k_{\max}}\right) & R_\mathrm{s}<ST\\ X_{i,j}^i+Q\boldsymbol{L} & R_\mathrm{s}\geqslant ST\end{cases} \tag{13}$$

式中：$X_{i,j}^i$为j维中第i个麻雀所在的位置；ω为(0, 1]之间的均匀随机数；$k_{\max}$为最大迭代次数；R_s为麻雀种群的预警值；ST为种群的安全值；Q为符合标准正态分布的随机数；$\boldsymbol{L}$为所有元素均为 1 的$1\times d$的矩阵。

追随者的位置更新公式可描述为

$$X_{i,j}^{i+1}=\begin{cases}Q\exp\left(\dfrac{X_{\text{worst}}^t-X_{i,j}^t}{i^2}\right) & i>\dfrac{n}{2}\\ X_m^{t+1}+\left|X_{i,j}^t-X_m^{t+1}\right|\boldsymbol{A}^+\times\boldsymbol{L} & \text{其他}\end{cases} \tag{14}$$

式中：X_{worst}^t为第t次迭代的最差位置，t为当前迭代次数；X_m^{t+1}为迭代次数为$t+1$时总体的最佳位置；$\boldsymbol{A}$为各个元素随机赋值为 1 或者−1 的$1\times d$的矩阵。

部分麻雀在种群觅食时担任预警麻雀的角色进行侦查和预警。当危险来临时，种群会进行反捕食，位置更新公式为

$$X_{i,j}^{i+1}=\begin{cases}X_{\text{best}}^t+\beta\left|X_{i,j}^t-X_{\text{best}}^t\right| & f_i\neq f_\mathrm{g}\\ X_{i,j}^t+R\left[\dfrac{\left|X_{i,j}^t-X_{\text{worst}}^t\right|}{(f_i-f_\mathrm{w})+\varepsilon_\mathrm{s}}\right] & f_i=f_\mathrm{g}\end{cases} \tag{15}$$

式中：X_{best}^t为迭代次数为t时预警麻雀的最佳全局位置；β为步长系数，是正态分布的随机数，其中均值为 0，方差为 1；f_i为当前适应度值；f_g为当前全局最佳的适应度值；f_w为当前全局最差的适应度值；R为取值范围为[−1, 1]的随机数；ε_s是最小的常数，避免分母等于 0。

本文将 SSA 与粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法及遗传算法 GA(genetic algorithm)的优化效果进行对比。PSO 是 1 种基于群体智能的全局搜索算法，通过个体之间的竞争与协作，搜索空间的最优解；GA 是 1 种启发式搜索算法，通过

对生物进化论的自然选择和生物进化过程的模拟，获得问题的最优解。

为满足电力系统二次调频实时性的要求，本文结合未来负荷预测数据，实现对VMD 参数的滚动优化。具体优化环节如下：运行参数优化程序，在 t−1 时刻得到 SSA 优化 VMD 参数结果的同时，对 t 时刻的 VMD 参数进行优化，t 时刻根据优化结果进行参数更新，并滚动优化 t+1 时刻的参数，实现每个时间段最优的参数优化。本文取 t= 15 min。

采用 SSA 优化 VMD 算法参数时，适应度函数的选择是关键环节。皮尔逊相关系数是衡量 2 个数据相关性的指标，相关系数越大，相关性就越高，可表示为

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(u_i-\overline{u})(v_i-\overline{v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(u_i-\overline{u})^2\sum_{i=1}^{n}(v_i-\overline{v})^2}} \tag{16}$$

式中：r 为皮尔逊相关系数；$\overline{u}$ 为原信号的均值；$\overline{v}$ 为重构后信号的均值；u_i 为原信号；v_i 为重构后的信号。

2.4 双层模糊控制

储能在容量、功率等方面存在局限性，在参与电力系统调频时，容易产生电池过充、过放问题。针对以上问题，本文采用双层模糊控制方法，以改善系统的动态调频性能并防止储能产生过充、过放问题。

第 1 层模糊控制器采用 ACE 高频信号及 ACE 高频信号的偏差作为输入量，制定模糊控制规则，得到储能所需响应的功率。输入量 $\mathrm{ACE_h}$ 及 $\mathrm{dACE_h}/\mathrm{d}t$ 的论域设置为$[-e,\ e]$，对 $\mathrm{ACE_h}$ 及 $\mathrm{dACE_h}/\mathrm{d}t$ 设置相同模糊子集为{负大(NB)，负中(NM)，负小(NS)，零(ZO)，正小(PS)，正中(PM)，正大(PB)}。输出量为储能响应的功率 P_1，其范围设置为$[-p, p]$的论域，其模糊子集与输入量的模糊子集相同。输入量及输出量的隶属度函数选用三角形隶属度函数，分别如图 4 和图 5 所示。

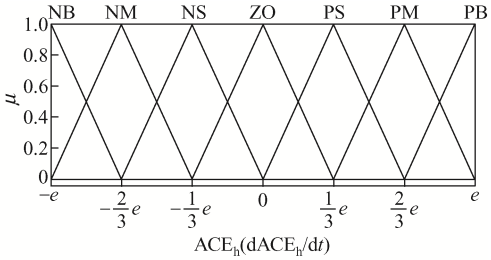


图 4　第 1 层输入变量隶属度函数

Fig. 4 Membership function of input variables in first layer

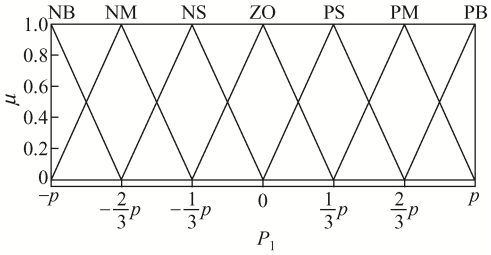


图 5　第 1 层输出变量隶属度函数

Fig. 5 Membership function of output variables in first layer

第 1 层模糊控制规则见表 1。在机组功率处于爬坡阶段时，储能吸收电能，减小负荷波动，降低波动给系统带来的影响。当机组功率达到稳定状态时，储能退出运行；当电网 $\mathrm{ACE_h}$ 较大且其变化率较大时，储能系统的输出功率较大；当电网 $\mathrm{ACE_h}$ 偏小且其变化率较小时，储能系统的输出功率较小。

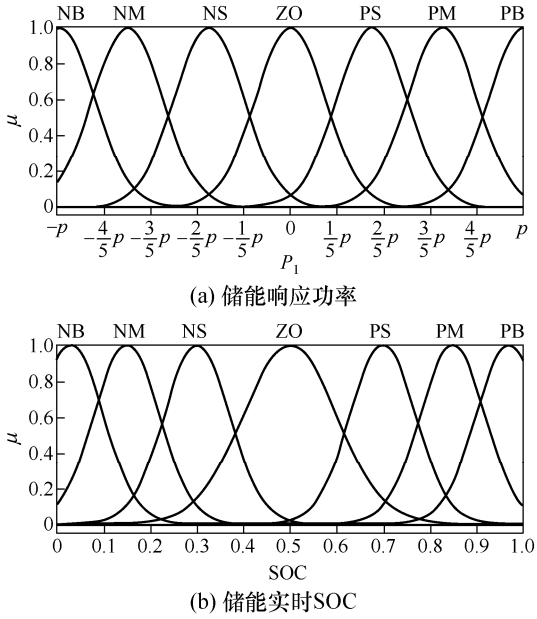
表 1　第 1 层模糊控制规则

Tab. 1 Rules for fuzzy control in first layer

$\mathrm{ACE_h}$	$\frac{\mathrm{dACE_h}}{\mathrm{d}t}$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PM	PM
NM	PB	PB	PB	PM	PS	PS	PS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	ZO	ZO
ZO	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NS
PS	ZO	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM
PM	NS	NS	NS	NM	NB	NB	NB
PB	NM	NM	NM	NB	NB	NB	NB

第 2 层模糊控制器以第 1 层模糊控制器输出的储能响应功率 P_1 及储能实时 SOC 作为输入量，以最终响应的功率 P_2 作为输出量。输入量 P_1 及储能 SOC 论域分别设置为$[-p, p]$、[0, 1]。定义 P_1、SOC 相同的模糊子集为{负大(NB)，负中(NM)，负小(NS)，零(ZO)，正小(PS)，正中(PM)，正大(PB)}。

输出量 P_2 为最终响应的功率，P_2 范围设置为$[-p, p]$的论域，其模糊子集与输入量的模糊子集相同。输入量及输出量的隶属度函数选用高斯型隶属度函数，分别如图 6 和图 7 所示。



(a) 储能响应功率

(b) 储能实时SOC

图 6 第 2 层输入变量隶属度函数

Fig. 6 Membership function of input variables in second layer

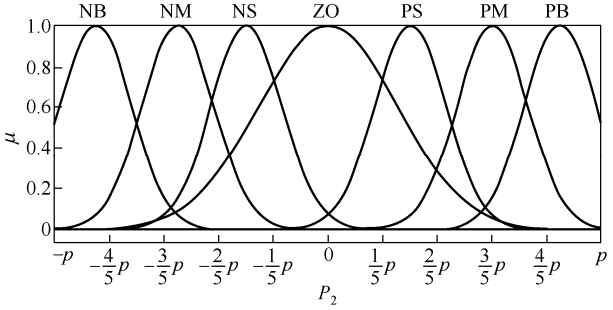


图 7 第 2 层输出变量隶属度函数

Fig. 7 Membership function of output variables in second layer

第 2 层模糊控制规则见表 2。当储能 SOC 处于良好状态时，可以多次进行充电与放电；当储能 SOC 处于不良状态时，应避免多充多放。当储能处于高电量时，应减小充电出力，增大放电出力；同理，当储能处于低电量时，应增大充电出力，减小放电出力。

表 2 第 2 层模糊控制规则

Tab. 2 Rules for fuzzy control in second layer

SOC	P_1						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	ZO	ZO
NM	NM	NM	NM	NM	NM	ZO	ZO
NS	NS	NS	NS	NS	NS	ZO	ZO
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO	ZO	PS	PS	PS	PS	PS
PM	ZO	ZO	PM	PM	PM	PM	PM
PB	ZO	ZO	PB	PB	PB	PB	PB

3 仿真分析

3.1 参数设置

本文在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建如图 2 所示的两区域互联调频系统仿真模型，该模型的调频机组均为再热式火电机组，额定功率设置为 1 000 MW，调频备用容量为-50~50 MW，机组爬坡率为 30 MW/min，储能的额定功率为 10 MW，额定容量为 10 MW·h。设置输入变量 $\mathrm{ACE_h}$ 、$\mathrm{dACE_h}$ / dt 的论域范围为[−0.03, 0.03]，输出变量 P_1 、P_2 的论域范围为[−0.01, 0.01]。以机组额定功率 1 000 MW 和额定频率 50 Hz 为基准值进行标幺化处理，其他仿真参数见表 3。

表 3 仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters

参数	设定值	参数	设定值
M_1	10	K_2	20
D_1	1	T_{l1}	0.08
K_1	20	F_{HP}	0.5
K_{P1}	−0.822	T_{l2}	0.06
K_{I1}	−0.16	M_2	10
T_e	0.01	T_{CH}	0.3
K_{P2}	−0.822	T_{RH}	10
K_{I2}	−0.16	β_1	21
T_c	0.01	β_2	21
T_{12}	0.086	T_{db}	0.01
D_2	1		

3.2 仿真结果分析

分解前的 ACE 信号如图 8 所示。设置种群规模为 50，最大迭代次数为 100，SSA 与 PSO 及 GA 的寻优迭代曲线对比如图 9 所示。在本文的仿真设计中，根据对标准化模量累积均值的计算，将 IMF1~IMF6 进行重构分配给储能系统，将

IMF7~IMF10 进行重构分配给常规机组。分配给储能的高频信号如图 10 所示，分配给火电机组的低频信号如图 11 所示。经参数优化的 VMD 分解 ACE 信号得到的各模态分量如图 12 所示。从图 9 可以看出，SSA 与 PSO、GA 的对比结果表明，SSA 寻优能力更强，收敛速度更快，优化效果更好。从图 12 可以看出，ACE 调频信号经过 VMD 分解后得到了 10 个 IMF 分量。各个 IMF 分量具有不同的频率，相互独立，不存在模态混叠的现象，通过分解结果可以看出 VMD 算法具有较强的分解能力及较高的分解精度。

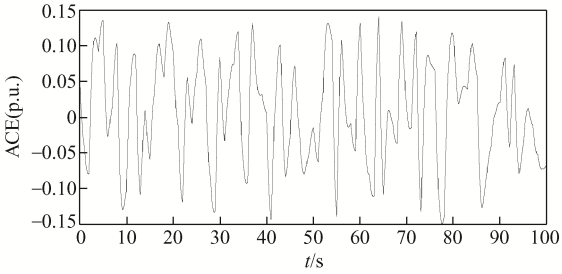


图 8　分解前的 ACE 信号

Fig. 8 ACE signal before decomposition

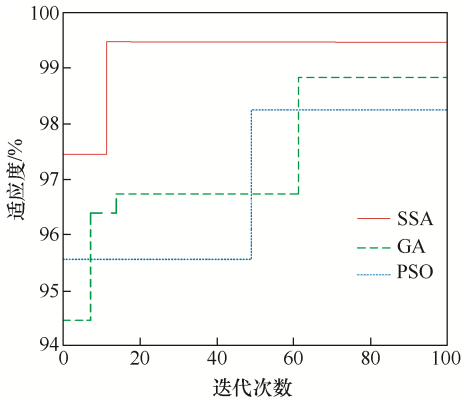


图 9　不同优化算法对比

Fig. 9 Comparison among different optimization algorithms

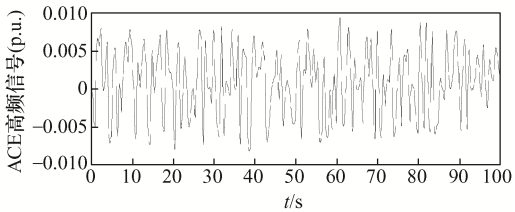


图 10　分配给储能的信号

Fig. 10 Signal assigned to energy storage

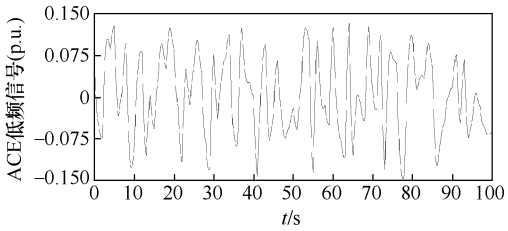


图 11　分配给火电机组的信号

Fig. 11 Signal assigned to thermal power units

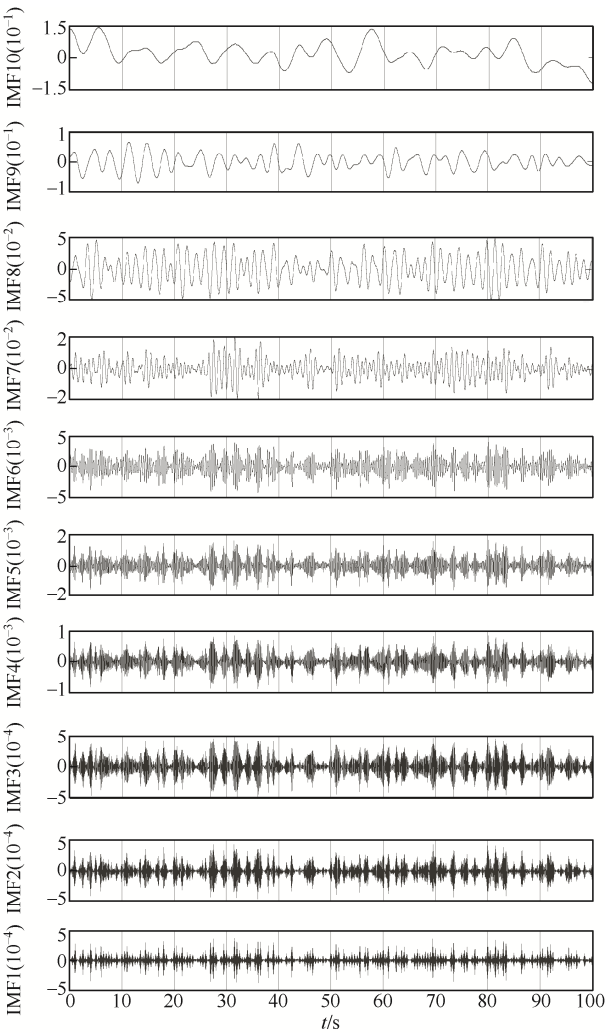


图 12　VMD 分解

Fig. 12 Decomposition using VMD

运行参数优化程序时，在对应的时间段内利用 SSA 对参数 K 和 α 进行优化更新，从而得到 K 和 α 最优的参数组合。在本文的仿真设计中，通过 SSA 优化得到最优的参数组合为[K, α]=[10, 1 587]。不同时间段的负荷扰动对应的最优参数组合[K, α]见表 4。

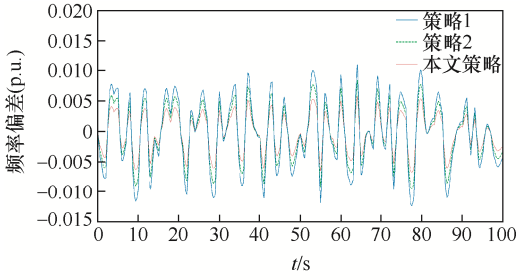
表 4 不同时间段优化参数的组合

Tab. 4 Combination of optimization parameters in different time periods

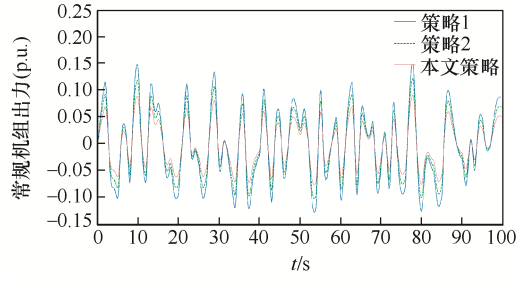
不同时间段	[K, α]
时间段 1	[10, 1 587]
时间段 2	[8, 1 269]
时间段 3	[9, 1 98]
时间段 4	[10, 1 506]
时间段 5	[9, 1 427]

本文对系统施加连续负荷扰动，仿真时长为 100 s。策略 1 是无储能控制策略，策略 2 是传统 PI 控制策略。区域 1 在连续负荷扰动下的系统动态响应如图 13 所示。不同控制策略下 SOC 的变化曲线如图 14 所示。不同控制策略的调频评价指标对比见表 5。

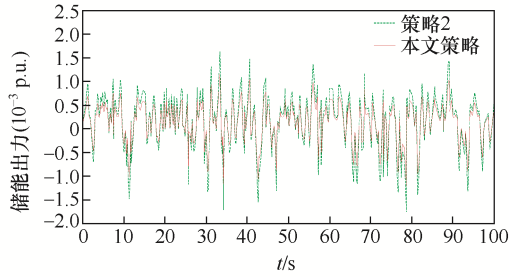
从图 13(a)和表 5 中可以看出，储能系统辅助火电机组参与调频后，对比无储能，系统的最大频率偏差和频率偏差均方根值均降低，有效提升了调频效果。通过对表 5 中不同控制策略的最大频率偏差和频率偏差均方根进行比较与计算，得出相应的指标数据与结论。在最大频率偏差方面，本文控制策略的最大频率偏差比策略 1 降低了 48.5%，比策略 2 降低了 31.0%。在频率偏差均方根方面，本文控制策略的频率偏差均方根比策略 1 降低了 45.6%，比策略 2 降低了 27.9%。综上所述，本文控制策略有效改善了调频效果。



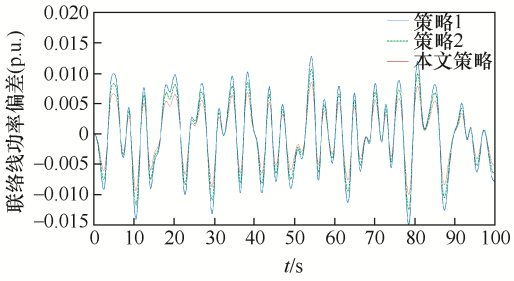
(a) 频率偏差



(b) 机组出力



(c) 储能出力



(d) 联络线功率偏差

图 13 系统动态响应

Fig. 13 System dynamic response

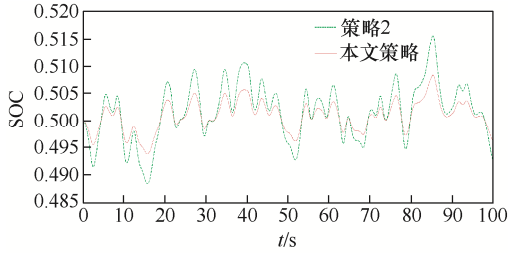


图 14 不同控制策略下 SOC 的变化曲线

Fig. 14 Variation curves of SOC under different control strategies

表 5 连续扰动下系统调频效果

Tab. 5 System frequency modulation effect under continuous disturbance

控制策略	最大频率偏差/Hz	频率偏差均方根/Hz	SOC 均方根
策略 1	-1.3×10^{-2}	5.7×10^{-3}	0
策略 2	-9.7×10^{-3}	4.3×10^{-3}	5.08×10^{-1}
本文策略	-6.7×10^{-3}	3.1×10^{-3}	5.01×10^{-1}

从图 13(b)可以看出，本文策略相较于策略 2 对常规机组的利用率更高。从图 13(c)和图 14 可以看出，与策略 2 相比，本文控制策略对储能电池的容量和功率需求更小，SOC 的保持效果更好，SOC 均方根更小，有效地避免了储能产生过充、过放的

问题。从图13(d)可以看出，本文控制策略减小了联络线功率，有利于平衡各控制区负荷。

4　结语

针对大量新能源并网带来的一系列调频问题，本文提出了基于 SSA-VMD 和双层模糊控制的火储联合调频策略。仿真结果表明，本文控制策略在减小频率偏差、改善调频效果方面比传统 PI 控制策略及无储能策略更具有优势。本文控制策略，不仅减小了对储能电池的容量需求及功率需求，还改善了储能系统的运行性能，提高了对常规机组的利用率，并有效避免了储能过充、过放的问题。

参考文献：

[1] 王琦, 郭钰锋, 万杰, 等. 适用于高风电渗透率电力系统的火电机组一次调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 974-984, 1274.
Wang Qi, Guo Yufeng, Wan Jie, et al. Primary frequency regulation strategy of thermal units for a power system with high penetration wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 974-984, 1274. (in Chinese)

[2] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.
Liu Chang, Zhuo Jiankun, Zhao Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18. (in Chinese)

[3] Jiang Quanyuan, Gong Yuzhong, Wang Haijiao. A battery energy storage system dual-layer control strategy for mitigating wind farm fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3263-3273.

[4] 孙东磊, 郑志杰, 马逸然, 等. 储能与 AGC 机组协同的鲁棒调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 142-149.
Sun Donglei, Zheng Zhijie, Ma Yiran, et al. Robust dispatching of energy storage coordinated with AGC units [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 142-149. (in Chinese)

[5] 马智慧, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2102-2115.
Ma Zhihui, Li Xinran, Tan Zhuangxi, et al. Integrated control of primary frequency regulation considering dead band of energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2102-2115. (in Chinese)

[6] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5080-5087.
Hu Zechun, Xie Xu, Zhang Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080-5087. (in Chinese)

[7] 张圣祺, 袁蓓, 徐青山, 等. 规模化储能参与下的电网二次调频优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 82-88, 95.
Zhang Shengqi, Yuan Bei, Xu Qingshan, et al. Optimal control strategy of secondary frequency regulation for power grid with large-scale energy storages [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 82-88, 95. (in Chinese)

[8] Luo Fengji, Meng Ke, Dong Zhaoyang, et al. Coordinated operational planning for wind farm with battery energy storage system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 253-262.

[9] Duggal I, Venkatesh B. Short-term scheduling of thermal generators and battery storage with depth of discharge-based cost model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2110-2118.

[10] 苏烨, 石剑涛, 张江丰, 等. 考虑调频的储能规划与竞价策略综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 191-198.
Su Ye, Shi Jiantao, Zhang Jiangfeng, et al. Review on planning and bidding strategy of energy storage considering frequency regulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 191-198. (in Chinese)

[11] 孙钢虎, 王小辉, 陈远志, 等. 储能联合发电机组调频经济效益分析[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 151-156.
Sun Ganghu, Wang Xiaohui, Chen Yuanzhi, et al. Analysis of economic benefits of frequency modulation by energy storage combined generating units [J]. Journal of

Power Supply, 2020, 18(4): 151-156. (in Chinese)

[12] 贾燕冰, 郑晋, 陈浩, 等. 基于集合经验模态分解的火-储联合调度调频储能容量优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2930-2937.
Jia Yanbing, Zheng Jin, Chen Hao, et al. Capacity allocation optimization of energy storage in thermal-storage frequency regulation dispatch system based on EEMD [J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2930-2937. (in Chinese)

[13] 李军徽, 侯涛, 严干贵, 等. 计及调频成本和荷电状态恢复的多储能系统调频功率双层优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8020-8033.
Li Junhui, Hou Tao, Yan Gangui, et al. Two-layer optimization of frequency modulation power in multi-battery energy storage system considering frequency modulation cost and recovery of state of charge [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8020-8033. (in Chinese)

[14] Doenges K, Egido I, Sigrist L, et al. Improving AGC performance in power systems with regulation response accuracy margins using battery energy storage system (BESS) [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2816-2825.

[15] 吕永青, 窦晓波, 杨冬梅, 等. 含荷电状态修正和通信延迟的储能电站负荷频率鲁棒控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 59-67.
Lü Yongqing, Dou Xiaobo, Yang Dongmei, et al. Load-frequency robust control for energy storage power station considering correction of state of charge and communication delay [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 59-67. (in Chinese)

[16] 裴佑, 裴哲义, 邱伟强, 等. 基于区块链的共享储能联合调频分散交易机制设计[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 138-145.
Pei You, Pei Zheyi, Qiu Weiqiang, et al. Design of decentralized trading mechanism for shared energy storage joint frequency regulation based on blockchain [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 138-145. (in Chinese)

[17] 陈丽娟, 姜宇轩, 汪春. 改善电厂调频性能的储能策略研究和容量配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 52-59.
Chen Lijuan, Jiang Yuxuan, Wang Chun. Strategy and capacity of energy storage for improving AGC performance of power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 52-59. (in Chinese)

[18] Meng Gaojun, Chang Qingqing, Sun Yukun, et al. Energy storage auxiliary frequency modulation control strategy considering ACE and SOC of energy storage [J]. IEEE Access, 2021, 9: 26271-26277.

[19] Xia Shiwei, Ding Zhaohao, Du Ting, et al. Multitime scale coordinated scheduling for the combined system of wind power, photovoltaic, thermal generator, hydro pumped storage, and batteries [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2227-2237.

[20] 李翠萍, 司文博, 李军徽, 等. 基于集合经验模态分解和多目标遗传算法的火-多储系统调频功率双层优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2017-2032.
Li Cuiping, Si Wenbo, Li Junhui, et al. Two-layer optimization of frequency modulated power of thermal generation and multi-storage system based on ensemble empirical mode decomposition and multi-objective genetic algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2017-2032. (in Chinese)

[21] 于会群, 帅永生, 靳东辉. 基于调频信号优化的储能调频控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 101-110.
Yu Huiqun, Shuai Yongsheng, Jin Donghui. Control strategy of energy storage frequency regulation based on frequency regulation signal optimization [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 101-110. (in Chinese)

[22] 李若, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能电池参与二次调频的综合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 74-82.
Li Ruo, Li Xinran, Tan Zhuangxi, et al. Integrated control strategy considering energy storage battery participating in secondary frequency regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 74-82. (in Chinese)

[23] 黄际元, 李欣然, 曹一家, 等. 面向电网调频应用的电池储能电源仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 20-24, 74.
Huang Jiyuan, Li Xinran, Cao Yijia, et al. Battery energy storage power supply simulation model for power grid

frequency regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 20-24, 74. (in Chinese)

[24] 赵靖英, 乔珩埔, 姚帅亮, 等. 考虑储能 SOC 自恢复的风电波动平抑混合储能容量配置策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5206-5219.
Zhao Jingying, Qiao Hengpu, Yao Shuailiang, et al. Hybrid energy storage system capacity configuration strategy for stabilizing wind power fluctuation considering SOC self-recovery [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5206-5219. (in Chinese)

[25] 陈石明, 范烨, 刘晶. 智能电网内规模化分布式电池储能系统的调频控制方法[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 120-131.
Chen Shiming, Fan Ye, Liu Jing. Frequency modulation control method for large-scale distributed battery energy storage systems in smart grid [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 120-131. (in Chinese)

[26] 韩晓娟, 田春光, 程成, 等. 基于经验模态分解的混合储能系统功率分配方法[J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 1889-1896.
Han Xiaojuan, Tian Chunguang, Cheng Cheng, et al. Power allocation method of hybrid energy storage system based on empirical mode decomposition [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(10): 1889-1896. (in Chinese)



于会群

作者简介：

于会群(1978—)，女，博士，副教授。研究方向：微电网控制技术。E-mail：yuhuiqun@shiep.edu.cn。

林涛(1997—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：电网储能调频技术。E-mail：17864301571@163.com。

戚明鑫(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：电网储能调频技术。E-mail：qimingxin01@163.com。

(责任编辑：耿越)

关于《电源学报》2024 年度优秀审稿人的表彰

在过去的 2024 年，共计 600 名专家大力支持《电源学报》审稿工作。各位专家严谨治学，恪尽职守，乐于奉献，严格把关学术质量，为期刊整体学术水平的提高做出巨大贡献，在此我们深表感谢！

为表彰审稿人对《电源学报》发展做出的突出贡献，本刊第四届编委会根据《2024 年度优秀审稿人推选方案》，推选出优秀审稿人 10 名，具体名单如下。

李　想　郑州大学
钱　强　河海大学
杨之青　合肥工业大学
刘　越　香港城市大学
邹宇航　清华大学
刘　懿　天津工业大学
谢立宏　南京航空航天大学
于全庆　哈尔滨工业大学
肖　迁　天津大学
刘宿城　安徽工业大学

特此表彰！

藉此，我们向所有审稿专家表示最崇高的敬意！

《电源学报》编辑部

2025 年 6 月