

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210857

基于多时间尺度的储能调峰调频协同控制策略

陈长青^{1,2}, 李欣然¹, 张冰玉³, 阳同光²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 智慧城市能源感知与边缘计算省重点实验室(湖南城市学院), 湖南 益阳 413000; 3. 国网浙江湖州市德清县供电有限公司, 浙江 湖州 310000)

摘要: 储能(Energy Storage, ES)仅参与电网单一场景(调峰或调频)控制, 利用率低。首先, 提出一种基于ES荷电状态(State of charge, SoC)的调峰调频工作区域划分方法和协同控制策略, 可实现ES在调峰与调频控制间切换, 进而提高利用率。其次, 为进一步提高ES调峰调频效果, 在调峰单一场景中分别提出变功率调峰策略和虚拟惯性与下垂控制相结合的综合调频控制策略。然后, 在此基础上进一步提出调峰调频协同控制策略。最后, 通过仿真实例发现, 相比单调峰与单调频控制, 基于多时间尺度的协同控制策略, ES利用率分别提高了16.25%与37.29%, 说明了该方法和策略的可行性。

关键词: 储能; 调峰; 调频; 协同控制策略

Energy storage peak and frequency modulation cooperative control strategy based on multi-time-scale

CHEN Changqing^{1,2}, LI Xinran¹, ZHANG Bingyu³, YANG Tongguang²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Smart City Energy Perception and Edge Computing, Hunan City University, Yiyang 413000, China; 3. State Grid Zhejiang Huzhou Deqing Power Supply Co., Ltd., Huzhou 310000, China)

Abstract: Energy Storage (ES) participates in the control of a single scenario (peak regulation or frequency modulation) of the power grid, and the utilization rate is low. A peak-FM working area division method and cooperative control strategy based on ES State of Charge (SoC) are proposed. This strategy can realize ES switching between peak modulation and frequency modulation control, and then improve the utilization rate. Then, to further improve the effect of ES peak modulation, a variable power peak modulation strategy and integrated frequency modulation control strategy combining virtual inertia and droop control are proposed respectively in a single peak modulation scene. From here a cooperative control strategy of peak and frequency modulation is proposed. Finally, a simulation example shows that compared with monotone peak control and single frequency modulation control, the utilization rate of ES is improved by 16.25% and 37.29% respectively based on multi-timescale cooperative control strategy. This shows the feasibility of the method and strategy.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903400).

Key words: energy storage; peak shaving; frequency regulation; cooperative control strategy

0 引言

ES具有性能稳定、响应快等特点^[1-4], 被广泛应用于平抑新能源出力波动^[5-6]、提高低电压穿透能力^[7]、调峰^[8-10]和调频^[11-12]等, 因此利用ES来改善电网运行特性, 已然成为众多学者的研究重点^[13-15]。

在调频研究方面: 文献[12]通过模拟惯性控制,

提供动态频率快速支持, 解决风光新能源发电造成的频率偏移, 验证了下垂控制及惯性控制参与调频的可行性; 文献[17-18]考虑ES的SoC与充放电功率关系, 提出变下垂系数自适应控制方法, 有效提高了ES调频效果; 文献[19]提出一种虚拟负惯性控制策略, 通过频率偏差临界值用以区分不同情况的调频需求, 选择对应的控制策略, 提高了调频准确性; 文献[20]提出一种基于动态下垂系数与动态SoC基点的ES一次调频控制策略, 能有效提高ES

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903400)

持续时间和调频效果。

而在调峰研究方面: 文献[21]提出综合考虑调峰效果、购电支出、蓄电池损耗的多目标优化模型, 采用改进粒子群优化算法进行求解; 文献[22]基于园区预测负荷, 对负荷及 SoC 状态划分区间, 针对不同区间设计各自的目标函数, 采用动态自适应粒子群算法进行求解, 进而确定 ES 控制策略; 文献[23]提出负荷预测与调峰动态目标规划结合的 ES 调峰控制策略, 通过分阶段滚动优化实现最优调峰效果。

然而, ES 仅应用于单一调峰或调频场景, 只有在特定时段 ES 才动作, 在其他时段处于闲置状态, 极大地浪费了 ES 资源。因此, 近年来, 为了提升 ES 利用率, 部分学者开始研究 ES 多场景协同运行。如文献[24]针对负荷侧 ES, 建立调峰调频综合收益的经济优化模型, 并验证了调峰调频协同优化收益大于两者单独收益之和, 从经济性角度证明了调峰调频协同优化的可行性。文献[25]针对电网侧 ES, 提出了一种调峰调频的综合控制策略, 将 SoC 进行区域划分, 实现两个应用场景协调运行。但文献[24-25]中 ES 主要采用恒功率出力策略, 不能实时跟踪负荷曲线变化, 降低了调峰调频准确性。

基于此, 本文针对电网侧 ES, 提出一种基于 SoC 状态的多时间尺度调峰调频工作区域划分方法。该方法可实现 ES 在调峰与调频控制间切换, 进而提高利用率。针对单调峰和调频控制场景, 分别提出变功率调峰策略、虚拟惯性与下垂控制相结合的综合调频控制策略。并在此基础上, 进一步提出调峰调频协同控制策略。最后, 通过仿真实例发现: 相比单调峰与单调频控制, 基于多时间尺度的协同控制策略, ES 利用率分别提高了 16.25% 与 37.29%。说明了该方法和策略的可行性。

1 协同控制工作区域划分方法

1.1 工作区域划分思路

电网调峰为日前计划调度, 通常由电力调度部门根据历史负荷数据和未来一天的负荷预测值, 分配给 ES 和各发电厂的出力计划, 而调频为日内实时调节。当供电与负荷不平衡时, 将发生频率波动, 进而产生调频需求。

根据调峰市场规则, ES 作为第三方独立主体, 需严格按照日前发电计划进行出力^[26]。图 1 为 ES 调峰原理图。然而, 当 ES 仅应用于单一调峰场景时, 只在负荷高峰时段或者负荷低谷时段进行充放电动作, 而在其他时段处于闲置状态, 大大降低了 ES 利用率。因此, 本文对 ES 采用“闲时复用”(即在同一个时间段内, 只有一种工作模式(调峰或调频))的方式。在 ES 非调峰阶段, 利用闲置 ES 改善

电网频率, 进而提高利用率。从而可将 ES 划分为多个工作区域, 如图 2 所示。

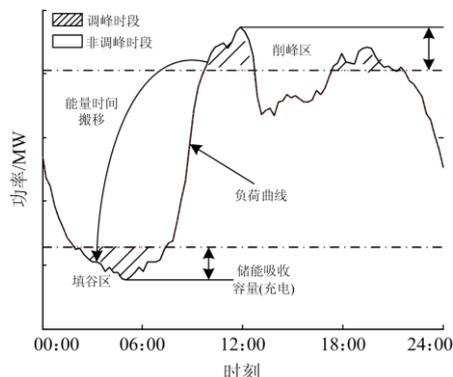


图 1 ES 调峰原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ES peak regulation

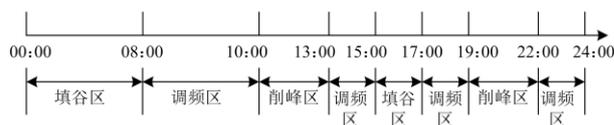


图 2 不同时间尺度的协同工作区域划分

Fig. 2 Division of collaborative working areas at different time scales

1.2 基于 SoC 的工作区域划分方法

受 ES 容量限制, 当 ES 应用于调峰调频协同控制时, 需要对 SoC 进行合理规划。当 ES 工作在填谷区时, ES 处于充电状态, 其 SoC 从 0.1 升至 0.9。当 ES 工作在削峰区时, 处于放电状态, SoC 从 0.9 降至 0.1。此时, 当 ES 切换到调频区时, SoC 初始值可能处于 0.1 或 0.9。然而, 频率偏差具有双向可能性。因此, 当 SoC 为 0.1 时, 不能通过放电来改善频率跌落问题, 当 SoC 为 0.9 时, 不能通过充电来改善频率上升问题。为避免使 SoC 处于临界值, 降低调频能力, 本文将 SoC 调峰工作区间设为 0.15~0.85, 为调频预留 0.05, 图 3 为协同控制下的 SoC 分区示意图。基于 SoC 的调峰调频协同控制工作区域划分如图 4 所示。

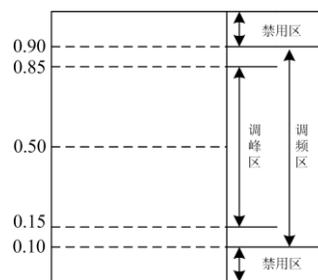


图 3 协同控制下的 SoC 工作区域划分

Fig. 3 SoC work area division under collaborative control

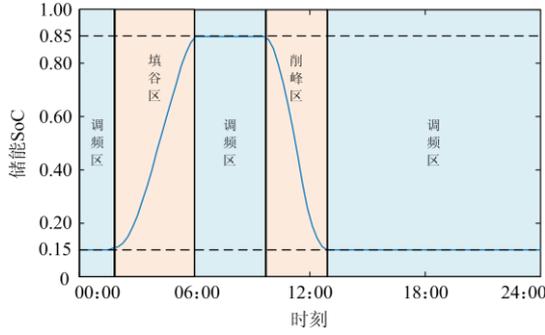


图 4 基于 SoC 的协同控制工作区域划分

Fig. 4 Collaborative control work area division based on SoC

2 ES 调峰调频协同控制策略

2.1 单调峰控制策略

在传统恒功率充放电策略中，因 ES 出力与实际调峰需求不匹配而出现局部反向高峰现象。为此，本文提出一种变功率充放电控制策略，使 ES 可根据负荷调峰需求动态调整充放电功率。ES 变功率充放电控制策略以一天为时间尺度，基于电量平衡原则，即 ES 填谷吸收的容量与削峰释放的容量相等。其变功率充放电策略控制流程如图 5 所示。

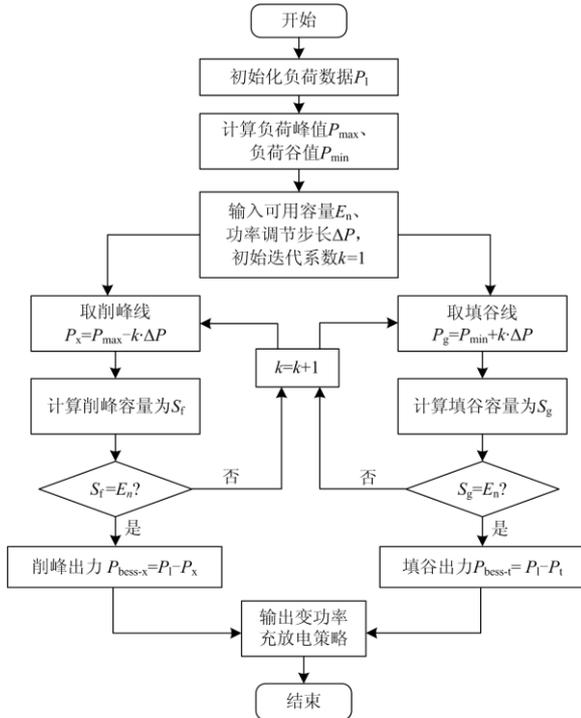


图 5 ES 变功率充放电策略流程图

Fig. 5 Charging and discharging strategy flow chart of energy storage variable power

其具体控制步骤如下所述。

1) 导入原始负荷 P_1 ，得到负荷的峰值 P_{\max} 与谷

值 P_{\min} 。

2) 设定 ES 的额定功率 P_m 与额定容量 E_m ，根据 ES 的 SoC 限制得到 ES 电站可用容量 E_n 。取初始削峰线 $P_x = P_{\max}$ ，并以设定的小数值步长 ΔP 向下移动，削峰线 $P_x = P_{\max} - k \cdot \Delta P$ 与负荷曲线的交点为 t_1 、 t_2 ，则可以确定削峰释放的电量，如式(1)所示。

$$S_f = \int_{t_1}^{t_2} (P_{\max} - P_i) dt \quad (1)$$

当削峰容量 S_f 与可用容量 E_n 相等时，则确定削峰线 P_x ，若削峰容量 S_f 小于可用容量 E_n ，迭代系数 $k = k + 1$ ，将削峰线 P_x 继续下移，直至 S_f 与 E_n 相等。ES 参与调峰场景变功率充放电策略削峰出力，如式(2)所示。

$$P_{\text{bess-x}} = P_1 - P_x \quad (2)$$

3) 取初始填谷线 $P_t = P_{\min}$ ，以设定的小数值步长 ΔP 向上移动，填谷线 $P_t = P_{\min} + k \cdot \Delta P$ 与负荷曲线的交点为 t_3 与 t_4 ，则填谷吸收的电量如式(3)所示。

$$S_g = \int_{t_3}^{t_4} (P_i - P_g) dt \quad (3)$$

当填谷容量 S_g 与可用容量 E_n 相等时，填谷线 P_g 也随之确定，若 S_g 小于 E_n ，则继续迭代向上移动填谷线，直至 S_g 与 S_f 相等。ES 参与调峰场景变功率充放电策略削峰出力，如式(4)所示。

$$P_{\text{bess-t}} = P_1 - P_t \quad (4)$$

上述步骤可以确定 ES 参与调峰场景变功率充放电策略的动作深度与动作时间。

2.2 单调频控制策略

虚拟下垂控制对改善系统稳态频率偏差效果很明显，却无法解决初始频率偏差变化率过快的问题，而虚拟惯性控制能有效改善频率偏差变化率。因此，基于两种控制方法各自的优点与不足，提出一种综合调频控制策略，其具体过程如图 6 所示。

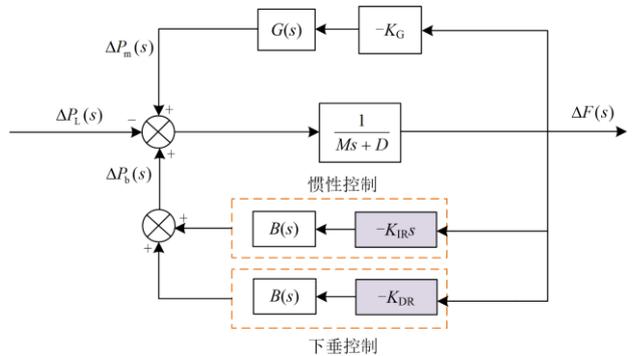


图 6 ES 综合控制模型

Fig. 6 ES integrated control model

由图 6 可知，当两种控制策略结合时，其 ES 出力如式(5)所示。

$$\Delta P(s) = -(K_{DR} + K_{IR}s)G(s)\Delta F(s) \quad (5)$$

式中, K_{IR} 和 K_{DR} 分别为惯性和下垂控制系数。

在综合控制策略下, 系统频率如式(6)所示。

$$\Delta F(s) = \frac{-\Delta P_L(s)}{Ms + D + K_G G(s) + (K_{DR} + K_{IR}s)B(s)} \quad (6)$$

式中, K_G 为传统机组调频系数。

由拉普拉斯变换可得系统初始频率偏差变化率与稳态频率偏差, 计算如式(7)所示。

$$\begin{cases} df_0 = \lim_{s \rightarrow \infty} s[s\Delta F(s)] = -\frac{\Delta P_L}{M + K_{IR}} \\ \Delta f_s = \lim_{s \rightarrow \infty} [s\Delta F(s)] = -\frac{\Delta P_L}{D + K_G + K_{DR}} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 通过采用下垂控制与惯性控制结合方法, 一方面可以减少稳态频率偏差, 另一方面可以抑制频率偏差变化率。当频率偏差处于恶化阶段, 采用虚拟惯性控制策略。而频率偏差处于恢复阶段, 采用虚拟下垂控制。图 7 为不同调频阶段的综合频率控制策略原理图。

图 7 中, 在 $t_1 \sim t_2$ 时段内, 满足 $\Delta f \cdot df/dt > 0$, 频率偏差有持续增大的趋势, 属于频率恶化工况, 需要采用虚拟惯性控制策略。在 $t_3 \sim t_4$ 时段内, 频率偏差有减小的趋势, 逐渐向 0 靠近, 属于频率恢复工况。此时 $\Delta f \cdot df/dt < 0$, 而下垂控制会减缓频率恢复速度, 所以在该工况下采用下垂控制。

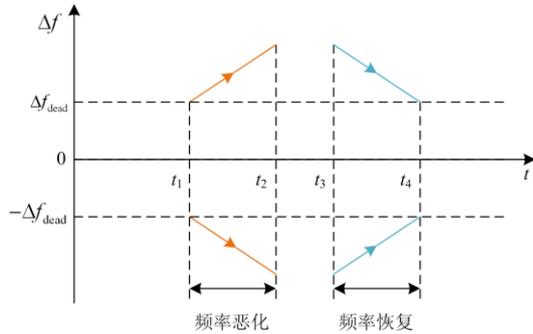


图 7 综合频率控制策略原理图

Fig. 7 Schematic diagram of integrated frequency control strategy

2.3 调峰调频协同控制策略

本文对 ES 参与调峰调频的协同控制策略, 主要采用“闲时复用”的方式。在 ES 非调峰阶段, 利用闲置 ES 改善电网频率, 进而提高利用率。因此, 需根据日前预测负荷曲线得到削峰与填谷线。进而划分外层调峰区与内层调频区, 外层调峰区进一步分为填谷区与削峰区, 外层调峰区投影至 x 轴的时段为调峰时段。从而得到基于负荷预测的协同工作时段, 如图 8 所示。

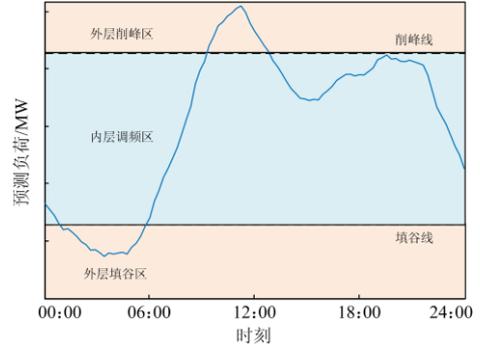


图 8 基于负荷预测的协同控制工作区域划分
Fig. 8 Collaborative control work area division based on load forecasting

由图 8 可知, 基于日前负荷预测曲线可划分三个工作区域。从而确定次日 ES 参与调峰与调频的时段。其调峰调频协同控制策略主要包括 5 个环节:

- 1) 导入预测负荷与实时负荷扰动数据。
- 2) 基于预测负荷数据, 通过变功率策略确定削峰线与填谷线, 基于实时负荷扰动数据, 确定频率偏差。
- 3) 当预测负荷数据在削峰线与填谷线之外时, 说明 ES 处于外层调峰区, 此时依据变功率调峰控制策略确定 ES 出力。
- 4) 若 ES 不处于外层调峰区, 则说明处于内层调频区。判断频率偏差是否越过死区, 若越过死区则依据综合调频控制策略确定 ES 出力, 否则 ES 出力为 0。
- 5) 输出 ES 的最终出力。得到调峰调频协同控制策略如图 9 所示。

根据负荷预测得到 t 时刻 ES 计划填谷出力 $P_g(t)$, 计划削峰出力 $P_f(t)$ 。由实时负荷扰动带来的 ES 调频出力为 $P_{PRF}(t)$ 。负荷扰动采样间隔为 1 min, 则在一天时间尺度内 $t=1440$ 。由此可得每个工作区域的 ES 出力情况。

1) 填谷区: 在该时段负荷处于谷值, 电力需求低, 供电压力较小, ES 处于充电状态, 存储多余电能, $P_{bess}(t) = P_g(t) < 0$ 。

2) 调频区: 该时段没有调峰需求, 若频率偏差大于设定上限, ES 为充电状态, $P_{bess}(t) = P_{PRF}(t) < 0$; 若频率偏差小于设定下限, ES 为放电状态, $P_{bess}(t) = P_{PRF}(t) > 0$; 若频率偏差在死区内, ES 出力为 0, $P_{bess}(t) = 0$ 。

3) 削峰区: 该时段负荷处于峰值, 电力需求量大, ES 处于放电状态, $P_{bess}(t) = P_f(t) > 0$ 。

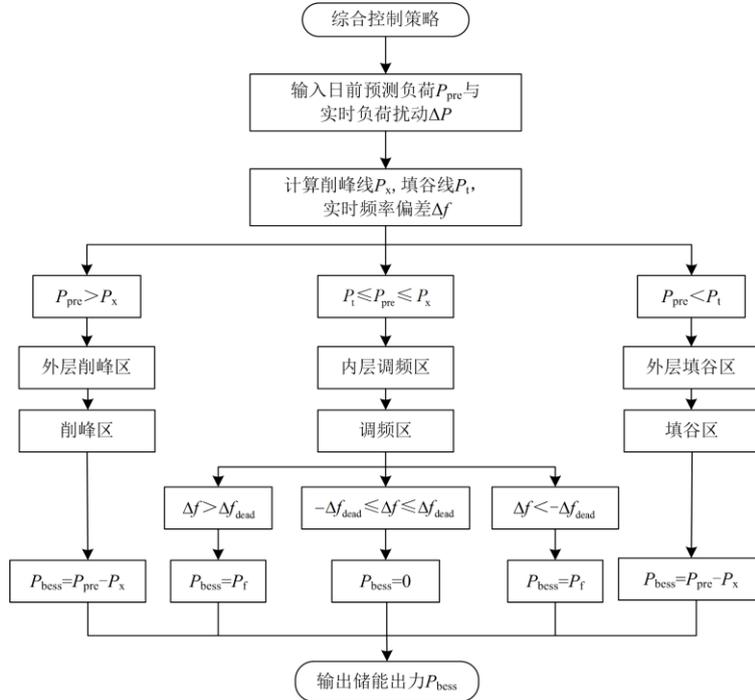


图 9 协同控制策略流程图

Fig. 9 Flow chart of collaborative control strategy

根据 ES 参与调峰调频协同控制工作区域划分与出力规则, 可得每时刻 ES 出力。其中, 不同时间尺度下的协同出力策略如图 10 所示。

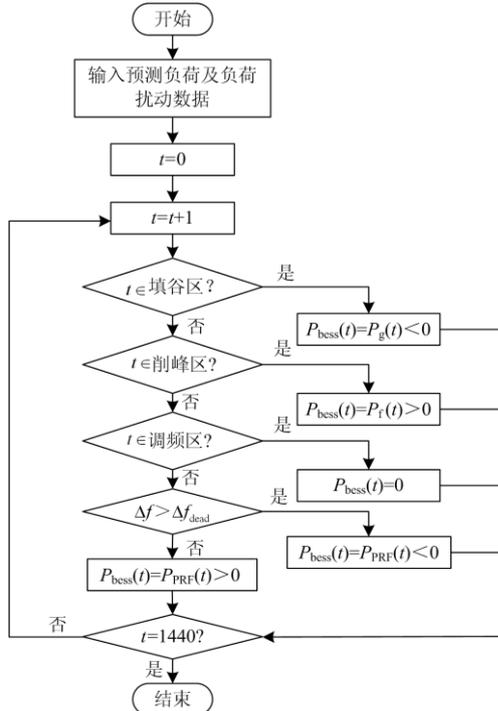


图 10 ES 协同控制出力策略

Fig. 10 Cooperative control output strategy of ES

2.4 调峰调频评价指标

2.4.1 调峰评价指标

为定量衡量调峰效果, 可通过定义评价指标对其进行量化。其调峰评估指标如下所述。

1) 绝对峰谷差

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad (8)$$

式中, P_{\max} 与 P_{\min} 分别为负荷的峰值与谷值, 单位为 MW, 该指标数值越小说明在 24 h 时间尺度内负荷的绝对偏差值越小。

2) 峰谷系数

$$\alpha = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \times 100\% \quad (9)$$

该指标体现负荷的波动程度, 数值越小说明波动程度越大。

3) 峰谷差率

$$\beta = \frac{\Delta P}{P_{\max}} \times 100\% \quad (10)$$

该指标体现负荷的波动范围, 数值越小说明波动范围越小。

4) 负荷变化方差

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P_{\text{avg}})^2 \quad (11)$$

式中: n 为预测负荷的采样数; i 为对应的采样时刻; P_{avg} 为预测负荷的平均值, 单位为 MW。该指标体

现负荷的平坦程度, 数值越小说明越平坦。

5) 削峰率

$$\lambda = \frac{P'_{\max}}{P_{\max}} \times 100\% \quad (12)$$

式中, P'_{\max} 为 ES 参与调峰后的负荷峰值, 该指标体现 ES 参与削峰的程度。

2.4.2 调频评价指标

为衡量调频效果, 需要定义评价指标对其进行量化, 针对阶跃负荷扰动, 定义频率恶化速度与恢复速度, 分别如式(13)、式(14)所示。

$$v_d = \frac{\Delta f_{\max} - \Delta f_0}{t_{\max} - t_0} = \frac{\Delta f_{\max} - \Delta f_0}{\Delta t_{\max}} \quad (13)$$

式中: v_d 指频率恶化速度, 单位为 Hz/s, v_d 越小说明频率恶化速度越慢, 则调频效果越好; Δf_{\max} 与 Δf_0 分别代表最大频率偏差与初始频率偏差, 单位为 Hz; t_{\max} 与 t_0 分别代表最大频率偏差对应的时刻与初始时刻, 单位为 s。

$$v_r = \frac{\Delta f_{\text{sta}} - \Delta f_{\max}}{t_{\text{sta}} - t_{\max}} = \frac{\Delta f_{\text{sta}} - \Delta f_{\max}}{\Delta t_{\text{sta}}} \quad (14)$$

式中: v_r 指频率恢复速度, 单位为 Hz/s, v_r 越大说明频率恢复越快, 则调频效果越好; Δf_{sta} 为稳态频率偏差, 单位为 Hz; t_{sta} 为稳态频率偏差出现的时刻, 单位为 s。

针对连续扰动, 用频率偏差及 SoC 均方根值作为调频场景的评价指标, 如式(15)、式(16)所示。

$$R_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_0)^2} \quad (15)$$

$$R_{\text{soc}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{SoC}_i - \text{SoC}_0)^2} \quad (16)$$

式中: f_i 与 SoC_i 分别为时刻 i 的频率与 SoC, 单位为 Hz; f_0 为基准频率 50 Hz; SoC_0 为 0.5; R_f 与 R_{soc} 代表系统频率及 SoC 偏离基准值的程度, 偏离值越小说明调频效果及 SoC 维持效果越好。

3 算例分析

以湖南某地区 ES 电站为例, 其装机规模为 26 MW/52 MWh, 由磷酸铁锂电池串并联组成, 单体容量为 3.2 V/86 Ah。选取某典型日负荷数据, 采样间隔为 15 min, 以 24 h 为时间尺度, 共有负荷样本 96 个。其中负荷最大值 $P_{\max}=205.32$ MW, 负荷最小值 $P_{\min}=80.925$ MW, 绝对峰谷差 $\Delta P=124.395$ MW, 峰谷系数 $\alpha=0.394$, 峰谷差率 $\beta=0.6059$, 负荷方差 $S=1499.4$ 。机组额定容量为 100 MW, 额定频率为 50 Hz, 调频仿真参数如表 1 所示。

3.1 变功率调峰策略仿真分析

为更好地体现本文所提变功率调峰策略的优越性, 现对恒功率与变功率调峰策略进行对比分析。参与调峰时, ES 均采用一充一放模式。其调峰效果与 ES 出力如图 11 与图 12 所示, ES 电站 SoC 变化如图 13 所示。调峰效果指标如表 2。

表 1 调频仿真模型参数

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|---------------|------|---------------|----|
| ES 容量/MWh | 52 | $M/p.u.$ | 10 |
| ES 功率/MW | 26 | $D/p.u.$ | 1 |
| $F_{HP}/p.u.$ | 0.5 | $K_G/p.u.$ | 20 |
| T_G/s | 0.08 | $K_{DR}/p.u.$ | 20 |
| T_{CH}/s | 0.3 | $K_{IR}/p.u.$ | 4 |
| T_{PCS}/s | 0.01 | — | — |

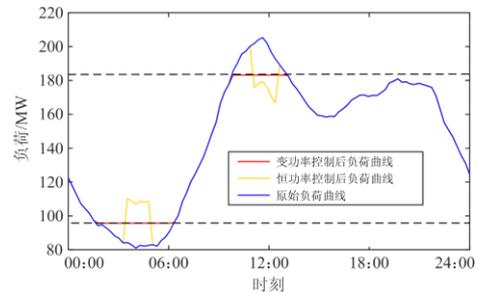


图 11 储能参与调峰场景后负荷曲线

Fig. 11 Afterload curve of peak-shaving scenario in which ES participates

由图 11 可知, 恒功率与变功率控制策略均在负荷低谷期充电, 负荷高峰期放电。但采用恒功率控制策略调峰, 负荷曲线将出现凹凸现象, 这是由于恒功率策略不能跟随负荷曲线实时调整 ES 出力。采用变功率控制策略时, 削峰线 $P_x=183.11$ MW, 填谷线 $P_t=95.67$ MW, 当负荷大于削峰线时, ES 放电, 当负荷小于填谷线时, ES 充电。可实时跟踪负荷曲线进行动态调整。因此, 其削峰填谷效果更好。

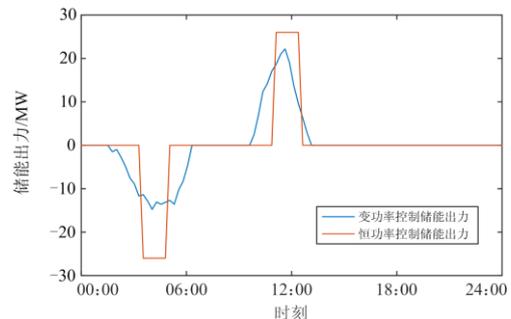


图 12 变功率和恒功率控制策略下储能出力

Fig. 12 ES output under variable power and constant power control strategies

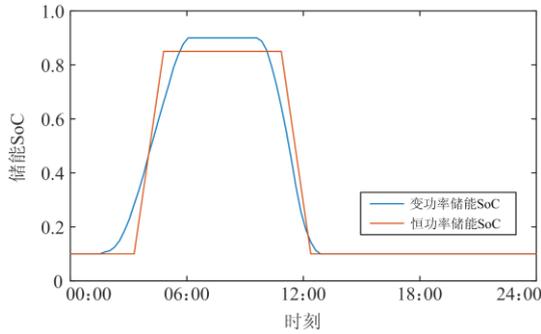


图 13 变功率及恒功率控制策略下储能 SoC

Fig. 13 ES SoC under variable power and constant power control strategies

由图 12 和图 13 不难发现,在两种控制策略下,ES 充放电时段有部分重合,由于变功率控制策略可随负荷曲线实时调整出力,可实现在相同容量下,延长充放电时间。

表 2 恒功率与变功率控制策略调峰评价指标

Table 2 Peak adjustment evaluation indexes of constant power and variable power control strategies

| 评价指标 | 预测负荷 | 恒功率控制策略 | 变功率控制策略 |
|---------------|---------|---------|---------|
| P_{max}/MW | 205.32 | 200.163 | 183.114 |
| P_{min}/MW | 80.925 | 82.098 | 95.666 |
| $\Delta P/MW$ | 124.395 | 118.065 | 87.448 |
| α | 0.394 1 | 0.410 2 | 0.522 4 |
| β | 0.605 9 | 0.589 8 | 0.477 6 |
| S | 1 499.4 | 1 200.6 | 1 148.8 |
| λ | — | 0.974 9 | 0.891 8 |

由表 2 可知:相比原始负荷,恒功率控制策略绝对峰谷差减小 6.33 MW,峰谷差率减小 0.016 1,峰谷系数增大 0.016 1,负荷方差减小 298.8,削峰率为 0.974 9。各项指标变化率较小,调峰效果不明显。而采用变功率控制策略,负荷绝对峰谷差减小 36.95 MW,峰谷差率减小 0.128 3,峰谷系数增大 0.128 3,负荷方差减小 350.6,削峰率为 0.891 8,调峰效果提升 8%。由此可知,与恒功率控制策略相比,变功率控制策略调峰效果更佳。

3.2 综合调频控制策略分析

3.2.1 阶跃负荷扰动

为说明阶跃负荷扰动下的下垂控制、虚拟惯性控制和综合控制 3 种控制策略的调频效果。在 5 s 处加入 0.01 p.u. 阶跃负荷扰动,仿真时长为 20 s,对 3 种控制策略进行仿真分析与评价。3 种控制方式下系统频率偏差、ES 出力及火电机组出力分别如图 14—图 16 所示。调频指标如表 3 所示。

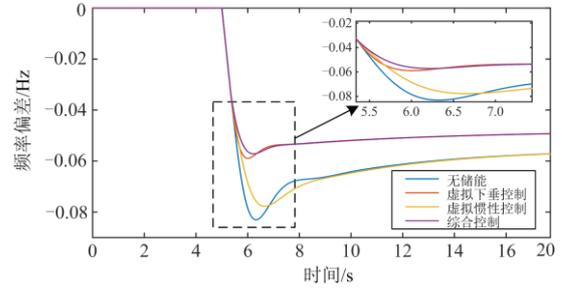


图 14 阶跃负荷扰动下频率偏差

Fig. 14 Frequency deviation under step load disturbance

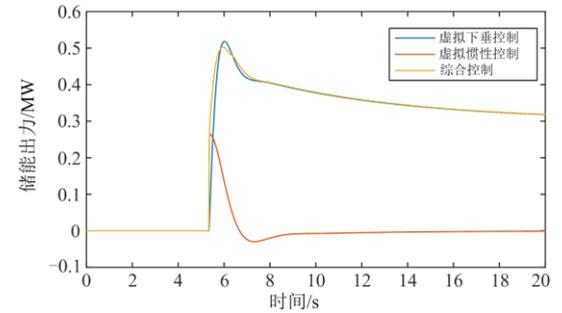


图 15 阶跃负荷扰动下储能出力

Fig. 15 ES output under step load disturbance

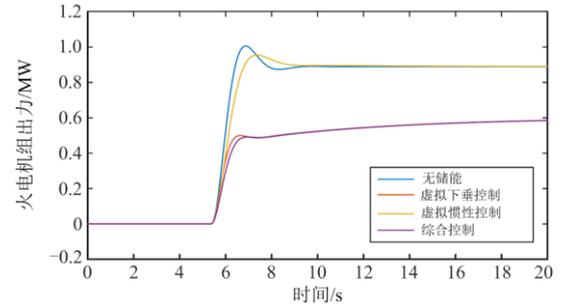


图 16 阶跃负荷扰动下火电机组出力

Fig. 16 Output of thermal power unit with step load disturbance

由图 14 可知,相比无 ES,3 种控制策略均能有效改善系统频率。其中综合控制与下垂控制对稳态频率偏差改善作用最大,将频率偏差由 0.083 Hz 降至 0.049 Hz。5~6 s 为频率恶化阶段($\Delta f \cdot df/dt > 0$)。惯性控制与综合控制下的频率恶化速率最小,这是因为惯性控制策略能改善频率变化率,对系统频率起积极作用。6~8 s 为频率恢复阶段($\Delta f \cdot df/dt < 0$),惯性控制频率恢复速率相较于无 ES 更慢,对系统频率起消极作用。而综合控制既可以在频率变化前期利用惯性控制减小频率恶化速率,又避免了惯性控制对频率恢复的负面影响。由图 15 可知,ES 出力在下垂控制与综合控制下的走向类似,在频率恶化

阶段综合控制出力略高于下垂控制, 这是因为综合控制在下垂控制出力的基础上叠加了惯性控制出力。惯性控制出力在频率恢复阶段出力为负, 此时 $df/dt > 0$, 在一定程度上抑制了频率恢复速率。由图 16 可知, 综合控制策略在降低火电机组出力方面最为明显。

表 3 阶跃扰动下各策略调频指标

Table 3 Frequency modulation index of each strategy

| under step disturbance | | | | | | |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| 策略 | $ \Delta f_{max} $ / Hz | $ \Delta f_{sta} $ / Hz | Δt_{max} / s | Δt_{sta} / s | v_d / (Hz/s) | v_r / (Hz/s) |
| 无储能 | 0.083 | 0.056 | 6.32 | 19.80 | 0.063 | -0.022 |
| 虚拟下垂控制 | 0.059 | 0.049 | 6.00 | 18.08 | 0.059 | -0.000 8 |
| 虚拟惯性控制 | 0.078 | 0.057 | 6.64 | 19.90 | 0.048 | -0.001 6 |
| 综合控制 | 0.057 | 0.049 | 6.21 | 18.21 | 0.047 | -0.000 7 |

由表 3 可知, 综合控制策略对改善频率稳态偏差效果最好。相比无 ES 减小了 31.3%, 既能有效抑制频率恶化速度, 又不会影响频率恢复速度。

3.2.2 连续负荷扰动

为说明连续负荷扰动工况下 3 种调频控制策略的调频效果, 在区域仿真模型中加入如图 17 所示的 24 h 连续随机负荷扰动, 得到各调频策略下系统频率偏差、SoC 及火电机组出力, 如图 18—图 20 所示。调频指标如表 4 所示。

由图 18 可知, 在连续随机负荷扰动工况下, 同一时刻不同控制方法频率偏差绝对值从小到大分别为综合控制、下垂控制、惯性控制以及无 ES。综合控制频率偏差绝对值比下垂控制小 0.001 Hz, 而比惯性控制小 0.02 Hz。说明综合控制在改善频率偏差方面与下垂控制效果类似, 且远优于惯性控制。

由图 19 可知, 惯性控制下 SoC 维持效果最好, 一直在 0.5 附近上下波动, 下垂控制 SoC 维持效果稍好于综合控制, 这是由于综合控制在下垂控制的基础上叠加了惯性控制。由图 20 可知, 在连续负荷

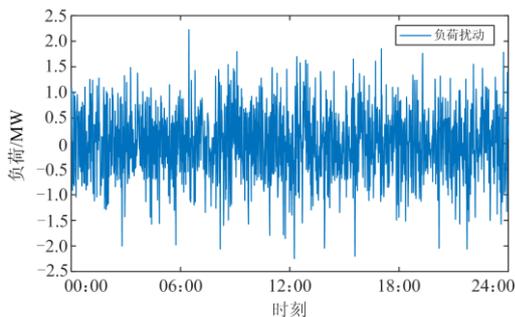


图 17 24 h 连续随机负荷扰动

Fig. 17 24 h continuous random load disturbance

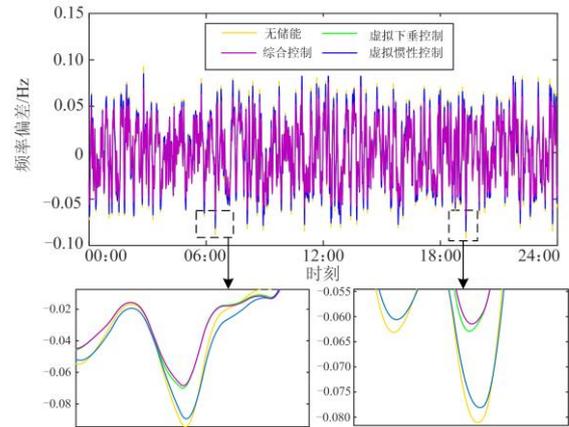


图 18 连续负荷扰动下频率偏差

Fig. 18 Frequency deviation under continuous load disturbance

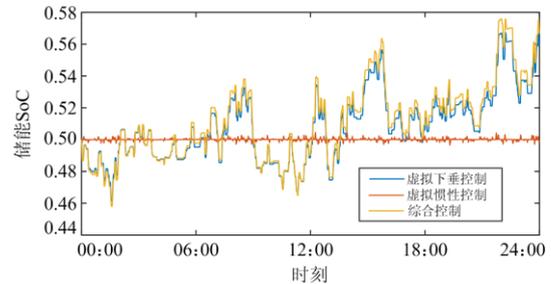


图 19 连续负荷扰动下储能 SoC

Fig. 19 ES SoC under continuous load disturbance

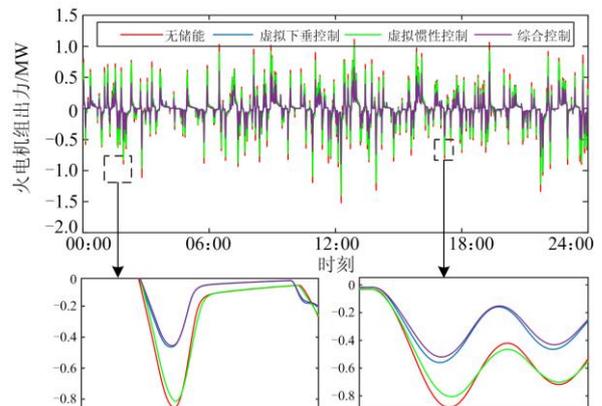


图 20 连续负荷扰动下火电机组出力

Fig. 20 Output of thermal power unit under

continuous load disturbance

扰动情况下, 综合控制下火电机组出力最小, 惯性控制下火电机组出力最大, 仅次于无 ES 情况。将不同控制策略下的火电机组出力次数进行统计, 综合控制下火电机组未动作次数为 1 042, 而无 ES 时火电机组未动作次数为 600。这说明综合控制不仅能有效改善系统频率偏差, 而且可以减少火电机组

动作次数, 缓解其调频压力。惯性控制下火电机组次数相较无 ES 增加了 334 次, 这是因为惯性控制抑制了频率的恢复。

表 4 连续扰动下各策略调频指标

Table 4 Frequency modulation index of each strategy under continuous disturbance

| 策略 | R_f | R_{soc} | 火电机组未动作次数 |
|--------|---------|------------------------|-----------|
| 无储能 | 0.036 9 | — | 600 |
| 虚拟下垂控制 | 0.032 1 | 0.037 7 | 945 |
| 虚拟惯性控制 | 0.036 5 | 7.958×10^{-4} | 266 |
| 综合控制 | 0.031 7 | 0.043 | 1 042 |

由表 4 可知, 综合控制策略在 SoC 维持效果上略低于虚拟下垂控制, 但综合控制策略调频效果最好, 在减缓火电机组调频压力方面也优于其他两种策略, 说明了综合控制策略在调频方面的有效性。

3.3 协同控制运行分析

设负荷扰动为均值为 0、标准差为 0.8 的正态分布随机数, 最大为 0.022 p.u., 采样时间为 1 s, 时间尺度为 24 h, 负荷扰动数据共计 86 400 个。基于本文所提调峰调频协同控制策略, 通过 Matlab/Simulink 仿真, 得到 ES 出力与 SoC, 如图 21 和图 22 所示。

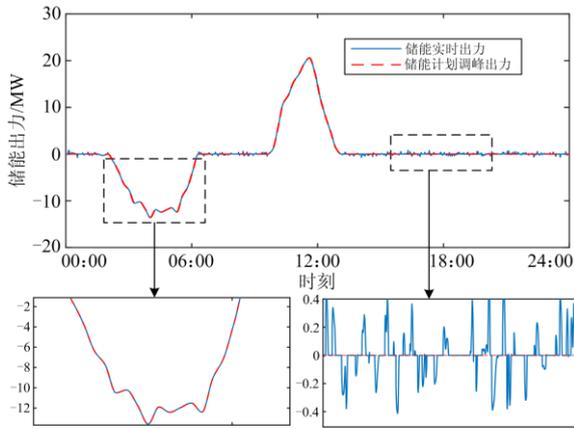


图 21 储能在调峰调频协同控制下出力曲线

Fig. 21 Output curve of ES under the coordinated control of peak and frequency modulation

由图 21 得到该典型日下 ES 在 24 h 时间尺度内实时工作区域划分, 如表 5 所示。

由表 5 可知, 当 ES 工作在协同控制时, 可以利用其闲置时段进行调频, 提高 ES 的利用率。调峰时段包括填谷区与削峰区, 累计 7.25 h, 调频时段累计 16.75 h, 定义 ES 出力次数与全天的统计时段数之比为 ES 利用率。现得到的单调峰、单调频以及协同场景下利用率如表 6 所示。

表 5 工作区域时段分布表

Table 5 Time distribution table of working area

| 时段 | 工作区域 |
|-------------|------|
| 00:00—01:30 | 调频区 |
| 01:45—06:00 | 填谷区 |
| 06:15—09:30 | 调频区 |
| 09:45—12:45 | 削峰区 |
| 13:00—23:45 | 调频区 |

表 6 不同工作场景下 ES 利用率

Table 6 ES utilization rate under different working scenarios

| 场景 | 出力次数 | 总时段 | 利用率/% |
|-------|--------|--------|-------|
| 单调峰控制 | 29 954 | 86 400 | 34.67 |
| 单调频控制 | 46 077 | 86 400 | 53.33 |
| 协同控制 | 60 264 | 86 400 | 69.75 |

由表 6 可知, 单调峰下 ES 的出力次数最少, 协同控制下 ES 出力次数最多, 为 60 264 次, 相较单调峰场景增加了 30 310 次。协同控制下 ES 利用率相较单调峰与单调频控制分别提升 35.08% 与 16.42%, 显著提升 ES 利用率。

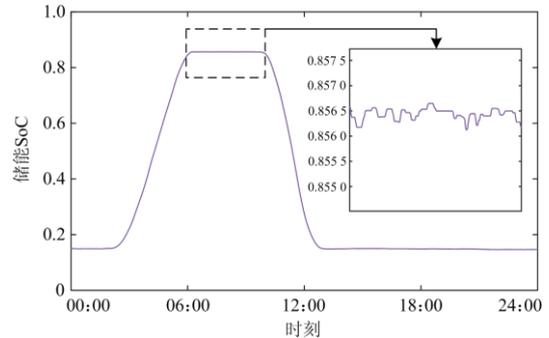


图 22 调峰调频协同控制下 SoC 曲线

Fig. 22 SoC curve under the coordinated control of peak and frequency modulation

由图 22 可知, 在协同控制下 SoC 处于 0.146~0.857, 没有超出 ES 正常 SoC 值, 验证了协同控制策略的可行性。ES 工作在调峰区时, 出力幅值较大, 持续时间长, 最大出力值为 20.6 MW。ES 工作在调频区时, 出力幅度小, ES 周期短, 最大出力值为 0.87 MW, 占用 ES 能量也小。其中 3 个调频工作区的 SoC 始末值如表 7 所示。

表 7 调频区 SoC 始末值

Table 7 Initial and final values of SoC in the FM region

| 时段 | 初始值 | 结束值 |
|-------------|-------|-------|
| 00:00—01:30 | 0.15 | 0.149 |
| 06:15—09:30 | 0.857 | 0.856 |
| 13:00—23:45 | 0.148 | 0.146 |

因调频引起的 SoC 波动值均为 0.001~0.002, 即调频占用的能量最多为 ES 能量的 2%, 进一步说明调频区的加入不影响调峰能力。

3.4 协同控制调峰效果分析

为验证调峰调频协同控制下 ES 调峰效果, 先将负荷扰动叠加到预测负荷上得到次日实际负荷曲线, 将计划 ES 出力与实时 ES 出力叠加到实际负荷上, 得到单调峰与协同控制下的 ES 调峰负荷曲线, 如图 23 所示。

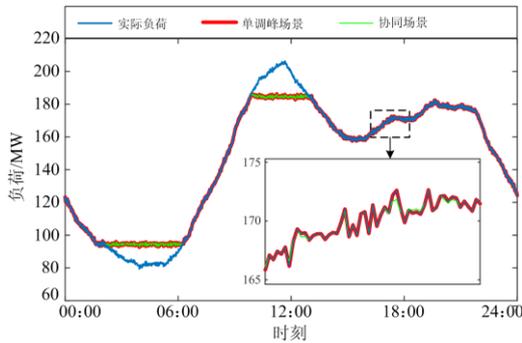


图 23 单调峰控制与协同控制负荷对比

Fig. 23 Comparison of monotone peak control and collaborative control load

图 23 中, 绿色曲线与红色曲线趋势一致, 重合部分占比极高。将 17:00—18:30 时段的负荷局部放大, 因该时段属于调频区, 单调峰场景在这个时段不进行充放电操作, 而协同控制策略在该时段可以处理系统的调频需求, 所以蓝色曲线与红色曲线完全重合, 而绿色曲线在此基础上略有波动。调峰指标如表 8 所示。

表 8 单调峰控制与协同控制调峰指标

Table 8 Monotone peak control and collaborative control peak regulation indexes

| 评价指标 | 实际负荷 | 单调峰 | 协同调峰 |
|----------------------|---------|---------|---------|
| P_{\max}/MW | 206.322 | 186.316 | 183.114 |
| P_{\min}/MW | 79.405 | 92.574 | 92.574 |
| $\Delta P/\text{MW}$ | 126.917 | 93.742 | 93.742 |
| α | 0.384 9 | 0.497 | 0.497 |
| β | 0.615 1 | 0.503 1 | 0.503 1 |
| S | 1 499.4 | 1 148.8 | 1 147.5 |
| λ | — | 0.903 | 0.903 |

由表 8 可知, 单调峰与协同控制对实际负荷均有改善, 且两者的调峰指标几乎一致, 进一步说明协同控制不影响调峰效果。而协同控制调峰负荷方差较单调峰减小 1, 侧面反映协同控制对于整体的负荷波动有更好的改善。

3.5 协同控制调频效果分析

为验证协同控制调频效果, 对 13:00—23:45 调频区进行仿真验证, 得到无 ES、协同控制与单调频控制下的频率偏差, 如图 24 所示。

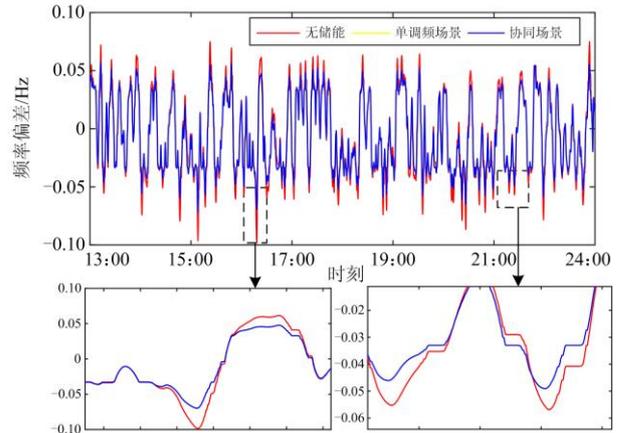


图 24 单调频控制与协同控制频率偏差对比

Fig. 24 Comparison of frequency deviations between single FM control and collaborative control

由图 24 可知, 无 ES 情况频率偏差绝对值最大为 0.098 Hz, 协同控制下频率偏差与单调频保持一致, 频率偏差绝对值最大为 0.072 Hz, 相比无 ES 减小了 0.026 Hz。调频指标如表 9 所示。

表 9 单调频控制与协同控制调频指标

Table 9 Frequency modulation index of single frequency modulation control and collaborative control

| 控制方式 | $\Delta f_{\max}/\text{Hz}$ | $\Delta f_{\min}/\text{Hz}$ | R_f |
|-------|-----------------------------|-----------------------------|---------|
| 无 ES | 0.086 4 | -0.098 | 0.035 3 |
| 单调频控制 | 0.063 | -0.072 | 0.031 2 |
| 协同控制 | 0.063 | -0.072 | 0.031 2 |

由表 9 可知, 单调频与协同控制对于频率偏差均有改善, 且协同控制调频效果与单调频控制完全一致。因此, 在不影响调峰效果及不越过 SoC 正常范围值的前提下, 利用闲置时段参与调频具有可行性, 并能有效地提高 ES 利用率。

4 结论

针对单调峰和调频控制场景, 提出变功率调峰策略以及虚拟惯性与下垂控制相结合的综合调频控制策略, 并在此基础上, 进一步提出分时段的调峰调频协同控制策略。通过仿真可得如下几个结论。

1) 针对单调峰场景, 变功率控制策略与恒功率控制策略均能降低负荷峰谷差。但与恒功率策略相比, 变功率策略下的削峰填谷效果更佳, 可提升 8%。

2) 针对调频场景, 在阶跃负荷扰动下, 综合控制策略对改善频率稳态偏差效果最好, 相比无储能减小了 31.3%。在连续负荷扰动下, 综合控制策略在 SoC 维持效果上略低于虚拟下垂控制, 但综合控制策略调频效果最佳, 在减缓火电机组调频压力方面也优于其他两种策略。

3) 相比单独调峰与单独调频控制, 协同控制策略在 ES 利用率方面, 分别提高了 16.25% 和 37.29%。

综上可知, 本文所提变功率调峰策略和综合调频控制策略能有效改善单调峰和调频场景效果。而所提基于 SoC 状态的多时间尺度综合控制策略, 能实现调峰调频和提高 ES 利用率的双层目的。

参考文献

[1] ZHANG Feng, XU Zhao, MENG Ke. Optimal sizing of substation scale energy storage station considering seasonal variations in wind energy[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(13): 3241-3250.

[2] 孙伟卿, 罗静, 张婕. 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 9-18.

SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie. Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 9-18.

[3] 帅轩越, 王秀丽, 黄晶. 多区域综合能源系统互联下的共享储能容量优化配置[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 382-392.

SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, HUANG Jing. Optimal configuration of shared energy storage capacity under multiple regional integrated energy systems interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 382-392.

[4] 王威, 李润秋, 张鹭, 等. 计及多类型电储能的综合能源系统优化运行对比分析研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 110-116, 123.

WANG Wei, LI Runqiu, ZHANG Lu, et al. Comparative analysis of optimal operation of integrated energy system with multiple types of energy storage[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 110-116, 123.

[5] NGAMROO I, KARAIPOOM T. Improving low voltage ride through performance and alleviating power fluctuation of WTs wind turbine in DC microgrid by optimal SMES with fault current limiting function[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5).

[6] 陈岩, 靳伟, 王文宾, 等. 区域储能站参与扰动平抑的

配电网多时间尺度自律策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 134-143.

CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, et al. Multi-time scale self-regulation strategy of distribution network with regional Energy Storage Stations participating in disturbance stabilization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 134-143.

[7] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲, 等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 15-24.

LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. A review of energy storage system to improve power quality in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-24.

[8] 颜湘武, 崔森, 常文斐. 考虑储能自适应调节的双馈感应发电机一次调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 1027-1039.

YAN Xiangwu, CUI Sen, CHANG Wenfei. Considering energy storage adaptive adjustment of doubly-fed induction generator control strategy of primary frequency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1027-1039.

[9] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 194-207.

JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 194-207.

[10] 罗庆, 张新燕, 罗君, 等. 基于正负效益的储能削峰填谷容量配置[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 91-97.

LUO Qing, ZHANG Xinyan, LUO Jun, et al. Energy storage peak load filling capacity allocation based on positive and negative benefits[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 91-97.

[11] 孙铭爽, 贾祺, 张善峰, 等. 面向机电暂态分析的光伏发电参与电网频率调节控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 28-37.

SUN Mingshuang, JIA Qi, ZHANG Shanfeng, et al. Single-stage grid-connected photovoltaic generation takes part in grid frequency regulation for electromechanical transient analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 28-37.

[12] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 179-186.

ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid

- by high-penetration photovoltaic[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 179-186.
- [13] 李建林, 李雅欣, 周喜超, 等. 储能商业化应用政策解析[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 168-178.
LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao, et al. Policy analysis of commercial application of energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 168-178.
- [14] MURTY V, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 1-20.
- [15] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 1-8.
- [16] DELILLE G, FRANCOIS B, MALARANGE G. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(4): 931-939.
- [17] MERCIER P, CHERKAoui R, OUDALOV A. Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(3): 469-477.
- [18] 李欣然, 邓涛, 黄际元, 等. 储能电池参与电网快速调频的自适应控制策略[J]. *高电压技术*, 2017, 43(7): 2362-2369.
LI Xinran, DENG Tao, HUANG Jiyuan, et al. Adaptive control strategy of energy storage battery in power grid fast frequency modulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(7): 2362-2369.
- [19] 邓霞, 孙威, 肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]. *高电压技术*, 2018, 44(4): 1157-1165.
DENG Xia, SUN Wei, XIAO Haiwei. Integrated control method of energy storage battery participating in primary frequency modulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(4): 1157-1165.
- [20] 李军徽, 高卓, 应鸿, 等. 基于动态下垂系数与 SOC 基点的储能一次调频控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(5): 1-10.
LI Junhui, GAO Zhuo, YING Hong, et al. Energy storage primary frequency modulation control strategy based on dynamic droop coefficient and SoC basis point[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(5): 1-10.
- [21] 夏新茂, 关洪浩, 丁鹏飞, 等. 基于改进型量子遗传算法的储能系统容量配置与优化策略[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(3): 551-558.
XIA Xinmao, GUAN Honghao, DING Pengfei, et al. Capacity allocation and optimization strategy of energy storage system based on improved quantum genetic algorithm[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(3): 551-558.
- [22] 杨锡运, 董德华, 李相俊, 等. 商业园区储能系统削峰填谷的有功功率协调控制策略[J]. *电网技术*, 2018, 42(8): 2551-2561.
YANG Xiyun, DONG Dehua, LI Xiangjun, et al. Active power coordination control strategy of peak load shifting for energy storage system in business park[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2551-2561.
- [23] 王晓东, 苗宜之, 卢爽瑄, 等. 基于 SCM-ANFIS 负荷预测的储能电站调峰控制策略[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(6): 1651-1657.
WANG Xiaodong, MIAO Yizhi, LU Shixuan, et al. Peak regulation control strategy of energy storage power station based on SCM-ANFIS load prediction[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2018, 39(6): 1651-1657.
- [24] SHI Y, XU B, WANG D, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 33(3): 2882-2894.
- [25] 丁明, 施建雄, 韩平平, 等. 光储系统参与电网调频及调峰的综合控制策略[J]. *中国电力*, 2021, 54(1): 116-123, 174.
DING Ming, SHI Jianxiong, HAN Pingping, et al. An integrated control strategy for photovoltaic-energy storage system participating in frequency regulation and peak shaving of power grid[J]. *Electric Power*, 2021, 54(1): 116-123, 174.
- [26] 史沛然, 李彦宾, 江长明, 等. 第三方独立主体参与华北电力调峰市场规则设计与实践[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(5): 168-174.
SHI Peiran, LI Yanbin, JIANG Changming, et al. Rule design and practice for third-party independent entities participating electric peak regulation auxiliary service market of North China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(5): 168-174.

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-09-24

作者简介:

陈长青(1989—), 男, 博士研究生, 助教, 研究方向为新能源保护控制与优化。E-mail: 841052440@qq.com

(编辑 姜新丽)