

# 基于储能系统多重约束的一次调频策略

梁继业<sup>1</sup>, 袁 至<sup>1</sup>, 王维庆<sup>1</sup>, 李 骥<sup>2</sup>, 范 玮<sup>3</sup>

(1. 新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 乌鲁木齐 830017;

2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011;

3. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司, 库尔勒 841000)

**摘 要:** 基于荷电状态(state of charge, SOC)控制储能系统参与一次调频时, 由于储能系统出力约束条件较为单一, 因而限制了储能系统的性能。针对此问题提出一种基于储能系统多重约束的一次调频策略。首先, 把通过双层模糊控制方法确定储能系统多时间尺度调频死区作为第 1 重约束条件, 避免火电机组与储能电池频繁动作。其次, 将 SOC 作为第 2 重约束条件, 约束因子作为第 3 重约束条件, 基于 logistic 曲线构建惯性与下垂综合控制模型, 约束储能系统出力。最后, 通过高精度 SOC 构建快速均衡函数, 缩短 SOC 均衡时间。通过搭建仿真模型分别在阶跃负荷扰动和连续负荷扰动的工况下验证所提控制策略有效性。

**关键词:** 一次调频; 多时间尺度; 荷电状态; 约束因子; 快速均衡

## Primary Frequency Control Strategy Based on Multiple Constraint of Energy Storage System

LIANG Jiye<sup>1</sup>, YUAN Zhi<sup>1</sup>, WANG Weiqing<sup>1</sup>, LI Ji<sup>2</sup>, FAN Wei<sup>3</sup>

(1. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control of Ministry of Education,

Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China;

3. Tarim Oilfield Company of PetroChina, Korla 841000, China)

**Abstract:** When an energy storage system is controlled based on state of charge (SOC) to participate in primary frequency control, the performance of the energy storage system is limited due to the relatively single output constraint condition of the energy storage system. To solve this problem, a primary frequency control strategy based on multiple constraints of energy storage system is proposed. Firstly, the double-layer fuzzy control method is used, so that the multi-time scale frequency modulation dead zone of the energy storage system is determined as the first constraint to avoid the frequent operation of thermal power units and energy storage batteries. Secondly, SOC is taken as the second constraint condition, and the constraint factor is taken as the third constraint condition. A comprehensive control model of inertia and sag is built based on the logistic curve to constrain the output of the energy storage system. Finally, the high precision SOC is used to construct a fast balancing function to shorten the SOC balancing time. Simulation models are built to verify the effectiveness of the proposed control strategy under the conditions of step load disturbance and continuous load disturbance, respectively.

**Key words:** primary frequency control; multiple time scales; state of charge; constraint factor; fast equalization

## 0 引言

新型电力系统是实现“碳达峰、碳中和”的有效措施<sup>[1]</sup>, 随着新型电力系统的发展, 风力发电、光伏发电将逐渐取代同步发电机, 电网惯性不断降

低, 加上新型电力系统出力的随机性, 给电网稳定性带来了巨大挑战<sup>[2-4]</sup>。由于储能电池出力快、灵活性强等优点, 可以有效辅助电网稳定运行<sup>[5-8]</sup>。

储能系统参与一次调频已被广泛应用, 常采用的方法是考虑荷电状态(state of charge, SOC)的惯性与下垂综合控制策略。文献[9]储能系统出力采用下垂控制, 其出力系数随着 SOC 呈现 S 型变化, 平滑储能系统的出力。文献[10]储能系统出力采用惯性与下垂综合控制策略, 其出力系数根据 SOC 线性

基金资助项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A01004-1); 国家自然科学基金(52067020)。

Project supported by Major Science and Technology Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2022A01004-1), National Natural Science Foundation of China (52067020).

变化, 防止了储能电池的过充过放。文献[11]采用惯性与下垂控制相互切换的控制策略, 文献[12]在文献[11]基础上考虑了 SOC 与健康状态(state of health, SOH), 延长储能电池的使用寿命。文献[13-14]通过模糊控制确定储能系统出力, 文献[15]在文献[13-14]基础上增加了惯性控制和负荷预测, 惯性控制可以减缓频率变化速度, 负荷预测可以充分配置出力系数。以上文献只考虑储能电池 SOC 状态, 其出力约束条件较少。

惯性与下垂综合控制策略增加其他约束条件可以提高储能系统性能, 文献[16-17]考虑了储能电池调频死区应小于火电机组死区, 使储能电池提前动作, 减小电网频率偏差, 文献[18]在文献[16-17]基础上增加了负惯性控制方法, 加速电网频率恢复。文献[19-20]在传统的下垂控制中考虑了 SOC 均衡控制, 并验证该 SOC 均衡策略的稳定性, 文献[21-22]在文献[19-20]的基础上增加了惯性与下垂系数修正, 提高了储能系统的效率。以上文献虽然考虑了其他约束条件, 但不能全方位提升储能系统性能, 因此, 本文从储能电池的调频死区、防止过充过放、出力约束、SOC 均衡这几方面提升储能系统性能。

本文提出了基于储能系统多重约束的一次调频策略。首先, 把采用双层模糊控制方法确定储能电池多时间尺度调频死区作为第 1 重约束条件, 减少火电机组的频繁动作次数和储能电池的不必要动作次数, 通过提高储能系统自适应能力来提升性能。其次, 将 SOC 作为第 2 重约束条件, 约束因子作为第 3 重约束条件, 通过惯性与下垂综合控制储能系统出力, 提升储能系统性能, 抑制电网频率恶化。最后, 采用安时积分和卡尔曼滤波综合估算法确定 SOC 大小, 减少估算误差, 同时通过 SOC 快速均衡函数缩短均衡时间, 防止储能电池过充过放, 减缓储能电池老化, 提高储能系统利用效率来辅助提升性能。通过 Matlab/Simulink 搭建仿真分别在阶跃负荷扰动和连续负荷扰动工况下验证所提控制策略的有效性。

## 1 储能系统参与一次调频模型

储能系统由多组储能电池构成, 其参与一次调频动态模型如图 1 所示, 动态模型中主要包含参与一次调频的火电机组和储能系统以及负荷扰动。图中:  $s$  为拉普拉斯算子;  $\Delta P_G(s)$ 、 $\Delta P_E(s)$  分别为火电机组参与一次调频出力、储能系统参与一次调频出

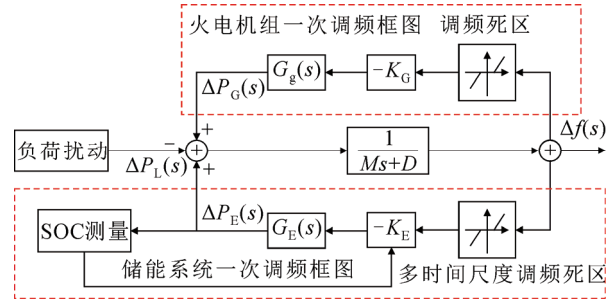


图 1 储能系统参与一次调频的动态模型

Fig.1 Dynamic model of energy storage system participating in primary frequency control

力;  $\Delta P_L(s)$  为负荷扰动;  $\Delta f(s)$  为电网频率偏差;  $G_g(s)$ 、 $G_E(s)$  分别为火电机组传递函数和储能系统传递函数;  $K_G$ 、 $K_E$  分别为火电机组出力系数和储能系统出力系数;  $M$  为电网惯性时间常数;  $D$  为系统阻尼系数。

火电机组传递函数  $G_g(s)$  为:

$$G_g(s) = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_g)(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (1)$$

式中:  $F_{HP}$  为汽轮机再热器增益;  $T_{RH}$  为再热器时间常数;  $T_g$  为火电机组调速器时间常数;  $T_{CH}$  为汽轮机时间常数。

储能系统的传递函数  $G_E(s)$  为:

$$G_E(s) = \frac{1}{1 + sT_E} \quad (2)$$

式中:  $T_E$  为储能系统的响应时间常数。

根据图 1 传递函数可知电网频率偏差  $\Delta f(s)$  为:

$$\Delta f(s) = \frac{-\Delta P_L(s)}{Ms + D + K_G G_g(s) + K_E G_E(s)} \quad (3)$$

由式(3)可知电网频率变化率和电网稳态频率偏差为:

$$\begin{cases} \lim_{s \rightarrow 0_+} s \Delta f(t) = \lim_{s \rightarrow 0_+} s \Delta f(s) = \frac{-\Delta P_L(s)}{M_b + M} \\ \lim_{s \rightarrow 0_+} \Delta f(t) = \lim_{s \rightarrow 0_+} s \Delta f(s) = \frac{-\Delta P_L(s)}{K_b + K_G + D} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $M_b$  为储能系统的惯性系数;  $K_b$  为储能系统的下垂系数。

由式(4)可知, 电网频率变化率与储能系统的惯性系数和电网惯性时间常数有关, 储能系统提供的惯性越大, 电网频率变化率越小, 惯性越小, 则相反。电网稳态频率偏差与储能电池的下垂系数、火电机组出力系数和系统阻尼系数有关, 储能系统的下垂系数越大, 电网频率偏差越小, 下垂系数越小, 则相反。

2 基于储能系统多重约束的一次调频策略

2.1 多时间尺度调频死区控制策略

负荷扰动引起电网频率波动时需要设置调频死区，火电机组调频死区一般为 $\pm 0.033$  Hz，储能电池调频死区应小于火电机组的调频死区。储能电池的调频死区太大，起不到抑制火电机组频繁动作的作用，调频死区太小，会频繁引起储能电池不必要的动作<sup>[17]</sup>。因此，本文提出储能电池多时间尺度调频死区方法，作为第 1 重约束条件。

考虑实际工程可执行性，按照系统特性来设置不同死区，多时间尺度调频死区机理为：负荷波动 $\Delta P_L(s)$ 与电网频率变化率 $\Delta f/\Delta t$ 较大时，将会引起较大的电网频率偏差，此时，储能电池需要较小的调频死区，使储能电池提前动作。负荷波动 $\Delta P_L(s)$ 与电网频率变化率 $\Delta f/\Delta t$ 较小时，将引起较小的频率偏差，该频率偏差可能不会影响电网稳定运行，此时，调频死区应设置较大，减小不必要的充放电次数。负荷波动与电网频率变化率影响着储能电池出力深度，为了延长其使用寿命，SOH 高的储能电池应比 SOH 低储能电池调频死区小，增加 SOH 高的储能电池动作次数和出力深度，从而确定多时间尺度调频死区，双层模糊控制框图如图 2 所示。

本文运用双层模糊控制方法确定调频死区的大小，模糊控制中隶属函数主要分为高斯隶属函数与三角形隶属函数，高斯隶属函数适用于变量取值范围较大的系统，但隶属区间较为模糊，三角形隶属函数的隶属区间清晰，并且响应速度快。确定调频死区是一个快速的过程，且需要清晰的隶属区间，进而可以更好的表达变量之间的关系。因此，本文采取三角形隶属度函数来确定多时间尺度调频死区，三角形隶属度函数图如图 3、4 所示。将负荷变化和电网频率变化率作为上层模糊控制的输入，确定上层模糊控制的输出储能电池出力深度，储能电池出力深度与 SOH 作为下层模糊控制的输入，得到下层模糊控制的输出储能电池多时间尺度调频死区 $\Delta f_d$ 。所有模糊控制的输入均取绝对值，其数值范围为 0~1，下层模糊控制的输出标幺值为 0、0.25、0.5、0.75、1，取值用 MIN、S、M、L、MAX 表示，分别代表着最小、小、中、大、最大，模糊控制规则如表 1、2 所示。

该控制策略的总体思路是通过多时间尺度调频死区来提高自适应能力，进而提升储能系统性能。

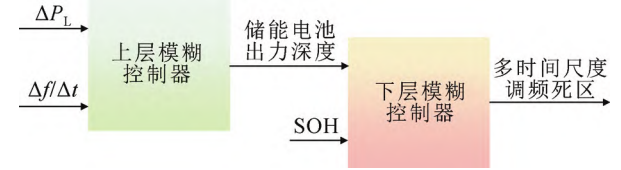


图 2 确定多时间尺度调频死区框图

Fig.2 Block diagram for determining multi-time scale frequency modulation dead zone

表 1 上层模糊控制规则表

Table 1 Upper-layer fuzzy control rule table

$\Delta P_L$	$\Delta f/\Delta t$				
	MIN	S	M	L	MAX
MIN	MIN	MIN	S	L	L
S	MIN	S	M	L	L
M	S	S	M	L	MAX
L	M	M	L	L	MAX
MAX	M	L	L	MAX	MAX

表 2 下层模糊控制规则表

Table 2 Lower fuzzy control rule table

储能电池 出力深度	SOH				
	MIN	S	M	L	MAX
MIN	MAX	MAX	MAX	L	M
S	MAX	L	L	M	S
M	L	M	M	S	MIN
L	L	M	S	MIN	MIN
MAX	M	MAX	MIN	MIN	MIN

通过负荷扰动、电网频率变化率以及储能电池 SOH 这 3 个系统特性确定储能电池调频死区，不仅可以使储能电池提前动作，减小电网频率偏差，而且还可以减少储能电池不必要动作，减缓储能电池老化。

2.2 惯性与下垂综合控制策略

本文将 SOC 作为第 2 重约束条件，约束因子作为第 3 重约束条件，构建惯性与下垂综合控制模型，第 2 重约束条件防止储能电池过充过放，第 3 重约束条件由 SOH 与电网频率偏差组成，其作用是辅助约束储能电池出力，惯性控制可以减小电网频率变化率，下垂控制可以减小电网频率偏差。储能电池在充放电过程中，其开路电压与 SOC 有关，SOC 越大，其开路电压越大，SOC 越小，则相反，SOC 的范围为 0.2~0.8，开路电压几乎不变，一般选取开路电压平稳区域作为最佳工作区间。储能电池在 SOC<0.2 或 SOC>0.8 时，对其寿命影响较大，为了防止储能电池过充过放，应停止充、放电动作，但容易导致电网频率瞬间变化，引起频率

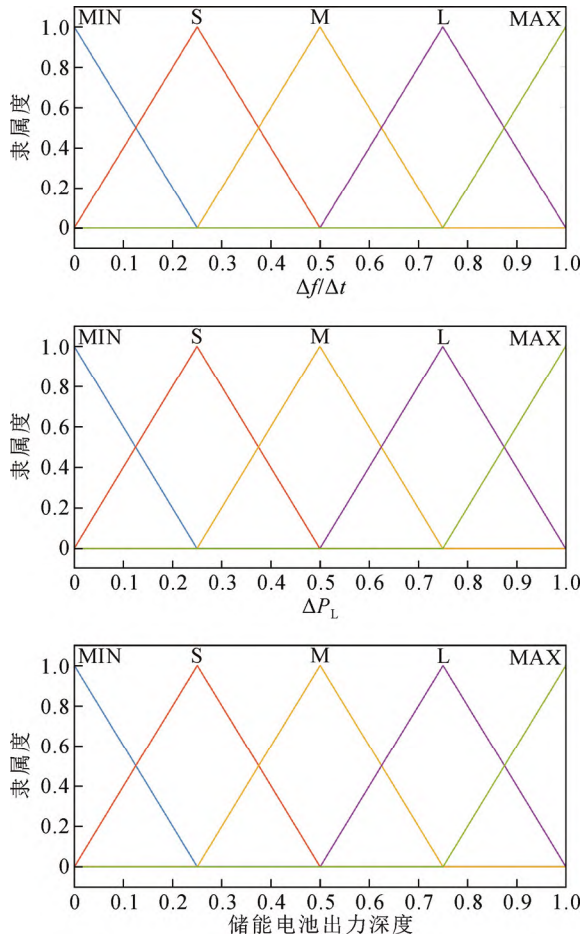


图3 上层模糊控制隶属度函数

Fig.3 Membership function of upper fuzzy control

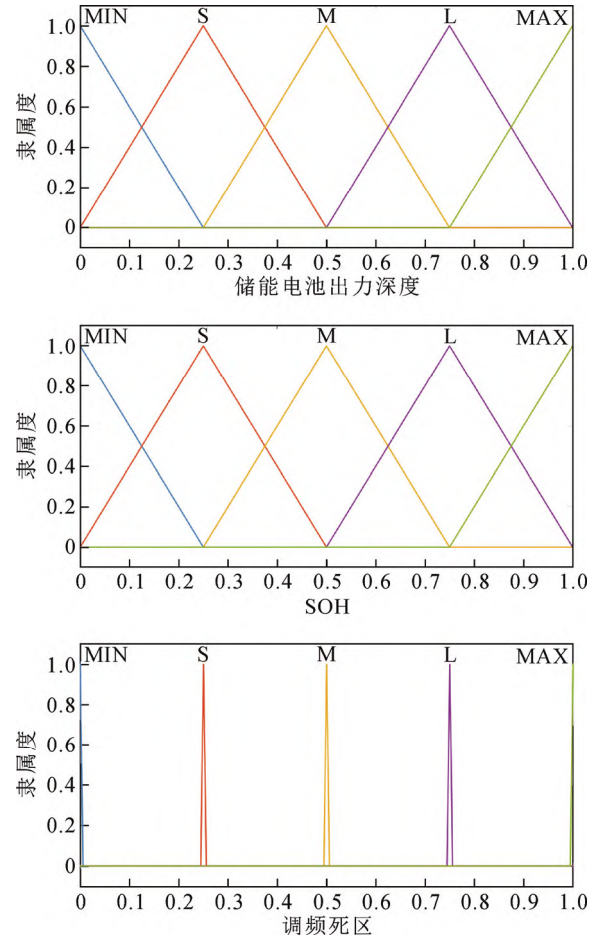


图4 下层模糊控制隶属度函数

Fig.4 Membership function of lower fuzzy control

振荡。logistic 曲线是一种 S 型曲线, 本文使用 logistic 曲线对储能电池出力进行控制, 使其出力平滑变化, logistic 曲线表达式  $K$  为:

$$K = \frac{K_{\max} K_0 e^{nt}}{K_{\max} + K_0 (e^{nt} - 1)} \quad (5)$$

式中:  $K_0$  为初始值;  $K_{\max}$  为终值;  $n$  决定曲线趋势。

储能系统参与一次调频出力  $\Delta P_E$  为:

$$\Delta P_E = \Delta P_M + \Delta P_K \quad (6)$$

$$\Delta P_M = M_b \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\Delta P_K = K_b G_1 \Delta f \quad (8)$$

式中:  $\Delta P_M$ 、 $\Delta P_K$  分别为虚拟惯性与下垂出力;  $K_b G_1$  为综合控制系数;  $G_1$  为约束因子; 当  $\Delta f/\Delta t$  与  $\Delta f$  同号时,  $M_b$  为正数, 储能电池提供正惯性, 减缓电网频率恶化速度, 当  $\Delta f/\Delta t$  与  $\Delta f$  异号时,  $M_b$  为负数, 储能电池提供负惯性, 加快电网频率恢复速度。

约束因子  $G_1$  表达式为:

$$G_1 = \left( 1 + \frac{\Delta f}{\Delta f_{\max}} \right) S_{OH} \quad (9)$$

式中:  $\Delta f_{\max}$  为允许最大频率偏差;  $S_{OH}$  为  $i$  时刻储能电池的 SOH。

根据式(6)–(9)可知, 当电网频率恶化时, 储能电池越健康, 电网频率偏差越大, 约束因子就越大, 储能电池出力也越大, 抑制电网频率恶化。当电网频率恢复时, 电网频率偏差变小, 约束因子变小, 储能电池出力减少, 延长参与一次调频时间。

储能系统的惯性系数  $M_b$  和下垂系数  $K_b$  为:

$$K_b = \begin{cases} (K_c + K_{c,add}) G_2, f > f_0 \\ (K_d + K_{d,add}) G_3, f < f_0 \end{cases} \quad (10)$$

$$M_b = \lambda K_b \quad (11)$$

式中:  $K_c$ 、 $K_d$  分别为充、放电系数;  $K_{c,add}$ 、 $K_{d,add}$  分别为充、放电系数附加项;  $G_2$ 、 $G_3$  分别为充、放电优化因子;  $f_0$  为基准频率, 取 50 Hz;  $\lambda$  为惯性系数与虚拟下垂系数的比例关系, 由于  $\Delta f/\Delta t$  比  $\Delta f$  数量



级大, 选取合理的 $\lambda$ 来控制储能电池出力。

充、放电系数  $K_c$ 、 $K_d$  为:

$$K_c = \begin{cases} K_{\max}, & S_i \leq S_{\text{high}} \\ \frac{K_{\max} K_0 e^{\frac{n_1 (S_{\max} - S_i)}{S_{\max} - S_{\text{high}}}}}{K_{\max} + K_0 (e^{\frac{n_1 (S_{\max} - S_i)}{S_{\max} - S_{\text{high}}}} - 1)}, & S_{\text{high}} < S_i < S_{\max} \\ 0, & S_i \geq S_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$K_d = \begin{cases} 0, & S_i \leq S_{\min} \\ \frac{K_{\max} K_0 e^{\frac{n_1 (S_i - S_{\min})}{S_{\text{low}} - S_{\min}}}}{K_{\max} + K_0 (e^{\frac{n_1 (S_i - S_{\min})}{S_{\text{low}} - S_{\min}}} - 1)}, & S_{\min} < S_i < S_{\text{low}} \\ K_{\max}, & S_i \geq S_{\text{low}} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  时刻的 SOC 值;  $S_{\min}$ 、 $S_{\text{low}}$ 、 $S_{\text{high}}$ 、 $S_{\max}$  分别为 SOC 的最小值、较小值、较大值、最大值, 本文分别取 0.2、0.4、0.6、0.8。

充、放电系数附加项  $K_{c,\text{add}}$ 、 $K_{d,\text{add}}$  为:

$$K_{c,\text{add}} = \begin{cases} \frac{\alpha K_{\max} K_0 e^{\frac{n_2 (S_{\min} - S_i)}{S_{\min} - 0}}}{\alpha K_{\max} + K_0 (e^{\frac{n_2 (S_{\min} - S_i)}{S_{\min} - 0}} - 1)}, & S_i \leq S_{\min} \\ 0, & S_i > S_{\min} \end{cases} \quad (14)$$

$$K_{d,\text{add}} = \begin{cases} \frac{\alpha K_{\max} K_0 e^{\frac{n_2 (S_i - S_{\max})}{1 - S_{\max}}}}{\alpha K_{\max} + K_0 (e^{\frac{n_2 (S_i - S_{\max})}{1 - S_{\max}}} - 1)}, & S_i \geq S_{\max} \\ 0, & S_i < S_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

由于 SOC 估算存在误差, 会出现储能电池过充过放现象。在充电状态下  $\text{SOC} < 0.2$  时, 或者放电状态下  $\text{SOC} > 0.8$  时, 充、放电系数附加项将不再为 0, 增加储能电池的惯性、下垂系数, 进而增加储能电池的充、放电量, 使 SOC 进入 0.2~0.8 之间。当储能电池输出功率超过最大功率时, 以最大功率进行充、放电。

根据图 5、6 可知,  $n_1$ 、 $n_2$  决定着 logistic 曲线变化趋势,  $n_1$  越小, 恢复到最佳工作区间越慢。 $n_2$  增大, 较小的 SOC 变化引起较大的储能电池出力,  $n_2$  减小, 较大的 SOC 变化引起较小的储能电池出力, 自适应调节能力差。

由图 7、8 可知, 储能电池充电状态下  $\text{SOC} > 0.8$  时, 综合控制系数为 0, 随着 SOC 减小, 约束因子增加, 综合控制系数增大, 储能电池出力变大。储能电池放电状态下  $\text{SOC} < 0.2$  时, 综合控制系数为 0, 随着 SOC 增加, 约束因子增加, 综合控制系数增大, 储能电池出力变大。储能电池 SOC 与约束因子控制其出力, 提升储能系统性能, 抑制电网频率恶化。

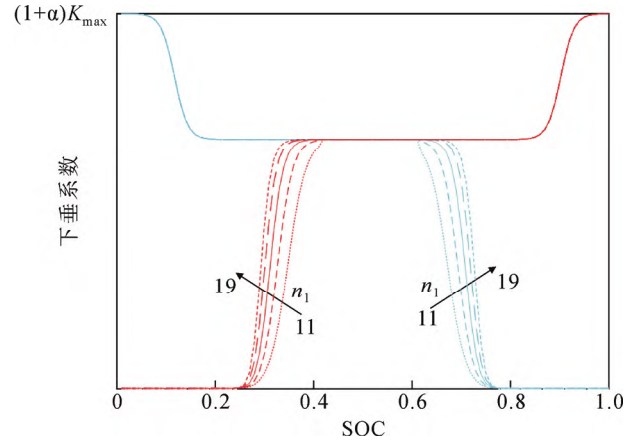


图 5 不同  $n_1$  对应的系数

Fig.5 Different coefficients corresponding to  $n_1$

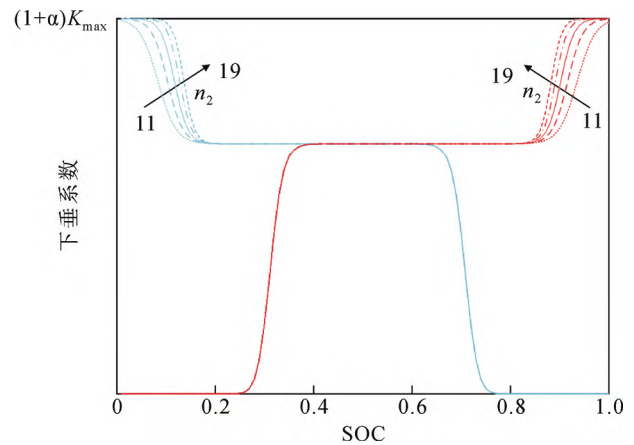


图 6 不同  $n_2$  对应的系数

Fig.6 Different coefficients corresponding to  $n_2$

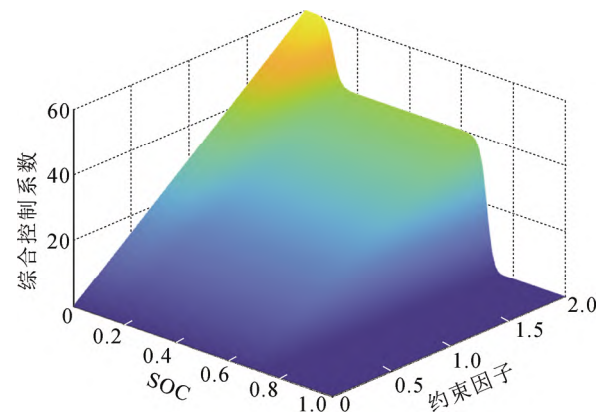


图 7 充电时综合控制系数

Fig.7 Comprehensive control coefficient during charging

### 2.3 SOC 均衡控制策略

由于储能电池的出力深度会影响 SOH, 损害储能电池寿命, 本文在储能系统内部各个储能电池进行 SOC 均衡, 储能电池放电时, SOC 高的储能电池增加出力, SOC 低的储能电池减少出力, 充电时,

则相反, 使储能电池出力深度均衡。

目前, 普遍使用安时积分法估算 SOC, 这是因为安时积分法计算简单, 获取 SOC 相对容易, 但是随着误差的积累, 估算误差越来越大。因此, 本文提出安时积分和卡尔曼滤波综合估算 SOC 方法, 该方法结合了安时积分法计算简单和卡尔曼滤波法误差修正的优点。首先通过安时积分法计算  $k$  时刻 SOC 估计值, 再运用卡尔曼滤波算法预测  $k+1$  时刻 SOC 估计值与开路电压估计值, 通过预测的开路电压与真实电压进行比较, 得到电压误差, 运用该误差进行 SOC 修正, 修正后的 SOC 误差更小, 其过程如图 9 所示。在 2.2 节中 SOC 约束条件具有 SOC 均衡效果, 但是均衡速度较慢, 容易使储能电池过早到达储能电池充、放电极限, 增加储能电池出力深度, 影响储能电池寿命, 本文提出 SOC 快速均衡函数策略, 使用比值法构建函数, 与差值法相比, 比值法对 SOC 更敏感, 更能加快 SOC 均衡速度, 缩短均衡时间, 提高储能系统利用效率, 进而辅助提升系统性能。

SOC 快速均衡函数  $F$  为:

$$F = \begin{cases} F_c, & f > f_0 \\ F_d, & f < f_0 \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $F_c$ 、 $F_d$  分别为 SOC 快速均衡充、放电函数。

SOC 快速均衡充电函数  $F_c$  为:

$$F_c = \left( \frac{S_{ave}}{S_i} \right)^k a^{m \left( \frac{S_{ave}}{S_i} - 1 \right)} \quad (17)$$

SOC 快速均衡放电函数  $F_d$  为:

$$F_d = \left( \frac{S_i}{S_{ave}} \right)^k a^{m \left( \frac{S_i}{S_{ave}} - 1 \right)} \quad (18)$$

式中:  $S_{ave}$  为 SOC 平均值;  $k$ 、 $a$ 、 $m$  决定充、放电的速度。

储能电池的出力为:

$$\Delta P_i = F \cdot \Delta P_E \quad (19)$$

根据式(16)–(19)可知, 在储能电池放电时  $SOC > S_{ave}$ , 增加储能电池出力, 当  $SOC < S_{ave}$ , 减小储能电池出力, 使得 SOC 快速接近  $S_{ave}$ , 充电时, 则相反, 实现 SOC 快速均衡。

## 2.4 多重约束控制策略总体思路及评价标准

### 2.4.1 多重约束控制策略总体思路

综上所述, 对基于储能系统多重约束的一次调频策略进行总体的分析, 其思路图如图 10 所示, 流程图如图 11 所示。约束 1 多时间尺度调频死区提高

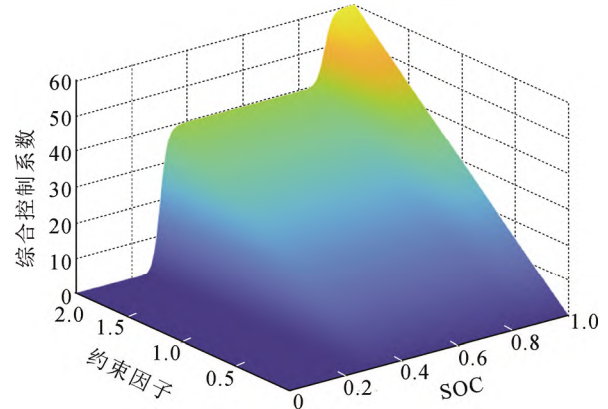


图 8 放电时综合控制系数

Fig.8 Comprehensive control coefficient during discharge

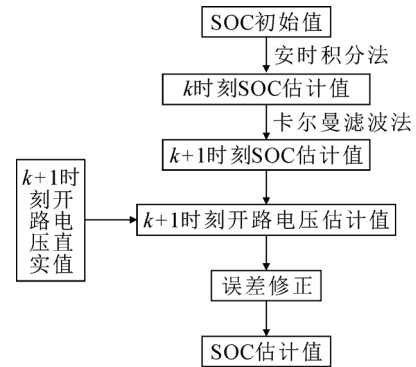


图 9 SOC 估算流程图

Fig.9 SOC estimation flow chart

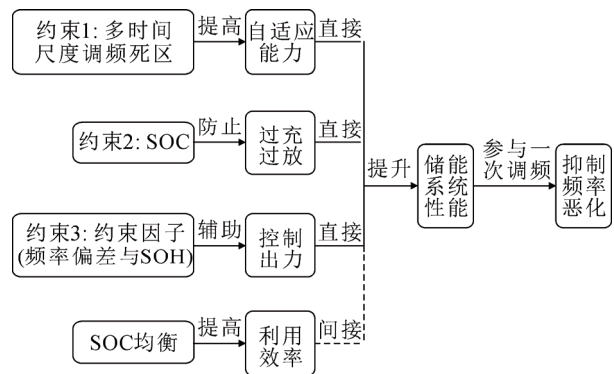


图 10 多重约束控制策略思路图

Fig.10 Multi-constraint control strategy diagram

了储能系统自适应能力, 约束 2 SOC 防止了储能电池过充过放, 约束 3 约束因子控制储能电池出力, SOC 均能提高了储能系统的利用率, 共同提升了储能系统性能, 在参与一次调频过程中抑制频率恶化。

首先, 确定第 1 重约束条件储能电池多时间尺度调频死区, 频率偏差越大, 储能电池调频死区越

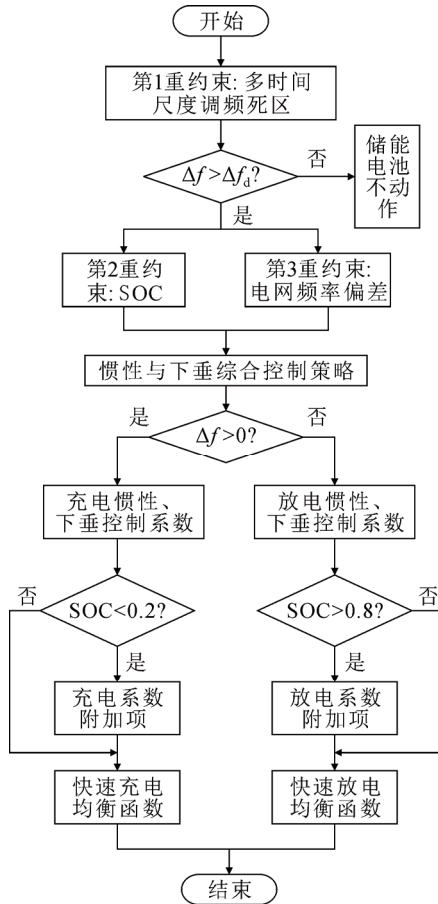


图 11 储能参与一次调频流程图

Fig. 11 Energy storage participates in the primary frequency control flow chart

小, 储能电池提前动作, 减小电网频率偏差。负荷扰动越小, 储能电池调频死区越大, 减少储能不必要动作次数, 提高储能系统自适应能力。

其次, 根据第 2、3 重约束条件控制储能出力, 确定惯性与下垂综合控制策略充、放电系数。充电状态下  $SOC < 0.2$  时, 或放电状态下  $SOC > 0.8$  时, 综合控制系数附加项增加储能电池出力, 进行快速充、放电, 使其尽快进入最佳工作区间。

最后, 进行 SOC 快速均衡, 缩短均衡时间, 减缓储能电池老化。由于每个储能电池 SOC 不同, 储能电池出力也不同, SOC 均衡将每个电池的出力保持一致, 提高储能系统利用效率。

#### 2.4.2 评价标准

本文分析储能系统参与一次调频效果的评价标准如下:

阶跃负荷扰动时, 使用电网最大频率偏差  $f_m$  和电网稳态频率偏差  $f_s$  对所提策略进行评价, 图 12 对电网频率偏差进行了介绍。电网最大频率偏差  $f_m$

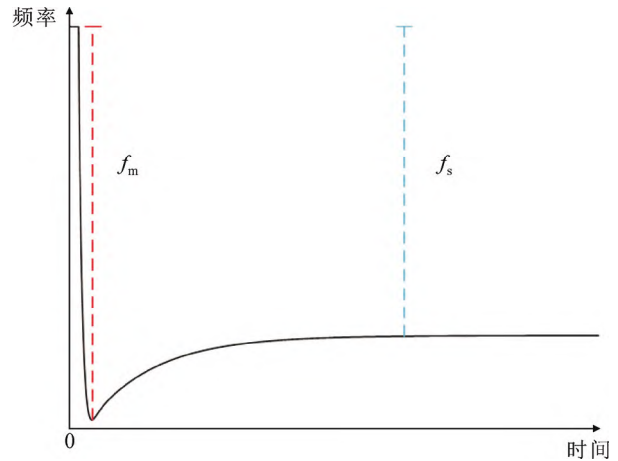


图 12 电网频率偏差介绍

Fig. 12 Introduction to frequency deviation of power grid

越小, 说明抗扰动性越好, 对电网的冲击越小。电网稳态频率偏差  $f_s$  越小, 说明扰动对电网的影响越小, 电网越稳定。电网最大频率偏差  $f_m$  和电网稳态频率偏差  $f_s$  越大, 则相反。

连续负荷扰动时, 使用电网平均频率偏差  $f_{ave}$ 、电网频率峰谷值和储能电池平均荷电状态  $Q_{ave}$  对所提策略进行评价<sup>[23]</sup>, 其表达式如下:

$$f_{ave} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - f_0)^2} \quad (20)$$

$$Q_{ave} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - S_0)^2} \quad (21)$$

式中:  $f_i$  为第  $i$  时刻电网的频率;  $S_0$  为电池荷电状态基准值。

电网平均频率偏差  $f_{ave}$  越小, 说明储能电池参与一次调频效果越好。储能电池平均荷电状态  $Q_{ave}$  越小, 储能电池出力深度越小。电网平均频率偏差  $f_{ave}$  和储能电池平均荷电状态  $Q_{ave}$  越大, 则相反。

### 3 算例分析

#### 3.1 仿真参数

本文通过 Matlab/Simulink 搭建仿真分别在阶跃负荷扰动和连续负荷扰动工况下验证所提控制策略的有效性, 火电机组选取 200 MW, 储能电池选取 50 MW/50 MW·h, 其他参数如表 3 所示<sup>[13-14]</sup>。

#### 3.2 阶跃负荷扰动仿真

在实际系统中一次调频覆盖时间为 30~60 s, 然后由二次调频将频率恢复至目标值, 基本不会出现频率长时间悬停情况, 所以本文在 100 MW 的阶跃负荷扰动下进行仿真, 仿真时间设为 40 s。SOC=0.5 的情况下, 本文方法将对比无储能方法、变  $K$  法、

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameter

参数	数值
$F_{HP}$ 标幺值	0.5
$T_{RH}/s$	10
$T_{CH}/s$	0.3
$T_g/s$	0.08
$K_g$	20
$D$	1
$M$	10
$T_E/s$	0.1
$K_{max}$	20
$K_0$	0.01

自适应法验证所提策略有效性。文献[9]提出的变  $K$  法中, SOC 在 0.2~0.8 之间, 储能系统出力线性变化, 放电时 SOC=0.8 储能系统出力最大, SOC=0.2 时储能系统停止出力, 充电时相反。文献[10]中自适应法是现在文献普遍使用的方法, 储能系统出力特征呈现关于 SOC 的 logistic 曲线变化, 放电时 SOC 在 0.4~0.8 之间出力最大, SOC 在 0.4~0.2 之间开始呈现 S 形变化, SOC=0.2 时为 0, 充电时则相反。本文方法的负荷扰动、储能系统出力、火电机组出力波形如图 13 所示。

由图 14 和表 4 可知, 无储能法电网最大频率偏差为-0.154 Hz, 电网稳态频率偏差为-0.116 Hz, 电网最大频率偏差和电网稳态频率偏差最大, 说明储能电池参与一次调频可以有效抑制电网频率恶化。变  $K$  法电网最大频率偏差为-0.128 Hz, 电网稳态频率偏差为-0.103 Hz, 由于在 SOC 变化初期储能电池出力开始线性减小, 所以储能电池参与一次调频效果较差。自适应法电网最大频率偏差为-0.110 Hz, 电网稳态频率偏差为-0.091 Hz, 自适应法在 SOC 变化初期储能系统出力较大, 所以储能电池参与一次调频效果较好。本文方法电网最大频率偏差和电网稳态频率偏差最小, 分别为-0.094 Hz、-0.081 Hz, 相比无储能方法分别减小 38.80%、29.13%, 相比于自适应方法分别减小 14.23%、9.89%, 电网最大频率偏差和电网稳态频率偏差相差甚小, 电网频率恢复速度更快。因为约束因子增加了储能电池出力, 所以本文方法参与一次调频效果最佳。

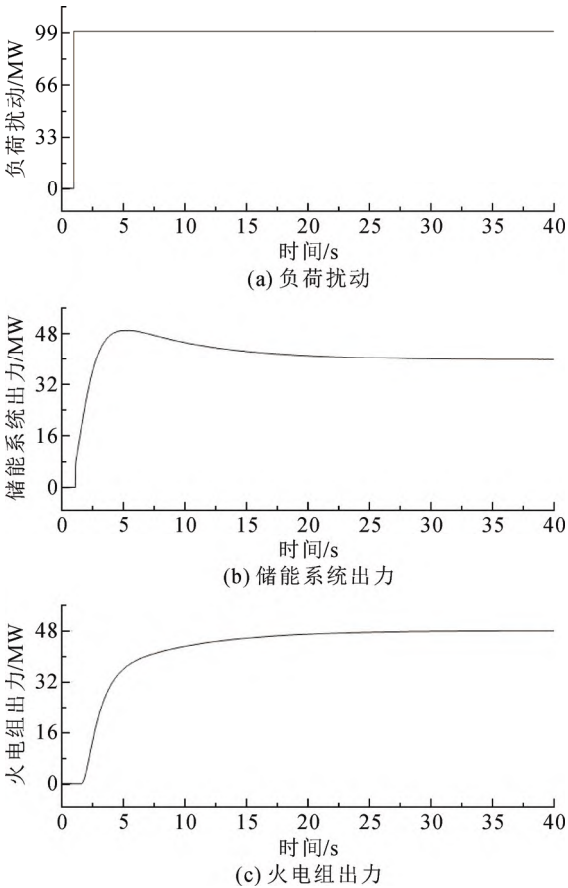


图 13 储能与火电机组出力

Fig.13 Energy storage and thermal power unit output

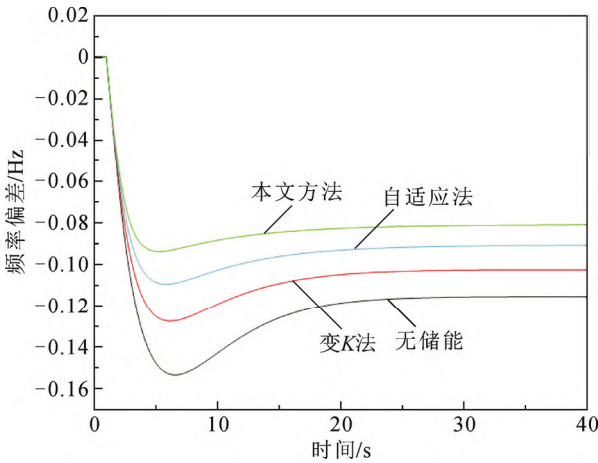


图 14 阶跃扰动频率偏差

Fig.14 Step interference frequency deviation

在长时间 5 min 阶跃负荷扰动下放电, 储能电池组 SOC 分别为 0.6、0.5、0.4 进行均衡, 快速均衡效果与普通均衡效果对比如图 15、16 所示。根据图 15、16 可知, 本文的 SOC 快速均衡比普通均衡效果好, 均衡时间更短。放电时, 普通均



表 4 阶跃扰动评价标准

Table 4 Step interference evaluation criteria

方法	$f_m/\text{Hz}$	$f_s/\text{Hz}$
无储能	-0.154	-0.116
变 $K$ 法	-0.128	-0.103
自适应法	-0.110	-0.091
本文方法	-0.094	-0.081

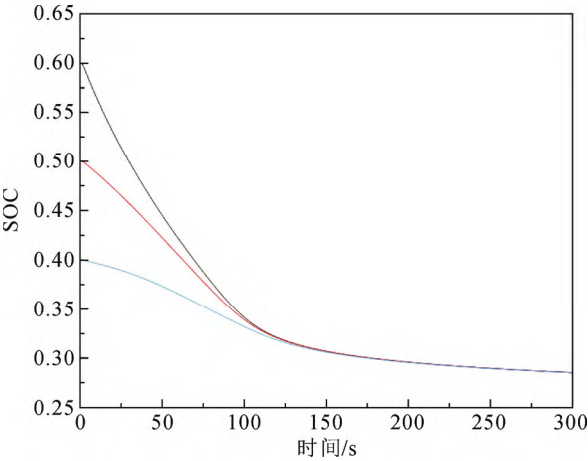


图 15 快速均衡

Fig.15 Fast equalization

衡中 SOC 在 0.4~0.8 时储能电池组出力相同, 不进行 SOC 均衡, 当 SOC<0.4 时开始 SOC 均衡, 而本文快速均衡函数在 SOC 变化初期开始均衡, 且有较大的均衡增益, 均衡速度提升了约 55%, 更早使储能电池 SOC 保持一致, 提高储能系统利用效率。

### 3.3 连续负荷扰动仿真

仿真在短时间与长时间连续负荷扰动下进行验证所提策略有效性, 短时负荷扰动仿真时间设为 4 min, 长时负荷扰动设为 30 min, 本文方法对比无储能法、变  $K$  法、自适应法, 其中无储能法、变  $K$  法、自适应法储能电池的调频死区设置 0.6(标么值), 本文方法采取多时间尺度调频死区策略。连续负荷扰动、储能系统多时间尺度调频死区、火电机出力、储能系统出力波形如图 17 所示。

根据图 18、19 和表 5 可知, 无储能法电网频率偏差最大, 电网频率偏差平均值为 0.053 Hz, 电网频率峰谷值为 0.224 Hz。变  $K$  法电网频率偏差平均值为 0.047 Hz, 电网频率峰谷值为 0.206 Hz, SOC 变化最小。自适应法电网频率偏差平均值为 0.043 Hz, 峰谷值为 0.191 Hz。在短时连续负荷扰动下, 本文控制策略的电网平均频率偏差和峰谷值最小,

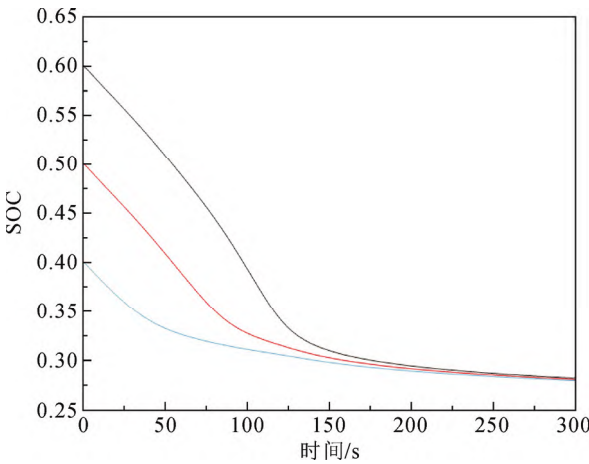
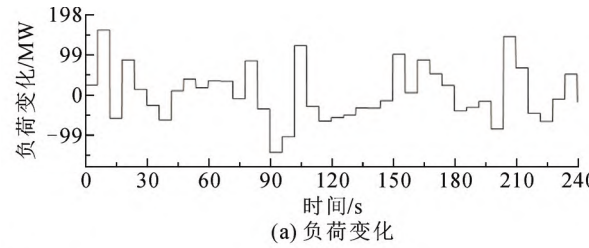
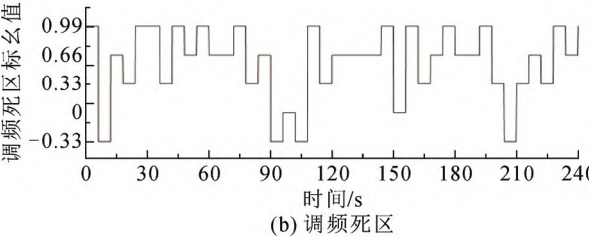


图 16 普通均衡

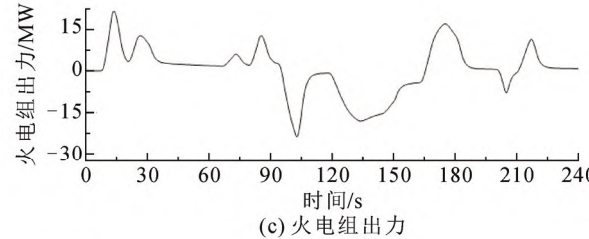
Fig.16 General equilibrium



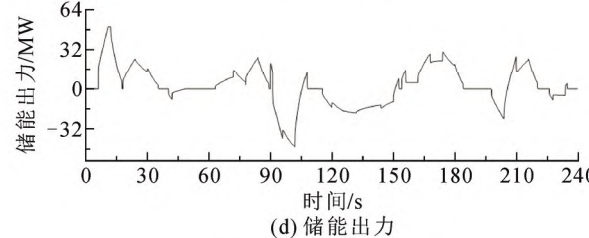
(a) 负荷变化



(b) 调频死区



(c) 火电组出力



(d) 储能出力

图 17 短时间连续负荷扰动

Fig.17 Short-time continuous load disturbance

电网频率偏差平均值为 0.039 Hz, 峰谷值为 0.196 Hz, 调频效果最好, 但 SOC 变化最大, 这是由于约束因子增大导致了储能系统出力增大, 消耗了较多的 SOC。

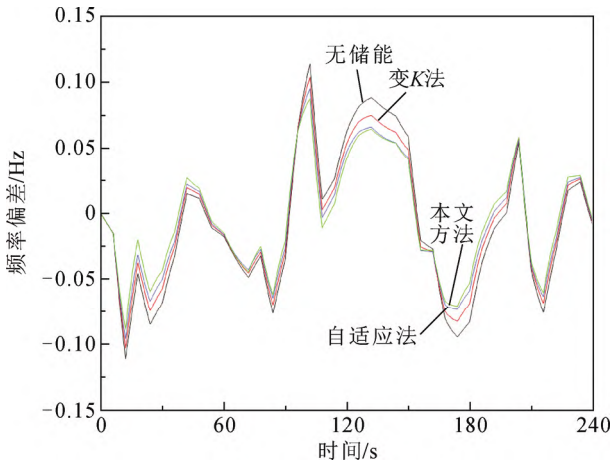


图 18 短时间负荷扰动电网频率偏差

Fig.18 Short-time load disturbance frequency deviation

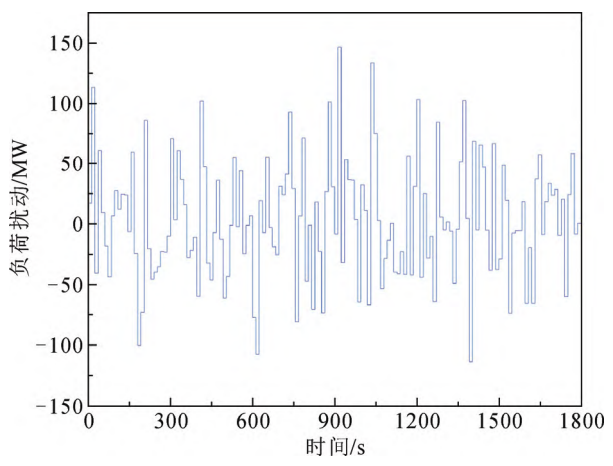


图 20 长时间连续负荷扰动

Fig.20 Long-time continuous load disturbance

表 5 连续扰动评价指标

Table 5 Continuous interference evaluation index

方法	$f_{ave}/\text{Hz}$	频率峰值/Hz	$Q_{ave}$	SOC 峰值
无储能	0.053	0.224	—	—
变 K 法	0.047	0.206	0.494	0.017
自适应	0.043	0.191	0.490	0.028
本文方法	0.039	0.196	0.487	0.038

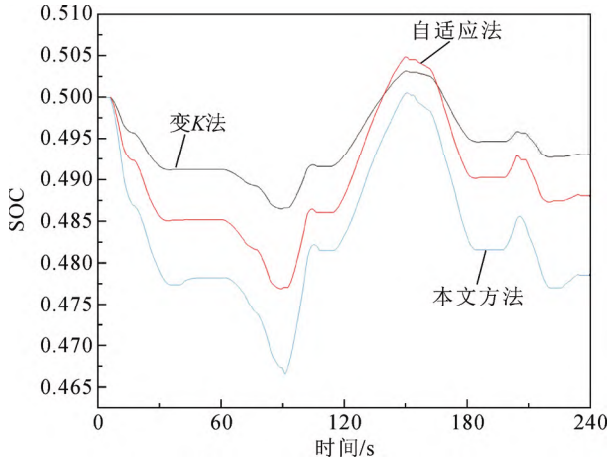


图 19 短时间连续扰动 SOC 变化

Fig.19 Short-time continuous interference with SOC changes

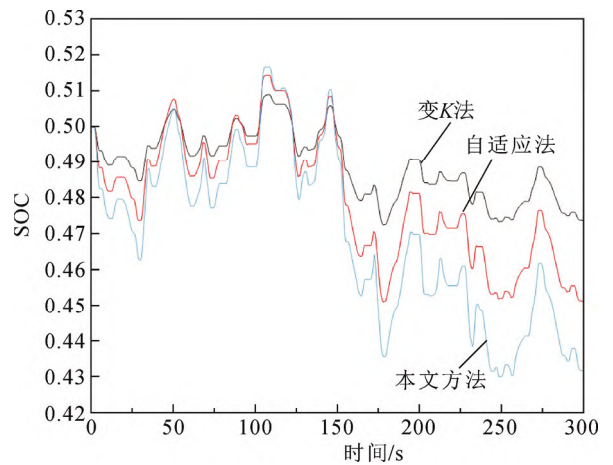


图 21 长时间连续扰动 SOC 变化

Fig.21 Long-time continuous interference with SOC changes

图 20—图 22 是长时间连续负荷扰动结果图, 图 20 是 30 min 的负荷干扰波形图。图 21 是 SOC 变化结果, 变 K 法 SOC 变化量最小, 本文方法的 SOC 变化量最大, 但都在健康范围内变化。图 22 是电网频率偏差, 本文方法的频率偏差最小, 参与一次调频效果最好。

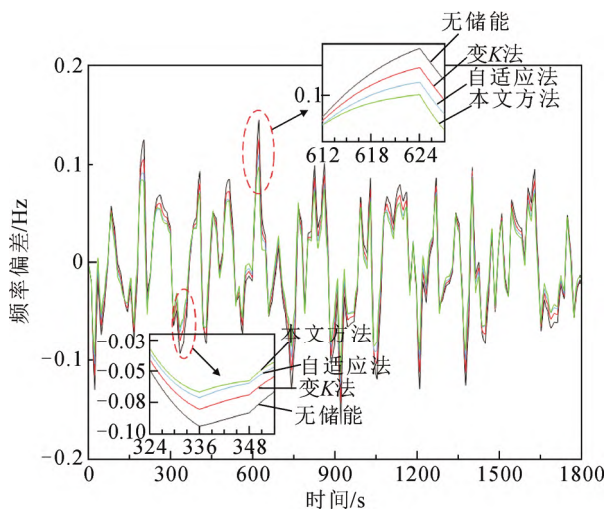


图 22 长时间连续负荷扰动电网频率偏差

Fig.22 Long-time continuous load disturbs the frequency deviation of power network

## 4 结论

本文为了提升储能系统性能,提出了一种基于储能系统多重约束的一次调频策略,得出以下结论:

1) 第 1 重约束条件储能电池多时间尺度调频死区考虑了实际工程可执行性,有效减少火电机组的频繁动作次数和储能电池的不必要动作次数,提高了自适应能力,进而提升了储能系统的性能。

2) 本文提出的惯性与下垂综合控制策略中 SOC 和约束因子控制储能电池出力,抑制电网频率恶化,提升储能系统性能。在参考实际系统的阶跃负荷扰动中,本文方法与自适应法比较,电网最大频率偏差和电网稳态频率偏差分别减小 14.23%、9.89%,在连续负扰动中,本文方法调频效果最佳。

3) 本文采用按时积分和卡尔曼滤波综合估算 SOC 方法,减少估算误差, SOC 快速均衡函数将均衡时间缩短了约 55%,通过提高储能系统利用效率来辅助提升储能系统性能。

本文未来研究重点将在储能电池多时间尺度调频死区的线性变化和经济性分析。

## 参考文献 References

- [1] 赵恩盛, 韩 杨, 周思宇, 等. 微电网惯量与阻尼模拟技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1413-1427.  
ZHAO En'sheng, HAN Yang, ZHOU Siyu, et al. Review and prospect of inertia and damping simulation technologies of microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1413-1427.
- [2] 李祥涛, 陈 磊, 郝 玲, 等. 基于两个细则的火储联合一次调频控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4163-4171.  
LI Xiangtao, CHEN Lei, HAO Ling, et al. A joint primary frequency modulation control strategy for fire storage based on two detailed rules[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4163-4171.
- [3] 张小莲, 覃世球, 张仰飞, 等. 考虑储能荷电状态的风储联合调频控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4120-4130.  
ZHANG Xiaolian, QIN Shiqiu, ZHANG Yangfei, et al. Wind turbine and storage joint frequency modulation control strategy considering energy storage state of charge[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4120-4130.
- [4] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4341.  
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4341.
- [5] MA Y X, HU Z C, SONG Y H. Hour-ahead optimization strategy for shared energy storage of renewable energy power stations to provide frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2331-2342.
- [6] AZIZIVAHED A, AREFI A, GHAVIDEL S, et al. Energy management strategy in dynamic distribution network reconfiguration considering renewable energy resources and storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 662-673.
- [7] 杨天鑫, 黄云辉, 唐金锐, 等. 高比例新能源下含调频控制的储能系统多目标优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2744-2753.  
YANG Tianxin, HUANG Yunhui, TANG Jinrui, et al. Multi-objective optimization of energy storage system with frequency regulation control under high proportion of renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2744-2753.
- [8] 刘 鑫, 李欣然, 谭庄熙, 等. 基于不同种类储能电池参与一次调频的最优策略经济性对比[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1403-1410.  
LIU Xin, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Economic comparison of optimal strategies based on different types of energy storage batteries participating in primary frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1403-1410.
- [9] 严干贵, 王铭岐, 段双明, 等. 考虑荷电状态恢复的储能一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 52-61.  
YAN Gangui, WANG Mingqi, DUAN Shuangming, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage considering state of charge recovery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 52-61.
- [10] 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. Primary frequency regulation control strategy of doubly-fed induction generator considering supercapacitor SOC feedback adaptive adjustment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1027-1039.
- [11] 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 strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1157-1165.
- [12] 张嘉诚, 夏向阳, 邓子豪, 等. 储能电站安全参与电网一次调频的优化控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 19-27.  
ZHANG Jiacheng, XIA Xiangyang, DENG Zihao, et al. Optimal control strategy for energy storage power station in primary frequency regulation of power grid[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 19-27.
- [13] 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. Primary frequency regulation control strategy of energy storage based on dynamic droop coefficient and SOC reference[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 1-10.
- [14] 李培强, 丰云鹤, 李欣然, 等. 考虑超短期负荷预测的储能电池参与电网一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 87-93, 148.  
LI Peiqiang, FENG Yunhe, LI Xinran, et al. Control strategy for energy storage battery participating in primary frequency regulation of power grid considering ultra-short-term load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 87-93, 148.
- [15] 宋兴荣, 熊尚峰, 王德顺, 等. 风电并网下储能参与电网一次调频控制策略[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 260-268.  
SONG Xingrong, XIONG Shangfeng, WANG Deshun, et al. Control strategy of energy storage participating in primary frequency regulation with wind power integration[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 260-268.
- [16] 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 stor-

- age[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2102-2115.
- [17] 方红艳, 马 平. 考虑混合储能调频死区的自适应下垂控制策略[J]. 电气工程学报, 2021, 16(4): 213-222.  
FANG Hongyan, MA Ping. Adaptive droop control strategy considering frequency modulation dead band of hybrid energy storage[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(4): 213-222.
- [18] 朱 武, 董 艺, 高迎迎, 等. 考虑调频死区与荷电状态的储能参与电网一次调频控制策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4391-4399.  
ZHU Wu, DONG Yi, GAO Yingying, et al. Control strategy of energy storage in primary frequency regulation of power grid considering dead band and state of charge[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(11): 4391-4399.
- [19] 户艳琴, 周仁友, 黄天翔, 等. 基于改进下垂控制的并网级联型储能系统 SOC 均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 120-129.  
HU Yanqin, ZHOU Renyou, HUANG Tianxiang, et al. SOC balancing strategy of a grid-connected cascaded-type energy storage system based on advanced droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 120-129.
- [20] 韦佐霖, 陈民铀, 李 杰, 等. 孤岛微网中分布式储能 SOC 和效率均衡控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 169-177.  
WEI Zuolin, CHEN Minyou, LI Jie, et al. Balancing control strategy of SOC and efficiency for distributed energy storage in islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 169-177.
- [21] 孟高军, 张 峰, 赵 宇, 等. 电池储能参与电网一次调频的优化综合控制策略[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(6): 43-49.  
MENG Gaojun, ZHANG Feng, ZHAO Yu, et al. Optimized integrated control strategy of battery energy storage participating in primary frequency regulation of power grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(6): 43-49.
- [22] 于琳琳, 王传捷, 张 峰, 等. 计及 SOC 均衡的电池储能参与电网一次调频自适应控制策略研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(5): 685-691.  
YU Linlin, WANG Chuanjie, ZHANG Feng, et al. Research on adaptive control strategy of primary frequency modulation of power grid with battery storage considering SOC equalization[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(5): 685-691.
- [23] 刘英培, 田仕杰, 梁海平, 等. 考虑 SOC 的电池储能系统一次调频策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 107-118.  
LIU Yingpei, TIAN Shijie, LIANG Haiping, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 107-118.



LIANG Jiye

YUAN Zhi  
Ph.D.Associate professor  
Corresponding author**梁继业**

1999—, 男, 硕士生

主要从事储能技术应用方面的研究工作

E-mail: 2267599319@qq.com

**袁 至(通信作者)**

1984—, 男, 博士, 副教授

主要从事可再生能源发电与并网控制的研究工作

E-mail: yzisthecure@163.com

收稿日期 2023-11-20 修回日期 2024-01-02 编辑 陈 蔓