

计及SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略

王育飞,杨铭诚,薛花,张宇华,米阳

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

摘要:考虑电池储能系统自身容量限制下提升一次频率响应的自适应性,提出一种计及荷电状态(SOC)的电池储能系统一次调频综合控制策略。建立电池储能系统一次调频动态模型,对比分析了虚拟惯性与虚拟下垂控制对电网频率偏差的调节特性。设计考虑SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略,并引入一种由综合考虑频率偏差及其变化率的输入系数与计及电池储能系统SOC的反馈系数相结合的自适应因子,输入系数由模糊逻辑控制器自适应调节,反馈系数通过回归函数自适应调节。最后搭建仿真模型进行阶跃和连续负荷扰动工况下不同控制策略对比分析,仿真结果验证了所提控制策略能自适应控制电池储能系统出力,有效提升一次调频效果。

关键词:电池储能系统;一次调频;自适应因子;综合控制策略;荷电状态

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110026

0 引言

风力、光伏等可再生能源发电规模化并网,其输出功率的间歇性与波动性,将严重影响电力系统频率的稳定性^[1]。由于传统燃煤机组自身可用容量、响应速度和调节精度的限制,频繁进行调频动作会损害其安全性和经济性^[2]。电池储能系统(BESS)响应速度快、短时功率吞吐能力强,具有双向调节和精确跟踪的能力。因而在新能源发电渗透率不断增加、电网功率波动更加频繁的情况下,电池储能系统参与调频成为研究热点^[3-5]。

目前,电池储能系统主要以虚拟惯性和虚拟下垂控制模式参与一次调频,前者可有效抑制频率偏差变化率,提供快速频率支撑^[6],后者有助于减小稳态频率偏差,提高频率的稳定性^[7]。通过设定电池储能系统虚拟惯性与虚拟下垂控制模式切换的临界值及其采用的控制模式^[8],实现二者的优势互补,可提升一次调频的改善效果。然而,若临界值的选取不当,电池储能系统出力在模式切换时刻易发生跃变^[9]。此外,电池储能系统的荷电状态(SOC)与功率输出密切相关,若只考虑调频效果的改善而忽略电池储能系统自身容量限制,将会导致电池储能系统使用寿命的降低,且电网频率易受到二次冲击^[10]。因此,频率偏差临界值的选取及SOC的维持成为电池储能系统一次调频控制策略设计中的关键因素。

对于频率偏差临界值的选取,文献[11]定义了

频率偏差临界值,实现不同频率偏差下控制模式的选择,以满足系统调频需求,提升了调频效果。文献[12]将频率偏差变化率极性变化时刻作为控制模式的切换时机,同时对各控制模式加入死区限制,减少频率偏差曲线波动,避免了不同控制模式间频繁切换。文献[13]提出一种动态结合的自适应控制策略,引入解析模型设计合理协调虚拟下垂与虚拟惯性控制二者关系的方法,实现了2种控制模式的互补结合与平滑切换,未使电池储能系统出现较大功率跃变。对于SOC的维持,文献[14]通过对电池的充放电循环衰退特性进行分析,为电池储能SOC的最优使用区间提供参考。文献[15]通过建立电池储能系统SOC与电网频率偏差之间的联系,扩展基于SOC反馈的下垂控制适用范围,该方法实现了电池储能系统在充放电过程中SOC平衡及其功率优化。

上述方法存在以下不足:在调频效果改善方面,当前研究均较依赖于临界值及动作时机的选取以进行2种控制模式切换,存在调节误差且控制模型较为复杂;在出力约束方面,除以电池储能系统固定下垂系数参与调频外,采用一次函数构建的线性约束中,下垂系数与SOC间关系设定较简单且自适应性较低,易对电池储能系统快速响应的能力造成影响^[16-18]。

针对上述问题,本文首先建立电池储能系统一次调频的动态模型,定量分析虚拟惯性及虚拟下垂控制特性。然后引入由输入系数与反馈系数动态组合的自适应因子,提出一种计及SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略。对于输入系数与反馈系数,前者采用模糊控制实现自适应调节,发挥电池储能系统快速频率支撑能力,无需考虑设定临界值以进行控制模式的切换,兼顾其实用性;后者计

收稿日期:2021-05-27;修回日期:2021-08-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61873159);上海市科技创新行动计划项目(19DZ2204700,20DZ2205500)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61873159) and Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan(19DZ2204700,20DZ2205500)

及电池储能系统实时SOC情况,采用回归函数设计自适应调节规律,防止过充过放的同时未弱化其快速响应能力。最后通过仿真验证所提控制策略的有效性。

1 电池储能系统参与一次调频控制系统模型

所研究含可再生能源发电的电池储能系统参与一次调频电网简化模型见附录A图A1。为分析频率响应特性,建立动态模型如图1所示,主要包含电池储能系统、传统调频机组及负荷扰动3类模型^[6]。其中,电池储能系统模型中SOC监测模块用以计算电池储能系统实时SOC;控制器则根据储能一次调频控制模式,设定K值以调节电池储能系统的有功出力。图中,s为拉普拉斯算子; $\Delta P_g(s)$ 、 $\Delta P_b(s)$ 分别为传统调频机组及电池储能系统有功出力变化; $\Delta P_L(s)$ 为风力、光伏发电出力波动及工商业、居民等负荷构成的综合负荷扰动; $\Delta f(s)$ 为电网频率偏差;H、D分别为系统惯性常数及阻尼系数; $G_{gen}(s)$ 、 $G_{bess}(s)$ 分别为传统调频机组及电池储能系统传递函数; K_g 、K分别为传统调频机组及电池储能系统的功率调节系数。

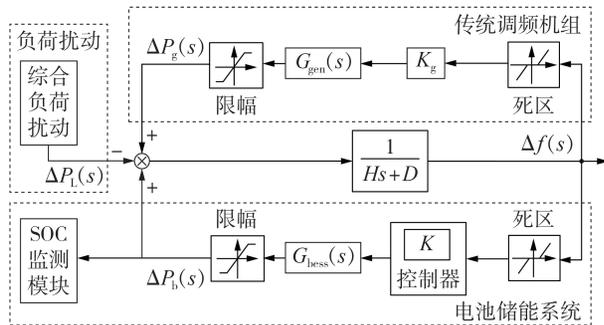


图1 电池储能系统参与一次调频的动态模型

Fig.1 Dynamic model of BESS participating in primary frequency regulation

当频率发生变化时,传统调频机组将频率偏差反馈给调速器,经调速器响应后改变汽轮机的机械输出功率,实现传统机组出力的增减以补偿频率偏差^[4];电池储能系统则通过设计控制器以模拟传统同步发电机控制补偿频率偏差。根据图1,建立复频域方程可得:

$$\begin{cases} \Delta f(s) = \frac{\Delta P_b(s) + \Delta P_g(s) - \Delta P_L(s)}{Hs + D} \\ \Delta P_g(s) = K_g \Delta f(s) G_{gen}(s) \end{cases} \quad (1)$$

根据频率响应特性,电池储能系统一次调频控制模式可采用虚拟惯性控制和虚拟下垂控制。当采用虚拟惯性控制时,设定 $K = M_b s$;当采用虚拟下垂控制时,设定 $K = K_b$ 。进而电池储能系统一次调频控制过程中的出力变化可表示为:

$$\begin{cases} \Delta P_{b,1}(s) = M_b s \Delta f(s) G_{bess}(s) \\ s \Delta f(s) = d \Delta f(s) / dt \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta P_{b,D}(s) = K_b \Delta f(s) G_{bess}(s) \quad (3)$$

式中: $\Delta P_{b,1}(s)$ 、 $\Delta P_{b,D}(s)$ 分别为采用虚拟惯性控制和虚拟下垂控制时电池储能系统的有功出力变化; M_b 、 K_b 分别为虚拟惯性和虚拟下垂控制的功率调节系数; $d \Delta f(s) / dt$ 为频率偏差变化率。将式(2)、(3)代入式(1),可得:

$$\begin{cases} \Delta f_1(s) = \frac{-\Delta P_L(s)}{Hs + D - K_g G_{gen}(s) - M_b s G_{bess}(s)} \\ \Delta f_D(s) = \frac{-\Delta P_L(s)}{Hs + D - K_g G_{gen}(s) - K_b G_{bess}(s)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta f_1(s)$ 、 $\Delta f_D(s)$ 分别为电池储能系统采用虚拟惯性和虚拟下垂控制时的电网频率偏差。

结合式(2)~(4)可知:一方面虚拟惯性控制模式发挥了电池储能系统的快速响应能力,抑制了频率偏差变化率,但对稳态频率偏差并不起作用,在频率偏差变化率过零后改变出力方向,阻碍频率偏差的恢复,虚拟下垂控制模式对于暂态频率偏差的改善并不明显,但对于稳态频率偏差的改善效果显著且持续^[8];另一方面,频率偏差变化率 $|d \Delta f(s) / dt|$ 与频率偏差 $|\Delta f(s)|$ 在时域上动态变化且差值较大, $|d \Delta f(s) / dt|$ 的突变会使电池储能系统瞬间出力较大。采用2种控制模式进行优势互补的控制策略时,若在 $|\Delta f(s)|$ 最大值时刻进行2种控制模式的切换,易造成电池储能系统输出功率的跃变^[11]。因此,考虑设计一种不涉及频率临界值进行模式切换的控制策略。

2 计及SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制

综合考虑虚拟惯性和虚拟下垂控制二者调频优势互补,在一次调频响应时段内的任一时刻设定电池储能系统出力皆由两者结合构成。为使电池储能系统能够根据电网频率偏差以及自身容量限制情况调节出力,引入自适应因子 μ 构建电池储能系统一次调频综合控制策略。所提控制策略的控制原理如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_b(s) = \Delta P'_{b,1}(s) + \Delta P'_{b,D}(s) \\ \Delta P'_{b,1}(s) = \mu_1 M_b \frac{d \Delta f(s)}{dt} G_{bess}(s) \\ \Delta P'_{b,D}(s) = \mu_2 K_b \Delta f(s) G_{bess}(s) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta P'_{b,1}(s)$ 、 $\Delta P'_{b,D}(s)$ 分别为引入自适应因子后虚拟惯性和虚拟下垂控制下电池储能系统有功出力变化; μ_1 、 μ_2 分别为虚拟惯性和虚拟下垂控制的自适应

因子,由输入系数及反馈系数2个部分构成,如式(6)所示。

$$\begin{cases} \mu_1 = \alpha_1 \beta_1 \\ \mu_2 = \alpha_2 \beta_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: α_1 、 α_2 分别为虚拟惯性和虚拟下垂控制的输入系数,满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; β_1 、 β_2 分别为虚拟惯性和虚拟下垂控制的反馈系数。

2.1 基于模糊控制的输入系数自适应调节

自适应因子中输入系数 α_1 、 α_2 分别用以调节虚拟惯性及虚拟下垂控制模式在一次调频响应过程中的出力占比。当系统负荷发生变化时,将一次调频中频率变化过程按最大频率偏差值时刻划分为频率下降及频率恢复阶段,其理论曲线如图2所示。图中, Δf_d 、 Δf_{\max} 和 Δf_s 分别为电池储能系统调频死区、最大频率偏差及稳态频率偏差值; t_0 为电池储能系统一次调频响应初始时刻; t_{\max} 为最大频率偏差时刻; t_s 为频率偏差进入稳态时刻。

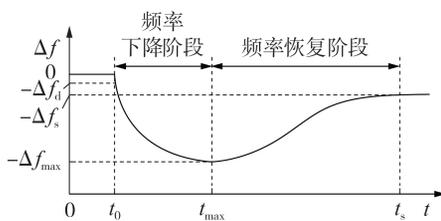


图2 一次调频频率偏差曲线

Fig.2 Frequency deviation curve of primary frequency regulation

1)在频率下降阶段,频率偏差变化率 $|d\Delta f/dt|$ 由 t_0 时刻的较大值逐渐减小,频率偏差 $|\Delta f|$ 则由较小值逐渐增大,抑制较大的 $|d\Delta f/dt|$ 及降低最大频率偏差 $|\Delta f_{\max}|$ 为此阶段的主要目标。将虚拟惯性控制的输入系数 α_1 跟随 $|d\Delta f/dt|$ 的变化趋势,由1以一定速率逐渐减小,直至 $|d\Delta f/dt|$ 为 $|\Delta f_{\max}|$ 时 α_1 减小为0;虚拟下垂控制的输入系数 α_2 则跟随 $|\Delta f|$ 的变化而由0逐渐增大,直至 $|\Delta f|$ 为 $|\Delta f_{\max}|$ 时 α_2 增大至1。

2)在频率恢复阶段,快速减小频率偏差 $|\Delta f|$ 使电网频率稳定为此阶段的主要目标。考虑该阶段 $d\Delta f/dt$ 由负值变为正值,虚拟惯性控制会阻碍频率的恢复,采用“负”虚拟惯性控制加速频率恢复,“负”仅表示虚拟惯性的功率调节系数符号相反^[11]。将虚拟惯性控制的输入系数 α_1 跟随 $|d\Delta f/dt|$ 的变化由0先增大后减小,虚拟下垂控制的输入系数 α_2 则与之变化相反,直至 $|\Delta f|$ 变为 $|\Delta f_s|$ 时 α_2 为1,并在变化过程中始终保持 $\alpha_2 > \alpha_1$ 。

基于上述分析可知,难以根据当前电网频率状态进行频率偏差临界值的准确量化估计,且无法利

用等式约束确定自适应因子中输入系数 α_1 、 α_2 具体数值,从而确定2种控制出力的调节量。模糊控制不依赖被控对象的数学模型,适用于动态特性不易掌握的非线性时变系统^[19],故采用模糊逻辑控制设计自适应控制器,根据电网频率偏差情况动态改变输入系数 α_1 、 α_2 。所提基于模糊控制的输入系数自适应调节方法无需设定2种控制模式切换的临界值,且控制模型相对简单,可根据实际工程需求进一步调整。

选择反映式(5)中约束关系的频率偏差及其变化率作为模糊控制器输入量,设计如图3所示的输入系数自适应调节方法。图中, K_1 和 K_2 分别为频率偏差及其变化率的比例因子; K_3 为输入系数 α_1 的量化因子。

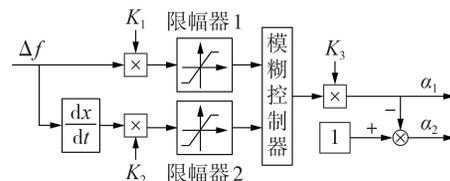


图3 基于模糊控制的输入系数自适应调节

Fig.3 Self-adaptive adjustment of input coefficient based on fuzzy control

设定模糊控制器2个输入量的论域均为 $[-0.5, 0.5]$,输出量的论域为 $[0, 1]$,以三角隶属度函数确定输入与输出量的隶属度函数。依据实际输入变量可分别为零状态且具有正、负2个方向的状态特性,选用大、中、小3个词汇来描述模糊控制器输入变量为正或负值时状态^[20],同时结合零状态,将其论域对称划分为7个等级 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$,分别表示输入变量 Δf 和 $d\Delta f/dt$ 负向偏大(NB)、负向偏中(NM)、负向偏小(NS)、零(Z)、正向偏小(PS)、正向偏中(PM)、正向偏大(PB)状态。考虑到输出变量 α_1 取值始终为正值且在0~1之间不断变化,若采用大、中、小划分输出变量论域为3个等级,则不满足控制精度要求;若划分为7个等级,则计算量大幅度提升。因此将输出变量模糊论域划分为5个等级 $\{Z, S, M, L, VL\}$,分别表示输出变量为零(Z)、小(S)、中(M)、大(L)、非常大(VL)状态。

从提高电池储能系统动态响应能力出发,利用2个输入和1个输出的模糊子集,据一次调频理论分析及实际工程经验:当 Δf 较小且 $d\Delta f/dt$ 较大时,输入系数 α_1 取较小值,以提供快速频率支撑阻止 Δf 的进一步恶化;当 Δf 较大且 $d\Delta f/dt$ 较小时,输入系数 α_1 取较小值,增加虚拟下垂出力以加快 Δf 向稳态恢复;当 Δf 与 $d\Delta f/dt$ 均较小时,输入系数 α_1 取中间值或较小值,在 Δf 较稳定的情况下适当减小电池储能系统出力;当 Δf 与 $d\Delta f/dt$ 均较大时,以阻止

$|\Delta f|$ 的进一步增加为目标,输入系数 α_1 取较大值,避免系统惯性减小从而导致保护系统动作。建立模糊控制规则见附录B表B1。所建立的模糊规则体现了如下控制特点:为抑制频率偏差变化率,在电网频率偏差较小的状态下,期望虚拟惯性模式出力占比较大,阻止频率偏差进一步恶化;频率偏差开始恢复且较平稳时,则增大虚拟下垂控制模式下出力,将提供持续出力作为优先目标。根据所设计逻辑规则,基于Mamdani推理算法进行求解。

2.2 计及SOC的反馈系数自适应调节

由于电池储能系统应用规模相对电力系统容量非常小,若一直采用较大充放电系数,则极易导致其SOC越限。为避免电池储能系统过充过放,提高其使用寿命,减少SOC越限对电网频率造成的不利影响,根据电池储能系统实时SOC情况对反馈系数 β_1 、 β_2 进行自适应调节。具体将电池储能系统SOC划分为如图4所示的5个不同状态区间。图中, K_m 为电池储能系统采用虚拟下垂控制时的最大充放电系数; Q_{SOC_min} 为SOC最低值; Q_{SOC_low} 为SOC较低值; Q_{SOC_high} 为SOC较高值; Q_{SOC_max} 为SOC最高值; Q_{SOC} 为SOC值。

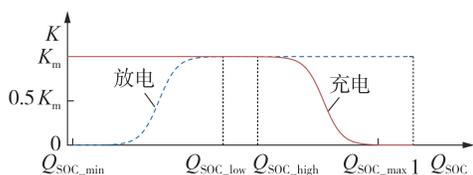


图4 基于回归函数的反馈系数自适应调节

Fig.4 Self-adaptive adjustment of feedback coefficient based on regression function

计及SOC的自适应控制规律为:尽量维持SOC在规定区域内;当SOC越限时,为增加电池储能系统的使用寿命,不再对其进行充放电动作。

采用一次函数构建线性约束的关系曲线虽然在一定程度上能够缓解电池储能系统过充过放的问题,但也弱化了电池储能系统快速响应能力,且在临界点易对系统造成二次扰动。因此引入Logistic回归函数建立电池储能系统SOC与采用下垂控制充放电系数之间的关系曲线。Logistic函数的特点在于初始阶段数值呈指数方式增长,随着数值逐渐饱和,增加速度有所减缓,达到一定程度时停止增长并稳定于某一数值。回归函数的形式越接近于电池储能系统SOC与充放电系数之间的线性关系,就越能保证反馈系数计算的准确性。同时,为确保电池储能系统出力不受指数变化影响,并使其在正常工作区间内具有较大出力,采用线性分段函数设置充放电曲线。文中电池储能系统采用虚拟下垂控制时的充电系数 K_c 和放电系数 K_d 在各SOC区间下的表达式

分别见式(7)~(9)。

$$K_c = K_m, K_d = 0 \quad Q_{SOC} \in [0, Q_{SOC_min}] \quad (7)$$

$$K_c = 0, K_d = K_m \quad Q_{SOC} \in [Q_{SOC_max}, 1] \quad (8)$$

$$K_c = \frac{0.01K_m \exp\left[\frac{15(Q_{SOC_max} - Q_{SOC})}{(Q_{SOC_max} - Q_{SOC_min})/2}\right]}{K_m + 0.01 \left\{ \exp\left[\frac{15(Q_{SOC_max} - Q_{SOC})}{(Q_{SOC_max} - Q_{SOC_min})/2}\right] - 1 \right\}} \quad (9)$$

$$K_d = \frac{0.01K_m \exp\left[\frac{15(Q_{SOC} - Q_{SOC_min})}{(Q_{SOC_max} - Q_{SOC_min})/2}\right]}{K_m + 0.01 \left\{ \exp\left[\frac{15(Q_{SOC} - Q_{SOC_min})}{(Q_{SOC_max} - Q_{SOC_min})/2}\right] - 1 \right\}} \quad (9)$$

$$Q_{SOC} \in (Q_{SOC_min}, Q_{SOC_max})$$

由此,动态反馈系数 β_1 、 β_2 的表达式分别为:

$$\beta_1 = \begin{cases} \lambda K_c & df/dt \geq 0 \\ \lambda K_d & df/dt < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta_2 = \begin{cases} K_c & f \geq f_0 \\ K_d & f < f_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: λ 为虚拟惯性和虚拟下垂控制的反馈系数之间的比值。由于频率变化率 df/dt 与当前频率偏离正常频率值 $f-f_0$ 的变动范围相差较大,应视电网所受扰动情况,设置较为合理的 λ 值使虚拟惯性及虚拟下垂控制出力适当,文中 λ 取值设定为0.35^[11]。

2.3 总体控制流程

从提升一次调频效果出发,同时考虑到电池储能系统的动作深度及容量限制,所提电池储能系统一次调频自适应综合控制框图见附录B图B1,具体控制流程见图5。

3 仿真分析

利用MATLAB/Simulink仿真软件搭建电池储能系统参与一次调频的区域电网仿真模型,以验证所提控制策略的有效性。按传统调频机组及电池储能系统间关系选取仿真参数,见附录C表C1。设定传统发电机组额定容量为150 MW,电网额定频率为50 Hz,电池储能系统容量为10 MW/10 MW·min。传统发电机组调频死区设定为 ± 0.033 Hz,电池储能系统调频死区设定为机组调频死区的60%^[13]。

针对阶跃和连续负荷扰动工况,考虑以下3种电池储能系统参与一次调频控制情况:①采用所提计及SOC的自适应综合控制策略;②采用虚拟惯性与虚拟下垂控制模式直接切换的控制策略;③采用虚拟下垂与惯性控制按分配比例系数模型自适应调整的控制策略。其中,后2种控制策略由于不改变电池储能系统充放电系数 K_c 与 K_d ,故称为定K直接

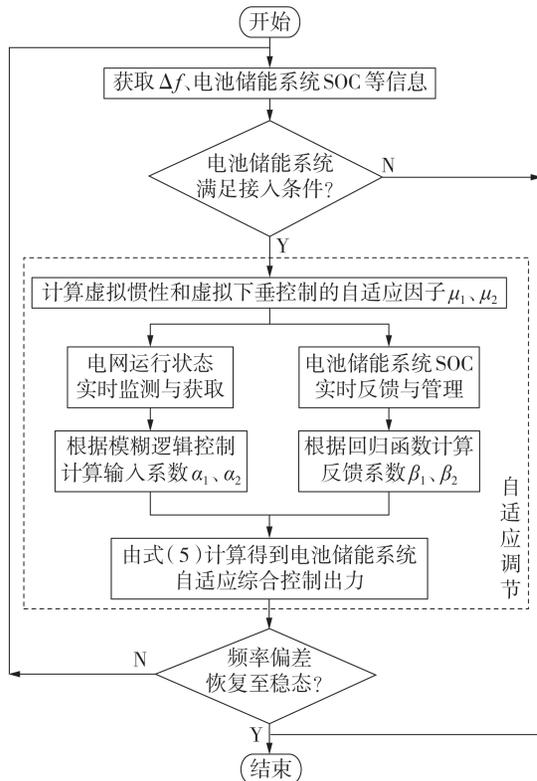


图5 计及SOC的自适应综合控制流程图

Fig.5 Flowchart of self-adaptive integrated control strategy considering SOC

切换与定K自适应控制。

3.1 阶跃负荷扰动工况

对于阶跃负荷扰动工况,电池储能系统一次调频效果的评价指标为频率偏差达到峰值时间 t_m 、最大频率偏差值 Δf_{\max} 和稳态频率偏差值 Δf_s 。 Δf_{\max} 与 Δf_s 越小,则表明调频效果越好。在所构建区域电网中加入幅值为30 MW的阶跃负荷扰动,该工况下电池储能系统初始SOC值设定为60%。3种控制策略所对应的频率偏差、电池储能系统出力、传统机组出力及电池储能系统SOC变化曲线如图6所示。对应调频指标结果如表1所示。

由图6可知,由于计及SOC的自适应综合控制策略与定K自适应控制在频率下降阶段中加入了虚拟下垂控制,频率偏差变化率得到抑制的同时减小了最大频率偏差。由于最大频率偏差值有所降低,所提控制策略下的机组暂态出力深度最大值相比定K直接切换与定K自适应控制明显减小。由表1中定量指标可知,与定K直接切换控制相比,所提控制策略使频率偏差最大值 $|\Delta f_{\max}|$ 减小约16%,暂态调频效果更好。调峰时间 t_m 更小,在频率恢复阶段,所提控制策略下频率偏差初始恢复速度更快,且稳态频率偏差值 Δf_s 的绝对值相对于其余二者更小,稳态调频效果更好。

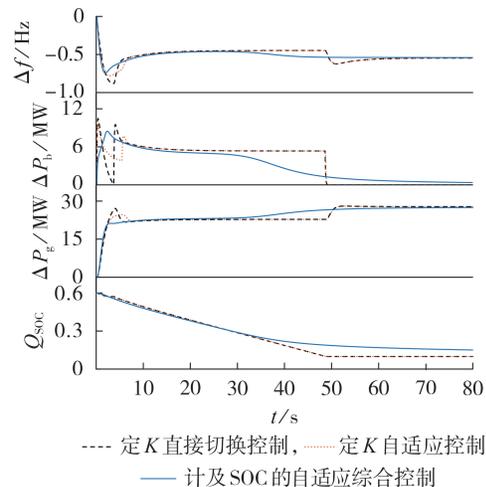


图6 阶跃负荷扰动下频率偏差、电池储能系统出力、传统机组出力、SOC变化曲线

Fig.6 Curves of frequency deviation, output power of BESS, output power of traditional units and SOC under step load disturbance

表1 电池储能系统调频指标结果

Table 1 Results of frequency regulation indexes of BESS

控制策略	$\Delta f_{\max} / \text{Hz}$	$\Delta f_s / \text{Hz}$	t_m / s
计及SOC的自适应综合控制	-0.74	-0.50	2.23
定K直接切换控制	-0.88	-0.55	3.76
定K自适应控制	-0.78	-0.55	2.86

由图6中电池储能系统出力曲线可知,本文所提控制策略下电池储能系统最大出力深度较定K直接切换控制减少约19.5%,相较于定K自适应控制减小约16%。由于无需考虑频率偏差临界值以切换相应的控制模式,所提控制策略下电池储能系统的出力曲线较为平滑,且不存在其余2种策略在临界值时刻发生跃变的情况。电池储能系统能量达到下限值后不再参与调频,采用定K直接切换与定K自适应控制均导致约0.18 Hz的频率二次跌落。所提控制策略在减小最大频率偏差值的基础上,未出现频率偏差突变的情况。且对电池储能系统SOC维持效果更优,其SOC较其余二者提高了11.8%。

3.2 连续负荷扰动工况

为验证所提控制策略在连续负荷扰动工况下的适用性,同样设定电池储能系统初始SOC值为60%,在区域电网中加入如图7所示的0.5 h时长连续负荷扰动进行仿真分析,所加入的负荷扰动瞬时最大变化值为31 MW。针对连续负荷扰动工况,调频指标为频率偏差均方根值 Δf_{rms} 、SOC均方根值 $Q_{\text{SOC,rms}}$ 及频率偏差峰谷差值 f_{p-v} ,其值越小,说明综合调频效果越好。上述3种控制策略下的电网频率偏差、传统机组出力及SOC变化曲线见附录C图C1。3种控制策略的各项调频定量指标如表2、3所示。

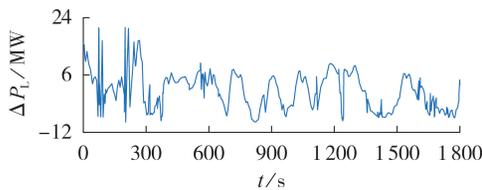


图 7 0.5 h 连续负荷扰动

Fig.7 0.5 h continuous load disturbance

表 2 0.5 h 电池储能系统调频指标结果

Table 2 Results of 0.5 h frequency regulation indexes of BESS

控制策略	$\Delta f_{rms} / \text{Hz}$	$Q_{SOC,rms} / \%$	f_{p-v} / Hz
计及SOC的自适应综合控制	0.181	16.7	0.752
定K直接切换控制	0.187	21.0	0.811
定K自适应控制	0.185	20.9	0.787

表 3 5 min 电池储能系统调频指标结果

Table 3 Results of 5 min frequency regulation indexes of BESS

控制策略	$\Delta f_{rms} / \text{Hz}$	$Q_{SOC,rms} / \%$	f_{p-v} / Hz
计及SOC的自适应综合控制	0.212	7.8	0.752
定K直接切换控制	0.221	7.9	0.811
定K自适应控制	0.217	7.8	0.787

由图 C1(a)可知:在连续负荷扰动下,对于较小负荷扰动,3种控制策略下频率偏差几乎相同;对于较大负荷扰动,所提控制策略的频率偏差比其余二者更小;且所提控制策略下传统调频机组最大出力深度有所降低。由表 2 中 0.5 h 连续扰动下的调频定量指标可知,所提控制策略对频率的波动抑制效果更好,且可有效减小频率波动的峰谷差。经计算,所提控制策略下 $Q_{SOC,rms}=16.7\%$,相比其余 2 种策略减少了约 4.2%。结合图 C1 中局部放大图可知,定 K 直接切换与定 K 自适应控制下电池储能系统 SOC 在其运行 1307 s 时达到下限值 10% 并退出调频控制,直至负向负荷扰动向电池储能系统充电后重新恢复动作,导致频率偏差二次跌落的同时加大了传统机组调频负担。而所提控制策略的 SOC 始终维持在 21.5% 以上,在一定程度上增加了电池储能系统一次调频备用容量。

由于前 5 min 内负荷波动较为频繁且幅值较大,对比分析 3 种方案的调频仿真结果,如图 C1(b)所示。结合表 3 调频定量指标结果可知,频率偏差波动指标相比 0.5 h 定量指标有所增大,所提控制策略的调频效果更好。由于前 5 min 内电池储能系统 SOC 均处于 30% 以上,3 种控制策略下电池储能系统在其荷电状态较好时皆以较大功率持续输出,电池储能系统的 $Q_{SOC,rms}$ 几乎相同。

按电池储能系统一次调频响应阶段内动作深度的积分计算 0.5 h 连续扰动下所提控制策略、定 K 直

接切换控制与定 K 自适应控制下所承担调频电量,分别为 1185、998、1053 MW·h。所提控制策略一次调频过程中承担更多的调频电量,实时电量效益更高^[21],同时减小了传统机组调频负担。结合图 C1 中 SOC 变化曲线可知,所提控制策略对电池储能系统 SOC 的维持效果更优,在一定程度上增加了电池储能系统的使用寿命。所提控制策略对调频用电池储能系统安装的经济性有所提升。

上述分析皆表明所提计及 SOC 的自适应综合控制具有更优的控制性能。

4 结论

制定更为可靠的电池储能系统协同传统调频机组出力计划,对于电池储能系统在电网中稳定、经济运行具有重要意义。为此,引入自适应因子,提出一种计及 SOC 的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略,经过理论及仿真分析得到以下结论。

1) 所引入的自适应因子将虚拟惯性与虚拟下垂控制 2 种经典控制策略进行互补结合,避免了选取临界值,使电池储能系统快速响应的同时出力更平滑,提升了其自适应调节能力。

2) 在自适应因子中引入输入系数有效发挥了 2 种经典控制策略的积极作用,同时综合考虑电池储能系统的 SOC 情况,引入了反馈系数用以调节电池储能系统实时出力,避免了过充过放。

3) 所提控制策略减小了电网最大频率偏差绝对值,并且避免了对电网频率的二次冲击。实现了电池储能系统出力在满足调频效果的基础上更加高效,也兼顾了电池储能系统的使用寿命,并在一定程度上增加了其一次调频备用容量。

本文暂未考虑电池储能系统的全寿命周期及经济性最优调频运行方案,后续研究重点在于对电池储能系统在实际运行阶段各类参数如死区、循环次数等影响进行优化,进一步提升电池储能系统与调频机组之间的协调作用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18, 369.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- [2] 隋云任,梁双印,黄登超,等. 飞轮储能辅助燃煤机组调频动态过程仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2597-2606.
SUI Yunren, LIANG Shuangyin, HUANG Dengchao, et al. Simu-

- lation study on frequency modulation process of coal burning plants with auxiliary of flywheel energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8):2597-2606.
- [3] 张圣祺,袁蓓,徐青山,等. 规模化储能参与下的电网二次调频优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5):82-88, 95.
ZHANG Shengqi, YUAN Bei, XU Qingshan, et al. Optimal control strategy of secondary frequency regulation for power grid with large-scale energy storages[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):82-88, 95.
- [4] 王琦,郭钰锋,万杰,等. 适用于高风电渗透率电力系统的火电机组一次调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4):974-984, 1274.
WANG Qi, GUO Yufeng, WAN Jie, et al. Primary frequency regulation strategy of thermal units for a power system with high penetration wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4):974-984, 1274.
- [5] 李建林,牛萌,王上行,等. 江苏电网侧百兆瓦级电池储能电站运行与控制分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2):28-35.
LI Jianlin, NIU Meng, WANG Shangxing, et al. Operation and control analysis of 100 MW class battery energy storage station on grid side in Jiangsu Power Grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2):28-35.
- [6] TURK A, SANDELIC M, NOTO G, et al. Primary frequency regulation supported by battery storage systems in power system dominated by renewable energy sources[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(18):4986-4990.
- [7] MENG L, ZAFAR J, KHADEM S K, et al. Fast frequency response from energy storage systems—a review of grid standards, projects and technical issues[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2):1566-1581.
- [8] 黄际元,李欣然,曹一家,等. 考虑储能参与快速调频动作时机与深度的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12):454-464.
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CAO Yijia, et al. Capacity allocation of energy storage system considering its action moment and output depth in rapid frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12):454-464.
- [9] 李欣然,崔曦文,黄际元,等. 电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18):3897-3908.
LI Xinran, CUI Xiwen, HUANG Jiyuan, et al. The self-adaptation control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18):3897-3908.
- [10] STROE D I, KNAP V, SWIERCZYNSKI M, et al. Operation of a grid-connected lithium-ion battery energy storage system for primary frequency regulation: a battery lifetime perspective[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1):430-438.
- [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] 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] 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.
- [14] 孙丙香,李响熙,龚敏明,等. 参与AGC辅助服务的锂离子电池储能系统经济性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19):4048-4061.
SUN Bingxiang, LI Yangxi, GONG Minming, et al. Study on the economy of energy storage system with lithium-ion battery participating in AGC auxiliary service[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19):4048-4061.
- [15] ZHU D, ZHANG Y. Optimal coordinated control of multiple battery energy storage systems for primary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1):555-565.
- [16] SHIM J W, VERBIĆ G, ZHANG N, et al. Harmonious integration of faster-acting energy storage systems into frequency control reserves in power grid with high renewable generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6193-6205.
- [17] 赵源筱,耿光超,江全元,等. 考虑功率变化速率的储能辅助单机调频控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1):141-147.
ZHAO Yuanxiao, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Frequency control strategy of single-generator supporting by energy storage considering power change rate[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1):141-147.
- [18] 米阳,蔡杭谊,袁明瀚,等. 直流微电网分布式储能系统电流负荷动态分配方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10):17-23.
MI Yang, CAI Hangyi, YUAN Minghan, et al. Dynamic distribution method of current load for distributed energy storage system in DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10):17-23.
- [19] KERDPHOL T, WATANABE M, HONGESOMBUT K, et al. Self-adaptive virtual inertia control-based fuzzy logic to improve frequency stability of microgrid with high renewable penetration[J]. IEEE Access, 2019, 7:76071-76083.
- [20] MENG G, CHANG Q, SUN Y, et al. Energy storage auxiliary frequency modulation control strategy considering ACE and SOC of energy storage[J]. IEEE Access, 2021, 9:26271-26277.
- [21] 黄际元,李欣然,常敏,等. 考虑储能电池参与一次调频技术经济模型的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21):112-121.
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CHANG Min, et al. Capacity allocation of BESS in primary frequency regulation considering its technical-economic model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21):112-121.

作者简介:



王育飞

王育飞(1974—),男,安徽合肥人,教授,博士,主要研究方向为电力储能应用技术、电能质量分析与控制和电动汽车有序充电(E-mail:wangyufei@shiep.edu.cn);

杨铭诚(1996—),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向为储能技术在电力系统频率调整中的应用(E-mail:121309487@qq.com);

薛花(1979—),女,江苏无锡人,副教授,博士,主要研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:xuehua@shiep.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第219页 continued on page 219)

Remaining useful life prediction of lithium-ion battery based on CNN-Bi-LSTM network

LIANG Haifeng¹, YUAN Peng¹, GAO Yajing²

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Carbon Neutrality Research Institute of China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: The RUL (Remaining Useful Life) prediction of the lithium-ion battery can evaluate the reliability of the battery, reduce the risk of battery use and provide a theoretical basis for battery maintenance. Combining the advantages of CNN (Convolutional Neural Network) and Bi-LSTM (Bi-directional Long Short-Term Memory) network, the CNN-Bi-LSTM network model for lithium-ion battery RUL prediction is proposed, which considers both multiple degradation characteristics and time sequence. The hyperparameters of CNN are obtained by simulation, the highly correlated feature parameters are selected as the prediction input, and the simulation experiment is carried out on the NASA lithium-ion battery aging data set. The experimental results show that the CNN-Bi-LSTM network model can accurately predict the RUL of lithium-ion batteries. Compared with other network models, it has the advantages of fewer network model parameters and smaller memory usage, and has good performance in accuracy and convergence.

Key words: lithium-ion battery; convolutional neural network; bi-directional long short-term memory network; remaining useful life prediction

(上接第 198 页 continued from page 198)

Self-adaptive integrated control strategy of battery energy storage system considering SOC for primary frequency regulation

WANG Yufei, YANG Mingcheng, XUE Hua, ZHANG Yuhua, MI Yang

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electrical Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Considering improving the adaptability of primary frequency response under the limitation of BESS (Battery Energy Storage System) capacity, an integrated control strategy of BESS considering SOC (State Of Charge) for primary frequency regulation is proposed. The dynamic model of BESS for primary frequency regulation is established. The regulation characteristics of virtual inertia and virtual droop control on the grid frequency deviation are compared and analyzed. A self-adaptive integrated control strategy of BESS considering SOC for primary frequency regulation is designed, in which a self-adaptive factor of a dynamic combination of input coefficient considering frequency deviation and its rate of change and feedback coefficient considering SOC is introduced. The input coefficients are adaptively adjusted by fuzzy logic controller and the feedback coefficients are adaptively adjusted by regression function. Finally, the simulation model is built to compare and analyze different control strategies under step and continuous load disturbance. The simulation results show that the proposed control strategy can adaptively control the output of BESS and effectively improve the primary frequency regulation effect.

Key words: battery energy storage system; primary frequency regulation; self-adaptive factor; integrated control strategy; state of charge

附录 A

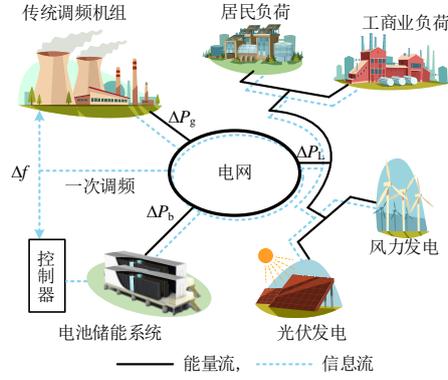


图 A1 电网简化模型

Fig.A1 Simplified model of power grid

附录 B

表 B1 模糊控制规则表

Table B1 Fuzzy control rules

df/dt	Δf						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	VL	L	L	VL	Z	Z	Z
NM	L	L	M	L	Z	Z	S
NS	M	M	M	M	Z	S	S
Z	Z	S	Z	Z	Z	S	Z
PS	S	S	Z	M	M	M	M
PM	S	Z	Z	L	M	L	L
PB	Z	Z	Z	VL	L	L	VL

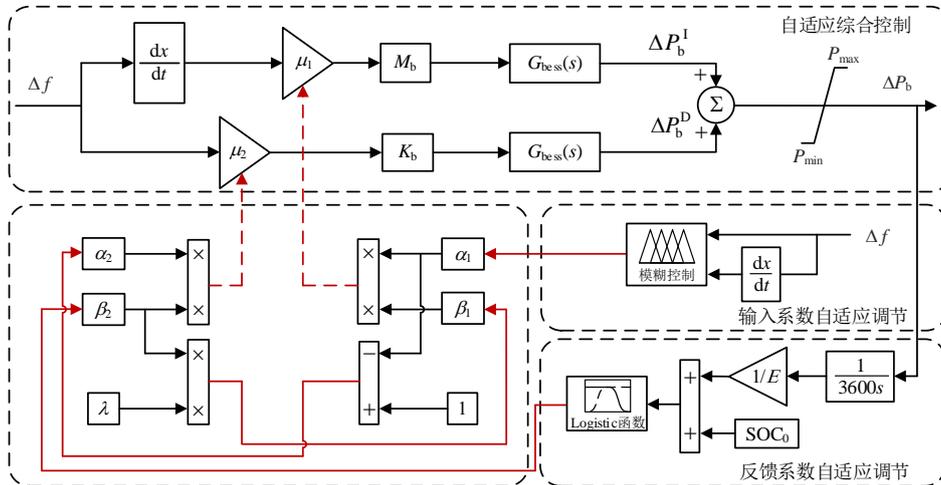


图 B1 电池储能系统一次调频自适应综合控制框图

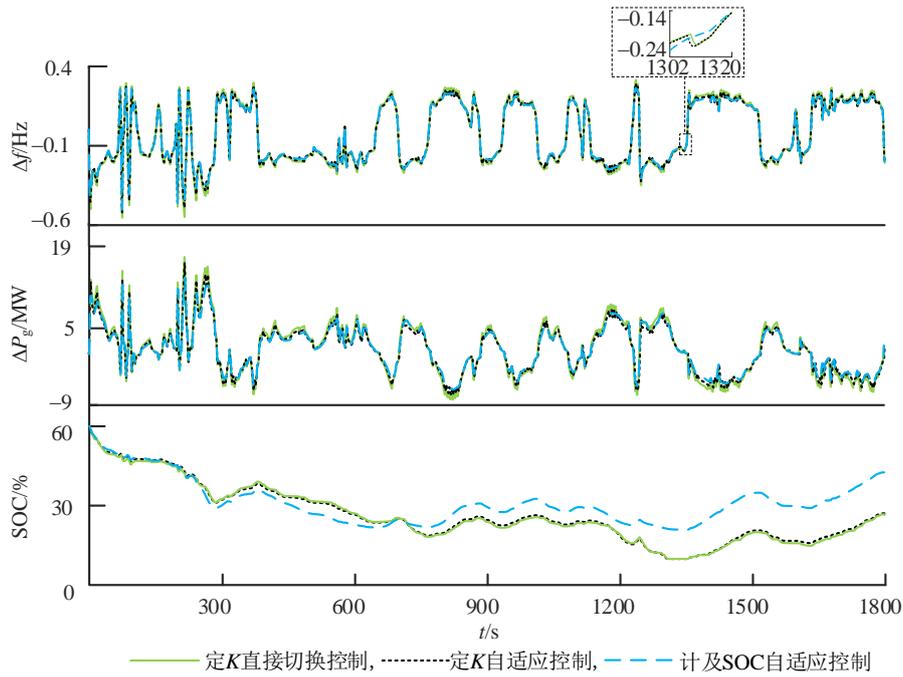
Fig.B1 Block diagram of self-adaptive integrated control of BESS for primary frequency regulation

附录 C

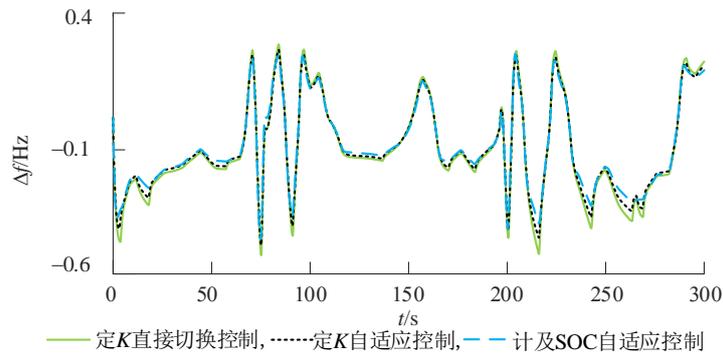
表 C1 仿真参数

Table C1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
T_g/s	0.08	T_b/s	0.1
T_{CH}/s	0.3	M_b	6
T_{RH}/s	10	K_b	4
F_{HP}	0.5	K_m	1
K_g	17	Q_{SOC_min}	0.1
ΔP_{ACE}	0	Q_{SOC_low}	0.45
D	1	Q_{SOC_high}	0.55
H/s	10	Q_{SOC_max}	0.9



(a) 频率偏差、传统机组出力、电池储能系统 SOC 变化曲线(0.5 h)



(b) 频率偏差曲线(5 min)

图 C1 连续负荷扰动下频率偏差、传统机组出力、电池储能系统 SOC 变化曲线

Fig.C1 Curves of frequency deviation, output power of traditional units and SOC of BESS under continuous load disturbance