

基于系统频率与 SOC 状态预测的储能一次调频控制策略

池志坤¹, 袁至¹, 李骥²

(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)

摘要: 现有的电池储能系统(battery energy storage system, BESS)参与一次调频的控制策略难以在保证系统频率稳定的基础上, 使荷电状态(state of charge, SOC)维持在合理范围内。针对此问题, 提出一种基于系统频率与 SOC 状态预测的储能一次调频控制策略。首先, 根据系统频率变化情况, 利用模糊控制自适应分配 BESS 下垂控制、虚拟惯性以及负虚拟惯性控制的出力比重; 其次, 根据采样点当前的负荷扰动、系统状态变量以及 SOC 构建模型预测控制(model predictive control, MPC)预测模型及其代价函数, 并进行二次规划求解, 以获取 BESS 当前最优的充放电系数; 再次, 根据输出的 SOC 以及系统频率的实际值, 对 MPC 预测模型和代价函数进行滚动优化; 最后, 使用仿真软件搭建含 BESS 的一次调频模型, 在阶跃和连续 2 种扰动工况下仿真验证该策略的有效性。仿真结果表明, 所提策略不仅能够较充分地发挥 BESS 的调频潜能, 改善系统频率, 减少机组调频动作次数, 还能使 SOC 维持在合理范围内。该策略可以为储能参与一次调频的相关研究提供有益参考。

关键词: 电池储能系统; 一次调频; 模糊控制; 模型预测控制; 荷电状态; 自适应充放电控制

Primary Frequency Regulation Control Strategy of Energy Storage Based on Prediction of System Frequency and State of Charge

CHI Zhikun¹, YUAN Zhi¹, LI Ji²

(1. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

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

Abstract: The existing control strategies of battery energy storage system (BESS) participating in primary frequency regulation are difficult to maintain state of charge (SOC) within a reasonable range while ensuring the stability of system frequency. To solve this problem, a primary frequency regulation control strategy for energy storage based on system frequency and SOC state prediction is proposed. Firstly, according to the change of system frequency, fuzzy control is used to adaptively allocate the output proportion of droop control, virtual inertia, and negative virtual inertia control of BESS. Secondly, according to the current load disturbance of the sampling point, system state variables, and SOC, a model predictive control (MPC) prediction model is adopted to construct its cost function, and quadratic programming is solved to obtain the current optimal charge and discharge coefficient of BESS. Thirdly, rolling optimization of MPC prediction model and cost function are performed according to the output SOC and the actual value of system frequency. Finally, a primary frequency regulation model containing BESS is built by using simulation software, and the effectiveness of this strategy is verified by simulation under step and continuous disturbance conditions. The simulation results show that this strategy can not only fully exert the frequency regulation potential of BESS, improve system frequency, reduce the number of unit frequency regulation actions, but also maintain SOC within a reasonable range. This strategy can provide a useful reference for related research on energy storage participating in primary frequency regulation.

Key words: battery energy storage system; primary frequency regulation; fuzzy control; model predictive control; state of charge; adaptive charge and discharge control

0 引言

“碳达峰、碳中和”战略和构建新型电力系统目标的提出,加快了能源清洁化的进程,具有高度不确定性的新能源并网会造成电力系统频率调节能力的大幅度短缺^[1]。由于高比例新能源及电力电子设备接入电网后,传统火电机组的比例相对减少,导致系统惯量降低,使得电力系统在发生有功功率扰动时,电网频率的波动幅度增加,频率安全难以保障^[2-4]。

电池储能系统(battery energy storage system, BESS)能够迅速响应频率变化,其响应速度等级为毫秒级,显著优于火电机组^[5]。随着“十四五”新型储能发展实施方案的发布, BESS 参与一次调频得到全面发展,由于储能电池具有快速性、灵活性等特点,进而提高了电网的稳定性^[6-8]。火电机组需要进行一次调频时, BESS 参与调频能够减少火电机组的调频动作频率,降低设备磨损,从而延长机组寿命^[9]。因此,如何充分发挥 BESS 的一次调频潜能成为当前需要解决的问题。

BESS 在参与一次调频过程中,通常将不同的控制方式相结合,从而可以灵活应对不同情况下的系统频率波动。在实际应用中,可结合虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的特性,通过确定合适的控制作用时机,实现不同控制策略之间的优势互补^[10]。文献[11]基于模糊控制提出了一种考虑区域控制误差及其变化率的综合协调频率控制策略,有效阻止了 BESS 有功功率与频率偏差变化不匹配情况的发生。文献[12]分析了一次调频中频率恢复阶段的频率变换特性,提出了负虚拟惯性控制,并且与虚拟惯性和下垂控制相结合,提高了系统的鲁棒性。文献[13-14]考虑到储能的自身运行状态,基于储能自身荷电状态(state of charge, SOC)提出了新的频率控制策略,使储能充分发挥其快速响应和参数可定制化优势。文献[15]提出以电网调频死区为分割边界,将储能调频过程划分为调频阶段与 SOC 恢复阶段,从而设计不同的调频策略。文献[16]利用双层控制策略,对单位调节功率和分配系数进行寻优,在减少储能寿命损耗的同时提升调频效果。文献[17]设计了随频率自适应调节的出力比重系数,实现了储能出力的自适应调整,并将线性自抗扰控制应用于控制火电机组,减小了频率波动,并提升了储能恢

复效果。文献[18]提出一种基于储能系统多重约束的一次调频策略,有效避免火电机组与储能电池频繁动作,同时约束储能系统出力,进而缩短 SOC 均衡时间。文献[19]提出了一种基于改进惯性响应的混合储能一次调频控制策略,可有效提升储能的调频控制效果,减小频率越限的可能性,进而增强系统频率运行的稳定裕量。

为了充分发挥 BESS 的一次调频潜能、减少火电机组调频的动作次数、并解决其在调频过程中容易造成过充过放的问题,本文提出了一种基于系统频率与 SOC 状态预测的储能一次调频控制策略。首先,根据系统频率变化情况利用模糊控制自适应分配电池储能系统的下垂控制、虚拟惯性以及负虚拟惯性控制的出力比重;其次,根据采样点当前的负荷扰动,系统状态变量以及 SOC 构建模型预测控制(model predictive control, MPC)的预测模型及其代价函数,并进行二次规划求解以获取 BESS 当前最优充放电系数;再次,根据输出的 SOC 以及系统频率的实际值对 MPC 预测模型以及代价函数进行滚动优化;最后,根据仿真实验,对比系统频率和 BESS 的 SOC 变化曲线以及火电机组的调频动作次数,以验证本文策略的有效性和可靠性。

1 BESS 辅助火电机组的一次调频模型

如图 1 所示,搭建 BESS 参与一次调频的动态模型。图 1 中: s 为拉普拉斯算子; Δf 为系统频率偏差; M 为系统的等效惯量; D 为系统的阻尼系数; K_g 为火电机组的单位调节功率; $G_g(s)$ 为火电机组调速器的传递函数; $G_{en}(s)$ 为火电机组汽轮机的传递函数; $G_b(s)$ 为 BESS 的一阶惯性传递函数; ΔP_L 为系统的负荷扰动; ΔP_G 为火电机组实际出力; ΔP_B 为 BESS 实际出力。

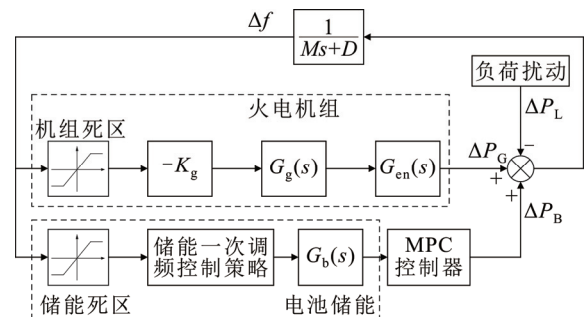


图 1 BESS 参与一次调频模型图

Fig.1 Model diagram of BESS participating in a frequency regulation

对于火电机组而言, 由于系统频率动态特性主要与调速器和汽轮机有关, 因此在搭建火电机组数学模型时, 主要考虑调速器以及汽轮机的传递函数。其中, 火电机组调速器的传递函数^[20]为:

$$G_g(s) = \frac{1}{sT_g + 1} \quad (1)$$

式中: T_g 为调速器时间常数。

火电机组的汽轮机模型如图 2 所示。图 2 中: k_{hp} 、 k_{ip} 以及 k_{lp} 分别对应的是高压缸、中压缸以及低压缸的功率系数; $G_{hp}(s)$ 、 $G_{ip}(s)$ 以及 $G_{lp}(s)$ 分别对应的是高压、中压以及低压蒸汽传递函数。

在火电机组中, 汽轮机按照做功蒸汽的压力等级通常被分为高压缸(HP)、中压缸(IP)和低压缸(LP)。通过这种多级分压的设计, 火电机组的汽轮机可以较为充分地利用过热蒸汽的能量, 从而提高火电机组的热效率并适应不同的运行条件。此外, 通过对汽轮机的优化设计和维护, 能够进一步提升火电机组的过程效率和发电稳定性。因此, 火电机组汽轮机的传递函数为:

$$G_{cn}(s) = k_{hp}G_{hp}(s) + k_{ip}G_{hp}(s)G_{ip}(s) + k_{lp}G_{hp}(s)G_{ip}(s)G_{lp}(s) \quad (2)$$

其中, 高压蒸汽传递函数为:

$$G_{hp}(s) = \frac{1}{sT_{CH} + 1} \quad (3)$$

式中: T_{CH} 为高压蒸汽容积时间常数。

中压蒸汽传递函数为:

$$G_{ip}(s) = \frac{1}{sT_{RH} + 1} \quad (4)$$

式中: T_{RH} 为中间再热蒸汽容积时间常数。

低压蒸汽传递函数为:

$$G_{lp}(s) = \frac{1}{sT_{CO} + 1} \quad (5)$$

式中: T_{CO} 为低压蒸汽容积时间常数。

在建立 BESS 的简化数学模型时, 可以等效为一阶惯性环节。BESS 的一阶惯性传递函数为:

$$G_b(s) = \frac{1}{sT_b + 1} \quad (6)$$

式中: T_b 为 BESS 响应时间常数。

2 基于系统频率与 SOC 状态预测的储能一次调频控制策略

2.1 BESS 参与一次调频控制策略

BESS 调频策略的典型方法之一是同时采用下

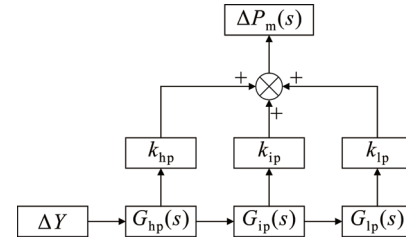


图 2 汽轮机 3 阶数学模型图

Fig.2 Third-order mathematical model of steam turbine

垂控制和虚拟惯性控制。其中, 下垂控制根据系统频率偏差大小控制 BESS 的输出功率, 从而对系统频率提供有功支撑, 其表达式为:

$$\Delta P_d = -K_E \Delta f \quad (7)$$

式中: ΔP_d 为 BESS 的下垂充放有功功率; K_E 为 BESS 下垂系数。

BESS 的虚拟惯性控制根据系统频率变化率大小控制 BESS 的有功出力^[13], 其数学表达式如下:

$$\Delta P_v = -M_E \frac{d\Delta f}{dt} \quad (8)$$

式中: ΔP_v 为 BESS 的虚拟惯性充放有功功率; M_E 为 BESS 的虚拟惯性系数。

对比前述 2 种频率控制方法, 下垂控制适用于频率偏差较大的情况, 但容易受到负荷扰动信号频繁波动的影响, 且由于其不涉及对系统惯量的调整, 因此在维持系统稳定性方面稍逊色于虚拟惯性控制。虚拟惯性控制适用于频率变化率较大的情况, 但在系统进入稳态后逐渐失去作用, 容易导致资源浪费, 且其在频率改善阶段容易引发二次扰动。因此, 为了提高一次调频效果, 通常采用结合虚拟惯性和下垂控制优势的综合控制策略。

图 3 为负荷扰动下的一次调频系统频率波形, 其中 t_0 为负荷扰动加入时刻; t_{max} 为频率偏差最大的时刻; t_s 为频率达到稳态的时刻; $|\Delta f_{max}|$ 为频率偏差最大值; $|\Delta f_s|$ 为频率稳态偏差值。

如图 3 所示, 系统的频率波形在一次调频的过程中可大致分为跌落、改善以及稳态 3 个阶段。以系统在 0 时刻加入负阶跃扰动为例, BESS 在各阶段对下垂和虚拟惯性出力比重的精准自适应把控的难度较大。例如, 在系统加入扰动的一瞬间, 频率变化率的绝对值迅速增大, 而频率偏差基本不变。接着在整个跌落阶段的过程中, 频率变化率的绝对值不断减小直至为 0, 而频率偏差绝对值由 0 逐渐达到最大。当进入改善阶段后, 频率变化率开始与

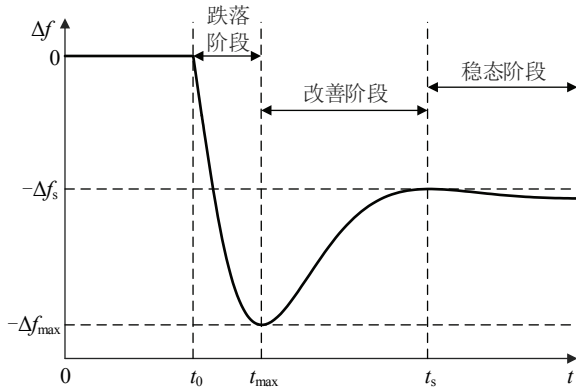


图3 负扰动下的一次调频系统频率波形图

Fig.3 Frequency waveform of primary frequency regulation under negative disturbance

频率偏差的符号相反, 虚拟惯性控制会造成二次扰动, 因此该阶段以下垂控制为主, 且需将虚拟惯性控制调整为负虚拟惯性控制^[12]。综上所述, BESS 的有功出力可表示为:

$$\Delta P_b = \begin{cases} k_v \Delta P_v + k_d \Delta P_d, & \Delta f \cdot \frac{d\Delta f}{dt} \geq 0 \\ -k_v \Delta P_v + k_d \Delta P_d, & \Delta f \cdot \frac{d\Delta f}{dt} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: ΔP_b 为 BESS 的有功出力; k_v 为跌落阶段的虚拟惯性控制出力比重以及改善阶段和稳态阶段的负虚拟惯性控制出力比重; k_d 为下垂控制的出力比重。且有:

$$k_v + k_d = 1 \quad (10)$$

由于模糊控制能够有效地处理系统模型的不确定性和复杂性, 且模糊规则通常基于专家的经验直觉, 无需搭建精确的数学模型。因此, 本文采用模糊控制分配 BESS 在一次调频过程中下垂控制虚拟惯性控制的出力比重。

根据电网传统一次调频的波形特性, 将 Δf 及其变化率 $d\Delta f/dt$ 作为模糊控制的二维输入信号, 同时将 k_v 作为输出信号。由于我国大电网频率偏差允许范围通常在 $-0.2 \sim 0.2$ Hz 之间, 因此需将频率偏差的控制阈值范围设置在频率偏差允许范围之内, 以保证频率偏差的绝对值在达到 0.2 之前, 下垂控制的比例系数就已达到最大值, 从而更好地发挥储能的调频潜能。若将控制阈值设置过小, 则会导致下垂控制的比例系数过早达到最大值, 从而抑制虚拟惯性控制所发挥的作用; 若将控制阈值设置过大, 则频率偏差很可能会因为系统灵敏度的不足而跌出允许范围之外。

由于储能在系统加入负荷扰动后需及时对快速的频率变化做出反应, 以保障系统稳定性和调频效果, 因此需将频率变化率的控制阈值范围设置在一个较小范围内。和上述的频率偏差一样, 两者作为模糊控制的输入变量, 其控制阈值都不是固定的具体范围, 应随着实际的系统环境和实验结果进行灵活调整, 从而达到最佳的调频效果。

此外, 为了增加输入信号的敏感度, 将输入信号根据其特性分配至 7 个模糊子集, 输出信号根据大小分配至 5 个模糊子集, 制定输入输出信号的隶属度函数。其中, 二维输入信号的模糊集合都为 {NB, NM, NS, Z0, PS, PM, PB}, 分别对应输入信号数值的负大、负中、负小、零值、正小、正中和正大, 输出信号所对应的模糊子集为 {Z0, S, M, B, VB}, 分别对应输出信号数值的零值、较小、中等、较大和最大。输入输出信号的隶属度函数如附录 A 图 A1—A3 所示。

不同的模糊逻辑推理规则会产生不同的输出效果。为了使下垂控制、虚拟惯性以及负虚拟惯性控制的比重更加合理地根据系统频率进行自适应变化, 需制定有效可靠的模糊逻辑推理规则。以负扰动为例, 结合图 3 的频率波形进行分析。当 $t=0$ 时, 由于系统扰动突然变化, $d\Delta f/dt$ 达到最大值, 而 Δf 几乎不变, 故此时应该采用虚拟惯性控制, k_v 应设置为最大。之后随着 Δf 的逐渐增大及 $d\Delta f/dt$ 的逐渐减小, k_v 应逐渐减小。当 Δf 达到最大点时, $d\Delta f/dt$ 为 0, 故此时应采用下垂控制, k_v 应设置为最小。当频率进入改善阶段后, Δf 开始逐渐减小, $d\Delta f/dt$ 短暂地先增后减, 因此该阶段应以下垂控制为主, 同时应将虚拟惯性控制更换为负虚拟惯性控制并以此为辅, k_v 应在一个较小的范围内波动。除此之外, 系统频率在正扰动工况下的变化逻辑与负扰动工况下的变化逻辑对称, 模糊推理规则也可根据不同情况下的频率偏差以及频率变化率来进行灵活修改, 以达到更好的调频效果。本文建立的虚拟惯性出力比重模糊逻辑推理表如附录 A 表 A1 所示, 生成的模糊逻辑结果如附录 A 图 A4 所示。

2.2 MPC 预测 BESS 充放电系数

2.2.1 MPC 基本原理

为了避免 BESS 在调频过程中产生过充过放的问题, 从而延长其使用寿命, 同时尽可能保障系统的调频效果, 本文利用 MPC 根据实时的系统频率以及 SOC 的变化情况对 BESS 在一次调频过程中的

充放电深度实行自适应最优调控。

MPC 的适用范围广泛, 近些年已在汽车自动驾驶、微电网、过程系统控制、机器人技术和车辆路径规划等多个领域展现出优异的控制性能^[21]。MPC 作为一种优秀的控制策略, 其响应速度能够达到毫秒级别, 能够适应复杂动态系统, 具体的预测周期与系统复杂度、预测步长以及预设采样时间有关。而储能一次调频的响应时间要求在秒级或更短, 因此, 可通过对上述参数进行设置使得其预测周期与储能一次调频控制需求相匹配。MPC 通过预测未来系统的动态行为, 以优化的方式确定被控输入, 从而实现对系统的精确控制。MPC 主要分为 4 个步骤: (1) 为设定参考轨迹; (2) 为建立预测模型; (3) 为反馈矫正; (4) 为滚动优化^[22]。

如附录 A 图 A5 所示, u 为系统的被控输入变量, y 为系统的输出变量, $k \sim (k+N)$ 为系统的预测区间, $k \sim (k+N-1)$ 为系统的控制区间。假设在 k 时刻测量当前的系统状态, 并根据测量的 $y(k)$ 施加一个输入 $u(k)$, 则能够预测到 $k+1$ 时刻的 $y(k+1)$ 。重复 N 次预测动作, 则最终能够预测到 $k+N$ 时刻的 $y(k+N)$ 。以 $N=4$ 为例, 系统在 k 时刻对未来的 4 个时刻进行预测, 最终能够得到 $u(k)$ 、 $u(k+1)$ 、 $u(k+2)$ 、 $u(k+3)$ 、 $y(k+1)$ 、 $y(k+2)$ 、 $y(k+3)$ 、 $y(k+4)$ 。预测完成后, MPC 仅将 $u(k)$ 作为 k 时刻的输入, 接着测量 $y(k+1)$ 的实际值, 再根据误差进行滚动优化, 并在下一时刻重复上述动作。

2.2.2 MPC 的预测模型

根据上述原理, 在 BESS 参与一次调频模型当中, 以系统频率和 SOC 作为系统的输出变量, 充放电系数作为被控输入变量并设定输出变量的参考轨迹。MPC 根据当前的输出变量, 基于被控输入变量, 对未来时间段内的输出变量表现进行轨迹追踪以及滚动优化, 寻得被控输入变量的最优解, 以达到平滑系统频率以及 SOC 误差的目的, 从而充分发掘 BESS 参与一次调频的潜能并延长其使用寿命。

MPC 多用于数位控制, 其离散状态表达式为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{L}\mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{x}(k+1)$ 为系统在 $k+1$ 时刻的状态变量; $\mathbf{x}(k)$ 为系统在 k 时刻的初始状态; $\mathbf{u}(k)$ 为系统在 k 时刻的被控输入变量; $\mathbf{w}(k)$ 为扰动变量; \mathbf{A} 为系统控制矩阵; \mathbf{B} 为输入控制矩阵; \mathbf{C} 为输出控制矩阵; \mathbf{L} 为系统扰动矩阵; $\mathbf{y}(k)$ 为输出变量。

基于离散化公式, 系统频率以及 SOC 可表示为:

$$\begin{cases} f(k+1) = f(k) + \frac{P_G(k)}{M} + \\ \frac{P_b(k)}{M}u_d(k) - \frac{P_L(k)}{M} \\ S(k+1) = S(k) - \frac{P_b(k)}{Q_B}u_d(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $f(k)$ 为系统频率在 k 时刻的大小; $u_d(k)$ 为 BESS 在 k 时刻的充放电系数; $S(k)$ 为 BESS 在 k 时刻的 SOC; Q_B 为 BESS 的额定容量。

为了简化系统状态空间模型, 将系统负荷扰动以及火电机组的调频出力均定义为扰动变量。将 k 时刻的初始状态及被控输入设为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k) = [f(k) \quad S(k)]^T \\ \mathbf{u}(k) = [u_d(k)] \end{cases} \quad (13)$$

扰动变量可以表示为:

$$\mathbf{w}(k) = [P_G(k) \quad P_L(k)]^T \quad (14)$$

其余的系统矩阵可表示为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{P_b(k)}{M} \\ -\frac{P_b(k)}{Q_B} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & -\frac{1}{M} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

MPC 在 k 时刻的参考值为目标频率和目标 SOC, 可表示为:

$$\mathbf{r}_k = [f_{\text{ref}}(k) \quad S_{\text{ref}}(k)]^T \quad (19)$$

式中: $f_{\text{ref}}(k)$ 为系统频率在 k 时刻的参考值; $S_{\text{ref}}(k)$ 为 SOC 在 k 时刻的参考值。

2.2.3 MPC 的代价函数

由式(11)、式(13)、式(17)及式(19)可得 k 时刻的误差矩阵可表示为:

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{r}_k = \mathbf{x}(k) - \mathbf{r}_k = [f(k) - f_{\text{ref}}(k) \quad S(k) - S_{\text{ref}}(k)]^T \quad (20)$$

通过计算当前系统频率与 SOC 的误差, MPC 能够根据误差生成控制信号, 以约束 BESS 的充放电深度。

MPC 的约束条件设置为:

$$\begin{cases} 49.8 \text{ Hz} \leq f(k) \leq 50.2 \text{ Hz} \\ 0.2 \leq S(k) \leq 0.8 \\ 0 \leq u_d(k) \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

由于系统的输出变量为 $f(k)$ 和 $S(k)$, 因此误差权重矩阵 \mathbf{Q} 可以表示为:

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(q_f \quad q_s) \quad (22)$$

式中: q_f 为 $f(k)$ 的误差权重; q_s 为 $S(k)$ 的误差权重。当 $q_f > q_s$ 时, MPC 更加注重于对系统频率的追踪; 而当 $q_f < q_s$ 时, MPC 则更加注重于对 SOC 的追踪。

通常情况下, BESS 的 SOC 安全运行范围为 0.2~0.8。因此, 在放电情况下, 将 [0.35, 0.8] 的范围设置为理想区域, 将 [0.2, 0.35] 的范围设置为危险区域; 在充电情况下, 将 [0.2, 0.65] 的范围设置为理想区域, 将 [0.65, 0.8] 的范围设置为危险区域。

根据系统频率以及 SOC 状态把 BESS 参与一次调频的不同情况划分为 6 个区间, 如附录 A 图 A6 所示, 其中 Q_{SOC} 表示 BESS 的 SOC 的大小。以 $f(k) > 50 \text{ Hz}$ 为例, 在第 I 区间内, 尽管 SOC 偏小, 但此时的调频需求为 BESS 吸收有功功率, 能够同时达到调频以及 SOC 恢复的目的, 因此在该区间内 MPC 应注重于对系统频率的追踪, q_f 应设为最大, q_s 应设为最小; 在第 II 区间内, SOC 的状态良好, 能够充分为系统频率的稳定提供有功保障, 因此在该区间内 MPC 应注重于对系统频率的追踪, q_f 应设为最大, q_s 应设为最小; 在第 III 区间内, SOC 偏大, 且该区间的调频需求为 BESS 吸收有功功率, 将进一步增大 SOC 值, 因此在该区间内 MPC 应该注重于对 SOC 的追踪, 增大 q_s 并减小 q_f 。同理, 在 $f(k) < 50 \text{ Hz}$ 的情况下也能推理出第 IV、V、VI 区间内 q_f 及 q_s 的变化情况。

将上述 q_f 以及 q_s 的变化规律以自适应曲线的形式进行表示, 如附录 A 式(A1)及式(A2)所示。其中: $q_{f\text{max}}$ 、 $q_{f\text{min}}$ 分别表示 f 误差权重的最大及最小值; $q_{s\text{max}}$ 、 $q_{s\text{min}}$ 分别表示 SOC 误差权重的最大及最小值; n 为自适应曲线增长率参数, 表示曲线的变化速度, n 越大则变化速度越快, 其大小应根据曲线的变化区间来进行选择。 q_f 和 q_s 的变化曲线如附录 A 图 A7 及图 A8 所示。

基于 $\mathbf{u}(k)$ 、 $\mathbf{u}(k+1)$ 、 \dots 、 $\mathbf{u}(k+N-1)$ 根据代价函数寻找最优被控输入, 其表达式为:

$$\mathbf{J} = \sum_{i=k}^{k+N-1} \left(\mathbf{e}(i)^T \mathbf{Q} \mathbf{e}(i) + \mathbf{u}(i)^T \mathbf{P} \mathbf{u}(i) + \mathbf{e}(k+N)^T \mathbf{F} \mathbf{e}(k+N) \right) \quad (23)$$

式中: \mathbf{P} 为输入权重矩阵, 由于本文 MPC 主要用于预测系统频率以及 SOC, 因此输入权重应小于误差权重; $\mathbf{e}(k+N)$ 为最终值的误差; \mathbf{F} 为最终值误差权重。由此可见 MPC 代价函数由 3 个部分组成, 其中, $\sum \mathbf{e}(i)^T \mathbf{Q} \mathbf{e}(i)$ 为误差加权和, $\sum \mathbf{u}(i)^T \mathbf{P} \mathbf{u}(i)$ 为输入加权和, $\mathbf{e}(k+N)^T \mathbf{F} \mathbf{e}(k+N)$ 为终端误差。

2.2.4 MPC 代价函数求解

MPC 在优化过程中需将代价函数转化成二次规划的形式, 以便求得其最小值, 从而寻得最优被控输入。其中, 二次规划的一般形式可以表示为:

$$\min(\mathbf{Z}^T \mathbf{H} \mathbf{Z} + \mathbf{c}^T \mathbf{Z}) \quad (24)$$

式中: \mathbf{Z} 为决策变量向量; \mathbf{H} 为一个对称矩阵; \mathbf{c} 为线性项的系数向量。

由于 MPC 的代价函数 J 同时包含了误差变量以及输入变量, 且 MPC 的目的是给被控输入寻找最优解, 因此需要用一定的方法将误差变量消除。

由于系统扰动变量是随机的, 无法被 MPC 预测, 因此在构建误差向量的过程中可以将其忽略。根据式(20), 以 k 时刻为例, MPC 在 k 时刻到 $k+N$ 时刻的误差矩阵可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{e}(k|k) = \mathbf{e}(k) \\ \mathbf{e}(k+1|k) = \mathbf{A} \mathbf{e}(k) + \mathbf{B} \mathbf{u}(k|k) + \mathbf{A} \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k+1} \\ \mathbf{e}(k+2|k) = \mathbf{A}^2 \mathbf{e}(k) + \mathbf{A} \mathbf{B} \mathbf{u}(k|k) + \mathbf{B} \mathbf{u}(k+1|k) + \mathbf{A}^2 \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k+2} \\ \vdots \\ \mathbf{e}(k+N|k) = \mathbf{A}^N \mathbf{e}(k) + \mathbf{A}^{N-1} \mathbf{B} \mathbf{u}(k|k) + \dots + \mathbf{B} \mathbf{u}(k+N-1|k) + \mathbf{A}^N \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k+N} \end{cases} \quad (25)$$

式中: 以 $\mathbf{e}(k+1|k)$ 为例, 括号内竖线左边为预测时刻, 竖线右边为实际时刻, 因此该式表达的含义为 MPC 在 k 时刻预测到的 $k+1$ 时刻的误差矩阵。

定义误差向量以及输入向量。其中, 误差向量包含从 k 时刻至 $k+N$ 时刻的误差矩阵, 输入向量包含从 k 时刻至 $k+N-1$ 时刻的输入矩阵。由此可将式(25)利用误差向量来表示, 如附录 A 式(A3)~式(A9)所示。

因此, 式(23)还可以写成:

$$\mathbf{J} = \mathbf{E}_{kN}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{E}_{kN} + \mathbf{U}_{kN}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{U}_{kN} \quad (26)$$

其中,

$$\mathbf{Q}_1 = \text{diag}(\mathbf{Q} \quad \mathbf{Q} \quad \dots \quad \mathbf{F}) \quad (27)$$

$$\mathbf{P}_1 = \text{diag}(\mathbf{P} \quad \mathbf{P} \quad \dots \quad \mathbf{P}) \quad (28)$$

结合附录 A 式(A3), MPC 代价函数最终可以化为:

$$\begin{aligned}
J = & \mathbf{U}_{kN}^T (\mathbf{S}_N^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{S}_N + \mathbf{P}_1) \mathbf{U}_{kN} + \\
& 2\mathbf{e}(k)^T \mathbf{O}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{S}_N \mathbf{U}_{kN} + 2\mathbf{U}_{kN}^T \mathbf{S}_N^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{T} \mathbf{R}_{kN} + \\
& 2\mathbf{e}(k)^T \mathbf{O}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{T} \mathbf{R}_{kN} + \mathbf{e}(k)^T \mathbf{O}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{O} \mathbf{e}(k) + \\
& \mathbf{R}_{kN}^T \mathbf{T}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_{kN}
\end{aligned} \quad (29)$$

由于 $\mathbf{e}(k)$ 为初始误差, \mathbf{R}_{kN} 为已设参考值, 两者均为已知量。除此之外, $2\mathbf{e}(k)^T \mathbf{O}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{S}_N \mathbf{U}_{kN}$ 和 $2\mathbf{U}_{kN}^T \mathbf{S}_N^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{T} \mathbf{R}_{kN}$ 两项为线性规划形式。由此可见式 (29) 已是二次规划的一般形式。求解代价函数的最小值获得最优解输入向量 \mathbf{U}_{kN} , 仅选取 $\mathbf{u}(k)$ 作为 k 时刻的系统输入矩阵, 之后在 $k+1$ 时刻得到输出信号 $\mathbf{y}(k+1)$ 并重新进行以上预测步骤。

综上所述, MPC 控制流程图如附录 A 图 A9 所示。

2.3 BESS 参与一次调频总流程

BESS 参与一次调频的流程图如附录 A 图 A10 所示。首先, 根据负荷扰动引起的系统频率偏差以及频率变化率, 利用模糊控制自适应调整 BESS 的下垂控制、虚拟惯性控制以及负虚拟惯性控制的出力比重。其次, 根据当前系统频率、BESS 实时 SOC 大小等系统状态变量构建 MPC 预测模型及其代价函数。最后, 将代价函数化为二次规划一般形式并对其求解以获取 BESS 的当前最优充放电系数。进入下一时刻后根据实际输出值重复以上步骤。

3 仿真验证及分析

3.1 仿真系统参数

本文基于 Matlab/Simulink 搭建 BESS 系统与火电机组的电网调频仿真模型。其中, 火电机组的额定容量为 1 000 MW, 为了凸显 SOC 在调频过程中的变化, 采用小容量的 BESS, 参数为 15 MW/1 MWh^[23]。火电机组一次调频的死区上下限为 ± 0.033 Hz (标么值为 0.000 66 pu), BESS 的调频上下限为 ± 0.02 Hz (标么值为 0.000 4 pu), 电网的额定频率设置为 50 Hz^[24], MPC 的参考量均为恒定值, $f_{\text{ref}}=50$ Hz, $S_{\text{ref}}=50$, 其余参数如附录 A 表 A2 所示^[23]。

3.2 控制策略对比仿真分析

系统分别在阶跃负荷扰动以及连续负荷扰动 2 种扰动工况下运行, 结果分别与无储能参与的调频策略、有储能参与的变 K 法策略^[25]以及定 K 法策略进行比较, 从而验证本文策略的优越性以及有效性。为了方便比较, 在实验结果图中均将变 K 法定义为策略 1, 定 K 法策略定义为策略 2, 无储能参与的调频策略定义为策略 3。

在阶跃负荷扰动的工况下, 根据输出的频率波形结果, 比较各自的最大频率偏差以及频率下降速度, 从而体现不同策略下的调频效果。最大频率偏差值越小且频率下降速度越慢, 说明调频效果越好。其中, 频率下降速度的表达式为:

$$v_f = \frac{|\Delta f_{\text{max}}|}{t_{\text{max}} - t_0} \quad (30)$$

同理, 对比储能 SOC 偏差时, 比较各策略中 SOC 曲线的最大偏移量以及偏移速度。最大偏移量越小以及偏移速度越缓慢, 说明 SOC 偏移越稳定, BESS 过充过放的抑制效果越好。其中, SOC 偏移速度的表达式为:

$$v_s = \frac{|\Delta S_{\text{max}}|}{t_E - t_0} \quad (31)$$

式中: ΔS_{max} 为 SOC 的最大偏移量; t_E 为总仿真时长。

在连续负荷扰动工况下, 根据输出的频率波形结果, 分别计算 4 种不同调频策略输出频率波形的峰谷差值及标准差, 从而分析不同策略对应的频率在该工况下的稳定性。峰谷差值及标准差越小, 说明调频效果越好。同时, 计算频率跌出火电机组调频死区内的次数, 即仿真时间内火电机组在该工况下需要动作的次数。火电机组的动作次数越少, 说明效果越好。其中, 火电机组的调频次数计算标准为: 如果电网频率偏差从火电机组调频死区内变化至死区外, 则视为一次火电机组的调频动作^[26]。频率标准差的表达式为:

$$\Delta f_{\text{sd}} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \Delta f_i^2} \quad (32)$$

式中: N_s 为总采样点个数; Δf_i 为第 i 个采样点的系统频率偏差。

对比储能 SOC 波形结果, 计算 4 种不同调频策略输出 SOC 偏差平均值以及标准差的方式。SOC 偏差平均值以及标准差越小, 说明调 SOC 值越稳定。SOC 偏差平均值的表达式为:

$$\Delta S_{\text{av}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \Delta S_i}{N_s} \quad (33)$$

式中: ΔS_i 为第 i 个采样点的 SOC 偏差。

SOC 标准差的表达式为:

$$\Delta S_{\text{sd}} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \Delta S_i^2} \quad (34)$$

3.3 阶跃负荷扰动工况

如图 4 所示, 在 5 s 时刻往系统中施加 0.02 pu

的阶跃负荷扰动，其中负荷扰动的基准值设置为 100 MW，BESS 的初始 SOC 值设置为 0.5，并将仿真总时长设置为 30 s^[24]。在此工况下的频率变化波形以及 SOC 波形如图 5 和图 6 所示。BESS 的出力曲线如图 7 所示，阶跃负荷扰动下的一次调频指标如表 1 所示，阶跃负荷扰动下的 SOC 指标如表 2 所示。

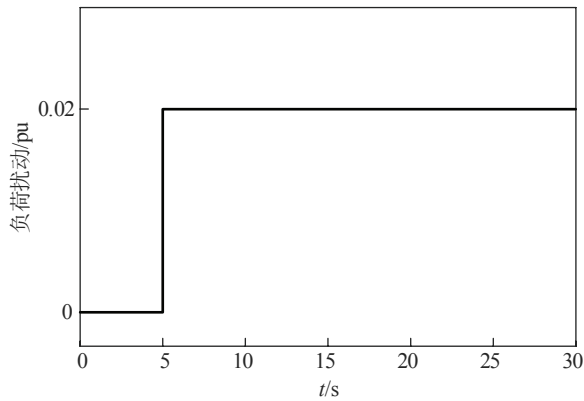


图 4 阶跃负荷扰动波形

Fig.4 Waveform of step load disturbance

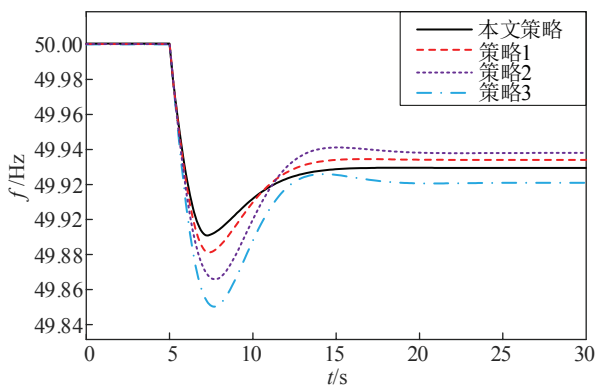


图 5 阶跃负荷扰动工况下的频率对比图

Fig.5 Frequency comparison chart under step load disturbance

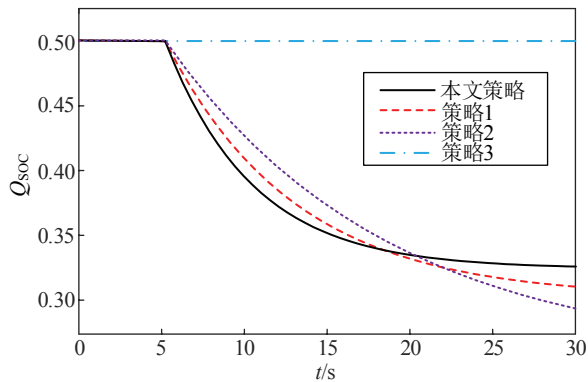


图 6 阶跃负荷扰动工况下的 SOC 对比图

Fig.6 SOC comparison chart under step load disturbance

由图 5 和表 1 可以看出，加入阶跃负荷扰动后，4 种调频策略所对应的频率都迅速下降，频率偏差在较短的时间内迅速增大。对比得出无储能参与的调频策略在扰动后频率下降得最快，最大频率偏差值也大于其余策略。其中，本文策略对应的最大频率偏差比无储能策略小 26.77%，变 K 法策略对应的最大频率偏差比无储能策略小 20.49%，定 K 法策略对应的最大频率偏差比无储能策略小 10.28%。在频率下降速度方面，本文策略比无储能策略慢 13.24%，变 K 法策略比无储能策略慢 10.80%，定 K 法策略比无储能策略慢 13.20%。由此可见，本文策略在阶跃负荷扰动工况下的调频效果最佳。其中，变 K 法的下降速度略快于定 K 法，尽管图中定 K 法的线条总体位于变 K 法的下方，但由于定 K 法的最大偏差时刻较大，因此其频率最大偏差点连接 5 s 时刻所对应频率点的直线斜率略小于变 K 法。

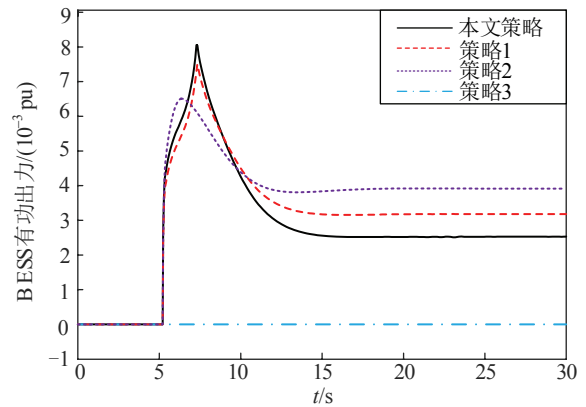


图 7 阶跃负荷扰动下的 BESS 出力曲线

Fig.7 BESS output curve under step load disturbance

表 1 阶跃负荷扰动下的一次调频指标

Table 1 Evaluation index of primary frequency regulation with step load disturbance

控制策略	t_{\max}/s	$\Delta f_{\max}/Hz$	$v_f/(10^{-2} Hz \cdot s^{-1})$
本文策略	7.247 2	-0.109 7	4.879 8
策略 1	7.374 3	-0.119 1	5.017 2
策略 2	7.752 8	-0.134 4	4.881 9
策略 3	7.663 0	-0.149 8	5.624 5

表 2 阶跃负荷扰动下的 SOC 指标

Table 2 Evaluation index of SOC with step load disturbance

控制策略	ΔS_{\max}	$v_s/10^{-3}$
本文策略	-0.174 8	6.992 4
策略 1	-0.190 8	7.632 2
策略 2	-0.209 2	8.368 3
策略 3	0	0

由图 5 可以看出, 本文策略的频率稳态偏差值大于策略 1 和策略 2。其原因在于: 如图 6 所示, 在第 15 s 时左右储能 SOC 下降至 0.35, 此时 SOC 进入危险区域, MPC 预测模型中的 q_s 开始升高, q_f 开始下降, MPC 开始对储能的充放电进行约束, 减小了储能的有功出力, 进而导致了该结果。这侧面反映了本文策略对储能 SOC 的约束表现优于变 K 法及定 K 法, 能够及时有效地避免过充过放现象。同时, 一次调频为有差调节, 在阶跃负荷扰动工况下可通过后续的二次调频策略来消除稳态频率偏差。

根据图 6 和表 2 对比各策略的 SOC 波动情况。忽略无储能策略, 仅在本文策略/变 K 法策略以及定 K 法策略之间进行对比。可以看出, 在调频初期, 在模糊控制作用下, 本文策略的虚拟惯性出力比重较大, 使得 BESS 充分发挥了平抑系统频率的作用, SOC 偏差较大。而当系统频率进入稳态阶段, 由于 MPC 约束了 BESS 充放电系数, 因此 SOC 的最终偏差值小于其余 2 种策略。其中, 本文策略的 SOC 最大偏差值比定 K 法小 16.44%, 变 K 法策略对应的 SOC 最大偏差值比定 K 法策略小 8.80%。在 SOC 偏移速度方面, 本文策略比定 K 法策略慢 16.43%, 变 K 法策略比定 K 法策略慢 8.79%。由此可见, 本文在维持储能 SOC 稳定方面同样表现最佳。

在阶跃负荷扰动的工况下, 本文策略与变 K 法单独进行对比, 不难看出在 SOC 状态理想的调频初期, 本文策略的最大频率偏差以及频率下降速度都要小于变 K 法, 而当 SOC 下降至 0.35 左右时减小对储能的有功出力。这充分说明了本文策略在 SOC 状态理想的时候比变 K 法更能发挥储能的调频潜能, 且能够及时避免储能的过充过放现象。

综上所述, 在阶跃负荷扰动工况下, 本文策略无论在最大频率偏差还是在频率下降速度方面均是 4 种调频策略中最小的, 调频效果优于其余策略。除此之外, 将各策略调频过程中的储能最大 SOC 偏移量以及 SOC 偏移速度进行对比可知, 本文策略中储能 SOC 的稳定性同样优于其余策略。

3.4 连续负荷扰动工况

5 s 时往系统中加入在 $(-0.025 \text{ pu}, 0.025 \text{ pu})$ 内来回波动的连续负荷扰动, BESS 的初始 SOC 设置为 0.5, 仿真时长设置为 5 min, 即 300 s^[24]。在此工况下, 4 种调频策略对应的频率变化波形如图 8 所示, SOC 波形如图 9 所示, BESS 出力曲线如图 10 所示, 连续负荷扰动下的一次调频指标如表 3 所示, 连续

负荷扰动下的 SOC 指标如表 4 所示。

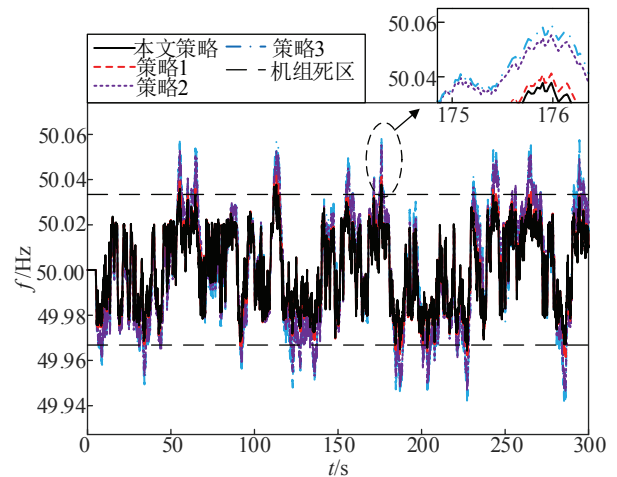


图 8 连续负荷扰动工况下的频率对比图

Fig.8 Frequency comparison chart under continuous load disturbance

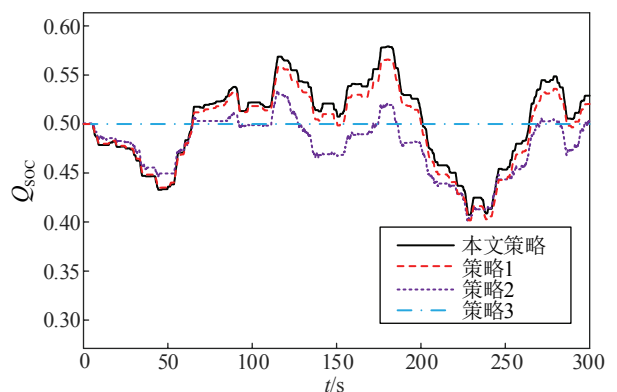


图 9 连续负荷扰动工况下的 SOC 对比图

Fig.9 SOC comparison chart under continuous load disturbance

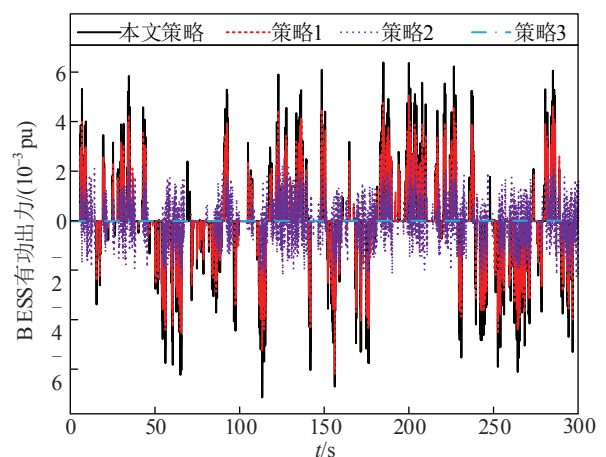


图 10 连续负荷扰动下的 BESS 出力曲线

Fig.10 BESS output curve under continuous load disturbance

表3 连续负荷扰动下的一次调频指标

Table 3 Evaluation index of primary frequency regulation with continuous load disturbance

控制策略	峰谷差值/Hz	$f_{sd}/10^{-3}$	机组动作次数
本文策略	0.073 6	19.701 9	6
策略 1	0.081 6	20.234 8	9
策略 2	0.108 8	25.287 1	17
策略 3	0.117 4	25.683 8	21

表4 连续负荷扰动下的SOC指标

Table 4 Evaluation index of SOC with continuous load disturbance

控制策略	峰谷差值	$S_{sd}/10^{-2}$	$S_{av}/10^{-3}$
本文策略	0.171 7	3.924 5	3.936 8
策略 1	0.164 1	3.763 3	-2.526 7
策略 2	0.130 0	2.681 7	-18.194 7
策略 3	0	0	0

由图8和表3可以看出,无储能参与的调频策略在连续负荷扰动工况下的频率波动幅度最大。对比4种策略的频率峰谷差值可知,本文策略比无储能策略小37.31%,变K法策略比无储能策略小30.49%,定K法策略比无储能策略小7.32%。对比4种策略的频率标准差可知,本文策略比无储能策略小23.29%,变K法策略比无储能策略小21.22%,定K法策略比无储能策略小1.54%。由此可见,在连续负荷扰动工况下,本文策略下的频率峰谷差值以及频率标准差都小于其余3种策略,说明在连续负荷扰动工况下,本文策略的调频效果优于其余3种策略。

除此之外,由表3可以看出,本文策略中火电机组的调频动作次数也小于其余3种策略。其中,本文策略比无储能策略少71.43%,变K法策略比无储能策略少57.14%,定K法策略比无储能策略少19.05%。结果说明本文策略也在一定程度上减少了火电机组因频繁动作而造成的磨损,从而延长了机组寿命,提升了其经济性。

根据图9和表4分析BESS在调频过程中的SOC波动情况,同样忽略无储能参与的调频策略,只在本文策略、变K法策略以及定K法策略之间进行比较。从SOC峰谷差值及标准差上来看,本文策略略大于变K法策略,这是由于本文策略在保证SOC维持在合理范围内的前提下,仍然着重于BESS的调频效果。定K法策略由于没有充分发挥BESS的调频潜能,因此SOC标准差最小,SOC波

动最小,同时该策略欠缺SOC的约束手段,因此SOC偏差平均值较大,SOC波动的区间范围偏离SOC的理想值。

在连续负荷扰动的工况下,本文策略与变K法单独进行对比。尽管从SOC的状态上来看,本文策略不如变K法稳定,但本文策略下的SOC始终维持在有利于调频的理想状态下,且在此状态下本文策略的调频效果明显优于变K法。由于变K法是基于预定义的轨迹规划,适用于已知的系统模型,能够保持较高的平滑性和稳定性,但在优化复杂系统约束时的精度有限。而本文策略具有良好的鲁棒性,能够处理不确定性的非线性系统,适合复杂的动态系统环境,具有良好的动态性能。

综上所述,在连续负荷扰动工况下,从4种策略的调频效果上来看,本文策略的调频效果优于其余3种策略。从SOC的稳定性上来看,本文策略与变K法策略相差甚微,能够使SOC保持在合理范围内。从减少火电机组调频动作次数的效果上来看,本文策略下的火电机组动作次数最少。

4 结论

1)本文所提出的BESS辅助火电机组一次调频策略能够灵活地根据系统频率波动情况调节下垂控制、虚拟惯性以及负虚拟惯性控制的出力比重,充分发挥了BESS的调频潜能,改善了系统频率状态,降低了火电机组调频动作次数,提升了机组的经济性。

2)本文根据储能SOC的当前状态对MPC代价函数中的误差权重进行自适应调整,能够使BESS在SOC良好状态下专注于调频,在SOC欠佳状态下专注于SOC恢复,及时避免BESS的过充过放。

3)本文利用MPC对未来的系统频率和储能SOC进行预测,对BESS的充放电系数进行灵活设置,在保证系统频率稳定的前提下提升了BESS自身SOC的稳定性,提高了BESS的使用寿命,从而减少了储能的使用及更换成本。

针对储能参与一次调频的课题,未来将在多储能单元以及混合储能参与一次调频的策略上进行重点研究。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] RATNAM K S, PALANISAMY K, YANG G Y. Future low-inertia

- power systems: requirements, issues, and solutions—a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 124: 109773.
- [2] 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.
- [3] 刘 凡, 李凤婷, 张高航, 等. 计及循环寿命和运营策略的风电汇集区域储能电站优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(8): 127-139.
LIU Fan, LI Fengting, ZHANG Gaohang, et al. Optimal configuration of storage power stations in a wind power gathering area considering cycle life and operation strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(8): 127-139.
- [4] 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.
- [5] 王凯丰, 谢丽蓉, 乔 颖, 等. 电池储能提高电力系统调频性能分析[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(1): 174-181.
WANG Kaifeng, XIE Lirong, QIAO Ying, et al. Analysis of frequency regulation performance of power system improved by battery energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(1): 174-181.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 陈勃旭, 崔 炜, 陈 宇, 等. 分布储能直流微电网中多储能荷电均衡控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(24): 111-120.
CHEN Boxu, CUI Wei, CHEN Yu, et al. Charge balance control strategy for multiple energy storage in a distributed energy storage DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(24): 111-120.
- [9] 王 琦, 李林高, 白建云, 等. 基于多变量模糊控制的储能系统辅助火电机组调频[J]. *电气自动化*, 2020, 42(1): 26-28, 36.
WANG Qi, LI Lingao, BAI Jianyun, et al. Frequency modulation of auxiliary thermal power plant for the energy storage system based on multivariable fuzzy control[J]. *Electrical Automation*, 2020, 42(1): 26-28, 36.
- [10] 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.
- [11] WANG K F, QIAO Y, XIE L R, et al. A fuzzy hierarchical strategy for improving frequency regulation of battery energy storage system[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(4): 689-698.
- [12] 吴启航, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3829-3836.
WU Qifan, SONG Xinli, ZHANG Jingran, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 3829-3836.
- [13] 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.
- [14] BOYLE J, LITTLE T, FOLEY A. Battery energy storage system state-of-charge management to ensure availability of frequency regulating services from wind farms[J]. *Renewable Energy*, 2020, 160: 1119-1135.
- [15] 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.
- [16] 于会群, 戚明鑫, 彭道刚, 等. 储能-火电联合一次调频的双层控制策略[J]. *热能动力工程*, 2023, 38(6): 48-57.
YU Huiqun, QI Mingxin, PENG Daogang, et al. Double-layer control strategy of combined primary frequency regulation for battery energy storage system and thermal power unit[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2023, 38(6): 48-57.
- [17] 王东风, 张 雄, 易 衡, 等. 计及高新能源渗透率的储能-火电互补系统调频策略研究[J]. *电力科学与工程*, 2023, 39(7): 42-52.
WANG Dongfeng, ZHANG Xiong, YI Heng, et al. Research of energy storage-thermal power complementary system frequency modulation strategy considering new energy penetration rate[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2023, 39(7): 42-52.
- [18] 梁继业, 袁 至, 王维庆, 等. 基于储能系统多重约束的一次调频策略[J]. *高电压技术*, 2024, 50(6): 2478-2489.
LIANG Jiye, YUAN Zhi, WANG Weiqing, et al. Primary frequency control strategy based on multiple constraint of energy storage system[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(6): 2478-2489.
- [19] 贺 隼, 郭罗权, 谭庄熙, 等. 考虑调频阶段需求的混合储能一次调频综合控制策略[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(9): 697-708.
HE Li, GUO Luoquan, TAN Zhuangxi, et al. Comprehensive control strategy of hybrid energy storage in primary frequency regulation considering demands of frequency regulation stages[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2024, 45(9): 697-708.
- [20] 陈 彪, 王 玮, 高 嵩, 等. 基于模糊自适应指令分解的飞轮-火电一次调频控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(19): 128-137.
CHEN Biao, WANG Wei, GAO Song, et al. Primary frequency regulation control strategy for flywheel-thermal power joint system based on fuzzy adaptive command decomposition[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(19): 128-137.
- [21] 翁 旭, 杨恒占, 钱富才. 噪声未知的对偶模型预测控制算法研究[J]. *控制工程*, 2023, 30(6): 1045-1050.
WENG Xu, YANG Hengzhan, QIAN Fucui. Research on dual model predictive control algorithm with unknown noise[J]. *Control Engineering of China*, 2023, 30(6): 1045-1050.

- [22] LIU X B, SUO Y B, ZHANG Z, et al. A new model predictive current control strategy for hybrid energy storage system considering the SOC of the supercapacitor[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(1): 325-338.
- [23] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 63-72.
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Primary frequency regulation strategy with energy storage system based on weight factors and state of charge recovery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 63-72.
- [24] 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.
- [25] 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. Battery energy storage systems' self-adaptation control strategy in fast frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2362-2369.
- [26] 王建波, 孙冉, 刘忠凯, 等. 面向储能辅助火电机组一次调频的深度强化学习控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(6): 186-192.
WANG Jianbo, SUN Ran, LIU Zhongkai, et al. Deep reinforcement

learning control strategy for primary frequency regulation of energy storage assisted thermal power units[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(6): 186-192.



CHI Zhikun

池志坤

1997—, 男, 硕士生

主要从事储能技术应用方面的研究工作

E-mail: martini929@163.com



YUAN Zhi

Ph.D.

Associate professor

Corresponding author

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 2024-12-02 修回日期 2025-04-21 编辑 程子丰

附录 A

表 A1 虚拟惯性出力比重模糊逻辑推理表

Table A1 Language table of the control rules for the ratio of

virtual inertia control

$\Delta f/\Delta t$	Δf						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	VB	M	B	VB	ZO	ZO	ZO
NM	B	B	B	B	M	S	S
NS	S	M	B	B	S	S	S
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	S	S	S	B	B	M	S
PM	S	S	M	B	B	B	B
PB	ZO	ZO	ZO	VB	B	M	VB

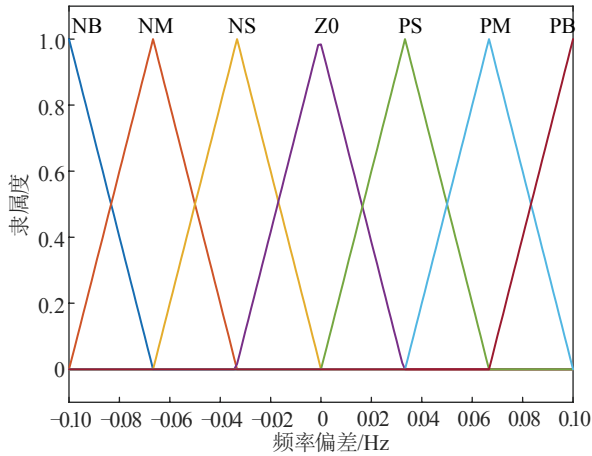


图 A1 系统频率偏差隶属度曲线图

Fig.A1 System frequency deviation membership curve

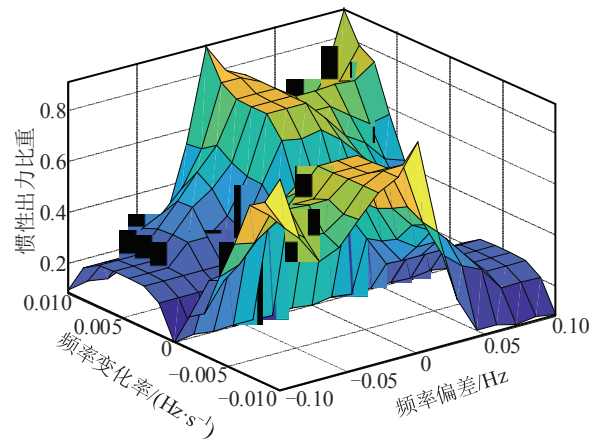


图 A4 模糊逻辑推理结果图

Fig.A4 Diagram of fuzzy logic reasoning results

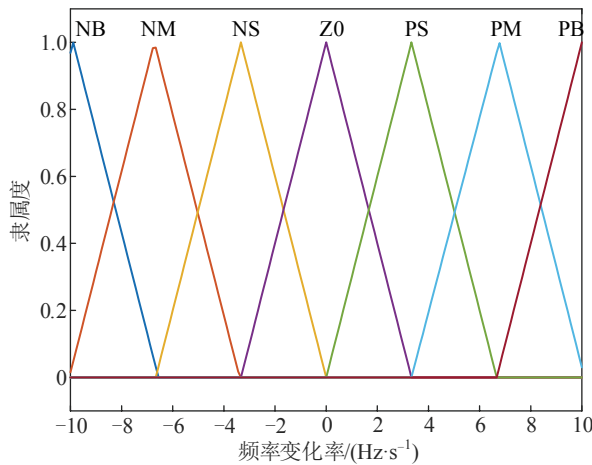


图 A2 频率变化率隶属度曲线图

Fig.A2 Frequency change rate membership curve

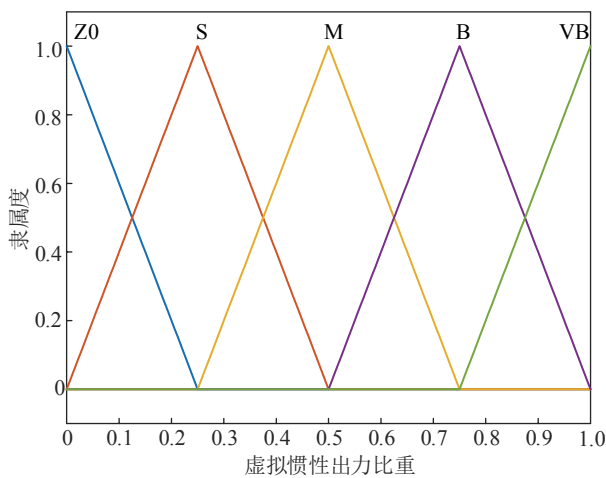


图 A3 虚拟惯性出力比重隶属度曲线图

Fig.A3 Ratio of virtual inertia control membership curve

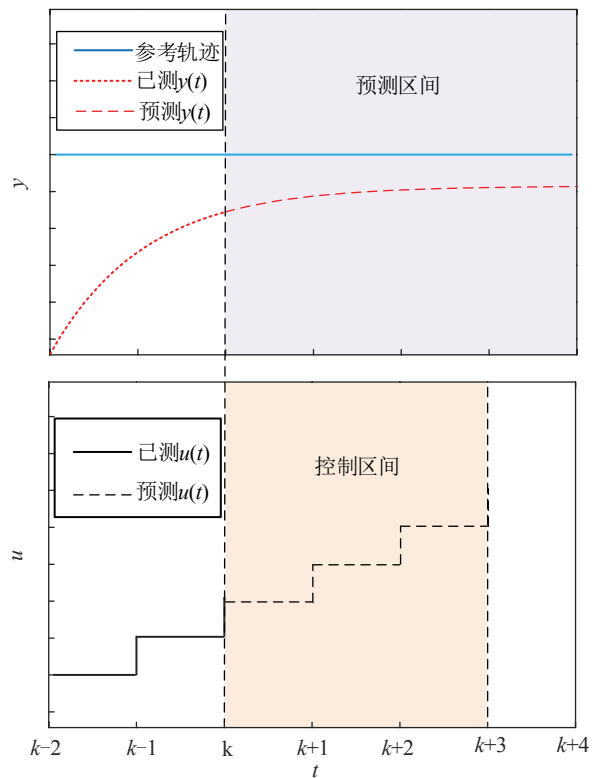


图 A5 MPC 控制原理图

Fig.A5 Schematic of MPC

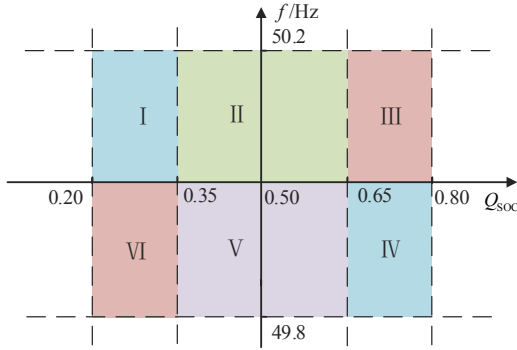


图 A6 BESS 参与一次调频区间划分图

Fig.A6 Interval division diagram of BESS participating in primary frequency regulation

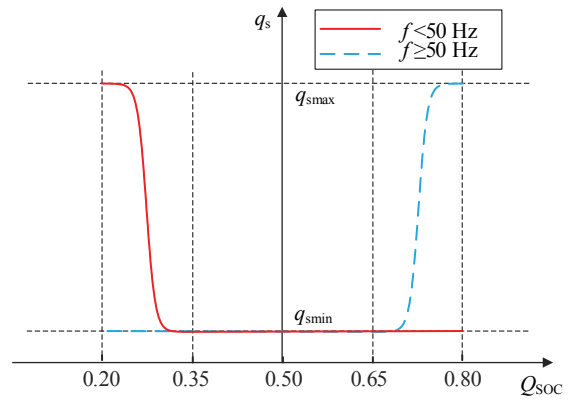


图 A8 SOC 误差权重曲线

Fig.A8 SOC error weight curve

$$q_f = \begin{cases} q_{f \min}, \text{SOC} > 0.8 \cap f \geq 50 \text{ Hz} \\ \frac{q_{f \max} - q_{f \min}}{1 + e^{n(\text{SOC} - 0.725)}} + q_{f \min}, \\ 0.65 < \text{SOC} \leq 0.8 \cap f \geq 50 \text{ Hz} \\ q_{f \max}, \text{SOC} \leq 0.65 \cap f \geq 50 \text{ Hz} \\ q_{f \max}, \text{SOC} > 0.35 \cap f < 50 \text{ Hz} \\ \frac{q_{f \max} - q_{f \min}}{1 + e^{-n(\text{SOC} - 0.275)}} + q_{f \min}, \\ 0.2 < \text{SOC} \leq 0.35 \cap f < 50 \text{ Hz} \\ q_{f \min}, \text{SOC} \leq 0.2 \cap f < 50 \text{ Hz} \end{cases} \quad (\text{A1})$$

$$q_s = \begin{cases} q_{s \max}, \text{SOC} > 0.8 \cap f \geq 50 \text{ Hz} \\ \frac{q_{s \max} - q_{s \min}}{1 + e^{-n(\text{SOC} - 0.725)}} + q_{s \min}, \\ 0.65 < \text{SOC} \leq 0.8 \cap f \geq 50 \text{ Hz} \\ q_{s \min}, \text{SOC} \leq 0.65 \cap f \geq 50 \text{ Hz} \\ q_{s \min}, \text{SOC} > 0.35 \cap f < 50 \text{ Hz} \\ \frac{q_{s \max} - q_{s \min}}{1 + e^{n(\text{SOC} - 0.275)}} + q_{s \min}, \\ 0.2 < \text{SOC} \leq 0.35 \cap f < 50 \text{ Hz} \\ q_{s \max}, \text{SOC} \leq 0.2 \cap f < 50 \text{ Hz} \end{cases} \quad (\text{A2})$$

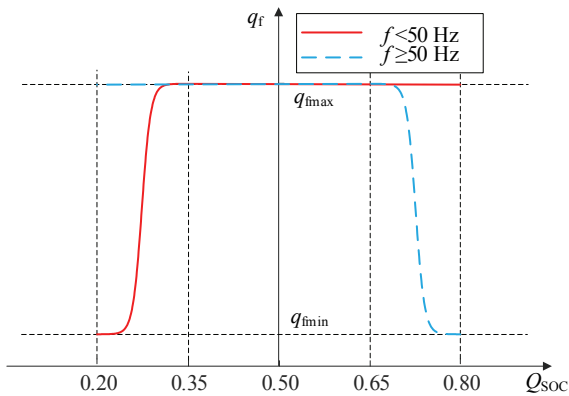


图 A7 系统频率误差权重曲线

Fig.A7 System frequency error weight curve

$$\mathbf{E}_{kN} = \mathbf{O}e(k) + \mathbf{S}_N \mathbf{U}_{kN} + \mathbf{TR}_{kN} \quad (\text{A3})$$

$$\mathbf{E}_{kN} = \begin{bmatrix} e(k|k) \\ e(k+1|k) \\ e(k+2|k) \\ \vdots \\ e(k+N|k) \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

$$\mathbf{U}_{kN} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k|k) \\ \mathbf{u}(k+1|k) \\ \mathbf{u}(k+2|k) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k+N-1|k) \end{bmatrix} \quad (\text{A5})$$

$$\mathbf{R}_{kN} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_k \\ \mathbf{r}_{k+1} \\ \mathbf{r}_{k+2} \\ \vdots \\ \mathbf{r}_{k+N} \end{bmatrix} \quad (\text{A6})$$

$$\mathbf{O} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{A} \quad \mathbf{A}^2 \quad \cdots \quad \mathbf{A}^N]^\text{T} \quad (\text{A7})$$

$$\mathbf{S}_N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{B} & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{AB} & \mathbf{B} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{A}^{N-1}\mathbf{B} & \mathbf{A}^{N-2}\mathbf{B} & \cdots & \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (\text{A8})$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{A} & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{A}^2 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{A}^N & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{A9})$$

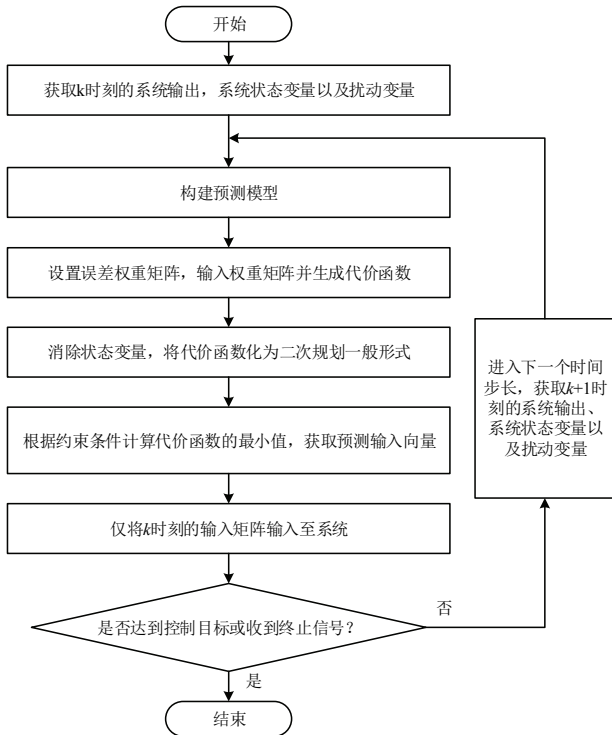


图 A9 MPC 控制流程图

Fig.A9 MPC control flow diagram

表 A2 调频模型仿真参数

Table A2 Parameters of frequency regulation simulation model

参数	数值
M	10
D	1
K_G	20
T_G	0.2 S
K_{HP}	0.3
K_{IP}	0.3
K_{LP}	0.4
T_{CH}	0.3 S
T_{RH}	7S
T_{CO}	0.5 S
T_B	0.05 S
K_E	5
M_E	5

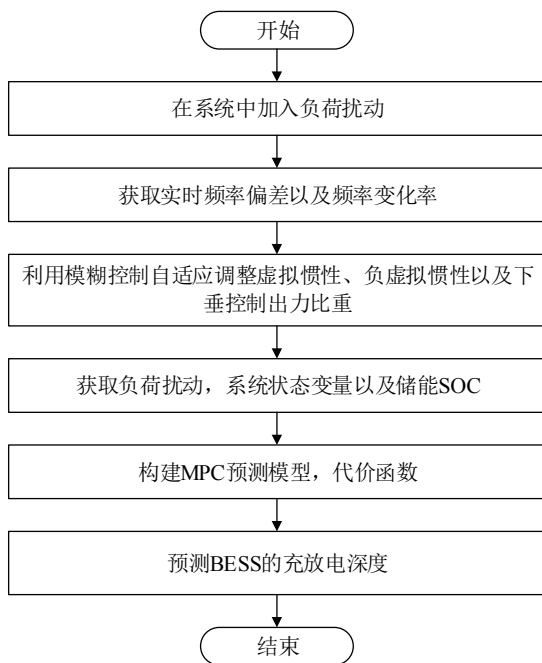


图 A10 BESS 参与一次调频流程图

Fig.A10 Flowchart of BESS in primary Frequency Regulation