

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.132

中图分类号: TM62

文献标志码: A

# 面向电网电压主动支撑的电池储能系统 自治控制方法

郭 辉<sup>1</sup>, 杨华磊<sup>1</sup>, 冯海波<sup>2</sup>, 崔东亚<sup>2</sup>, 张 毅<sup>3</sup>

(1.河南九域恩湃电力技术有限公司, 郑州 450000; 2.河南合众电力技术有限公司, 郑州 450001;  
3.国网湖北省电力公司武汉供电公司, 武汉 430000)

**摘要:** 随着可再生能源渗透率的不断提高, 虽然碳排放降低, 但其固有间歇性和波动性也给电力系统带来了惯性和安全经济性下降等问题, 电池储能(BES(battery energy storage))技术是解决这一问题的重要手段之一。基于此, 提出1种面向主动支撑电网电压的基于全状态反馈的电池储能系统自治控制方法。首先, 基于 $K_v(V_g-v_g)$ 下垂和虚拟电容 $C$ 惯量技术, 设计静态功率支撑控制和动态电压支撑控制模块, 使得电池储能系统可提供电网功率(静态)支撑和电压(动态)支撑; 其次, 采用全状态反馈方法将电压控制器和电流控制器合并, 使得所提控制器设计更系统化和灵活化, 并可减小单相接地故障引起的电压振荡; 然后, 为了维持电池储能荷电状态SOC(state-of-charge)的稳定, 设计基于调节因子 $\alpha$ 的电池储能SOC控制器, 以进一步提升电池储能系统的自治运行能力; 最后, 通过MATLAB和半实物仿真平台对14节点直流系统进行案例研究, 仿真结果验证了所提方法在静态功率、动态电压双支撑及单线接地故障时的有效性。研究表明, 所提方法下电池储能系统可连接到电网中的任何关键节点, 通过本地监测扰动可主动支撑电网公共连接点电压, 不受扰动影响, 且可独立运行控制。此外, 该方法还可防止暂态低压事故时变流器过流等问题, 最终实现BES的自治运行能力。

**关键词:** 电池储能系统; 直流微电网; 电网支撑; 可再生能源的间歇性; 虚拟惯量

## Autonomous Control Method for Battery Energy Storage System Oriented to Active Support of Grid Voltage

GUO Hui<sup>1</sup>, YANG Hualei<sup>1</sup>, FENG Haibo<sup>2</sup>, CUI Dongya<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>3</sup>

(1. Henan Jiuyu EPRI Electric Power Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 2. Henan United Electric Power Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 3. Wuhan Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** With the increasing penetration rate of renewable energy, carbon emissions are reduced. However, the inherent intermittency and volatility of renewable energy also bring problems such as inertia, security and economy to the power system. The battery energy storage(BES) technology has become one of the important means to solve this problem. Under this background, an autonomous control method for BES system oriented to the active support of grid voltage is proposed based on full-state feedback. First, based on sagging  $K_v(V_g-v_g)$  and the virtual capacitor  $C$  inertia technology, static power support control and dynamic voltage support control modules are designed, so that the BES system can provide power(static) support and voltage(dynamic) support. Second, the voltage controller and current controller are combined by using the full-state feedback method, which makes the design of the proposed controller more systematic and flexible and reduces the voltage oscillations caused by single-phase ground fault. Third, in order to maintain the stability of state-of-charge(SOC) of BES, a BES SOC controller based on regulatory factors is also

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2022-11-15, 2022-12-22,  
2023-02-27, 2023-03-23; 录用日期: 2023-03-31; 网络首发日期: 2023-07-03

designed to further improve the autonomous operation capability of the BES system. Finally, a case study of a 14-node DC system was carried out based on MATLAB and a semi-physical simulation platform, and simulation results

verified the effectiveness of the proposed method in the cases of double-support of static power and dynamic voltage and single-line ground fault. With this method, the BES system can be connected to any key node in the grid, and the voltage at the point of common coupling in the grid can be actively supported through the local monitoring of disturbance, which is not affected by disturbance and can be operated and controlled independently. In addition, this method can also prevent the converter from overcurrent during transient low-voltage accidents, so that the autonomous operation capability of BES is realized.

**Keywords:** Battery energy storage (BES) system; DC microgrid; power grid support; intermittency of renewable energy; virtual inertia

随着我国“双碳”战略的稳步推进,可再生能源如光伏 PV(photovoltaic)、风力发电机等越来越多地接入电力系统<sup>[1-3]</sup>。据国际能源署预测,全球光伏安装量预计每年将增长约 13%,约占电力需求的 1/3<sup>[4-6]</sup>。然而,高渗透率 PV 的不确定性和间歇性给电力系统电压控制带来了重大挑战,如:大规模可再生能源出力的强扰动特性会导致电力系统电压剧烈波动,甚至不稳定等问题。在此背景下,电池储能 BES(battery energy storage)技术被认为是平抑大规模可再生能源间歇性和波动性的重要手段之一,并可作为实现可再生能源高渗透的锚定源<sup>[7-9]</sup>。

针对含储能的高渗透率可再生能源电力系统电压控制问题,国内外学者进行了一些研究,并提出了多种解决方法<sup>[10-19]</sup>。文献[17-18]针对含高渗透率 PV 的电力系统,提出了 1 种基于移动平均模型和双电层电容的储能控制方法,以解决 PV 输出功率骤升引起的功率电压问题,但该方法无法解决光伏输出功率突然下降引起的功率电压问题;文献[19-20]提出了 1 种利用 BES 系统跟踪可再生能源的输出功率,以平滑可再生能源输出功率的控制方法,根据可再生能源扰动可自动调节电池储能系统的输出及电池荷电状态 SOC(state-of-charge),但该方法需要实时测量可再生能源输出功率,这对电池储能系统的安装位置有较高要求,且控制方法高度依赖通信网络,因此,电池储能系统只能响应来自本地可再生能源的输出功率扰动。为了降低电池储能控制系统对通信网络的依赖性,提升电池储能的响应能力,国内外学者提出了基于虚拟同步发电机 SGs(synchronous generators)的电池储能功率控制策略,该方法可极大提升电池储能的惯性和调速器响应能力,使得电池储能具备类似传统交流发电机的调频能力。文献[21]提出了 1 种适用于电

池储能系统三相逆变器的控制方法,该方法通过调整直流端口电容的电压,可为电池储能系统变流器直流侧提供一定的虚拟惯量;文献[22]提出了 1 种基于下垂增益的电池储能系统变流器功率控制方法,以补偿系统电压波动期间的功率不平衡,然而,这种方法在控制策略中引入了电压微分项,可能会引起控制系统的高频动态变化;文献[23]提出了 1 种基于 SOC 的电池储能系统虚拟惯量控制方法,可根据电池储能系统的 SOC 自动调整下垂增益,以提升控制系统的稳定性。综上所述,目前已有电池储能系统控制方法存在以下不足:①仅能单独调节系统惯量或下垂增益,不能同时调节这 2 个量,控制调节难度大,控制效果较差;②依赖本地可再生能源输出功率扰动的监测,不能接收二次控制的指令,且控制器的响应速度和阻尼设计不合理,使得控制器设计复杂,灵活性低;③需要电池储能系统与可再生能源组合使用,且主要是为了平滑可再生能源出力的波动性,不具备独立自治运行的能力。

基于此,本文提出 1 种可主动支撑电网电压的电池储能系统自治控制方法,以提升 BES 变流器的惯量和下垂增益自动调节能力,从而实现 BES 对电网电压主动电压功率支撑。

## 1 面向电网电压主动支撑的 BES 自治控制建模

图 1 为所提电池储能系统自治控制框图,图中:  $v_g$  为直流母线电压;  $V_g$  为  $v_g$  的标称值;  $K_v$  为下垂增益;  $V_{bat}$  为电池电压;  $i_{bo}$  和  $i_{bo}^*$  分别为变流器输出电流及其参考值;  $L_b$  为滤波器电感;  $R_b$  为寄生电阻;  $R_v$  为虚拟电阻,是正常数;  $P_{set}$  为功率设

定值;  $\beta(\cdot)$  为静态支撑调整增益;  $i_{ss}$  为电池电流;  $I_{SOC}$  为增量电流;  $SOC_{set}$  为 SOC 的设定值。可以看出, 所提方法具备动态电压支撑和静态功率支撑 2 个电网支撑模块。动态电压支撑通过模拟电容  $C$  产生惯量响应; 静态功率支撑由  $K_v(V_g - v_g)$  产

生下垂响应, 当可再生能源出现出力扰动时, 会影响直流母线电压  $v_g$ , 当 BES 探测到这些变化时会自动做出相应的反应, 此外, 所提方法还限制变流器电流, 以保护其免受暂态低压扰动, 并维持电池的 SOC。

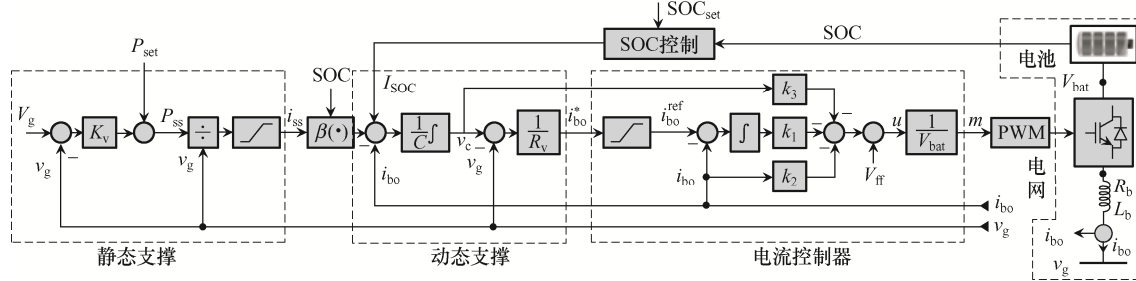


图 1 所提电池储能系统自治控制框图

Fig. 1 Block diagram of autonomous control of proposed battery energy storage system

对于电池储能系统, 通常采用双向全桥电压源变流器 VSC(voltage-source converter), 本文主要对其进行控制建模和方法设计的研究。假设  $m(t)$  是变流器的脉宽调制 PWM(pulse width modulation)信号, 则变流器的平均输出电压为  $v_{bo}(t) = m(t)V_{bat}$ 。本文定义  $u(t) = m(t)V_{bat}$  作为控制输入, 则

$$\frac{d}{dt} i_{bo}(t) = -\frac{R_b}{L_b} i_{bo}(t) + \frac{1}{L_b} u(t) - \frac{1}{L_b} v_g(t) \quad (1)$$

图 2 为所提 BES 系统及其控制器的等效电路, 该模型基于开关周期内信号的平均值推导得出<sup>[12]</sup>。

如图 2(a)所示, 对电网的动态电压支撑是通过模拟电容来实现的, 则有

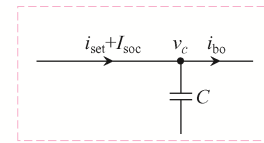
$$I^* - i_{bo} = C \dot{v}_c \quad (2)$$

式中:  $I^* = \beta(i_{ss}, SOC) + I_{SOC} = i_{set} + I_{SOC}$ , 由较慢的外控制环提供, 符合虚拟电容的动态特性, 其中,  $i_{set}$  为电流设定值;  $\dot{v}_c$  为电容器  $C$  的电压  $v_c$  的变化率。

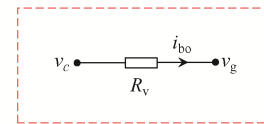
图 2(b)为电压环的等效电路。为了给电网电压提供支撑, 直流母线电压  $v_g$  和电容电压  $v_c$  必须耦合, 这是由电压回路来实现的。电压控制回路模型为

$$v_c - v_g = i_{bo}^* R_v \quad (3)$$

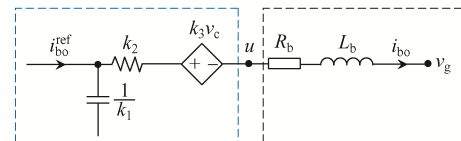
由于电流控制回路速度快, 变流器输出电流  $i_{bo}$  在电压回路的时间尺度上等于参考值  $i_{bo}^*$ , 因此式(3)中  $R_v$  为虚拟电容和直流电压之间的虚拟电



(a) 模拟电容的等效电路



(b) 电压环的等效电路( $v_c$ 和 $v_g$ 之间)



(c) 电流环的等效电路

图 2 所提控制系统及其控制器的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuits of the proposed control system and its controller

阻。电压环控制一般采用 PI 控制器, 这会使控制设计复杂化, 也会影响控制器的稳定裕度。静态支撑通过下垂函数可表示为

$$P_{ss} = P_{set} + K_v(V_g - v_g) \quad (4)$$

电流控制回路必须快速将变流器电流  $i_{bo}$  严格调节至参考值  $i_{bo}^*$ , 本文采用具有增益  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  的全状态反馈来实现完全控制。电池的 SOC 为可用充电容量与其总容量的比值, 即

$$\begin{aligned} \text{SOC}(t) &= \text{SOC}_0 - \frac{1}{Q} \int_0^t i_{\text{bo}}(t) dt \\ \frac{d}{dt} \text{SOC}(t) &= -\frac{1}{Q} i_{\text{bo}}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\text{SOC}_0$  为 SOC 的初始值。SOC 控制器产生增量电流  $I_{\text{SOC}}$ , 以将 SOC 驱动至其设定值  $\text{SOC}_{\text{set}}$ 。该参数调整 SOC 控制的强度, 并根据 SOC 状态调整静态支撑的水平。

## 2 全状态反馈控制器的设计

所提控制器存在 10 个需要设计的参数:  $C$ ,  $R_v$ ,  $K_v$ , 电流控制增益  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ , SOC 控制增益 ( $k_{1\text{SOC}}$ 、 $k_{2\text{SOC}}$ ), 及 SOC 驱动参数 ( $\alpha$ 、 $\beta$ )。

(1) 虚拟电容  $C$ 。电容产生的惯量功率  $P_{\text{dyn}}$  为

$$P_{\text{dyn}} = -Cv_c \dot{v}_c \approx -Cv_g \dot{v}_g \approx -CV_g \dot{V}_g \quad (6)$$

电压  $V_g$  及其变换率  $\dot{V}_g$  和所需的支撑水平将确定  $C$  的大小。

(2) 虚拟电阻  $R_v$ 。对于直接连接到直流母线的实际电容器, 电容器电压等于直流系统电压, 即电阻  $R_v$  为 0。但本文必须考虑  $R_v \neq 0$  的情况, 以允许控制器正常工作。由此产生的 RC 电路的截止频率  $f_c = 1/(2\pi R_v C)$ , 因此,  $R_v$  应足够小, 以获得足够大的带宽。然而, 过小的  $R_v$  会增加对噪声和  $v_g$  急剧跳变的敏感性, 并导致过度调制, 故  $R_v$  的建议值在 0.01~0.10 p.u. 之间。

(3) 下垂增益  $K_v$ 。本文设定  $K_v = P_{\text{rated}} / \Delta V_g$ , 其中:  $P_{\text{rated}}$  为 BES 的额定功率;  $\Delta V_g$  为直流母线的允许电压偏差。该模块的输出是通过极限电压暂态条件下的限制器进行调节。

(4) 电流控制增益  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 。本文采用线性二次型跟踪器技术来设计电流控制增益。假设  $x_1(t) = \int e(t) dt = \int [-i_{\text{bo}}(t) + i_{\text{bo}}^{\text{ref}}(t)] dt$ ,  $x_2(t) = i_{\text{bo}}(t)$ ,  $x_3(t) = v_c(t)$ , 则

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_2 + \frac{x_3}{R_v} - \frac{v_g}{R_v} \\ \dot{x}_2 = -\frac{R_b}{L_b} x_2 + \frac{u}{L_b} - \frac{v_g}{L_b} \\ \dot{x}_3 = -\frac{x_2}{C} + \frac{i_{\text{ss}} + I_{\text{SOC}}}{C} \\ u = -k_1 x_1 - k_2 x_2 - k_3 x_3 + V_{\text{ref}} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $V_{\text{ref}}$  为恒定前馈项, 表示软启动,  $V_{\text{ref}} = v_g(0) + k_3 v_c(0)$ ,  $v_g(0)$  为滤波后的电网电压, 以改善电流限制。其控制目标是使得  $x_2$  在存在干扰的情况下仍能跟踪其参考值  $\dot{x}_2$ 。该问题属于鲁棒跟踪问题, 可通过对式(7)求导获得线性二次调节器 LQR(linear quadratic regulator)。令  $z_i(t) = \dot{x}_i(t)$ ,  $i=1,2,3$ ;  $w(t) = \dot{u}(t)$ , 则

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -z_2 + \frac{1}{R_v} z_3 \\ \dot{z}_2 = -\frac{R_b}{L_b} z_2 + \frac{1}{L_b} w \\ \dot{z}_3 = -\frac{1}{C} z_2 \\ w = -k_1 z_1 - k_2 z_2 - k_3 z_3 \end{cases} \quad (8)$$

电流指令  $i_{\text{ss}}$  和  $I_{\text{SOC}}$  的动态速度较慢, 而电网电压  $v_g$  为直流量, 因此  $\frac{d}{dt} v_g = \frac{d}{dt} i_{\text{ss}} = \frac{d}{dt} I_{\text{SOC}} = 0$ , 式(8)可统一为

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bw(t) \\ w(t) = -Kz(t) \end{cases} \quad (9)$$

其控制目标是将  $z_i(t) = e(t)$  调节至 0, 则控制成本  $J$  表示为

$$J = \int_0^{\infty} [q_1 e^2(t) + q_2 z_2^2(t) + q_3 z_3^2(t) + w^2(t)] dt \quad (10)$$

此外, 还可系统地调整参数  $q_i$ , 以设计  $K$ , 从而在电流控制中实现快速平稳响应。

(5) SOC 控制增益  $k_{1\text{SOC}}$ 、 $k_{2\text{SOC}}$ 。由于该回路速度较慢, 在设计过程中, 动态电压支撑和电流控制回路被视为一个整体。设  $x_1(t) = \int (-\text{SOC}(t) + \text{SOC}_{\text{set}}) dt$ ,  $x_2(t) = \text{SOC}(t)$ ,  $u(t) = I_{\text{SOC}}(t)$ 。其状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_2 + \text{SOC}_{\text{set}} \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{Q} u \\ u = -k_{1\text{SOC}} x_1 - k_{2\text{SOC}} x_2 \end{cases} \quad (11)$$

其控制目标是使得  $x_2$  在存在干扰的情况下仍能跟踪其参考值  $\dot{x}_2$ 。类似上述推导, 将  $z_i(t) = e(t)$  调节至 0, 则控制成本为

$$J = \int_0^{\infty} [q_1 e^2(t) + q_2 z_2^2(t) + w^2(t)] dt \quad (12)$$

(6) SOC 控制率  $\alpha$ 。其可调整充电、放电的速率, 本文设置为

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{SOC}_a < \text{SOC} < \text{SOC}_b \\ 1 + \gamma |\text{SOC} - \text{SOC}_{\text{set}}| & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $\gamma$  为 1 个正常数。

(7) 静态支撑调整增益  $\beta$ 。根据 SOC 设定点的距离调整静态支撑项, 并防止可能地耗尽或过度充电,  $\beta$  可表示为

$$\beta = \begin{cases} 1 & v_g < V_g, \text{SOC}_a \leq \text{SOC} \\ \frac{\text{SOC} - \text{SOC}_{\min}}{\text{SOC}_a - \text{SOC}_{\min}} & v_g < V_g, \text{SOC}_{\min} < \text{SOC} < \text{SOC}_a \\ 0 & v_g < V_g, \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\min} \\ 1 & v_g \geq V_g, \text{SOC} \leq \text{SOC}_b \\ \frac{\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}}{\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}_b} & v_g \geq V_g, \text{SOC}_b < \text{SOC} < \text{SOC}_{\max} \\ 0 & v_g \geq V_g, \text{SOC}_{\max} < \text{SOC} \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\text{SOC}_{\min}$  和  $\text{SOC}_{\max}$  分别为 SOC 的最小限值和最大限值。当 SOC 跨越下、上边界  $\text{SOC}_a$  和  $\text{SOC}_b$  时, 控制器开始减少静态支撑。

### 3 仿真分析与实验验证

#### 3.1 仿真参数

本文测试系统采用 1 个 14 节点的直流电力系统, 其包括节点 7 处的 15 kW 的 PV 系统、节点 8 处的电池储能系统以及不同节点的负载。负载有 3 种类型: 恒电阻( $R$  型)、恒功率( $P$  型)和恒电流( $I$  型)。测试系统的标称电压为 400 V, 直流电力系统通过 18 kV·A 的三相变流器连接到交流电力系统。测试系统的相关参数见表 1 和表 2, 系统结构如图 3 所示。

图 3 中, 15 kW PV 变流器由 1 个  $C_{\text{PV}} = 500 \text{ F}$  的直流端口电容和  $L_{\text{PV}} = 2.5 \text{ mH}$ 、 $R_{\text{PV}} = 50 \text{ m}\Omega$  的输出滤波器组成。测试系统中控制结构的设计参数为:  $k_{1\text{PV}} = -1333.35$ ,  $k_{2\text{PV}} = 2.82$ ,  $k_{3\text{PV}} = 237.13$ ,  $k_{4\text{PV}} = -1.14$ ,  $k_{5\text{PV}} = 829.43$ ,  $k_{6\text{PV}} = 0.59$ 。测试系统采用三

表 1 测试系统直流线路相关参数

( $r = 0.6 \Omega/\text{km}$ ,  $l = 0.21 \text{ mH}/\text{km}$ )

Tab. 1 DC line-related parameters of test system

( $r = 0.6 \Omega/\text{km}$ ,  $l = 0.21 \text{ mH}/\text{km}$ )

线路	长度/km	$R/\Omega$	$L/\text{mH}$	
1	电网节点	1.20	0.61	0.21
1	2	0.55	0.34	0.12
2	3	0.29	0.19	0.16
3	4	2.00	1.32	0.49
4	5	0.80	0.52	0.20
5	6	0.92	0.56	0.18
6	7	0.35	0.21	0.15
7	8	0.65	0.36	0.12
8	9	1.72	1.20	0.44
9	10	1.55	1.30	0.41
10	11	0.29	0.18	0.15
11	12	0.50	0.37	0.25
12	13	0.76	0.49	0.20
13	14	0.41	0.21	0.20
14	1	2.59	1.55	0.30

表 2 测试系统直流负载相关参数

Tab. 2 DC load-related parameters of test system

负载类型	电网节点	数值/kW
恒功率	5	1.90
	7	0.86
	11	0.50
恒电阻	1	1.20
	2	1.40
	6	2.20
	8	0.50
	9	1.10
	12	2.00
	13	0.64
恒电流	3	1.40
	4	0.52
	10	3.00
	14	0.60

相 VSC 和  $dq$  轴电流控制方法。直流端口电容为 1.2 mF, 滤波器为 2.5 mH 和 50 m $\Omega$ 。VSC 通过 PI 控制器( $K = -0.2848$ 、 $\tau = 1/75$ )调节直流参考电压  $V_{\text{dc}}^* = 400 \text{ V}$ 。此外, VSC 还可使用下垂机制( $K_q = -0.0577$ 、 $I_q^* = -7.84 \text{ A}$ )提供电压、无功支撑。通过最优控制设计电流控制增益  $k_{1\text{inv}} = -1000$ 、 $k_{2\text{inv}} = 2.26$ 。另外, 本文采用的三相同步参考系下锁相环

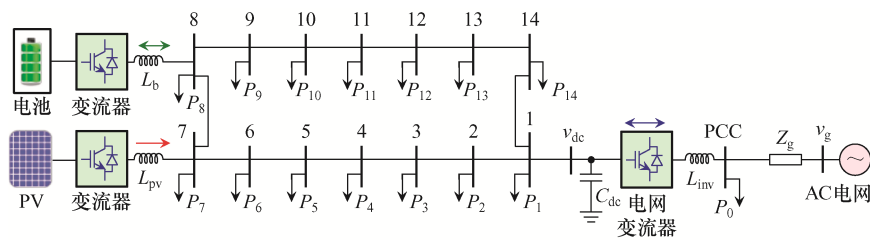


图 3 测试系统的结构

Fig. 3 Structure of test system

PLL(phase-locked loop)参数  $\mu_1 = \mu_3 = 200$ ,  $\mu_2 = 5000$ 。所提控制器安装在节点 8 处的 600 V 10 kW 电池储能系统的变流器上, 变流器为全桥 VSC, 含 1 个  $L_b=2.5$  MH、 $R_b=50$  m $\Omega$  的输出滤波器, 其额定电流为 25 A, 模拟电容  $C=100$  mF, 虚拟电阻  $R_v=0.10$   $\Omega$ , 可使 RC 电路的带宽在 16 Hz 左右。对于静态支撑, 当直流电压偏离 20 V (即 5%)时, BES 提供其额定功率 10 kW, 因此  $K_v=500$ 。交流电力系统建模为电网阻抗  $Z_g=0.12+j1.2$   $\Omega$  的三相交流电源。公共耦合点 PCC(point of common coupling)处的标称交流电压为 208 V, 并连接滞后功率因数为 0.7 的 7.07 kV·A 本地交流负载  $P_0$ 。变流器的开关频率为 10 kHz。

### 3.2 仿真结果与分析

#### 3.2.1 动态电压支撑能力验证

为了验证所提方法下 BES 对电网动态电压支撑能力, 本文首先设定  $K_v=0$ , 即静态支撑被禁用, 且只研究所提控制的惯量特性, 并与实际电容进行仿真比较。图 4 为光伏输出功率分别在  $t=0.50$  s 和  $t=1.25$  s 发生阶跃变化时所提控制器的响应。可以看出, 在无补偿器的情况下, 整个测试系统中节点上的电压均会发生波动和偏移。此外, 观察电池及电网变流器直流侧和交流侧的电压发现, 所提方法下 BES 能够像实际电容器一样工作, 有效抑制系统电压波动。

图 5 为  $t=0.50$  s 时, 4.0 kW 的负载连接到节点 9 并在  $t=1.50$  s 断开时的控制响应。可以看出, 在无补偿的情况下, 负载变化会导致电力系统发生剧烈的电压波动, 而所提方法下 BES 可像实际电容一样有效消除电压波动。

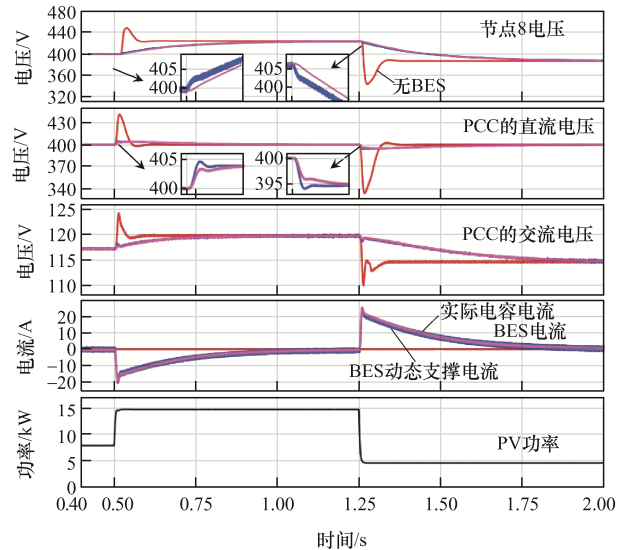


图 4 BES 系统对抑制光伏功率突变引起电压波动响应  
Fig. 4 Response of BES system to voltage fluctuations caused suppressing abrupt PV power changes

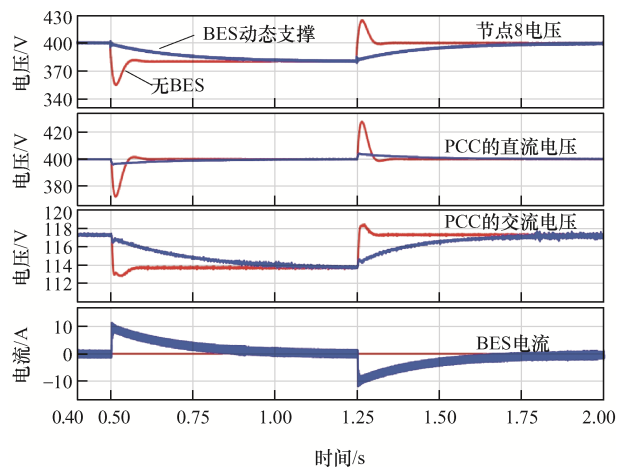


图 5 BES 系统对抑制负载突变引起电压波动的响应  
Fig. 5 Response of BES system to voltage fluctuations caused by suppressing abrupt load changes

#### 3.2.2 完全支撑能力验证

测试案例中下垂增益  $K_v=400$ 。图 6 为光伏输出功率在  $t=0.50$  s 和  $t=1.25$  s 发生突变时的控制系

统响应,并与单独动态电压支撑进行了比较分析。可以看出,启用静态支撑功能后,当电压稳定在 400 V 以下时, BES 持续供电;当电压稳定在 400 V 以上时, BES 吸收电能,因此电压限制在较小的范围内。由于电网变流器始终控制着 PCC 的直流电压,所以静态支撑对此特定节点无较大影响。

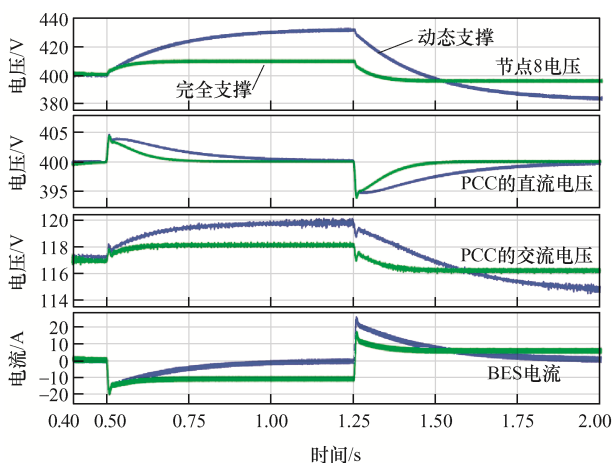


图 6 BES 对光伏功率变化引起的低压电路(动态)和偏移(静态)的响应

Fig. 6 Response of BES to low-voltage circuit (dynamic) and offsets (static) caused by PV power changes

图 7 为在  $t=0.50$  s、 $t=1.25$  s 时连接、断开 4.0 kW 负载时的控制系统响应。可以看出,在静态支撑下 BES 可提供稳态支持,并将电压保持在较窄范围内。

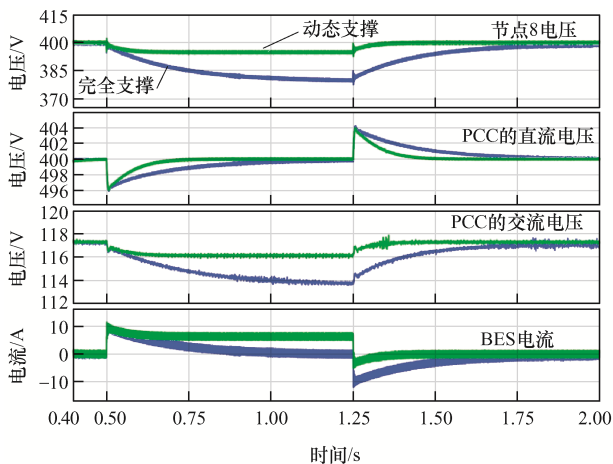


图 7 BES 对负载变化引起的低压电路(动态)和偏移(静态)的响应

Fig. 7 Response of BES to low-voltage circuit (dynamic) and offsets (static) caused by load changes

图 8 和图 9 分别为光伏发电和负载变化期间的电网变流器电流变化,仿真结果显示, BES 的动态电压支撑起到了缓冲电网变流器突然应力的作用,在启用静态支撑的情况下,电网变流器在功率扰动期间稳定运行时的波动较小。

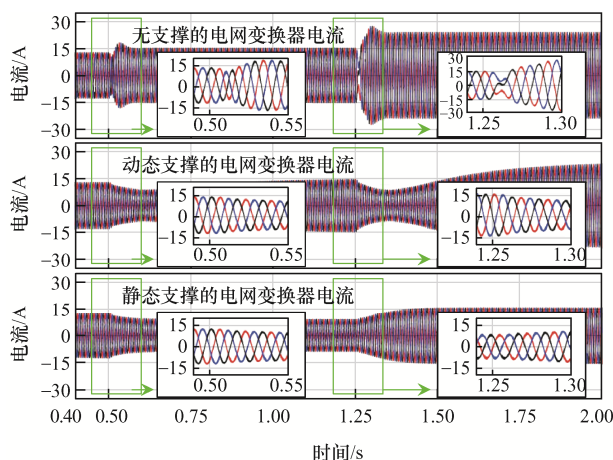


图 8 光伏发电过程中的电网变流器电流

Fig. 8 Grid converter current during PV power generation

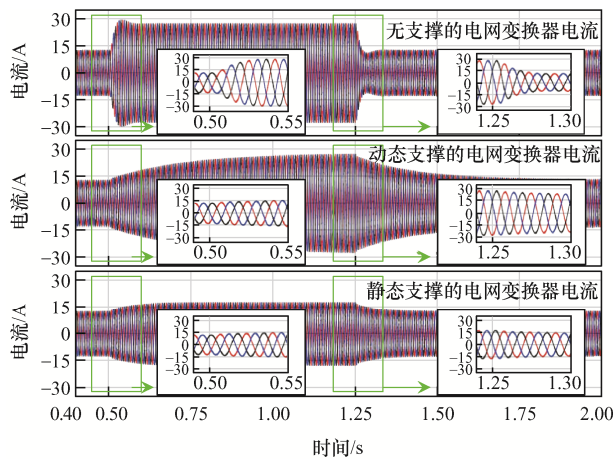


图 9 负载变化期间的电网变流器电流

Fig. 9 Grid converter current during load changes

### 3.2.3 交流故障测试

图 10 为电网阻抗  $Z_g$  的 1/2 处发生单相接地故障时系统的响应。可以看出,故障在  $t=0.40$  s 发生,在  $t=0.50$  s 清除;无 BES 支撑时,整个系统会发生电压振荡;而有 BES 支撑时,连接点附近的电压振荡显著减少。

### 3.2.4 SOC 控制器测试

为了在较短时间内仿真验证所提 SOC 控制的有效性,本文采用了 1 个容量  $Q=0.1$  A·h 的小电

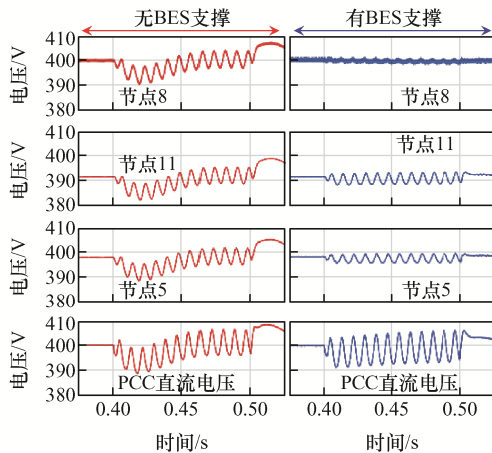


图 10 A 相 L-G 故障期间系统响应

Fig. 10 Response of system during L-G fault in phase A

池。图 11 为当  $q_1$  和  $q_2$  分别在  $10^{-7} \rightarrow 10^{-1.8}$  和  $10^1 \rightarrow 10^{0.75}$  之间增加时 SOC 环路的闭环极点。可以看出, 闭环极点  $-0.014 \pm j0.013$  的控制增益为:  $k_{1SOC} = 0.1334$ ,  $k_{2SOC} = -10.08$ 。SOC 限值为:  $SOC_{set} = 0.5$ ,  $SOC_a = 0.3$ ,  $SOC_b = 0.7$ ,  $SOC_{min} = 0.2$ ,  $SOC_{max} = 0.8$ ,  $\gamma = 2$ 。

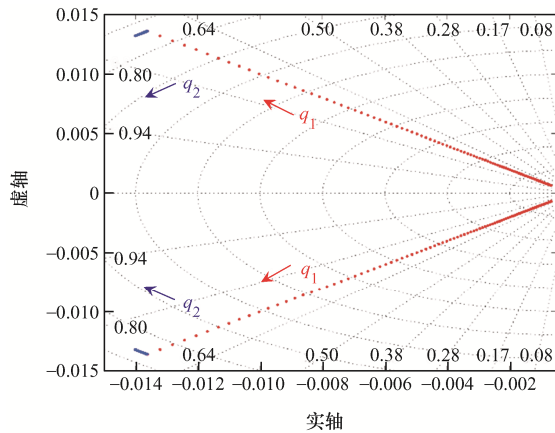


图 11 BES 变换器 SOC 的控制增益设计

Fig. 11 Design of SOC control gains for BES converter

图 12 为 BES 系统对光伏功率上升的响应。可以看出, 由于母线电压  $v_g > 400$  V, BES 通过吸收系统功率提供静态支持, 从而导致 SOC 上升。SOC 控制的参考电流  $I_{SOC}$  也会上升, 表明电池应该放电以驱动 SOC 回到其标称值。当 SOC 达到 70% 边界条件时, 控制器开始减小静态支撑; 当 SOC 达到 80% 上限时, 控制器禁用静态支撑。

### 3.3 实验验证

进一步实验验证所提方法的有效性。实验器件包括 1 个在最大功率点工作的 Agilent E4360A 光伏

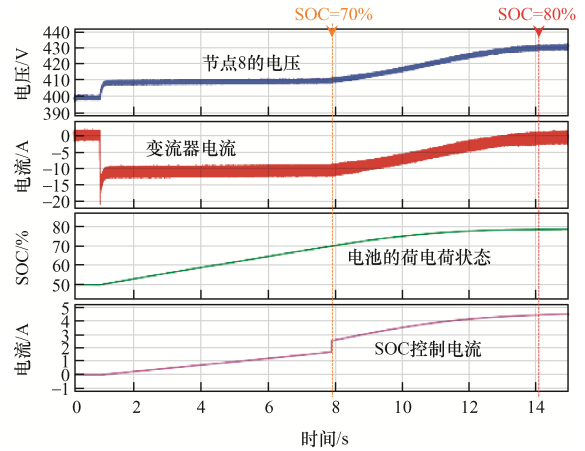
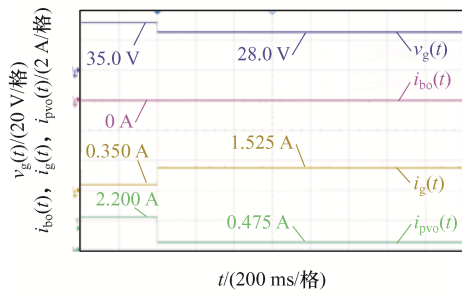


图 12 所提 BES 系统 SOC 控制的响应

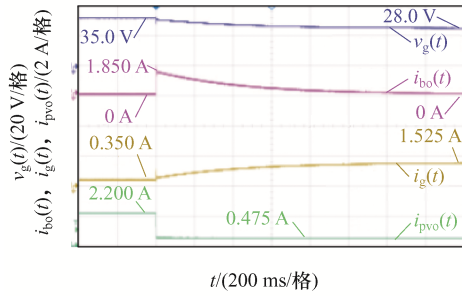
Fig. 12 SOC control response of proposed BES system

仿真器、1 个  $R_g=6.5 \Omega$ 、 $V_{dc}=38$  V 的直流电压源和 1 个 Chroma 可编程电子负载。负载电阻设定为  $12.73 \Omega$ , PCC 处的电压设定为  $V_g=35.0$  V。带有所提控制器的 BES 系统与 PCC 连接, 电压为  $V_b=75.0$  V, 串联电阻  $R_1=3.2 \Omega$ , 负载  $R_2=52 \Omega$ 。本文使用 Semikron 的全桥变流器, 其控制参数采用开关频率为 5 kHz 的单极 PWM。变流器输出滤波器电感  $L_b=10$  mH, 寄生电阻  $R_b=1.4 \Omega$ , 模拟电容  $C=120$  mF, 虚拟电阻  $R_v=1.5 \Omega$ 。电流控制增益  $q_1=10^{7.1}$ 、 $q_2=10^{1.2}$ 、 $q_3=10^2$ , 控制增益  $k_1=-5611.0$ 、 $k_2=12.8$ 、 $k_3=-22$ 。闭环极点位于  $-604 \pm j469$  和  $-21+j0$  处。下垂增益  $K_v=18.8$ , 这意味着 BES 每单位电压偏移供应或吸收 18.8 W。最大和最小电流限制  $I_{max}$  和  $I_{min}$  分别设置为 5 A 和 -5 A。图 13(a)~(c) 为光伏电流  $i_{pvo}$  从 2.30 A 降至 0.48 A 时的系统响应。无 BES 支撑时, 光伏功率的下降会导致 PCC 电压  $v_g$  从 35.0 V 骤降至 28.0 V, 电网电流  $i_g$  从 0.350 A 骤升至 1.525 A; 在 BES 动态支撑下, BES 通过峰值为 1.85 A 的快速电流  $i_{bo}$  提供惯性, 防止电压骤降, 类似于 100 mF 的实际电容; 当静态支撑启用时, BES 继续提供 1.20 A 的电流, 将电压保持在 33.5 V。图 13(d)~(f) 为 PV 电流  $i_{pvo}$  从 0.475 A 增加到 2.200 A 时的响应, 同样地可得出相同结论。

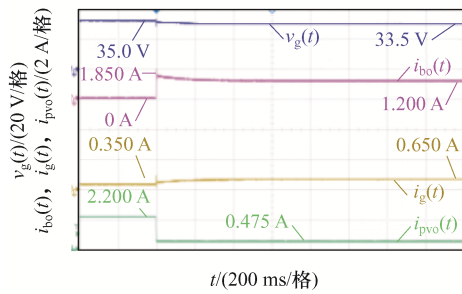
图 14(a)~(c) 为负载电阻从  $12 \Omega$  降低至  $6 \Omega$  时的响应, 这导致 PCC 处的电压  $v_g$  从 35.0 V 突然下降至 26.0 V, 电网电流  $i_g$  上升至 1.8 A。在动态支撑下, BES 通过注入峰值为 2.4 A 的电流来提供惯性, 并缓慢降至 0; 在静态支撑下, BES 持续供电



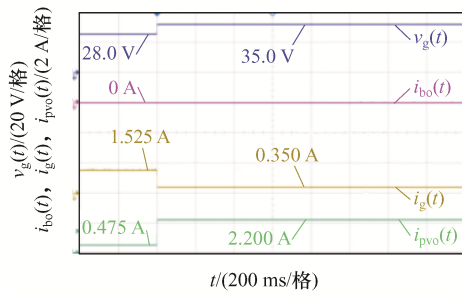
(a) 光伏功率下降(无BES)



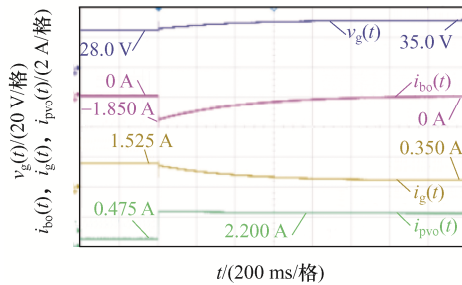
(b) 光伏功率下降(带BES动态支撑)



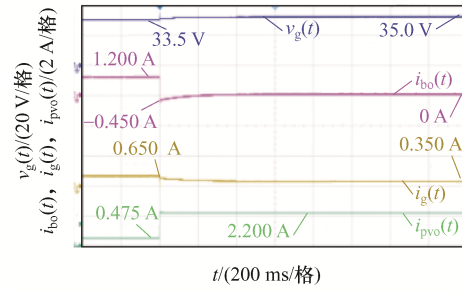
(c) 光伏功率下降(BES完全支撑)



(d) 光伏功率上升(无BES)



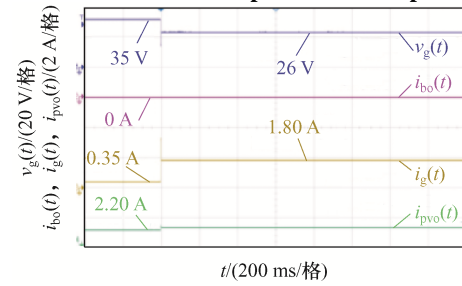
(e) 光伏功率上升(带BES动态支撑)



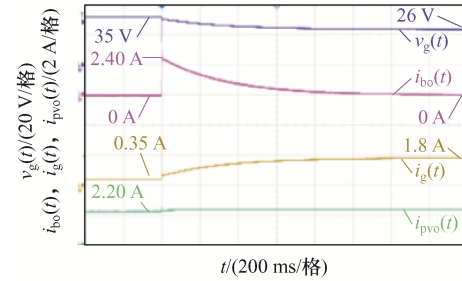
(f) 光伏功率上升(BES完全支撑)

图 13 在实验装置中系统对 PV 输出功率扰动的响应

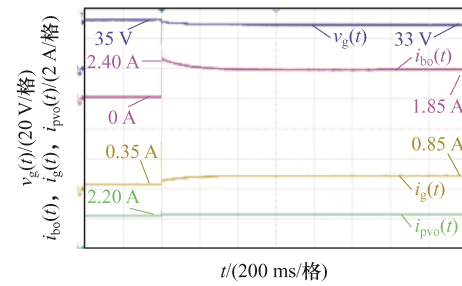
Fig. 13 Responses of system to PV output power disturbances in experimental setup



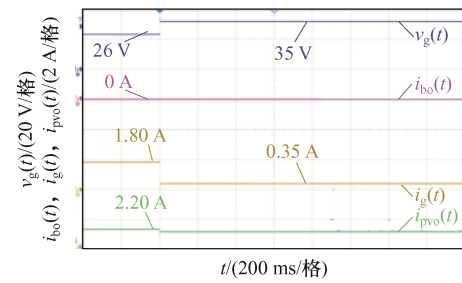
(a) 负荷增加(无BES)



(b) 负荷增加(带BES动态支撑)



(c) 负荷增加(BES完全支撑)



(d) 负荷降低(无BES)

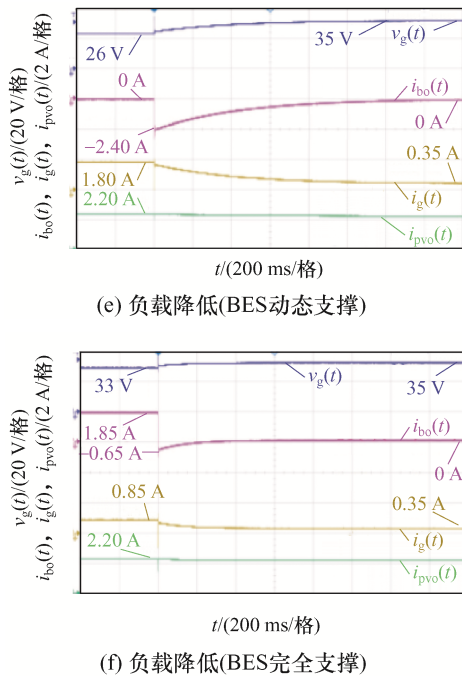


图 14 在实验装置中系统对负载扰动的响应

Fig. 14 Responses of system to load disturbances in experimental setup

电流  $i_{bo}$  为 1.85 A, 电压保持在 33.0 V。图 14(e)~(f) 为负载从  $6.0 \Omega$  增加至  $12 \Omega$  时的响应, 同样地, 实验结果证实了该系统在低电压和低功率下的运行有效性。由于系统是线性的, 因此在高压/电力应用中的可扩展性是有效的。

## 4 结论

本文提出了 1 种可主动支撑电网电压的 BES 系统自治控制方法, 以提升 BES 变流器的惯量和下垂增益自动调节能力, 从而实现 BES 对电网电压主动静/动态支撑。最后, 本文通过 MATLAB 和半实物仿真平台进行了案例研究, 研究结论如下。

(1) 所提方法采用  $K_v(V_g - v_g)$  下垂和虚拟电容  $C$  惯量技术, 使得 BES 变流器具备一定惯量和下垂增益自动可调能力, 可提供电网静态功率支撑和动态电压支撑。

(2) 所提方法采用全状态反馈方法, 将电压控制器和电流控制器合并, 使得所提控制器设计更系统化和灵活化, 并可减小单相接地故障引起的

电压振荡。

(3) 本文设计的基于调节因子  $\alpha$  的电池储能 SOC 控制器, 可进一步提升电池储能系统的自治运行能力, 使得电池储能系统不需要与可再生能源组合使用, 不依赖对本地可再生能源扰动的监测, 可连接到电力系统的任何关键节点, 并通过本地测量检测扰动, 在电力系统受到扰动期间提供一定主动电压支撑, 以保证电力系统的安全运行。

## 参考文献:

- [1] 曹以龙, 涂少博, 帅禄玮, 等. 基于 QPSO 和双线性插值的混合储能系统改进解耦控制[J]. 电源学报, 2022, 20(1): 65-74.  
Cao Yilong, Tu Shaobo, Shuai Luwei, et al. Improved decoupling control of hybrid energy-storage system based on QPSO and bilinear interpolation [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(1): 65-74. (in Chinese)
- [2] Hu Jiefeng, Li Zilin, Zhu Jianguo, et al. Voltage stabilization: A critical step toward high photovoltaic penetration [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2019, 13(2): 17-30.
- [3] Kroposki B, Johnson B B, Zhang Yingchen, et al. Achieving a 100% renewable grid: Operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2): 61-73.
- [4] Bloomberg NEF. Battery pack prices fall as market ramps up with market average at \$156/kWh in 2019 [EB/OL]. (2019-12-03)[2022-5-10]. <https://xueqiu.com/9080548226/136914272>
- [5] 申永鹏, 孙建彬, 杨小亮, 等. 电动汽车混合储能装置三端口功率变换器设计[J]. 电源学报, 2022, 20(2): 76-87.  
Shen Yongpeng, Sun Jianbin, Yang Xiaoliang, et al. Design of a three-port power converter for hybrid energy storage device in an electric vehicle [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(2): 76-87. (in Chinese)
- [6] Kirby N M. Current trends in DC: Voltage-source converters [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(3): 32-37.
- [7] Melath G, Rangarajan S, Agarwal V. A novel control scheme for enhancing the transient performance of an

- islanded hybrid AC-DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9644-9654.
- [8] Wang Jiangfeng, Sun Kai, Zhou Dehong, et al. Virtual SVPWM based flexible power control for dual-DC-port DC-AC converters in PV-battery hybrid systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11431-11443.
- [9] Pritchard E, Gregory D C. The DC revolution [J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(2): 4-9.
- [10] Nasir M, Khan H A, Zaffar N A, et al. Scalable solar DC micrigrids: On the path to revolutionizing the electrification architecture of developing communities [J]. IEEE Electrification Magazine, 2018, 6(4): 63-72.
- [11] Chub A, Vinnikov D, Korkh O, et al. Ultra-wide voltage gain range micro converter for integration of silicon and thin-film photovoltaic modules in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 13763-13778.
- [12] 陈新, 王康, 陈金祥, 等. 储能用悬浮交错双向 DC/DC 变换器[J]. 电源学报, 2021, 19(5): 32-39.  
Chen Xin, Wang Kang, Chen Jinxiang, et al. Floating interleaved bi-directional DC/DC converter for energy storage [J]. Journal of Power Supply, 2019, 19(5): 32-39. (in Chinese)
- [13] Sangwongwanich A, Yang Yongheng, Blaabjerg F. A cost-effective power ramp-rate control strategy for single-phase two-stage grid-connected photovoltaic systems [C]// 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, WI, USA, 2016: 1-7.
- [14] Kakimoto N, Satoh H, Takayama S, et al. Ramp-rate control of photovoltaic generator with electric double-layer capacitor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(2): 465-473.
- [15] 冯婷婷, 张竣淇, 朱勇, 等. 基于储能型开关电感准 Z 源逆变器的模型预测控制[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 137-145.  
Feng Tingting, Zhang Junqi, Zhu Yong, et al. Model predictive control of energy-storage switched-inductor quasi-Z-source inverter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 137-145. (in Chinese)
- [16] Alam M, Muttaqi K, Sutanto D. A novel approach for ramp-rate control of solar PV using energy storage to mitigate output fluctuations caused by cloud passing [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 507-518.
- [17] Sharma R, Karimi-Ghartemani M. Addressing abrupt PV disturbances, and mitigating net load profile's ramp and peak demands, using distributed storage devices [J]. Energies, 2020, 13(5): 10-24.
- [18] Santos Neto P J dos. Power management strategy based on virtual inertia for dc microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12472-12485.
- [19] Beck H -P, Hesse R. Virtual synchronous machine [C]// IEEE 9th International Conference on Electronics and Power Quality Utilisation. 2007: 1-6.
- [20] Karimi-Ghartemani M, Khajehoddin S A, Piya P, et al. Universal controller for three-phase inverters in a microgrid [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1342-1353.
- [21] Fang Jingyang, Lin Pengfeng, Li Hongchang, et al. An improved virtual inertia control for three-phase voltage source converters connected to a weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8660-8670.
- [22] Tan Shucheng, Dong Ge, Zhang Hui, et al. Virtual DC machine control strategy of energy storage converter in DC microgrid [C]// 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Ottawa, ON, Canada, 2016: 1-5.
- [23] Unamuno E, Paniagua J. Unified virtual inertia for AC and DC microgrids: And the role of interlinking converters [J]. IEEE Electrification Magazine, 2019, 7(4): 56-68.



郭辉

## 作者简介:

郭辉(1978—), 男, 通信作者, 硕士, 助理工程师。研究方向: 电源一次调频控制。E-mail: zzz11121212@163.com。

杨华磊(1993—), 男, 本科, 助理工程师。研究方向: 电源一次调频控制。E-mail: yanghl22@126.com。

冯海波(1987—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 电源一次调频控制。E-mail: fhb323@163.com。

崔东亚(1986—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 电源一次调频控制。E-mail: 66718912@qq.com。

张毅(1984—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 储能控制。E-mail: 46715592@qq.com。

(责任编辑: 郭凯凯)