

考虑 SOC 的电池储能系统一次调频策略研究

刘英培¹, 田仕杰¹, 梁海平¹, 谢岩², 霍启迪², 唐晓骏²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192)

摘要: 电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)以其控制精度高、响应速度快等优势被广泛应用于电网中。为充分发挥 BESS 参与电网一次调频的优势, 提出一种基于荷电状态(State Of Charge, SOC)与频率偏差的综合控制方法。首先, 为了改善电池循环寿命, 设计基于荷电状态 SOC 的下垂系数与虚拟惯性系数。引入基于频率偏差的加权系数将下垂出力与虚拟惯性出力相结合, 在频率偏差较小时增加虚拟惯性出力权重以稳定频率, 在频率偏差较大时增加下垂出力权重以快速调节频率偏差, 并在频率偏差超过一定限度后进行故障穿越时的频率支撑, 而当电网状态变好且 SOC 较低或较高时进行 SOC 恢复。其次, 提出 BESS 参与电网一次调频的评价指标以定量评估所提策略的调频效果及 SOC 维持效果。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建 BESS 仿真模型, 并在阶跃负荷扰动、随机负荷扰动、瞬时性短路故障及光伏间歇性出力扰动工况下仿真验证所提策略的调频效果及 SOC 维持效果。仿真结果表明, 所提策略能实现较好的调频效果并将 SOC 维持在合理区间内。研究成果为 BESS 成套设备生产厂家合理设计控制保护参数提供参考, 对提升 BESS 涉网性能具有实际意义。

关键词: 电池储能系统; 一次调频; 荷电状态; 频率偏差; 控制策略

Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid

LIU Yingpei¹, TIAN Shijie¹, LIANG Haiping¹, XIE Yan², HUO Qidi², TANG Xiaojun²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Grid Security and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The battery energy storage system (BESS) has been widely used in power grids with the advantages of high control accuracy and fast response speed. In order to use the advantages of BESS in primary frequency regulation (PFR) of a power grid, this paper proposes an integrated control strategy based on state of charge (SOC) and frequency deviation. First, the droop coefficient and the virtual inertia coefficient based on SOC are designed to improve battery cycle life. Then the weighting coefficients based on frequency deviation are introduced to combine the droop output with the virtual inertial output. When the frequency deviation is small, the weighting coefficient of the virtual inertia output is increased to stabilize the frequency. When the frequency deviation is large, the weighting coefficient of the droop control is increased to quickly adjust the frequency deviation. When the frequency deviation exceeds a certain limit, BESS performs frequency support during fault ride-through. In addition, when the system is in good condition and the SOC is low or high, the SOC recovery is performed. Secondly, an evaluation index of BESS participating in the PFR of the power grid is proposed to quantitatively evaluate the frequency regulation performance and the SOC maintenance performance of this strategy. Finally, a simulation model of BESS is built in PSCAD/EMTDC, and the frequency regulation and the SOC maintenance performance of this strategy are verified by simulation under step load and random load disturbance, transient short-circuit fault and intermittent output of PV conditions. The simulation results indicate that this strategy can improve the frequency regulation performance and maintain the SOC within a reasonable range. The results can provide a reference for equipment manufacturers of BESS to design control and protection parameters reasonably, and have practical significance for improving BESS's grid-connected performance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607069).

Key words: battery energy storage system; primary frequency regulation; state of charge; frequency deviation; control strategy

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607069); 中国电力科学研究院有限公司科技项目资助(XT83-20-005)

0 引言

“双碳”目标背景下,为加快构建清洁低碳能源体系,我国正加速向新能源转型^[1-6]。但风光等新能源具有波动性和随机性,大规模接入电网会产生系统等效转动惯量减小、调频调压能力减弱等问题^[7-8],而电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)以其控制精度高、响应速度快等特点参与电网调频调压,能实现系统功率的快速平衡,保证电力系统安全、稳定、经济运行^[9-15]。

国内外虽已有一些具备调频功能的 BESS 示范工程^[16-18],但以 BESS 为主的新型快速储能当前仍停留在示范阶段,且多用于改善风电场的联网运行性能,其广域调控效能尚未得到充分利用^[19-20]。基于电网安全运行的需求,发挥 BESS 调频优势是当今研究的热点问题^[21-23]。因此,研究 BESS 调频控制策略,对 BESS 在电力系统调频领域中的推广应用及规划调度具有一定实际意义。

目前,国内外已有许多学者证明了 BESS 参与电网调频的有效性。文献[24]提出将 BESS 应用于交直流混合微电网,利用下垂控制解决交流侧频率稳定及直流侧电压稳定等问题,证明了下垂控制策略稳态效果好。文献[25]采用固定的下垂系数(“定K法”)调节 BESS 出力,未考虑储能电池荷电状态(State Of Charge, SOC)的快速变化,容易出现储能电池过充过放等问题,影响其循环寿命。文献[26-27]采用一种考虑储能电池 SOC 变下垂系数(“变K法”)的控制方法,能避免储能电池的过充过放。文献[28]利用模糊控制在频率偏差较大时,根据储能电池 SOC 反馈平滑输出功率,解决储能电池可能存在的过充过放问题。而为了获得更好的调频效果,文献[29]提出了一种针对 BESS 的综合控制模式,它包含下垂控制与虚拟惯性控制模式,以频率峰值时刻作为控制模式的切换时刻,从而实现了两种控制方法的优势互补,并能在较少储能电池容量需求的前提下满足调频要求。文献[30]提出了一种以正/负虚拟惯性控制改善储能调频动态特性为主、下垂控制改善储能稳态特性为辅,3种方法互相配合的综合控制策略,其能在保证调频需求的同时兼顾 SOC 维持效果。文献[31-32]通过合理设计基于 SOC 与频率偏差的下垂系数及虚拟惯性系数,实现下垂与虚拟惯性协调优化控制,有效提升了一次调频效果。上述研究工作基于下垂控制单独作用或与虚拟惯性控制叠加后实现 BESS 参与电网一次调频,未考虑电

网故障下的调频策略设计,也未考虑调频过程中 SOC 自恢复,仿真算例较为单一。

本文提出一种 BESS 参与电网一次调频的综合控制策略。首先设计基于 SOC 的下垂系数与虚拟惯性系数以避免储能电池过充过放。之后设计基于频率偏差的加权系数将下垂出力与虚拟惯性出力依据各自权重进行数值叠加,并根据频率偏差所处的不同阶段选择出力模式,且在频率偏差超过一定限度后进行故障穿越时的频率支撑,而在电网状态变好且 SOC 较低或较高时进行 SOC 恢复。随后提出 BESS 参与电网一次调频的评价指标以定量评估所提策略的调频效果及 SOC 维持效果。最后基于 PSCAD/EMTDC 搭建 BESS 仿真模型,验证所提策略的调频效果及 SOC 维持效果。

1 BESS 基本结构及工作原理

典型 BESS 由储能电池、DC/DC 变换器、DC/AC 变换器、升压变压器、电池管理系统、监控系统等组成,其拓扑结构及控制系统图如图 1 所示。

图中: U_{dc} 为 DC/AC 变换器直流侧电压; v_a 、 v_b 、 v_c 分别为 DC/AC 变换器桥臂电动势; R_{ac} 、 L_{ac} 分别为 BESS 交流侧等效电阻、电抗;TL 母线位于升压变压器低压侧;PCC 母线位于升压变压器高压侧; u_a 、 u_b 、 u_c 分别为 TL 母线处 abc 相电压; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 TL 母线处 abc 相电流; u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 分别为 TL 母线处 dq 轴电压、电流;PLL 为锁相环; θ 为 TL 母线处 a 相电压相位; $T_{3s/2s}$ 、 $T_{2s/2r}$ 、 $T_{2r/3s}$ 分别为 abc/ $\alpha\beta$ 、 $\alpha\beta$ /dq、dq/abc 变换矩阵; U_{ac} 为 TL 母线处电压幅值; P 、 Q 分别为 TL 母线处有功功率、无功功率实际值; $P_{ref}(f)$ 、 Q_{ref} 分别为 BESS 输送有功功率、无功功率参考值, f 为电网频率; U_{dcref} 、 U_{acref} 分别为 DC/AC 变换器直流侧、交流侧电压参考值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为内环电流控制器中 d 轴、q 轴电流参考值。

由图 1 可以看出: BESS 采用锁相环准确追踪 TL 母线处 a 相电压相位,为整个控制系统提供相位参考;外环控制器根据控制目标选择控制方式(定有功功率、定无功功率、定直流电压、定交流电压控制方式等)并经过比例积分运算为内环电流控制器提供 dq 轴电流参考值;而内环电流控制器通过调节 DC/AC 变换器桥臂电动势使 dq 轴电流快速跟踪其参考值。将有功功率参考值设置为频率的函数,可实现 BESS 参与电网一次调频功能。

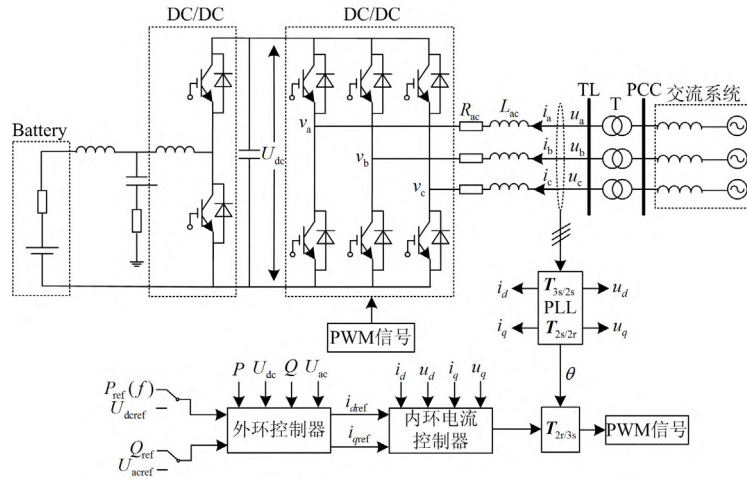


图1 BESS 拓扑结构及控制系统

Fig. 1 Topology of BESS and diagram of control system

2 BESS 参与电网一次调频综合控制策略

2.1 基于 SOC 的下垂系数与虚拟惯性系数

下垂控制原理为 BESS 模拟装有调速器的发电机组参与电网一次调频时的功频下垂特性, 将频率偏差乘以一个固定的下垂系数后叠加到 BESS 有功功率控制环节, 从而减小稳态频率偏差, 实现一次调频作用。该过程中, BESS 有功出力如式(1)所示。

$$\Delta P_{Dr} = -K_{Dr} \Delta f \quad (1)$$

式中: ΔP_{Dr} 为下垂出力; K_{Dr} 为下垂系数; Δf 为频率偏差。

而虚拟惯性控制原理为 BESS 模拟发电机组内部惯性响应过程, 将频率偏差变化率乘以一个固定的惯性系数后叠加到 BESS 有功功率控制环节, 从而阻碍频率的快速恶化, 维持频率的稳定。该过程中, BESS 有功出力如式(2)所示。

$$\Delta P_{In} = -K_{In} d\Delta f \quad (2)$$

式中: ΔP_{In} 为虚拟惯性出力; K_{In} 为虚拟惯性系数; $d\Delta f$ 为频率偏差变化率。

BESS 调频过程中, 为防止 SOC 越限时触发闭锁装置使有功出力发生阶跃性变化, 进而导致频率二次跌落及振荡, 设计基于 SOC 的下垂系数如式(3)、式(4)所示^[26]。

$$K_{Dr_dis} = \begin{cases} 0, & Q_{SOC} \in [0, Q_{SOCmin}] \\ \frac{K_{Drmax}}{2} \left(\frac{Q_{SOC} - Q_{SOCmin}}{Q_{SOClow} - Q_{SOCmin}} \right)^4, & Q_{SOC} \in [Q_{SOCmin}, Q_{SOClow}] \\ K_{Drmax} - \frac{K_{Drmax}}{2} \left(\frac{Q_{SOC} - Q_{SOCref}}{Q_{SOClow} - Q_{SOCref}} \right)^4, & Q_{SOC} \in [Q_{SOClow}, Q_{SOCref}] \\ K_{Drmax}, & Q_{SOC} \in [Q_{SOCref}, 1] \end{cases} \quad (3)$$

$$K_{Dr_ch} = \begin{cases} K_{Drmax}, & Q_{SOC} \in [0, Q_{SOCref}] \\ K_{Drmax} - \frac{K_{Drmax}}{2} \left(\frac{Q_{SOC} - Q_{SOCref}}{Q_{SOChigh} - Q_{SOCref}} \right)^4, & Q_{SOC} \in [Q_{SOCref}, Q_{SOChigh}] \\ \frac{K_{Drmax}}{2} \left(\frac{Q_{SOC} - Q_{SOCmax}}{Q_{SOChigh} - Q_{SOCmax}} \right)^4, & Q_{SOC} \in [Q_{SOChigh}, Q_{SOCmax}] \\ 0, & Q_{SOC} \in [Q_{SOCmax}, 1] \end{cases} \quad (4)$$

式中: K_{Dr_dis} 、 K_{Dr_ch} 分别为 BESS 放电状态、充电状态下的下垂系数; Q_{SOC} 为 SOC 数值; K_{Drmax} 为下垂系数最大值; Q_{SOCmin} 、 Q_{SOClow} 、 Q_{SOCref} 、 $Q_{SOChigh}$ 、 Q_{SOCmax} 分别为依据电池自身特性设置的 SOC 最小值、较低值、期望值、较高值、最大值。

由式(3)、式(4)获得基于 SOC 的下垂系数曲线如图 2 所示。

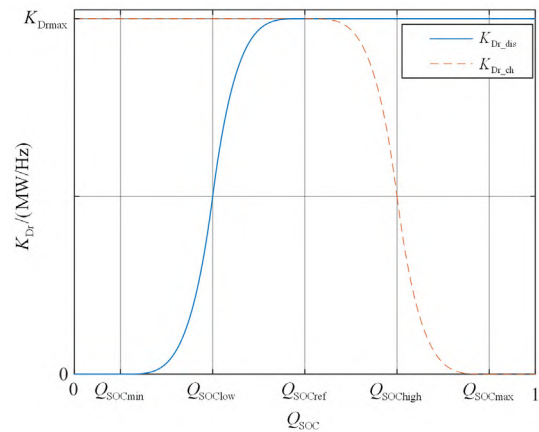


图2 基于 SOC 的下垂系数曲线

Fig. 2 Curve of droop coefficient based on SOC

由图 2 可以看出: 所设计的下垂系数曲线采用分段函数的形式, 在整个 SOC 区间内平滑变化。

BESS 在采用该特性曲线后能根据 SOC 数值合理控制出力, 避免电池过充过放导致频率二次跌落。

由于虚拟惯性系数与下垂系数本质类似, 设计虚拟惯性系数如式(5)所示。

$$\begin{cases} K_{\text{In_dis}} = k_{\text{In/Dr}} K_{\text{Dr_dis}} \\ K_{\text{In_ch}} = k_{\text{In/Dr}} K_{\text{Dr_ch}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $K_{\text{In_dis}}$ 、 $K_{\text{In_ch}}$ 分别为 BESS 放电状态、充电状态下的虚拟惯性系数; $k_{\text{In/Dr}}$ 为虚拟惯性系数与下垂系数的比例关系。考虑到 $d\Delta f$ 与 Δf 的物理区间差别较大, 应合理设置 $k_{\text{In/Dr}}$ 以实现虚拟惯性与下垂出力相当^[27,32]。

2.2 基于频率偏差的加权系数

考虑到下垂控制对 Δf 的抑制效果较好, 而虚拟惯性控制对 $d\Delta f$ 的抑制效果较好, 通过引入相应的加权系数将下垂出力与虚拟惯性出力相结合, 实现 BESS 参与电网一次调频过程。

任意时刻, BESS 一次调频出力由下垂出力与虚拟惯性出力两部分组成, 表达式如式(6)所示。

$$\Delta P_{\text{PFR}} = w_{\text{Dr}} \Delta P_{\text{Dr}} + w_{\text{In}} \Delta P_{\text{In}} \quad (6)$$

式中: ΔP_{PFR} 为 BESS 一次调频出力; w_{Dr} 、 w_{In} 分别为下垂出力、虚拟惯性出力在一次调频中的加权系数。

为实现下垂出力、虚拟惯性出力根据电网调频需求灵活配置出力比例, 设计基于频率偏差的 w_{Dr} 与 w_{In} 分别如式(7)、式(8)所示^[31]。

$$w_{\text{Dr}} = \begin{cases} 0.5 + \frac{|\Delta f|}{2\Delta f_{\text{setw}}}, & 0 \leq |\Delta f| \leq \Delta f_{\text{setw}} \\ 0.5 + \frac{|\Delta f|}{2\Delta f_{\text{setw}}}, & \Delta f_{\text{setw}} \leq |\Delta f| \leq 2\Delta f_{\text{setw}} \\ 1.5, & |\Delta f| \geq 2\Delta f_{\text{setw}} \end{cases} \quad (7)$$

$$w_{\text{In}} = \begin{cases} 1.5 - \frac{|\Delta f|}{2\Delta f_{\text{setw}}}, & 0 \leq |\Delta f| \leq \Delta f_{\text{setw}} \\ 1.5 - \frac{|\Delta f|}{2\Delta f_{\text{setw}}}, & \Delta f_{\text{setw}} \leq |\Delta f| \leq 2\Delta f_{\text{setw}} \\ 0.5, & |\Delta f| \geq 2\Delta f_{\text{setw}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, Δf_{setw} 为设置的频率偏差临界值。

当 $0 \leq |\Delta f| \leq \Delta f_{\text{setw}}$ 时, 频率恶化不严重, 下垂控制的调频效果不明显, 应将 w_{Dr} 设置较小、 w_{In} 设置较大以防止系统中突然投切负荷导致 $d\Delta f$ 快速增大, 此时 $0.5 \leq w_{\text{Dr}} \leq 1 \leq w_{\text{In}} \leq 1.5$; 当 $\Delta f_{\text{setw}} \leq |\Delta f| \leq 2\Delta f_{\text{setw}}$ 时, 频率恶化较严重, 下垂控制的调频效果较明显, 应将 w_{Dr} 设置较大、 w_{In} 设置较小以

充分发挥下垂出力对 $|\Delta f|$ 的快速调节作用, 此时 $0.5 \leq w_{\text{In}} \leq 1 \leq w_{\text{Dr}} \leq 1.5$; 而当 $|\Delta f| \geq 2\Delta f_{\text{setw}}$ 时, 频率恶化更为严重, 此时设置 w_{Dr} 达到最大限幅值 1.5, w_{In} 达到最小限幅值 0.5, 以增加下垂出力权重, 并保证虚拟惯性出力对 $d\Delta f$ 具有一定抑制能力。

由式(7)、式(8)获得基于频率偏差的加权系数曲线如图 3 所示。

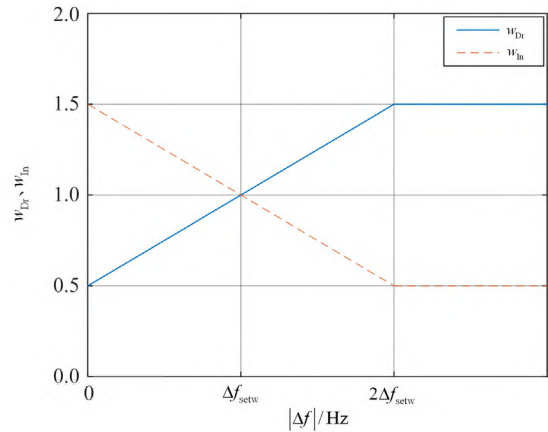


图 3 基于频率偏差的加权系数曲线

Fig. 3 Curve of weighting coefficients based on frequency deviation

由图 3 可以看出: 所设计的加权系数能根据频率偏差合理控制下垂出力与虚拟惯性出力比例, 在频率偏差较小时增加虚拟惯性出力权重以稳定频率, 在频率偏差较大时增加下垂出力权重以快速调节频率偏差, 从而实现两种控制方法的协调运行与优势互补。

2.3 故障穿越时的调频策略

国家标准《电化学储能系统储能变流器技术规范》(GB/T34120-2017)及《电化学储能系统接入电网技术规定》(GB/T36547-2018)规定: 并入 10(6) kV 及以上电压等级的电化学储能系统应具备一定的耐受电网频率异常的能力。当电网发生故障或受到扰动导致频率/电压异常时, 具有故障穿越能力的 BESS 能够不间断并网运行, 甚至向电网提供一定的有功/无功功率以支持电网恢复, 直到电网恢复到正常运行状态。基于上述标准设计如下故障穿越时的调频策略:

BESS 实时检测电网频率, 当电网发生故障或受到扰动导致频率偏差超过一定限度后, 为迅速响应频率恶化, 可闭锁外环控制器, 通过直接给定 i_{dref} 的形式, 使 BESS 向电网注入或吸收一定量的有功电流以协助频率恢复, 减小电网崩溃的可能; 而一旦频率恢复, BESS 能在较短的时间内迅速恢复到

故障前工作状态。其中, i_{dref} 如式(9)所示。

$$i_{dref} = \begin{cases} -I_{\max}, \Delta f < -\Delta f_{\text{setFRT}} \\ I_{\max}, \Delta f > \Delta f_{\text{setFRT}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_{\max} 为 BESS 输出电流限幅值, 负/正分别代表 BESS 向电网注入/吸收有功电流; Δf_{setFRT} 为设置的故障穿越时的频率偏差临界值。

由式(9)可见: 当电网发生故障或受到扰动导致频率极低时, BESS 向电网注入有功电流达到上限值以最大限度协助频率提升; 当电网发生故障或受到扰动导致频率极高时, BESS 向电网吸收有功电流达到上限值以最大限度协助频率回落。

2.4 SOC 恢复策略

BESS 参与电网一次调频过程中, 当电网频率良好而 SOC 较低或较高时, 可利用电网中剩余调频容量为 BESS 充放电, 使 SOC 维持在合理区间内, 以便在后续调频任务中提供更多调频容量。基于上述理念, 设计如下 SOC 恢复策略。

BESS 实时检测电网频率及 SOC 数值, 当频率偏差幅值在设置的频率偏差临界值之内时, 触发频率偏差允许信号如式(10)所示; 当 SOC 数值在设置的 SOC 上下限值之外时, 触发 SOC 允许信号如式(11)所示; 当同时满足上述两条限制逻辑时, 触发 SOC 恢复信号如式(12)所示。

$$S_{iRE1} = \begin{cases} 1, |\Delta f| \leq \Delta f_{\text{setRE}} \\ 0, |\Delta f| > \Delta f_{\text{setRE}} \end{cases} \quad (10)$$

$$S_{iRE2} = \begin{cases} 1, Q_{\text{SOC}} \in [0, Q_{\text{SOCRElow}}] \\ 0, Q_{\text{SOC}} \in [Q_{\text{SOCRElow}}, Q_{\text{SOCREhigh}}] \\ 1, Q_{\text{SOC}} \in [Q_{\text{SOCREhigh}}, 1] \end{cases} \quad (11)$$

$$S_{iSOCRE} = S_{iRE1} \wedge S_{iRE2} \quad (12)$$

式中: S_{iRE1} 为频率偏差允许信号; Δf_{setRE} 为设置的 SOC 恢复时的频率偏差临界值; S_{iRE2} 为 SOC 允许信号; Q_{SOCRElow} 、 $Q_{\text{SOCREhigh}}$ 分别为 SOC 恢复时依据电池自身特性设置的 SOC 下限值、上限值; S_{iSOCRE} 为 SOC 恢复信号; \wedge 为逻辑运算“与”。

由式(10)可见: 当 $|\Delta f| \leq \Delta f_{\text{setRE}}$ 时, S_{iRE1} 置 1; 当 $|\Delta f| > \Delta f_{\text{setRE}}$ 时, S_{iRE1} 置 0。

由式(11)可见: 当 $Q_{\text{SOC}} \leq Q_{\text{SOCRElow}}$ 或 $Q_{\text{SOC}} \geq Q_{\text{SOCREhigh}}$ 时, S_{iRE2} 置 1; 当 $Q_{\text{SOCRElow}} \leq Q_{\text{SOC}} \leq Q_{\text{SOCREhigh}}$ 时, S_{iRE2} 置 0。

由式(12)可见, 当 S_{iRE1} 与 S_{iRE2} 均为 1 时, S_{iSOCRE} 置 1; 当 S_{iRE1} 或 S_{iRE2} 有 0 时, S_{iSOCRE} 置 0。

S_{iSOCRE} 置 1 将触发 SOC 恢复模块, 控制 BESS

恒流充放电以实现 SOC 恢复, 其充放电电流如式(13)所示。

$$I_{B_RE} = \begin{cases} -I_{B\max}, Q_{\text{SOC}} \in [0, Q_{\text{SOClow}}] \\ -I_{B\max} \left(\frac{Q_{\text{SOC}} - Q_{\text{SOCRElow}}}{Q_{\text{SOClow}} - Q_{\text{SOCRElow}}} \right), Q_{\text{SOC}} \in [Q_{\text{SOClow}}, Q_{\text{SOCRElow}}] \\ I_{B\max} \left(\frac{Q_{\text{SOC}} - Q_{\text{SOCREhigh}}}{Q_{\text{SOCREhigh}} - Q_{\text{SOCREhigh}}} \right), Q_{\text{SOC}} \in [Q_{\text{SOCREhigh}}, Q_{\text{SOCREhigh}}] \\ I_{B\max}, Q_{\text{SOC}} \in [Q_{\text{SOCREhigh}}, 1] \end{cases} \quad (13)$$

式中: I_{B_RE} 为 SOC 恢复时的储能电池充放电电流; $I_{B\max}$ 为储能电池最大充放电电流, 正/负分别代表放电/充电状态。

由式(13)获得 SOC 恢复时的储能电池充放电电流曲线如图 4 所示。

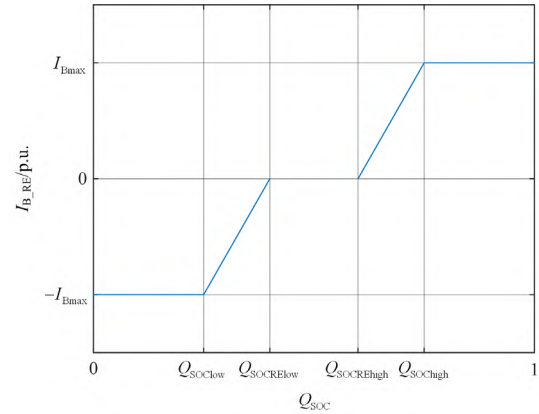


图 4 SOC 恢复时的储能电池充放电电流曲线

Fig. 4 Curve of charge and discharge current of battery under SOC recovery

由图 4 可以看出: 所设计的储能电池充放电电流曲线能根据 SOC 数值线性变化, 在整个 SOC 恢复期间平滑 BESS 有功出力, 避免充放电结束瞬间因切换控制策略使 BESS 有功出力阶跃性变化导致频率大幅度振荡。

2.5 综合控制策略

考虑到虚拟惯性控制是将频率偏差变化率乘以惯性系数后叠加到 BESS 有功功率控制环节。当频率快速恶化时, 虚拟惯性出力与电网调频需求相同, 能抑制频率的快速恶化; 而当频率开始恢复时, 虚拟惯性出力与电网调频需求相反, 对系统而言相当于二次扰动, 阻碍频率的快速恢复。

针对上述虚拟惯性出力对频率动态特性的影响机理, 设计如下综合控制策略:

1) 频率恶化时, 依据式(3)一式(5)所示下垂系数、虚拟惯性系数计算下垂出力与虚拟惯性出力后, 按式(7)、式(8)所示加权系数确定下垂出力与虚拟惯

性出力比例, 实现下垂控制与虚拟惯性控制共同参与电网一次调频;

2) 频率恢复时, 在策略 1) 基础上, 将式(8)所示 w_{in} 置零, 从而闭锁虚拟惯性出力, 实现下垂控制单独参与电网一次调频;

3) 当 $|\Delta f| > \Delta f_{setFRT}$ 时, 按式(9)所示有功电流参

考值输出有功电流以支撑频率恢复;

4) 当 $|\Delta f| \leq \Delta f_{setRE}$ 且 $Q_{SOC} \leq Q_{SOCRElow}$ 或 $Q_{SOC} \geq Q_{SOCREhigh}$ 时, 按式(13)所示充放电电流进行 SOC 恢复。

本文所述 BESS 参与电网一次调频控制框图如图 5 所示。

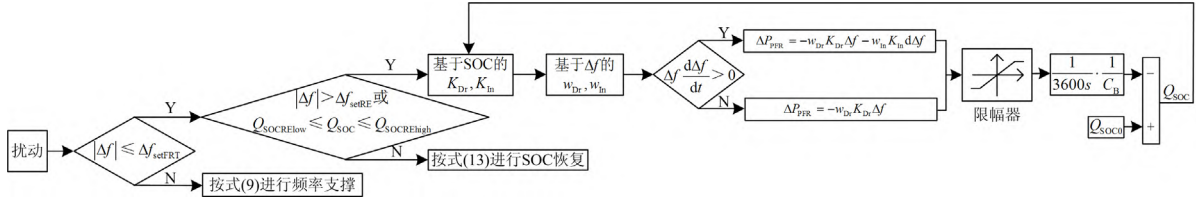


图 5 BESS 参与电网一次调频控制框图

Fig. 5 Block diagram of control strategy of BESS in primary frequency regulation

图中: C_B 为电池额定容量; Q_{SOC0} 为荷电状态初始值; s 为拉普拉斯算子。

由图 5 可以看出: 下垂系数、虚拟惯性系数、下垂出力加权系数、虚拟惯性出力加权系数在采用协调优化控制策略后, 与频率偏差、频率偏差变化率共同决定 BESS 一次调频出力的大小及方向, 并经过一段时间的积累后, 完成储能电池的充放电过程, 从而不断改变电池 SOC 并反馈给相应系数, 且能在频率极度恶化时进行频率支撑, 而在电网状态变好且 SOC 较低或较高时进行 SOC 恢复。

3 控制策略评价指标

为评估上述控制策略的调频效果及 SOC 维持效果, 采用如下评价指标^[30-32]。

1) 针对阶跃负荷扰动工况。采用最大频率偏差 Δf_m 、频率恶化速度 V_{de} 评估控制策略的调频效果; 采用 300 s 长时充放电后 SOC 偏差 $\Delta Q_{SOClong}$ 评估控制策略的 SOC 维持效果。 Δf_m 、 V_{de} 幅值越小代表控制策略的调频效果越好, $\Delta Q_{SOClong}$ 幅值越小代表控制策略的 SOC 维持效果越好。其中, V_{de} 、 $\Delta Q_{SOClong}$ 表达式如式(14)所示。

$$\begin{cases} V_{de} = \frac{|\Delta f_m|}{t_m} \\ \Delta Q_{SOClong} = Q_{SOClong} - Q_{SOCref} \end{cases} \quad (14)$$

式中: t_m 为最大频率偏差时刻; $Q_{SOClong}$ 为 300 s 长时充放电后 SOC 数值。

2) 针对随机负荷扰动工况。采用频率峰谷差 Δf_{p-v} 、频率偏差方均根值 Δf_{rms} 评估控制策略的调频效果; 采用 SOC 峰谷差 ΔQ_{SOCp-v} 、SOC 偏差方均根值 ΔQ_{SOCrms} 评估控制策略的 SOC 维持效果。 Δf_{p-v} 、

Δf_{rms} 越小代表控制策略的调频效果越好, ΔQ_{SOCp-v} 、 ΔQ_{SOCrms} 越小代表控制策略的 SOC 维持效果越好。各评价指标表达式如式(15)所示。

$$\begin{cases} \Delta f_{p-v} = f_{max} - f_{min} \\ \Delta f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_i^2} \\ \Delta Q_{SOCp-v} = Q_{SOCpeak} - Q_{SOCvalley} \\ \Delta Q_{SOCrms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{SOCi} - Q_{SOCref})^2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: f_{max} 、 f_{min} 分别为频率最大、最小值; n 为采样点个数; Δf_i 为第 i 个点的频率偏差; $Q_{SOCpeak}$ 为 SOC 峰值; $Q_{SOCvalley}$ 为 SOC 谷值; Q_{SOCi} 为第 i 个点的 SOC 数值。

3) 针对瞬时性短路故障工况。采用最大频率偏差 Δf_m 、频率峰谷差 Δf_{p-v} 评估控制策略的调频效果; 采用 SOC 峰谷差 ΔQ_{SOCp-v} 评估控制策略的 SOC 维持效果。 Δf_m 、 Δf_{p-v} 幅值越小代表控制策略的调频效果越好, ΔQ_{SOCp-v} 越小代表控制策略的 SOC 维持效果越好。

4) 针对光伏间歇性出力扰动工况。采用最大频率偏差 Δf_m 、频率峰谷差 Δf_{p-v} 评估控制策略的调频效果; 采用 300 s 长时充放电后 SOC 偏差 $\Delta Q_{SOClong}$ 评估控制策略的 SOC 维持效果。 Δf_m 、 Δf_{p-v} 幅值越小代表控制策略的调频效果越好, $\Delta Q_{SOClong}$ 越小代表控制策略的 SOC 维持效果越好。

4 仿真验证及分析

本文基于 PSCAD/EMTDC 搭建 BESS 仿真模

型, 并将 BESS 与弱交流电网相连。为便于仿真分析, 弱交流电网简化为同步发电机组带负荷的形式, 发电机组额定容量设置为 1 000 MVA, 电网额定频率设置为 50 Hz, 储能电池额定容量设置为 10 MW/1 MWh(额定容量设置较小以便仿真时更明显地观察 SOC 变化)、荷电状态初始值设置为 0.5。分别在阶跃负荷扰动、随机负荷扰动、瞬时性短路故障及光伏间歇性出力扰动工况下进行仿真, 并将所提策略与定 K 法^[25]、变 K 法^[27]、定 K&定 M 法^[29]、无储能接入时进行对比以验证调频效果及 SOC 维持效果。BESS 控制保护参数如表 1 所示。

表 1 控制保护参数

Table 1 Control and protection parameters

参数	数值
Q_{SOCmin}	0.1
Q_{SOClow}	0.3
Q_{SOCref}	0.5
$Q_{SOChigh}$	0.7
Q_{SOCmax}	0.9
$K_{Drmax}/(MW/Hz)$	20
$k_{In/Dr}$	5
$\Delta f_{setw}/Hz$	0.025
$\Delta f_{setFRT}/Hz$	0.1
$I_{max}/p.u.$	1
$\Delta f_{setRE}/Hz$	0.02
$Q_{SOCRElow}$	0.4
$Q_{SOCREhigh}$	0.6
$I_{Bmax}/p.u.$	1

4.1 阶跃负荷扰动工况

在电网中投入 15 MW 阶跃负荷, 仿真时长设置为 400 s。此工况下频率、SOC 波形分别如图 6、图 7 所示。各控制策略评价指标如表 2 所示。

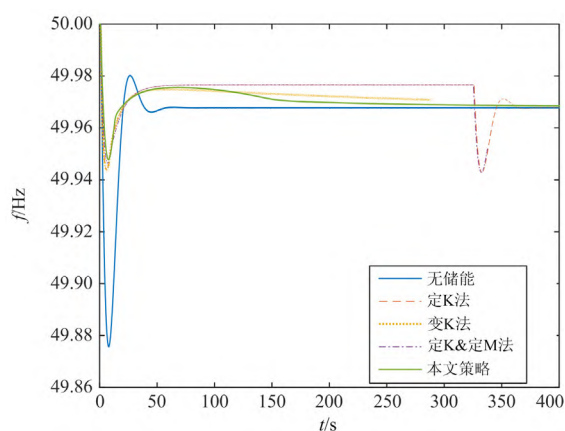


图 6 阶跃负荷扰动工况下频率波形

Fig. 6 Waveform of frequency under step load disturbance

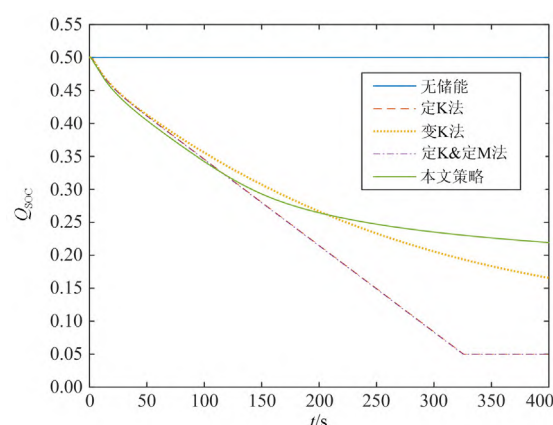


图 7 阶跃负荷扰动工况下 SOC 波形

Fig. 7 Waveform of SOC under step load disturbance

表 2 阶跃负荷扰动工况下各控制策略评价指标

Table 2 Evaluation index of control strategy under step load disturbance

控制策略	$\Delta f_m/Hz$	$V_{de}/(Hz/s)$	$\Delta Q_{SOClong}$
无储能	-0.124 2	0.018 0	—
定 K 法	-0.056 2	0.010 8	-0.416 2
变 K 法	-0.056 2	0.010 8	-0.294 4
定 K&定 M 法	-0.053 6	0.009 3	-0.416 8
本文策略	-0.052 2	0.007 8	-0.264 8

由图 6 及表 2 可以看出: 电网中投入阶跃负荷后, 4 种控制策略下频率均快速跌落。其中无储能接入时最大频率偏差幅值为 0.124 2 Hz, 频率跌落速度为 0.018 0 Hz/s, 频率跌落最严重, 调频效果最差; 而 BESS 采用本文策略时由于虚拟惯性出力阻碍了频率的快速跌落, 最大频率偏差幅值仅为 0.052 2 Hz, 跌落速度仅为 0.007 8 Hz/s, 频率跌落最轻微, 调频效果最好; 采用定 K 法、变 K 法时, 频率跌落过程中下垂系数相同导致频率波形重合, 最大频率偏差幅值均为 0.056 2 Hz, 跌落速度均为 0.010 8 Hz/s; 采用定 K&定 M 法时, 最大频率偏差幅值为 0.053 6 Hz, 跌落速度为 0.009 3 Hz/s。

且由图 6 可以看出: BESS 采用定 K 法、定 K&定 M 法会导致 326 s 时频率再次跌落, 主要因为采用固定下垂系数时未考虑储能电池的过充过放, 当电量不足 5% 时触发了保护闭锁装置使 BESS 退出运行, 对系统而言相当于二次扰动; 而采用本文策略、变 K 法时, 一次调频出力随 SOC 的减小而减小, 使频率趋于最终稳定的过程中一直平缓变化, 无较大跌落现象产生, 并在电池放完电后最终稳定在无储能接入时的频率稳态值。

由图 7 及表 2 可以看出: 300 s 阶跃负荷扰动后,

BESS 采用本文策略时 SOC 偏差幅值为 0.264 8, 耗电量最小, SOC 维持效果最好; 采用定 K 法、定 K&定 M 法时 SOC 偏差幅值分别为 0.416 2、0.416 8, 耗电量较大, SOC 维持效果较差, 且容易造成储能电池过充过放后触发保护闭锁装置; 采用变 K 法时 SOC 偏差幅值为 0.294 4, SOC 维持效果稍好。

4.2 随机负荷扰动工况

在电网中加入 300 s 随机负荷扰动, 负荷扰动曲线如图 8 所示。此工况下频率、SOC 波形分别如图 9、图 10 所示。各控制策略评价指标如表 3 所示。

由图 9 及表 3 可以看出: 电网中出现随机负荷扰动, 4 种控制策略下频率波形均在额定值 50 Hz 附近上下波动。其中无储能接入时频率峰谷差为 0.052 8 Hz, 频率偏差方均根值为 0.011 2 Hz, 频率波动最剧烈, 调频效果最差; 而 BESS 采用本文策略后, 由于虚拟惯性阻碍频率的快速变化, 频率峰谷差为 0.014 4 Hz、频率偏差方均根值为 0.003 0 Hz,

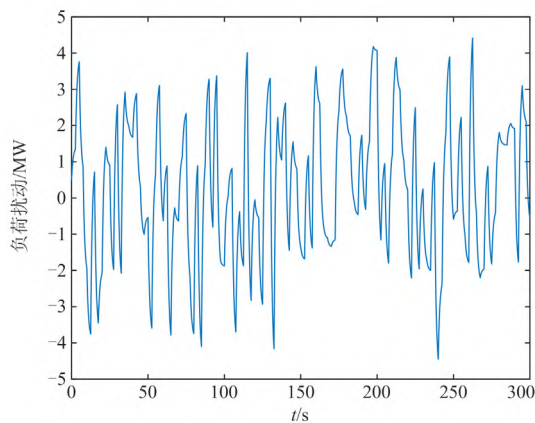


图 8 负荷扰动曲线

Fig. 8 Curve of load disturbance

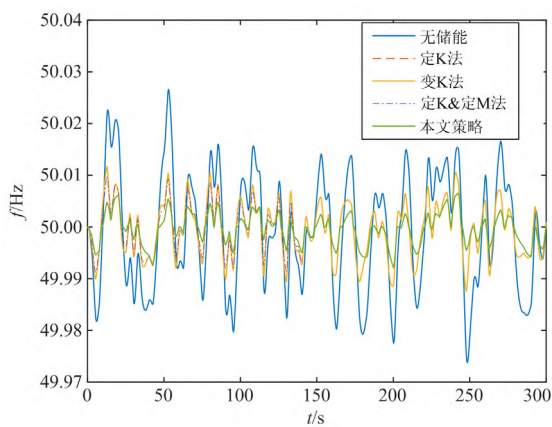


图 9 随机负荷扰动工况下频率波形

Fig. 9 Waveform of frequency under random load disturbance

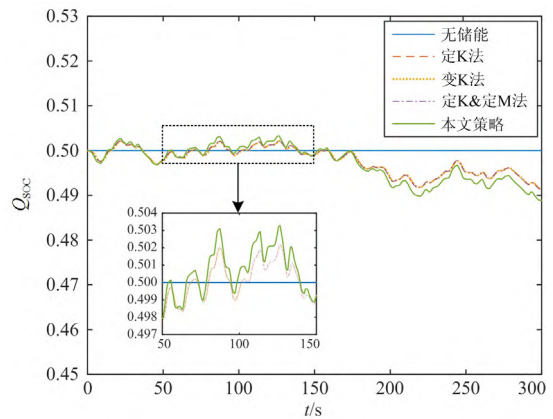


图 10 随机负荷扰动工况下 SOC 波形

Fig. 10 Waveform of SOC under random load disturbance

表 3 随机负荷扰动工况下各控制策略评价指标

Table 3 Evaluation index of control strategy under

random load disturbance

控制策略	$\Delta f_{p-v}/\text{Hz}$	$\Delta f_{\text{rms}}/\text{Hz}$	$\Delta Q_{\text{SOCp-v}}$	ΔQ_{SOCrms}
无储能	0.052 8	0.011 2	—	—
定 K 法	0.024 1	0.005 2	0.010 6	0.003 7
变 K 法	0.024 1	0.005 2	0.010 6	0.003 7
定 K&定 M 法	0.021 3	0.004 6	0.010 8	0.003 9
本文策略	0.014 4	0.003 0	0.014 3	0.004 7

频率波动最轻微, 调频效果最好; 采用定 K 法、变 K 法时, 由于此工况下下垂系数相同导致频率波形重合, 频率峰谷差均为 0.024 1 Hz, 频率偏差方均根值均为 0.005 2 Hz; 采用定 K&定 M 法时, 频率峰谷差为 0.021 3 Hz, 频率偏差方均根值为 0.004 6 Hz。

由图 10 及表 3 可以看出: 300 s 随机负荷扰动工况下, BESS 采用定 K 法、变 K 法时下垂系数相同导致 SOC 波形重合, SOC 峰谷差均为 0.010 6、SOC 偏差方均根值均为 0.003 7, SOC 维持效果较好; 采用定 K&定 M 法时 SOC 峰谷差为 0.010 8、SOC 偏差方均根值为 0.003 9; 采用本文策略时 SOC 峰谷差为 0.014 3、SOC 偏差方均根值为 0.004 7, SOC 维持效果与其余方法相差甚微, 在合理区间内。

4.3 瞬时性短路故障工况

4 s 时电池储能并网点发生三相短路故障, 故障持续时间 0.5 s, 过渡电阻 5 Ω 。此工况下频率、SOC 波形分别如图 11、图 12 所示。各控制策略评价指标如表 4 所示。

由图 11 及表 4 可以看出: 4 s 时电池储能并网点发生瞬时性短路故障, 频率快速跌落, 故障持续 0.5 s 后被清除, 频率开始恢复。其中无储能接入时

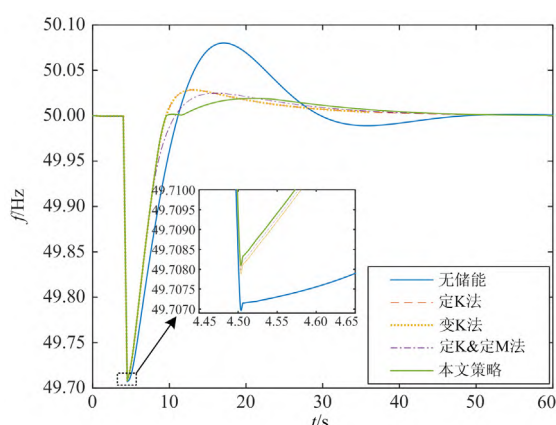


图 11 瞬时性短路故障工况下频率波形

Fig. 11 Waveform of frequency under transient short-circuit fault

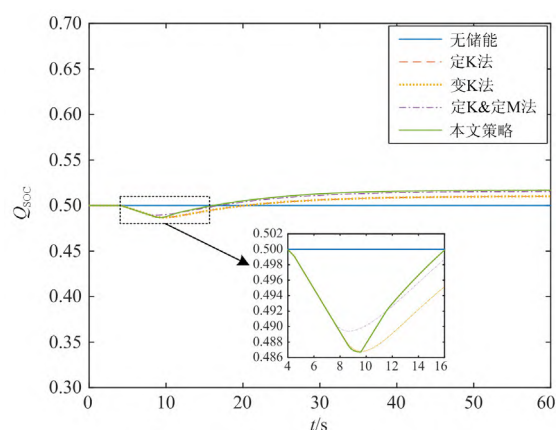


图 12 瞬时性短路故障工况下 SOC 波形

Fig. 12 Waveform of SOC under transient short-circuit fault

表 4 瞬时性短路故障工况下各控制策略评价指标

Table 4 Evaluation index of control strategy under transient short-circuit fault

控制策略	$\Delta f_{\text{nv}}/\text{Hz}$	$\Delta f_{\text{p,v}}/\text{Hz}$	$\Delta Q_{\text{SOCp,v}}$
无储能	-0.293 0	0.373 2	—
定 K 法	-0.292 1	0.320 5	0.023 5
变 K 法	-0.292 1	0.320 5	0.023 5
定 K&定 M 法	-0.292 0	0.316 8	0.026 2
本文策略	-0.291 9	0.311 0	0.030 0

最大频率偏差幅值为 0.293 0 Hz, 频率峰谷差为 0.373 2 Hz, 频率恶化最严重, 调频效果最差; 而 BESS 采用本文策略时最大频率偏差幅值为 0.291 9 Hz, 频率峰谷差为 0.311 0 Hz, 频率恶化最轻微, 调频效果最好; 采用定 K 法、变 K 法时, 调频过程中下垂系数相同导致频率波形重合, 最大频率偏差

幅值均为 0.292 1 Hz, 频率峰谷差均为 0.320 5 Hz; 采用定 K&定 M 法时最大频率偏差幅值为 0.292 0 Hz, 频率峰谷差为 0.316 8 Hz。

由图 12 及表 4 可以看出: 瞬时性短路故障工况下, BESS 采用定 K 法、变 K 法时下垂系数相同, 导致 SOC 波形重合, SOC 峰谷差均为 0.023 5, SOC 维持效果较好; 采用定 K&定 M 法时 SOC 峰谷差为 0.026 2; 采用本文策略时 SOC 峰谷差为 0.030 0, SOC 维持效果与其余方法相差甚微, 在合理区间内。

4.4 光伏间歇性出力扰动工况

1 s 时云层变薄, 电网中光伏系统增发 30 MW 有功功率; 120 s 后云层变厚, 电网中光伏系统在上述基础上减发 30 MW 有功功率, 以模拟光伏间歇性出力扰动工况。此工况下频率、SOC 波形分别如图 13、图 14 所示。各控制策略评价指标如表 5 所示。

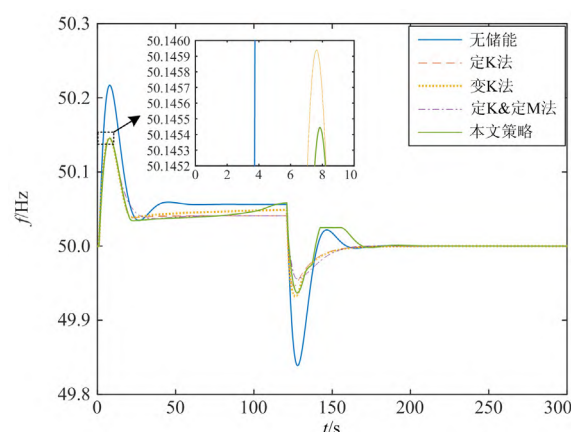


图 13 光伏间歇性出力扰动工况下频率波形

Fig. 13 Waveform of frequency under intermittent output of PV

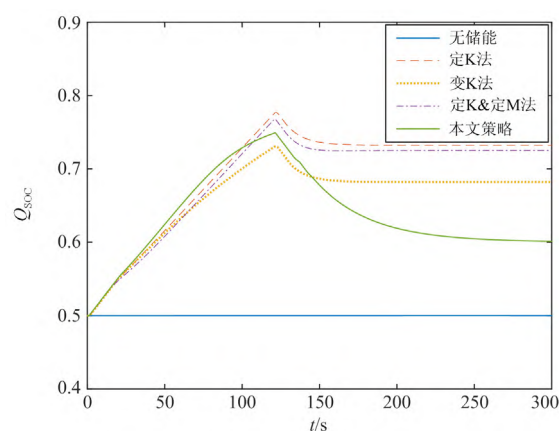


图 14 光伏间歇性出力扰动工况下 SOC 波形

Fig. 14 Waveform of SOC under intermittent output of PV

表 5 光伏间歇性出力扰动工况下各控制策略评价指标

Table 5 Evaluation index of control strategy under intermittent output of PV

控制策略	$\Delta f_m/\text{Hz}$	$\Delta f_{p_v}/\text{Hz}$	$\Delta Q_{\text{SOClong}}$
无储能	0.216 9	0.377 9	—
定 K 法	0.145 9	0.199 9	0.232 2
变 K 法	0.145 9	0.213 5	0.182 1
定 K&定 M 法	0.145 4	0.190 6	0.225 0
本文策略	0.145 4	0.208 2	0.101 2

由图 13 及表 5 可以看出: 1 s 时光伏系统增发 30 MW 有功功率, 4 种控制策略下频率均快速上升, 120 s 后光伏系统减发 30 MW 有功功率, 频率均快速跌落, 并在一段时间后稳定在额定值 50 Hz。其中无储能接入时最大频率偏差幅值为 0.216 9 Hz, 频率峰谷差为 0.377 9 Hz, 频率恶化最严重, 调频效果最差; BESS 采用定 K 法时最大频率偏差幅值为 0.145 9 Hz, 频率峰谷差为 0.199 9 Hz; 采用变 K 法时最大频率偏差幅值为 0.145 9 Hz, 频率峰谷差为 0.213 5 Hz; 采用定 K&定 M 法时最大频率偏差幅值为 0.145 4 Hz, 频率峰谷差为 0.190 6 Hz; 采用本文策略时最大频率偏差幅值为 0.145 4 Hz, 频率峰谷差为 0.208 2 Hz, 调频效果与其他方法相近。

且由图 13 及图 14 可以看出: BESS 采用本文策略后, 当调频后期电网频率良好而 SOC 数值偏高时, BESS 触发 SOC 恢复模块将多余电量释放, 放电过程中会使频率略微升高, 放电结束后频率趋于稳定。

由图 14 及表 5 可以看出: 300 s 长时充放电后, BESS 采用本文策略时 SOC 偏差幅值仅为 0.101 2, SOC 维持效果最好; 采用定 K 法、定 K&定 M 法时 SOC 偏差幅值分别为 0.232 2、0.225 0, SOC 维持效果较差; 采用变 K 法时 SOC 偏差幅值为 0.182 1, SOC 维持效果稍好。

5 结论

本文针对 BESS 参与电网一次调频问题, 提出了一种基于 SOC 与频率偏差的综合控制策略, 得出如下结论:

1) BESS 参与电网一次调频过程中, 采用固定的下垂系数易造成电池过充过放, 不仅影响电池使用寿命, 严重时将触发闭锁保护装置使频率发生二次跌落及振荡;

2) 基于能量守恒原理, 为提升电网调频性能而增大电池储能出力与维持 SOC 水平可能存在矛盾, 需要根据现场实际需求协调二者关系, 以兼顾调频

效果与 SOC 维持效果;

3) 本文所提策略在阶跃负荷扰动、随机负荷扰动、瞬时性短路故障及光伏间歇性出力扰动工况下调频指标较小, 调频效果较好, 且 SOC 维持在合理区间内, 可为 BESS 成套设备生产厂家设计控制保护策略提供参考。

参考文献

- [1] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [2] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [3] 代琼丹, 邓昕, 吴雪妍, 等. 能源互联网下综合能源服务商业模式综述[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 135-144.
DAI Qiongdan, DENG Xin, WU Xueyan, et al. Overview on integrated energy service business model under energy internet[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 135-144.
- [4] 王源, 南海鹏, 关欣. 风水储微电网优化调度策略研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 216-222.
WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin. Optimal scheduling strategy of wind-hydro-storage micro-grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 216-222.
- [5] 张宁, 薛美美, 吴潇雨, 等. 国内外能源转型比较与启示[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 113-119, 155.
ZHANG Ning, XUE Meimei, WU Xiaoyu, et al. Comparison and enlightenment of energy transition between domestic and international[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 113-119, 155.
- [6] 史谢虹, 周鹏超, 张锐, 等. 碳中和背景下欧亚地区国家能源转型的动向与展望[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 568-574.
SHI Xiehong, ZHOU Pengchao, ZHANG Rui, et al. Trends and prospects of energy transition in Eurasia in context of carbon neutrality[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 568-574.
- [7] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8, 25.
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J].

- Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8, 25.
- [8] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
- TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [9] 刘畅, 黄杨, 杨昕然, 等. 计及储能及负荷转供协同调度的城市电网弹性运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 56-66.
- LIU Chang, HUANG Yang, YANG Xinran, et al. Flexible operation strategy of an urban transmission network considering energy storage systems and load transfer characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 56-66.
- [10] 孙玉树, 李星, 唐西胜, 等. 应用于微网的多类型储能多级控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 181-188.
- SUN Yushu, LI Xing, TANG Xisheng, et al. Multi-level control strategy of multi-type energy storages for microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 181-188.
- [11] 赵伟, 袁锡莲, 周宜行, 等. 考虑运行寿命内经济性最优的梯次电池储能系统容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 16-24.
- ZHAO Wei, YUAN Xilian, ZHOU Yixing, et al. Capacity configuration method of a second-use battery energy storage system considering economic optimization within service life[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 16-24.
- [12] 刘起兴, 和识之, 卢伟辉, 等. 电池储能辅助二次调频的模型预测控制方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 119-125.
- LIU Qixing, HE Shizhi, LU Weihui, et al. Model predictive control method for battery energy storage assisting secondary frequency regulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 119-125.
- [13] 贾学翠, 李相俊, 万君, 等. 平抑电网大功率扰动的规模化电池储能系统控制方法[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 69-76.
- JIA Xuecui, LI Xiangjun, WAN Jun, et al. Control method of large-scale battery energy storage system for suppressing the disturbance of power grid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 69-76.
- [14] 郭明萱, 穆云飞, 肖迁, 等. 考虑电池寿命损耗的园区综合能源电/热混合储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 66-75.
- GUO Mingxuan, MU Yunfei, XIAO Qian, et al. Optimal configuration of electric/thermal hybrid energy storage for park-level integrated energy system considering battery life loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 66-75.
- [15] 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.
- [16] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
- LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [17] 高明杰, 惠东, 高宗和, 等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 59-64.
- GAO Mingjie, HUI Dong, GAO Zonghe, et al. Presentation of national wind/photovoltaic/energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 59-64.
- [18] 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. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 168-178.
- [19] 冯江霞, 梁军, 冯益坤. 基于风电功率 min 级分量波动特性的风电场储能容量优化计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 1-6.
- FENG Jiangxia, LIANG Jun, FENG Yikun. Optimization calculation of wind farm storage capacity based on minute-scale wind power characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 1-6.
- [20] 贾成真, 王灵梅, 孟恩隆, 等. 基于风电场集中储能的风储柔性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 30-37.
- JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Research on flexible control strategy based on the centralized storage joint with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 30-37.
- [21] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生

- 能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10, 20.
- LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10, 20.
- [22] 苗福丰, 唐西胜, 齐智平. 风储联合调频下的电力系统频率特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2209-2216.
- MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Analysis of frequency characteristics of power system based on wind farm-energy storage combined frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2209-2216.
- [23] YAN G G, LIU D Y, LI J H, et al. A cost accounting method of the Li-ion battery energy storage system for frequency regulation considering the effect of life degradation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 43-51.
- [24] LI Y, HE L, LIU F, et al. Flexible voltage control strategy considering distributed energy storages for DC distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 163-172.
- [25] 邓睿. 电池储能技术在电力系统调频中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- DENG Rui. Research on frequency regulation for a power system with battery energy storage[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] LI P Q, TAN Z X, ZHOU Y J, et al. Secondary frequency regulation strategy with fuzzy logic method and self-adaptive modification of state of charge[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 43575-43585.
- [29] 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.
- [30] 吴启帆, 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.
- [31] 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.
- [32] 王育飞, 杨铭诚, 薛花, 等. 计及 SOC 的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 192-198, 219.
- WANG Yufei, YANG Mingcheng, XUE Hua, et al. Self-adaptive integrated control strategy of battery energy storage system considering SOC for primary frequency regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 192-198, 219.

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2022-01-06

作者简介:

刘英培(1982—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为直流输电、直流配电技术、新能源发电与并网技术等; E-mail: liuyingpei_123@126.com

田仕杰(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电池储能系统控制策略、电力系统分析等; E-mail: 2831605371@qq.com

梁海平(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电与并网技术、电力系统安全防御与恢复控制等。E-mail: lianghaiping@aliyun.com

(编辑 葛艳娜)