

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.101

中图分类号: TM732

文献标志码: A

基于调频信号优化的储能调频控制策略

于会群, 帅永生(中国电源学会学生会员), 靳东辉

(上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 随着风电等可再生能源的大规模并网, 传统调频电源的调频容量和调频效果等难以满足电网需求。为此, 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。首先, 建立符合电网调频需求的储能仿真模型, 基于此模型对区域控制误差信号和区域调频需求信号的分配模式进行复频域分析, 结合这2种控制信号的优势确定调频信号的切换判据; 然后, 考虑储能调频过程中的经济性和调频效果, 以减小频率偏移和调频成本优化为目标, 通过基于分解的多目标进化算法优化其分配系数; 最后, 通过阶跃扰动分别仿真验证调频信号切换判据和多目标进化算法优化储能分配系数的有效性, 通过连续扰动对综合控制策略进行仿真验证, 结果表明该策略不仅可以有效减小系统频率偏差, 还降低了储能的运行成本。

关键词: 电池储能; 二次调频; 分配信号优化; 成本优化; 多目标进化算法

Control Strategy of Energy Storage Frequency Regulation Based on Frequency Regulation Signal Optimization

YU Huiqun, SHUAI Yongsheng, *Student Member, CPSS*, JIN Donghui

(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the large-scale integration of wind power and other renewable energy sources, the frequency regulation capacity and effect of traditional frequency regulation power sources are difficult to meet the requirements of power grid. To solve this problem, a comprehensive control strategy based on the frequency regulation signal optimization of a battery energy storage system which assists the thermal power unit to participate in secondary frequency regulation is proposed. First, a simulation model of energy storage that meets the power grid's frequency regulation requirements is established. Based on this model, the allocation mode of area control error signal and area frequency regulation requirement signal is analyzed in the complex frequency domain, and the switching criterion for frequency regulation signal is determined by combining the advantages of the two control signals. Then, considering the economy and efficiency of energy storage frequency regulation, the allocation coefficient is optimized by a decomposed multi-objective evolutionary algorithm to reduce the frequency offset and optimize the cost of frequency regulation. Finally, the effectiveness of frequency regulation signal switching criterion and multi-objective evolutionary algorithm in optimizing the energy storage allocation coefficient is verified by step disturbance simulation. The comprehensive control strategy is verified by continuous disturbance simulation, and results show that it can not only reduce the system

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-16; 录用日期:
2022-04-22; 网络首发日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育资助项目
(92067105); 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 National Natural Science Foundation
of China Major Research Program Incubation Project under the
grant 92067105; Shanghai “Science and Technology Innovation
Action Plan” Special Project for Capacity Building of Local
Institutions under the grant 20020500500

frequency offset effectively, but also lower the operating cost
of energy storage.

Keywords: Battery energy storage; secondary frequency
regulation; allocation signal optimization; cost optimization;
multi-objective evolutionary algorithm

随着风、光等新能源的大量渗透, 传统发电机
组的比例逐渐减少, 这意味着电网面临调频电源占
比降低、调频效果不理想和频率稳定性下降等问

题^[1-6], 寻求新的调频电源来辅助传统机组调频已成为研究热点。相较于传统调频电源, 电池储能系统 BESS(battery energy storage system)具有响应速度快、跟踪精度高等优势, 可以辅助传统调频机组维持电网频率稳定^[7-10]。目前, 储能调频项目已在世界范围内被广泛应用, 国内外也出台了相关政策鼓励 BESS 参与电网调频, 如国家能源局印发的《完善电力辅助服务补偿(市场)机制工作方案》中明确指出, 鼓励储能设备参与电力辅助服务补偿并实现全覆盖; 国家能源局颁布的《电力并网运行管理规定》和《电力辅助服务管理办法》(新版“两个细则”)也重点规范了新型储能的管理条例, 并对其辅助服务方面做出了一些修正^[11]。

在 BESS 参与电网调频的过程中, 自动发电控制 AGC(automatic generation control)是维持电网有功平衡和频率稳定的关键措施, 但传统 AGC 策略已无法应对当前的挑战^[12-14]。其调频信号分配模式目前主要分为基于区域控制误差 ACE(area control error)的信号分配模式^[15-16]和基于区域调节需求 ARR(area regulation requirement)的信号分配模式^[17-19]2 种。文献[20]同时对这 2 种信号分配模式进行仿真分析, 结果表明两者在调频时段中的不同阶段各有优势; 文献[21]通过复频域分析 2 种信号分配模式的频率响应, 并以两者的时域响应曲线交点作为其信号的切换判据。对于调频信号的责任分配问题, 有不少学者进行了研究。文献[22]采用基于集合经验模态分解的方法来对调频信号进行分解, 通过其所选取的阶数将信号分成 2 个部分, 其中频率较高的部分由储能承担, 频率较低的部分由机组承担; 文献[23]采用变分模态分解的方法将调频指令进行初级分配, 同时也考虑了机组爬坡率和储能荷电状态 SOC(state-of-charge)限制等因素; 文献[20]提出了电池储能系统动态可用 AGC 的概念, 其本质是结合优先级和比例对 AGC 信号进行分配, 但未考虑调频电源的容量和爬坡率等因素导致其无法进行满分配; 文献[18]考虑调频效果和储能损耗来建立目标函数, 通过多目标网格自适应算法进行优化求解, 从而得到最优的比例分配系数。

基于上述研究, 本文提出 1 种基于信号模式切换和基于分解的多目标进化算法 MOEA/D(decomposed multi-objective evolutionary algorithm)的优化控制策略。首先建立了满足二次调频需求的 BESS 仿真模型, 通过复频域分析 ACE 和 ARR 这 2 种信号分配模式的优势并建立切换判据; 然后考虑经济性和调频效果, 通过 MOEA/D 对 BESS 分配系数进行优化求解; 最后通过仿真验证了本文策略的有效性。

1 储能参与电网调频模型

1.1 储能模型

在对储能参与调频研究的仿真分析时, 需构建含储能电池的区域电网调频模型。目前, 常用于电网调频的储能电池模型有一阶惯性模型和戴维南等效电路模型。前者结构简单且便于仿真计算, 但其无法精确描述储能电池工作时的内部参数变化和自身动态性能; 后者虽能模拟储能电池的动态性能, 但不能满足二次调频研究中的时间尺度需求^[24]。因此本文提出 1 种适用于电网调频的储能电池模型, 该模型由功率转换系统 PCS(power conversion system)环节、响应延时-时间转换环节和判断输出环节构成, 其模型结构如图 1 所示。

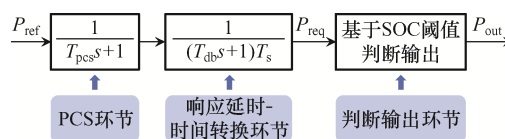


图 1 储能电池模型

Fig. 1 Energy storage battery model

图 1 中: P_{ref} 为储能出力给定值, 其值为正时表示储能放电, 其值为负时表示储能充电; P_{req} 为经过 PCS 环节和响应延时-时间转换环节后的功率需求; P_{out} 为储能实际输出功率; T_{pcs} 为储能变流器时间常数; T_{db} 为延时环节的时间常数; T_s 为时间转换系数。该模型中的判断输出环节主要以 SOC 阈值为判断依据来输出功率, 同时可以缓解储能过充、过放的问题, 其最大充、放电功率分别为

$$P_{c,\max} = \begin{cases} P_b & S \leq S_{h-} \\ P_b (e^{\frac{S_h - S}{S_h - S_{h-}} \lambda} + 1)^{-1} & S_{h-} < S \leq S_h \\ P_b (e^{\frac{S - S_h}{S_{\max} - S_h} \lambda} + 1)^{-1} & S_h < S \leq S_{\max} \\ 0 & S > S_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{d,\max} = \begin{cases} 0 & S \leq S_{\min} \\ P_b (e^{\frac{S - S_1}{S_{\min} - S_1} \lambda} + 1)^{-1} & S_{\min} < S \leq S_1 \\ P_b (e^{\frac{S_1 - S}{S_1 - S_{1+}} \lambda} + 1)^{-1} & S_1 < S \leq S_{1+} \\ P_b & S > S_{1+} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{c,\max}$ 、 $P_{d,\max}$ 分别为考虑 SOC 修正后的最大充、放电功率; P_b 为储能的额定充、放电功率; S 为储能电池荷电状态实时值; S_{\min} 、 S_{\max} 、 S_h 、 S_1 、 S_{h-} 和 S_{1+} 分别为储能电池荷电状态的最小值、最大值、高值、低值、较高值和较低值; λ 为自适应因子。

则储能最终出力 P_{out} 的表达式为

$$P_{out} = \begin{cases} \min(P_{req}, P_{d,\max}) & P_{req} \geq 0 \\ -\min(-P_{req}, P_{c,\max}) & P_{req} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

该环节中 k 时刻储能的荷电状态 S_k 可表示为

$$S_k = \begin{cases} S_{k-1} - \frac{\eta_b \Delta t P_{out,k}}{S_b} & P_{out,k} \leq 0 \\ S_{k-1} - \frac{\Delta t P_{out,k}}{\eta_b S_b} & P_{out,k} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_{k-1} 为 $k-1$ 时刻储能的荷电状态; $P_{out,k}$ 为 k 时刻储能的最终出力; η_b 为储能的充、放电效率; Δt 为采样时间间隔; S_b 为储能的额定容量。

1.2 储能参与电网调频模型

基于上述符合电网调频需求的储能电池仿真模型, 本文对储能参与电网调频的 2 种调频信号模式进行建模, 并引入频率偏差对储能分配系数的灵敏度(无量纲)加以分析和讨论, 确定切换时机判据。

1.2.1 基于 ACE 信号分配模式

本文以单区域电网调频模型为研究对象, 其中调频电源由 1 台火电机组和 1 个电池储能系统构成^[21]。基于 ACE 信号分配模式的储能电池参与区

域电网调频的频率响应仿真模型如图 2 所示。

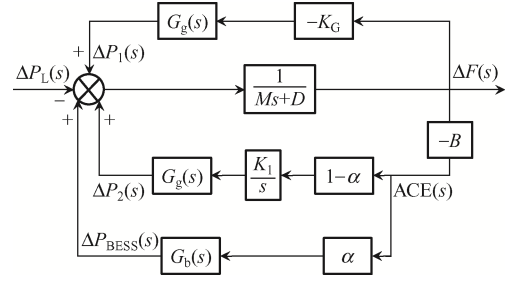


图 2 基于 ACE 信号分配的储能参与电网调频仿真模型
Fig. 2 Simulation model of energy storage participating in power network frequency regulation based on ACE signal allocation

图 2 中: $\Delta P_1(s)$ 、 $\Delta P_2(s)$ 和 $\Delta P_{BESS}(s)$ 分别为机组的一次调频出力、二次调频出力和储能电池出力; $\Delta P_L(s)$ 和 $\Delta F(s)$ 分别为负荷扰动和区域电网的频率偏差; $1/(Ms+D)$ 为机网接口模型; M 为机组转动惯量; D 为系统负荷阻尼常数; B 为区域电网的频率偏差系数; K_G 为机组一次调频调差系数; K_1 为积分控制器系数; α 为储能指令分配系数; $G_g(s)$ 和 $G_b(s)$ 分别为机组和储能的传递函数模型, 其中 $G_g(s)$ 可表示为

$$G_g(s) = \frac{1 + F_{HP} T_{RH} s}{(1 + T_G s)(1 + T_{CH} s)(1 + T_{RH} s)} \quad (5)$$

式中: F_{HP} 为再热器增益; T_{RH} 、 T_G 和 T_{CH} 分别为再热器、调速器和汽轮机的时间常数, 其数值选取参考文献[25]。

由图 2 可得

$$\Delta F(s) = \frac{\Delta P_1(s) + \Delta P_2(s) + \Delta P_{BESS}(s) - \Delta P_L(s)}{Ms + D} \quad (6)$$

$$\Delta P_1(s) = -K_G G_g(s) \Delta F(s) \quad (7)$$

$$\Delta P_2(s) = -B(1 - \alpha) \frac{K_1}{s} G_g(s) \Delta F(s) \quad (8)$$

$$\Delta P_{BESS}(s) = -B\alpha G_b(s) \Delta F(s) \quad (9)$$

将式(7)~式(9)代入式(6)可得

$$\Delta F(s) = -\Delta P_L(s) \left\{ Ms + D + \left[K_G + \frac{B(1 - \alpha)K_1}{s} \right] G_g(s) + B\alpha G_b(s) \right\} \quad (10)$$

设在 ACE 信号分配模式下 $\Delta F(s)$ 对 α 的灵敏度为 $S_{\alpha,ACE}^{\Delta F}$, 其表达式为

$$S_{\alpha,ACE}^{\Delta F} = \frac{\partial \Delta F(s) / \partial \alpha}{\Delta F(s) / \alpha} \quad (11)$$

由式(10)可得 $\Delta F(s)$ 对 α 的偏导数为

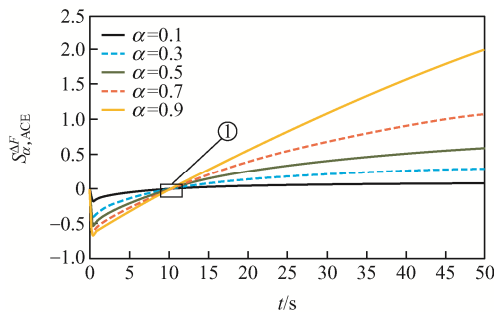
$$\frac{\partial F(s)}{\partial \alpha} = \frac{\Delta F^2(s)}{\Delta P_L(s)} B \left[G_b(s) - \frac{K_1}{s} G_g(s) \right] \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得

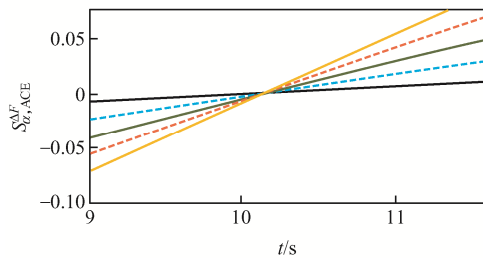
$$S_{\alpha,ACE}^{\Delta F} = \frac{\Delta F(s)}{\Delta P_L(s)} \alpha B \left[G_b(s) - \frac{K_1}{s} G_g(s) \right] \quad (13)$$

化简式(13)后可知, 灵敏度 $S_{\alpha,ACE}^{\Delta F}$ 的表达式与负荷扰动 $\Delta P_L(s)$ 无关, 且式中 $\Delta F(s)$ 与 $\Delta P_L(s)$ 的比值恒为负, 则当 $S_{\alpha,ACE}^{\Delta F}$ 为负时有利于频率恢复, $S_{\alpha,ACE}^{\Delta F}$ 为正时抑制频率恢复。

由式(13)可得 ACE 信号分配模式下 $\Delta F(s)$ 对 α 的灵敏度曲线, 如图 3 所示。可见, 在 ACE 信号分配模式下, 初期 $S_{\alpha,ACE}^{\Delta F} < 0$, 然后其幅值先增大后减小, 直到过零点后逐渐达到稳态, 即在调频时段初期有利于频率偏差的恢复, 随后对其抑制效果逐渐增强, 且随着储能出力比重的逐渐增加对频率的恢复效果和抑制效果都显著增强。



(a) 灵敏度



(b) 图(a)中①局部放大

图 3 基于 ACE 信号分配模式下的灵敏度曲线
Fig. 3 Sensitivity curves based on ACE signal allocation mode

1.2.2 基于 ARR 信号分配模式

基于 ARR 信号分配模式的储能电池参与区域电网调频的频率响应仿真模型如图 4 所示。

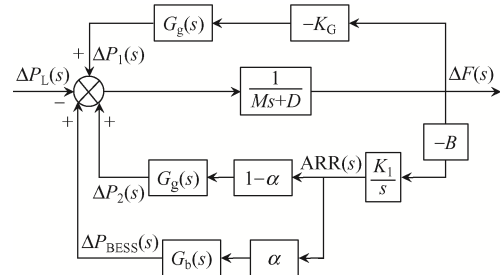


图 4 基于 ARR 信号分配的储能参与电网调频仿真模型

Fig. 4 Simulation model of energy storage participating in power grid frequency regulation based on ARR signal allocation

与 1.2.1 节 ACE 信号的分析方法同理, 由图 4 可得

$$S_{\alpha,ARR}^{\Delta F} = \frac{\Delta F(s)}{\Delta P_L(s)} \alpha B \frac{K_1}{s} [G_b(s) - G_g(s)] \quad (14)$$

由式(14)可得基于 ARR 信号分配模式 $\Delta F(s)$ 对 α 的灵敏度曲线, 如图 5 所示。可见, 在 ARR 信号模式下, 不论储能出力比重为多少, $S_{\alpha,ARR}^{\Delta F}$ 始终小于 0, 其幅值先增后减, 最后达到稳态, 即在调频全时段都有利于频率偏差恢复, 且随着储能出力比重的增加, 其对频率的恢复效果也显著增强。

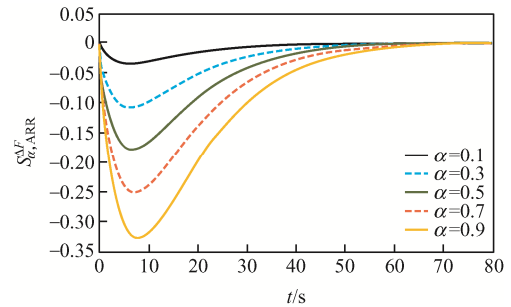


图 5 基于 ARR 信号分配模式下的灵敏度曲线

Fig. 5 Sensitivity curves based on ARR signal allocation mode

1.2.3 信号分配模式的切换判据

基于 1.2.1 节和 1.2.2 节对 2 种信号分配模式模型的分析可以看出: 当储能电池采用 ACE 信号分配模式时, 频率偏差信号不需通过 PI 环节而直接进行分配, 故在调频时段初期储能可以充分发挥其快速出力的优势, 根据式(6)~式(9), 在负荷扰动 $\Delta P_L(s)$ 确定时

$\Delta P_1(s)$ 、 $\Delta P_2(s)$ 、 $\Delta P_{\text{BESS}}(s)$ 的稳态值分别为 0、 Δp_L 、0, 即在稳态时储能逐渐停止出力, 机组开始承担全部负荷扰动; 当储能电池采用 ARR 信号分配模式时, 频率偏差信号需通过 PI 环节进行分配, 在负荷扰动 $\Delta P_L(s)$ 确定时 $\Delta P_1(s)$ 、 $\Delta P_2(s)$ 、 $\Delta P_{\text{BESS}}(s)$ 的稳态值分别为 0、 $(1-\alpha)\Delta p_L$ 、0, 即稳态时储能和机组按分配比例联合出力, 共同承担系统负荷扰动。

综上所述, 结合 2 种调频信号的优势, 本文采用 ACE 模式下灵敏度 $S_{\alpha, \text{ACE}}^{\Delta f}$ 的过零时刻作为调频信号分配模式的切换时机判据。其切换控制策略为在调频时段的初始时刻投入 ACE 信号分配模式, 同时系统计算该模式下的灵敏度 $S_{\alpha, \text{ACE}}^{\Delta f}$ 并实时监测其过零时刻, 若未过零则继续采用原分配模式, 否则切换为 ARR 信号分配模式。

2 基于 MOEA/D 优化的控制策略

储能电池辅助火电机组参与电网调频时, 需对调频信号进行合理分配。为使系统频率偏差快速恢复, 同时减少储能损耗, 本文提出基于 MOEA/D 的优化分配策略。该策略可在每个调频时段内计算出最优分配比例, 使得储能与机组之间协调配合, 快速减小系统频率偏差。

2.1 储能参与调频的多目标优化模型

2.1.1 调频效果目标函数

储能参与电网调频时, 由于负荷扰动频繁且随机性较强, 导致系统出力和负荷波动很难时刻精准匹配, 因此要求电网频率总是维持在计划值上是不现实和不必要的, 系统发电与负荷扰动保持长期动态匹配即可。基于此, 本文采用某调频时段内频率偏差的均方根小于目标值作为其目标函数, 表达式为

$$C_1 = \sqrt{\sum_{t=t_0}^T \Delta f^2(t) / T} \leq \varepsilon \quad (15)$$

式中: C_1 为调频时段内频率偏差的均方根; T 为调频时段; t 和 t_0 分别为当前时刻和当前调频时段的初始时刻; Δf 为该区域电网的频率偏差; ε 为频率控制目标。

2.1.2 储能调频成本目标函数

储能电池损耗的主要因素有 3 个: 电池的充放

电功率、SOC 和温度(当温度过高于或过低于标称温度时通常会增加老化)。目前多数储能应用中, 温度由空调系统调节, 并保持储能电池温度在合适的范围内, 因此本文主要考虑前 2 个因素, 选取这 2 个因素作为储能调频成本的目标函数, 其表达式为

$$\min C_2 = \beta \sqrt{\sum_{t=t_0}^T P_{\text{out}}^2(t) / T} + \gamma \sqrt{\sum_{t=t_0}^T (S_t - S_0)^2 / T} \quad (16)$$

式中: C_2 为调频时段内储能的调频成本; P_{out} 为储能实际输出功率; S_t 和 S_0 分别为储能的当前时刻荷电状态和储能的基准荷电状态; β 和 γ 分别为储能电池由于高功率和 SOC 偏移过大而增加调频成本的权重系数, 二者的选取采用熵权法进行赋权^[26]。其中对于储能出力深度和 SOC 的约束已在上述储能模型中确立。

2.2 基于 MOEA/D 的优化分配策略

MOEA/D 本质上是 1 种优化算法, 其优势是可以将多目标问题分解为若干个单目标问题, 故对于多目标优化问题来说该算法的速度有较大优势。本文在 MOEA/D 中的分解方法采用权重切比雪夫聚合法, 其原始公式为

$$\min g^{\text{tc}}(x | \rho, z^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{ \rho_i | f_i(x) - z_i^* | \} \quad \text{s.t. } x \in \Omega \quad (17)$$

式中: g^{tc} 为目标函数; ρ 为权重向量; m 为权重数量; z^* 为参考点坐标, $z^* = [z_1^* \ z_2^* \ \dots \ z_m^*]^T$, 对于每个目标分量 i , 均有 $z_i^* = \min \{ f_i(x) | x \in \Omega \}$, Ω 为决策空间, 即由每个目标分量最小值组成的坐标。由于该方法在处理连续多目标问题时会导致聚合曲线不平滑, 因此本文对其进行改进, 即在原始公式中添加参数 φ 来与权重求和方法相组合, 通过调整 φ 控制 2 种聚合方法的比例, 则有

$$\min g^{\text{AT}}(x | \rho, z^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{ \rho_i | f_i(x) - z_i^* | \} + \varphi \sum_{j=1}^m | f_j(x) - z_j^* | \quad (18)$$

算法流程如下。

步骤 1 输入初始参数。双目标函数、约束条件和算法的终止条件。

步骤 2 初始化。计算权重向量之间的欧式距离,然后随机生成初始种群 x^1, x^2, \dots, x^N ; 初始化参考点 z^* , 即每个目标分量上的最小值; 再创建 1 个外部种群 EP(external population)用于存储优秀个体。

步骤 3 种群更新。对每个权重向量进行更新,从邻集 $B(i)$ 中随机取出个体 x^k 和 x^l , 利用基因重组遗传算子使其产生新解 y ; 对 y 修复和改进启发产生符合当前约束的解 y' ; 更新 z^* , 判断 y' 是否替换原有极值; 更新邻域解 $B(i)$, 对于邻域中每个权值向量 λ^j , 如果得到优化则更新 i ; 最后更新 EP, 从 EP 中移除所有被 $F(y')$ 支配的解, 如果该解不存在, 则将 $F(y')$ 加入到 EP 中。

步骤 4 条件终止。根据输入初始参数中的停止条件判断循环是否停止, 若停止, 则输出 EP; 否则, 重复步骤 3, 最后在 EP 解集中选出最优的储能分配系数。

其综合控制策略流程如图 6 所示。

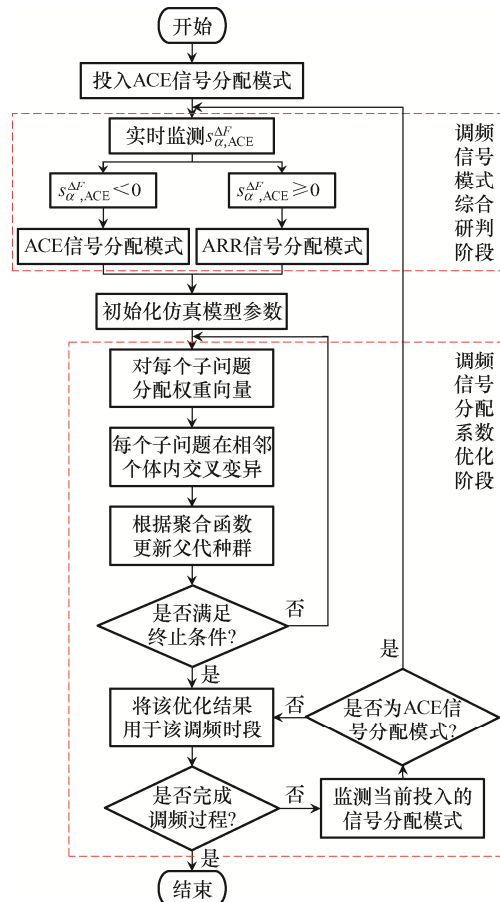


图 6 综合控制策略流程

Fig. 6 Flow chart of comprehensive control strategy

3 仿真分析

3.1 仿真条件

在 MATLAB/Simulink 平台建立如图 2 和图 4 的含储能电池的区域电网频率响应模型。设置火电机组额定功率为 1 000 MW, 机组爬坡率为 30 MW/min; 模型参数选取为: $F_{HP}=0.50$, $T_{RH}=10.00$, $T_G=0.08$, $T_{CH}=0.30$; 设置 BESS 的额定功率和容量分别为 10 MW 和 10 MW·h, 充、放电效率为 0.9, 基准荷电状态 $S_0=0.5$, 模型参数选取为: $T_{pcs}=0.01$, $T_{db}=0.01$; 功率基准值和频率基准值分别为 1 000 MW 和 50 Hz, 其他参数见表 1。

表 1 仿真模型参数

Tab. 1 Parameters of simulation model

参数	数值	参数	数值
M	8	S_{\max}	0.9
D	1	S_{\min}	0.1
B	21	S_1	0.3
K_G	20	S_h	0.7
K_1	0.18	S_{1+}	0.375
β	0.75	S_{h-}	0.625
γ	0.25		

3.2 调频信号切换策略结果分析

基于 3.1 节对调频信号模式的建模分析, 为验证在不同信号分配模式下系统频率的恢复效果, 对模型施加标幺值为 0.2 的阶跃扰动以模拟负荷波动。将基于单 ACE 调频信号的控制策略、基于单 ARR 调频信号的控制策略及本文分配信号切换的控制策略进行仿真对比。仿真结果分别如图 7~图 9 所示, 调频评价指标对比见表 2。

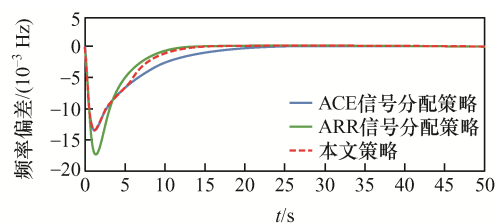


图 7 3 种信号分配策略的频率偏差对比

Fig. 7 Comparison of frequency offset among three signal allocation strategies

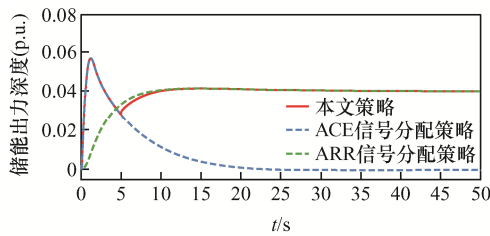


图 8 3 种信号分配策略的储能出力深度对比

Fig. 8 Comparison of energy storage output depth among three signal allocation strategies

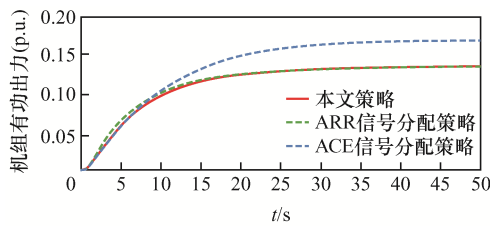


图 9 3 种信号分配策略的机组有功出力对比

Fig. 9 Comparison of active power output from unit among three signal allocation strategies

表 2 阶跃响应下 3 种信号分配策略的调频效果

Tab. 2 Frequency regulation effects of three signal allocation strategies under step response

控制策略	最大频率偏差/Hz	频率偏差均方根/Hz	频率偏差峰值时间/s	频率恢复稳态时间/s
本文策略	-1.349×10^{-2}	4.507×10^{-3}	1.141	20.000
ACE 信号分配策略	-1.349×10^{-2}	6.146×10^{-3}	1.141	32.399
ARR 信号分配策略	-1.735×10^{-2}	5.182×10^{-3}	1.263	18.801

由图 7~图 9 和表 2 可以看出, 本文控制策略在整个调频过程中均能有效恢复频率偏差。相较于基于单 ACE 调频信号控制策略, 本文控制策略的频率恢复稳态时间减少了 38.3%, 频率偏差的均方根减少了 26.7%, 最大频率偏差和频率偏差峰值时间与其相同, 即本文策略在快速恢复频率的同时也能保证系统稳态频率偏差不会过大; 相较于基于单 ARR 调频信号控制策略, 本文控制策略的最大频率偏差减少了 22.2%, 频率偏差的均方根减少了 13.0%, 在系统频率的暂态稳定性方面优势较大, 而频率恢复稳态时间仅增加了 6.4%, 说明本文策略在减少频率偏差的同时也能保证系统稳态恢复时间不会过长。

3.3 MOEA/D 优化结果分析

3.2 节已对本文调频信号的切换策略进行了仿真验证, 本节将对 MOEA/D 优化储能分配系数的有效性进行验证。对模型施加标么值为 0.2 的阶跃扰动以模拟负荷波动, 并将 2.2 节切换判据用于 MOEA/D 优化储能分配系数的控制策略及基于传统比例分配储能系数的控制策略的仿真对比。仿真结果分别如图 10~图 12 所示, 调频评价指标对比见表 3。

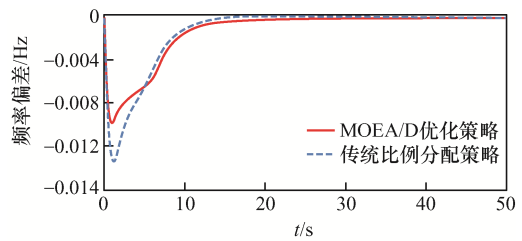


图 10 系统频率偏差对比

Fig. 10 Comparison of system frequency offset

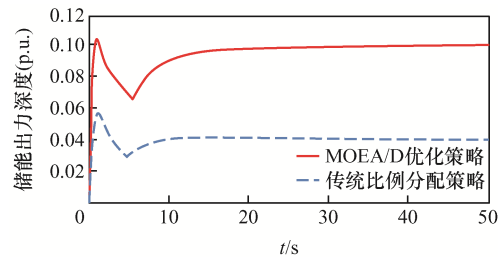


图 11 储能出力深度对比

Fig. 11 Comparison of energy storage output depth

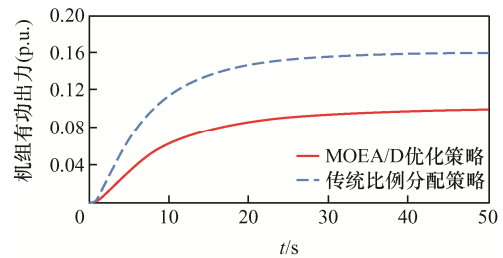


图 12 机组有功出力对比

Fig. 12 Comparison of active power output from unit

表 3 阶跃响应下 2 种储能分配系数优化策略对比

Tab. 3 Comparison between two optimization strategies for energy storage allocation coefficient under step response

控制策略	最大频率偏差/Hz	频率偏差均方根/Hz	频率恢复稳态时间/s
MOEA/D 优化策略	-9.854×10^{-3}	3.379×10^{-3}	17.890
传统比例分配策略	-1.283×10^{-2}	6.146×10^{-3}	26.586

由图 10~图 12 和表 3 可以看出,通过 MOEA/D 对储能分配系数进行优化后,系统的频率稳定性更好。相较于基于传统比例分配控制策略,本文控制策略的最大频率偏差减少了 23.2%,频率偏差的均方根减少了 45.0%,频率恢复稳态时间减少了 32.7%。结果表明,通过 MOEA/D 优化储能分配系数的策略对系统频率的暂、稳态均有较大提升。

3.4 综合控制策略结果分析

对本文模型施加连续负荷扰动,将如下 3 种控制策略进行仿真对比:一是本文的综合控制策略,以切换判据优化调频信号,以 MOEA/D 优化储能分配系数;二是无储能策略;三是传统电厂的 ARR 单信号分配模式和按比例分配系数的控制策略,仿真结果分别如图 13 和图 14 所示,调频评价指标对比见表 4。

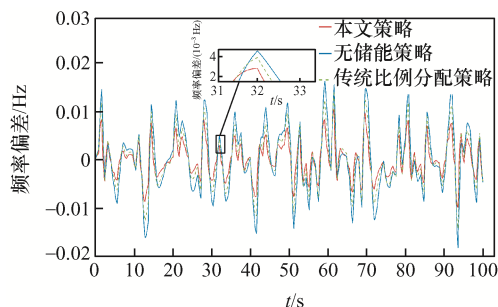


图 13 连续扰动下的系统频率偏差曲线

Fig. 13 System frequency offset curve under continuous disturbance

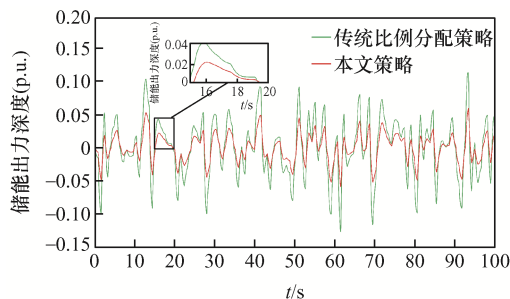


图 14 连续扰动下的储能出力曲线

Fig. 14 Energy storage output curves under continuous disturbance

由图 13、图 14 和表 4 可以看出,本文控制策略在减小频率偏差和控制调频成本方面均具有较好的效果;在最大频率偏差方面,比无储能策略减小了 41.6%,比传统比例分配策略减小了 25.3%;

表 4 连续扰动下 3 种信号分配策略的调频效果

Tab. 4 Frequency regulation effects of three signal allocation strategies under continuous disturbance

控制策略	最大频率偏差/Hz	频率偏差均方根/Hz	储能系统调频成本
本文策略	1.061×10^{-2}	3.692×10^{-3}	0.138
无储能策略	-1.817×10^{-2}	6.869×10^{-3}	0
传统比例分配策略	1.421×10^{-2}	5.251×10^{-3}	0.152

在频率偏差均方根方面,比无储能策略减小了 46.3%,比传统比例分配策略减小了 29.7%;在储能系统调频成本方面,比传统比例分配策略减小了 9.2%。综上,本文综合控制策略不仅可以减小系统频率偏差,还能控制储能在参与调频过程中的成本。

4 结语

为解决传统电源调频容量不足和调频性能不理想等问题,本文提出基于调频信号切换和 MOEA/D 优化的综合控制策略,并进行了仿真验证。仿真结果表明,本文策略在改善系统暂、稳态频率质量方面效果显著,也能兼顾储能系统的调频成本并维持其 SOC 在较为理想的区间,同时提升了电池储能系统在辅助传统机组调频过程中的经济性。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 李德鑫, 田春光, 吕项羽, 等. 基于 AHP 和 CRITIC 的电网调峰调频储能系统规划[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 136-141.
Li Dexin, Tian Chunguang, Lü Xiangyu, et al. Planning of energy storage system for power grid peaking shaving and frequency regulation based on AHP and CRITIC [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(2): 136-141. (in Chinese)
- [3] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联

- 合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29-34.
- Mu Chunhua, Wu Pengyue, Sun Ganghu, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29-34. (in Chinese)
- [4] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- Sun Bingying, Yang Shuili, Liu Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16, 38. (in Chinese)
- [5] 胡泽春, 罗浩成. 大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 2-15.
- Hu Zechun, Luo Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 2-15. (in Chinese)
- [6] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
- Li Junhui, Feng Xichao, Yan Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170. (in Chinese)
- [7] 裴善鹏, 朱春萍. 高可再生能源比例下的山东电力系统储能需求分析及省级政策研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 29-35.
- Pei Shanpeng, Zhu Chunping. Research of energy storage demand and province class policy in Shandong electric power system in a setting of high proportion renewable energy [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 29-35. (in Chinese)
- [8] 谢志佳, 李德鑫, 王佳蕊, 等. 储能系统参与电力系统调频应用场景及控制方法研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 117-125.
- Xie Zhijia, Li Dexin, Wang Jiarui, et al. Application scenarios and control method research of energy storage system participating in power system frequency modulation [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 117-125. (in Chinese)
- [9] 刘强. 储能系统在火力发电厂联合调频应用[J]. 通信电源技术, 2020, 37(3): 120-122, 125.
- Liu Qiang. Application of energy storage system in joint frequency regulation of thermal power plant [J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(3): 120-122, 125. (in Chinese)
- [10] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
- Li Xinran, Huang Jiyuan, Chen Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153. (in Chinese)
- [11] 国家发展和改革委员会. 国家能源局关于印发《完善电力辅助服务补偿(市场)机制工作方案》的通知(国能发监管〔2017〕67号)[EB/OL]. (2017-11-15)[2022-03-21]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto92/201711/t20171122_3058.htm.
- [12] 江全元, 龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3360-3368.
- Jiang Quanyuan, Gong Yuzhong. Review of wind power integration control with energy storage technology [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3360-3368. (in Chinese)
- [13] 陈大宇, 张粒子, 马历. 储能参与的 AGC 市场出清优化建模新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 79-84.
- Chen Dayu, Zhang Lizi, Ma Li. A new optimization method for AGC market clearing considering energy storage systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 79-84. (in Chinese)
- [14] 高宗和, 滕贤亮, 涂力群. 互联网 AGC 分层控制与 CPS 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 78-81.
- Gao Zonghe, Teng Xianliang, Tu Liqun. Hierarchical AGC mode and CPS control strategy for interconnected power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 78-81. (in Chinese)
- [15] 邹包产, 杜志坚, 要丰伟, 等. 火电机组基于区域控制偏差(ACE)模式协调优化[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(4): 34-38.
- Zou Baochan, Du Zhijian, Yao Fengwei, et al. Coordination optimization of thermal power units based on area control error(ACE) mode [J]. Techniques of Automation

- and Applications, 2021, 40(4): 34-38. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 81-87. Ding Dong, Liu Zongqi, Yang Shuili, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 81-87. (in Chinese)
- [18] 路小俊, 伊建伟, 李炎. 基于多目标网格自适应搜索算法的储能系统参与 AGC 优化控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2116-2124. Lu Xiaojun, Yi Jianwei, Li Yan. Optimal control strategy of AGC with participation of energy storage system based on multi-objective mesh adaptive direct search algorithm [J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2116-2124. (in Chinese)
- [19] Zhong Jin, He Lina, Li Canbing, et al. Coordinated control for large-scale EV charging facilities and energy storage devices participating in frequency regulation [J]. Applied Energy, 2014, 123: 253-262.
- [20] Cheng Yunzhi, Tabrizi M, Sahni M, et al. Dynamic available AGC based approach for enhancing utility scale energy storage performance [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1070-1078.
- [21] 张舒鹏, 董树锋, 徐成司, 等. 大规模储能参与电网调频的双层控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 55-62. Zhang Shupeng, Dong Shufeng, Xu Chengsi, et al. Bi-level control strategy for power grid frequency regulation with participation of large-scale energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 55-62. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 李卫国, 焦盘龙, 刘新宇, 等. 基于变分模态分解的储能辅助传统机组调频的容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 43-52. Li Weiguo, Jiao Panlong, Liu Xinyu, et al. Capacity optimization configuration of energy storage auxiliary traditional unit frequency modulation based on variational mode decomposition [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 43-52. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 李若. 储能电池参与电力系统二次调频控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018. Li Ruo. Research on secondary frequency modulation control strategy of energy storage battery in power system [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [26] Ju Liwei, Tan Zhongfu, Li Huanhuan, et al. Multi-objective operation optimization and evaluation model for CCHP and renewable energy based hybrid energy system driven by distributed energy resources in China [J]. Energy, 2016, 111: 322-340.



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。

帅永生(1996—), 男, 中国电源学会学生会会员, 通信作者, 硕士研究生。研究方向: 储能辅助电网调频技术。E-mail: 591919928@qq.com。

靳东辉(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 储能辅助电网调频技术。E-mail: 18616389519@163.com。