

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231336

## 基于 VDCG 的直流微电网退役锂电池 SOC 均衡方案

吴青峰<sup>1</sup>, 褚晓林<sup>1</sup>, 刘立群<sup>1</sup>, 胡秀芳<sup>1</sup>, 薄利明<sup>2</sup>

(1. 太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

**摘要:** 为增加系统惯性, 直流微电网内锂电池控制器常采用虚拟直流发电机(virtual DC generator, VDCG)控制方案, 但该方案无法使锂电池荷电状态(state of charge, SOC)自均衡。现有基于 VDCG 的锂电池 SOC 均衡方案仅能实现电压等级一致的非等容锂电池 SOC 均衡, 而退役锂电池储能系统(retire lithium battery energy storage systems, RLBESS)的容量和电压等级均难以保持一致。针对此问题, 提出了一种基于 VDCG 的适用于不同电压等级及容量的 RLBESS 组间 SOC 均衡方案。该方案在传统 VDCG 的基础上建立  $U-P_m$  关系式并引入 SOC 均衡因子, 能够根据初始 SOC 状态自动调节锂电池的功率分配, 并保持良好的电压质量。建立了所提方案的小信号模型, 分析了关键控制参数对系统稳定性的影响。最后, 利用 Matlab/Simulink 仿真软件对不同工况进行有效性验证。仿真结果表明: 所提方案能够在锂电池电压等级不一致工况下实现 RLBESS 的 SOC 均衡, 具有良好的可扩展性。

**关键词:** 直流微网; 退役锂电池; 虚拟直流发电机; 荷电状态均衡; 小信号模型

### SOC balancing scheme for lithium batteries in a DC microgrid based on VDCG

WU Qingfeng<sup>1</sup>, CHU Xiaolin<sup>1</sup>, LIU Liqun<sup>1</sup>, HU Xiufang<sup>1</sup>, BO Liming<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** In order to increase system inertia, a virtual DC generator (VDCG) control scheme is often used for lithium battery controllers in DC microgrids, but this scheme cannot achieve self-balancing of the state of charge (SOC) of the lithium battery. The existing SOC equalization scheme based on VDCG for lithium batteries can only achieve SOC equalization for non-capacity lithium batteries with the same voltage level, while it is difficult to maintain the same capacity and voltage level of retired lithium battery energy storage systems (RLBESS). In response to this issue, this paper proposes a SOC equalization scheme for RLBESS with different voltage levels and capacities based on VDCG. This scheme establishes a  $U-P_m$  relationship based on traditional VDCG and introduces an SOC balance factor, which can automatically adjust the power distribution of lithium batteries based on the initial SOC state, while maintaining good voltage quality. A small-signal modeling of the proposed scheme is established, and the influence of key control parameters on the system stability is analyzed. Finally, the effectiveness of the proposed scheme is verified in different working conditions by using Matlab/Simulink simulation software. The simulation results show that the proposed scheme can achieve SOC balancing of RLBESS under inconsistent voltage levels of lithium batteries, with good scalability.

This work is supported by the National Key R & D Program of China (No. 2018YFA0707305).

**Key words:** DC microgrid; retire lithium battery; virtual DC generator; state of charge balancing; small-signal model

## 0 引言

随着全球化石能源储量的日益减少以及“碳达峰”、“碳中和”目标提出, 具有低碳排放特性的电动汽车快速发展。当电动汽车锂电池容量降到额定容量的 70%~80%时, 锂电池必须退役<sup>[1-2]</sup>, 由此产生了大量的退役电动汽车锂电池。研究表明: 可将退役锂电池储能系统(retire lithium battery energy storage systems, RLBESS)应用在对电池性能要求较低场合, 如电网储能、家庭储能、低速电动车等场合,

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2018YFA0707305); 山西省基础研究计划面上项目资助(202203021221153); 阳泉市应用基础研究计划项目资助(2022JH059)

以便实现退役锂电池的梯次利用, 减少环境污染和避免资源浪费<sup>[3-4]</sup>。当退役电动汽车锂电池应用在孤岛直流微电网场景时, 由于微电网电力电子器件的存在容易造成微电网缺乏惯性和欠阻尼, 导致系统易失稳<sup>[5]</sup>。为解决此问题, 国内外学者根据传统发电机的特性, 提出了虚拟直流发电机(virtual DC generator, VDCG)控制策略<sup>[6]</sup>。该策略通过引入转动惯量和阻尼系数提升直流微电网的惯性和阻尼特性。直流微电网内 RLBESS 可以采用 VDCG 控制策略来克服传统下垂控制带来的系统惯性小的难题<sup>[7-8]</sup>。

荷电状态(state of charge, SOC)均衡对于锂电池的寿命和容量利用率至关重要<sup>[9-11]</sup>。为实现直流微电网内锂电池 SOC 均衡, 有学者提出了基于  $U-I$  下垂控制的 SOC 均衡方案。文献[12-13]通过在  $U-I$  下垂控制中引入功率调节项以实现锂电池组间 SOC 均衡。但下垂控制本身具有惯性小的缺点, 因此基于 VDCG 控制方案引起学者的广泛关注。

目前基于 VDCG 的研究方案, 大多聚焦于维持系统电压稳定, 对基于 VDCG 的 SOC 均衡控制研究尚处于起步阶段。文献[14]提出了基于 VDCG 的风机后级变换器控制策略, 通过粒子群优化算法得到系统的最优转动惯量, 保证直流母线的电压波动范围不越限。文献[15]通过修改 VDCG 控制策略, 有效地抑制了直流母线电压波动以及实现了电流的精确共享。文献[16]根据 VDCG 的优点, 提出了混合储能系统抑制直流母线电压波动的控制策略, 改善了系统的稳定性。文献[17]建立了 VDCG 的小信号模型, 并分析了转动惯量对系统的影响。虽然文献[14-17]提出了基于 VDCG 的控制策略, 但均未涉及锂电池的 SOC 均衡问题。为实现 VDCG 控制下的 SOC 均衡, 文献[18]在初始电枢电阻中引入双曲正切函数和 SOC 调节因子, 通过调节电枢电阻值影响电流分配, 使锂电池放电过程 SOC 自均衡。文献[19]通过将 SOC 参数融入电枢电阻, 实现锂电池充放电过程中的 SOC 均衡。文献[20]在 VDCG 控制中引入虚拟电枢电阻, 通过调节虚拟电枢电阻值来均衡 SOC。但文献[18-20]中各台锂电池的容量均相等。针对此问题, 文献[21]针对非等容的锂电池组, 提出了 VDCG 控制下的 SOC 均衡功率分配策略, 该方案可以实现非等容锂电池组的 SOC 均衡, 但此方案存在两个问题: 首先, 该方案中假设各块锂电池的电压等级一致, 而实际工况中 RLBESS 受退役时间和老化程度不一致的影响, 各块锂电池的电压等级难以保持一致; 其次, 该方案需要额外的电压补偿环节实现电压调节, 增加控制难度和成本。

综上所述, 针对现有基于 VDCG 的 SOC 均衡

方案的不足, 本文提出一种基于改进型 VDCG 的 RLBESS 的 SOC 均衡方案。本文的贡献及创新点包括: 现有基于 VDCG 的 SOC 均衡方案仅针对电压等级相同的锂电池系统, 无法使电压等级不一致 RLBESS 的 SOC 自均衡; 而本文所提方案在 VDCG 的基础上引入 SOC 均衡因子并对调节系数进行改进, 实现了等容/非等容 RLBESS 系统 SOC 均衡。现有基于 VDCG 的 SOC 均衡方案需要引入额外电压补偿环节实现电压的调节, 而本文所提方案中通过对 SOC 均衡因子进行改进, 不需要额外的电压补偿环节即可保持良好的电压质量。

## 1 VDCG 控制下 RLBESS 输出特性分析

### 1.1 VDCG 数学模型

VDCG 控制主要由机械和电气两个部分组成<sup>[22]</sup>。为便于分析, 假设直流发电机的极对数为 1。VDCG 控制机械和电枢方程如下所述。

#### 1) 机械方程

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} \quad (2)$$

式中:  $J$  表示转动惯量;  $D$  表示阻尼系数;  $T_m$  表示机械转矩;  $T_e$  表示电磁转矩;  $P_e$  表示电磁功率;  $\omega_0$  和  $\omega$  分别表示额定角速度和实际角速度。

由式(1)和式(2)可知, 直流发电机的虚拟电磁转矩相对于直流母线电压所提供的虚拟机械转矩而言具有制动性质。当负荷端电压变化时, 其机械转矩能提供一个惯量使母线电压得到缓冲。

#### 2) 电枢方程

$$E_a = U + R_a I_a \quad (3)$$

$$E_a = C_T \Phi \omega \quad (4)$$

式中:  $E_a$ 、 $R_a$  分别表示电枢电动势与电枢等效电阻;  $I_a$  为电枢电流;  $U$  为发电机的机端电压;  $C_T$  表示转矩系数;  $\Phi$  表示每极磁通。

图 1 为 VDCG 的原理图, 其中双向 DC-DC 变换器可以等效成为一个二端口网络, 左端与分布式 RLBESS 相连, 右端与直流母线连接。由于直流发电机与双向 DC-DC 变换器的二端口网络相似, 因此, 双向 DC-DC 变换器等效的二端口网络可以模拟直流发电机的外在特性<sup>[23]</sup>。图 1 中:  $U_1$  为 RLBESS 端输出电压(即 DC-DC 变换器输入电压);  $U_{DC}$  为双向 DC-DC 变换器输出电压;  $I_1$  为储能输出电流;  $I_2$  为 DC-DC 变换器输出电流;  $C$  为电容;  $L$  和  $R$  分别为变换器的滤波电感和寄生电阻。

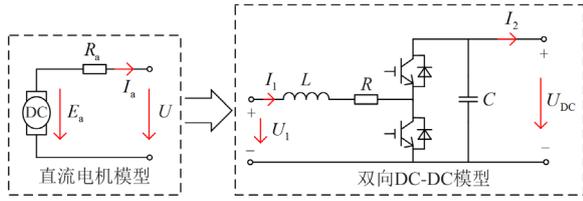


图1 VDCG原理图<sup>[24]</sup>

Fig. 1 VDCG schematic diagram<sup>[24]</sup>

### 1.2 VDCG 控制策略

VDCG 控制策略框图<sup>[25-26]</sup>如图 2 所示, 其主要工作过程为: 首先通过额定角速度  $\omega_0$  得到 VDCG 的机械转矩  $T_m$ , 再通过转子机械方程得到 VDCG 的实际角速度  $\omega$ , 最后通过直流电机的电枢方程得到电枢电流  $I_a$ 。根据 VDCG 模块得到电枢电流  $I_a$ , 再通过换算得到分布式储能输出电流的参考值。然后通过电流环进行跟踪控制, 最后经过 PWM 控制生成驱动信号, 从而完成对整个控制回路的控制。

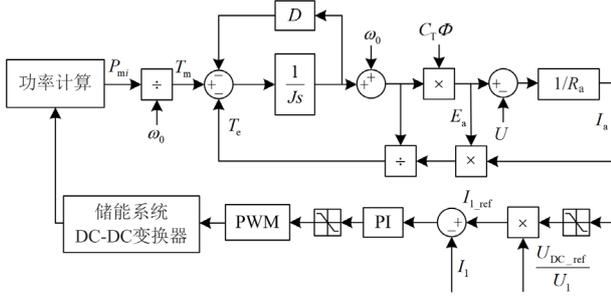


图2 VDCG 控制策略框图

Fig. 2 VDCG control strategy block diagram

假设双向 DC-DC 变换器工作在理想状态下, 忽略其功率损耗<sup>[27]</sup>, 依据功率守恒原则, 满足式(5)。

$$U_1 I_1 = U_{DC} I_2 \quad (5)$$

当双向 DC-DC 变换器稳定运行时, 满足式(6)。

$$\begin{cases} U_{DC} = U_{DC\_ref} \\ I_2 = I_a \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $U_{DC\_ref}$  表示 DC-DC 端电压参考值。

结合式(5)和式(6), 可以得到 RLBESS 输出电流的参考值  $I_{1\_ref}$ , 其表达式为

$$I_{1\_ref} = \frac{U_{DC\_ref}}{U_1} I_a \quad (7)$$

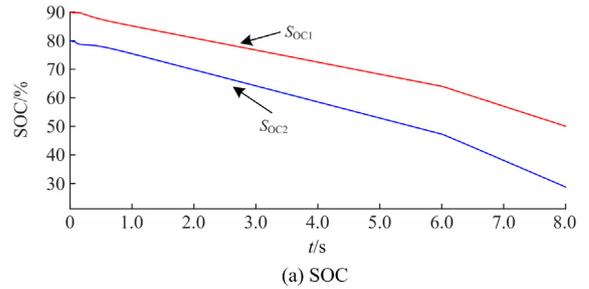
### 1.3 VDCG控制下RLBESS的SOC特性分析

为分析传统 VDCG 控制下 RLBESS 的 SOC 特性, 首先需要获得 RLBESS 的 SOC 值。根据文献[28]得到的 SOC 估算公式如式(8)所示。

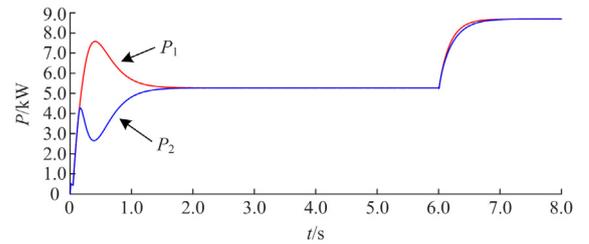
$$S_{OCi} = S_{OC0} - \frac{\int I_i dt}{C_{ei}} \approx S_{OC0} - \frac{\int P_{mi} dt}{V_{dci} C_{ei}} \quad (8)$$

式中:  $S_{OCi}$  表示第  $i$  台 RLBESS 的实际 SOC;  $S_{OC0}$  表示 RLBESS 的初始 SOC;  $V_{dci}$  和  $I_i$  分别表示第  $i$  台 RLBESS 的端电压和输出电流;  $C_{ei}$  表示第  $i$  台 RLBESS 的容量;  $P_{mi}$  表示第  $i$  台 RLBESS 输出的有功功率(即 DC-DC 变换器输出功率)。

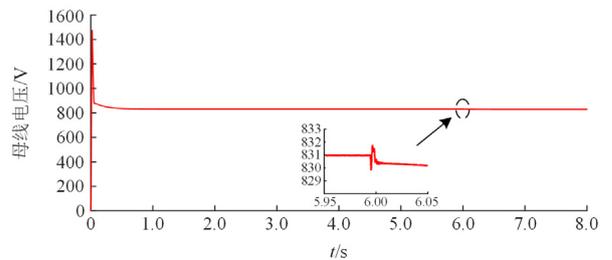
图 3 为 2 台 RLBESS 的 DC-DC 变换器采用传统 VDCG 控制的放电过程仿真波形。2 台 RLBESS 的初始 SOC 分别为 90% 和 80%, 容量分别为 100 Ah 和 50 Ah, 电压分别为 600 V 和 550 V, 在  $t=6.0$  s 时增加负荷。由式(8)和图 3(a)可知, 由于容量、电压及初始 SOC 的不同, 导致 2 台 RLBESS 的 SOC 无法实现均衡。由图 3(b)可知, 有功功率经过一段时间的调节逐渐到达稳态值, 说明 VDCG 可以增大系统的惯性。此外, 由图 3(c)可知传统 VDCG 控制下



(a) SOC



(b) 有功功率



(c) 母线电压

图3 VDCG 控制下 RLBESS 的放电过程

Fig. 3 Discharge process of RLBESS under VDCG control

的直流母线电压和额定电压相比跌落近 20 V, 说明传统 VDCG 控制无法维持良好的电压质量。

## 2 基于 VDCG 的 RLBESS 组间 SOC 均衡方案

### 2.1 容量及电压对 SOC 的影响分析

为实现 RLBESS 组间 SOC 均衡, 需要分析容量及电压差异对 SOC 均衡的影响, 本文以 2 台 RLBESS 为例, 根据式(8), 倘若 2 台 RLBESS 的 SOC 实现均衡, 则满足式(9)。

$$S_{OCb1} - \frac{\int P_{m1} dt}{V_{dc1} C_{e1}} = S_{OCb2} - \frac{\int P_{m2} dt}{V_{dc2} C_{e2}} \quad (9)$$

式中,  $S_{OCb1}$  和  $S_{OCb2}$  分别表示 2 台 RLBESS 均衡时的 SOC 值。

在均衡状态时, 满足  $S_{OCb1} = S_{OCb2}$ 。结合式(9)可知在 RLBESS 的  $C_{ei}$  和  $V_{dci}$  不相等条件下, 若要继续维持 SOC 均衡, 应满足式(10)。

$$\frac{\int P_{m1} dt}{V_{dc1} C_{e2}} = \frac{\int P_{m2} dt}{V_{dc2} C_{e2}} \quad (10)$$

由式(10)可知, 要想实现 RLBESS 的 SOC 均衡, 需要使 RLBESS 稳态时有功功率比等于容量和电压乘积比。因此, 本文在 VDCG 的基础上提出  $U$ - $P_m$  关系表达式并引入调节系数  $k_i$ , 以消除容量及电压差异对 SOC 均衡的影响, 其表达式如式(11)所示。

$$U_{DCi} = U_0 - k_i P_{mi} \quad (11)$$

式中:  $U_{DCi}$  为 VDCG 输出端电压;  $U_0$  为额定电压。

根据式(11)可知, 在系统稳定运行时, 只需调节  $k_i$  就能实现 RLBESS 稳态时输出有功功率比等于容量和电压乘积比, 即满足式(12)。

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{P_{m1}}{P_{m2}} = \frac{C_{e1} \cdot V_{dc1}}{C_{e2} \cdot V_{dc2}} \quad (12)$$

### 2.2 RLBESS 的 SOC 均衡方案

上述分析表明, 通过调节系数  $k_i$  使有功功率值和电池容量与电压乘积成正比, 消除了容量及电压对 SOC 的影响。为实现 RLBESS 组间 SOC 均衡, 还需要引入基于 SOC 均衡的控制项, 引入后的表达式为

$$\begin{cases} U_{DCi} = U_0 - k_i B_i \times P_{mi} \\ B_i = 1 - \frac{S_{OCi}^n}{\sum_{i=1}^s S_{OCi}^n} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $s$  为 RLBESS 的总台数;  $B_i$  为均衡因子, 用于实现 SOC 的均衡;  $n$  为均衡系数, 用来调节均衡

速度。

将式(13)进行变形可得每台 RLBESS 输出的有功功率为

$$P_{mi} = \frac{U_0 - U_{DCi}}{k_i} \times \frac{1}{B_i} \quad (14)$$

同时, 结合式(8)和式(14)可得

$$S_{OCi} = S_{OC0} - \frac{\int \frac{U_0 - U_{DCi}}{k_i} \times \frac{1}{B_i} dt}{V_{dci} C_{ei}} \quad (15)$$

以 2 台带载 RLBESS 为例, 分析所提方案的 SOC 均衡原理, SOC 均衡控制方案原理图如图 4 所示。倘若初始时  $S_{OC1} > S_{OC2}$ , 根据式(13)可知均衡因子  $B_i$  满足  $B_1 < B_2$ 、 $U_{DC1} > U_{DC2}$ , 此时 2 台 RLBESS 分别工作在曲线 1 和曲线 2。当系统稳定运行时  $U_{DCi}$  基本相同, 曲线 1 和曲线 2 与  $U_{DCi}$  交于  $A_1$  和  $A_2$  点, 2 台 RLBESS 输出的有功功率分别为  $P_1$  和  $P_2$ , 且满足  $P_1 > P_2$ 。在均衡因子  $B_i$  的调节下, 根据式(14)可知, SOC 高的 RLBESS 比 SOC 低的 RLBESS 输出更多的有功功率, 2 台 RLBESS 的 SOC 差值会随着时间的增加逐渐缩小。当 2 台 RLBESS 的 SOC 均衡时, 它们的功率电压曲线将会运行在曲线 3, 随着放电的进行, 2 台 RLBESS 的 SOC 最终重合在一起。值得注意的是: 由于调节系数  $k_i$  和均衡因子  $B_i$  均满足  $0 < k_i < 1$ 、 $0 < B_i < 1$ , 且在式(13)中两者通过乘法关系与  $P_{mi}$  结合, 因此系统稳定运行时  $U_{DCi}$  基本保持在  $U_0$  附近, 不会产生较大的电压偏移。

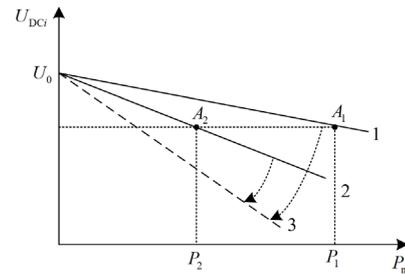


图 4 SOC 均衡控制原理图

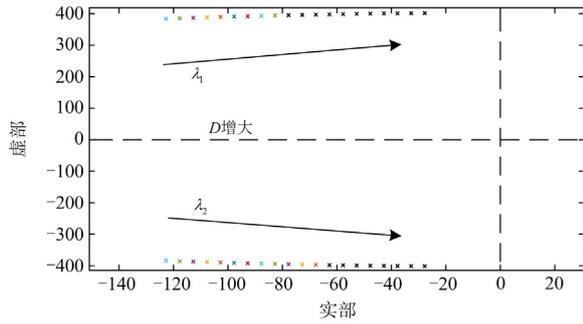
Fig. 4 Schematic diagram of SOC balancing control

所提基于改进型 VDCG 的 RLBESS 组间 SOC 均衡方案整体控制框图如图 5 所示。

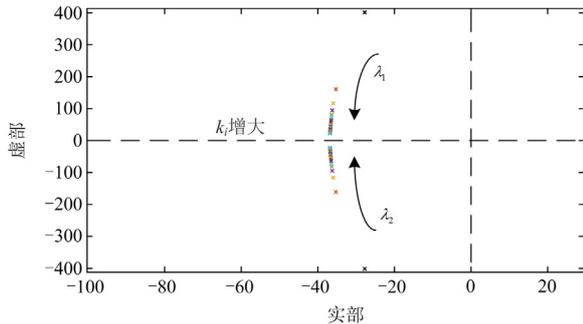
## 3 主要参数小信号稳定分析

为了分析关键参数对系统稳定性的影响, 接下来需要对 VDCG 控制策略进行小信号建模<sup>[29]</sup>。首先对双向 DC-DC 变换器的 Boost 模式进行分析, 其小





(b)  $J=0.5, 1 < D < 100, k_i = 2 \times 10^{-4}$



(c)  $J=0.5, D=5, 2 \times 10^{-4} < k_i < 0.02$

图 8  $J$ 、 $D$  和  $k_i$  变化时系统主导极点根轨迹

Fig. 8 Dominant pole root trajectory of the system when  $J$ ,  $D$  and  $k_i$  change

此时系统的稳定性也开始变差。因此, 合理选择  $J$ 、 $D$  和  $k_i$  对 VDCG 控制的实现十分重要。

#### 4 仿真实验与分析

为验证所提基于 VDCG 的 RLBESS 组间 SOC 均衡方案的有效性, 使用 Matlab/Simulink 仿真软件按照图 9 搭建了多台 RLBESS 仿真模型, 仿真参数如表 2 所示。

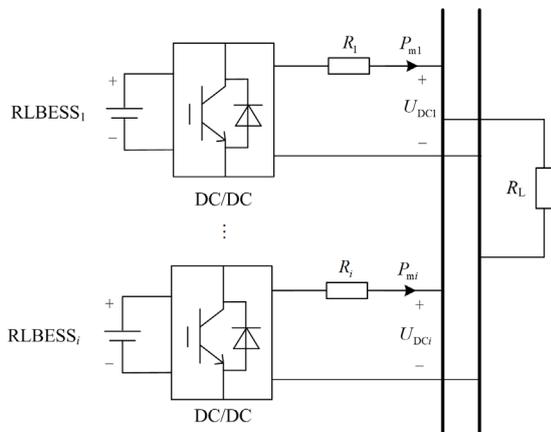


图 9 RLBESS 并联等效电路图

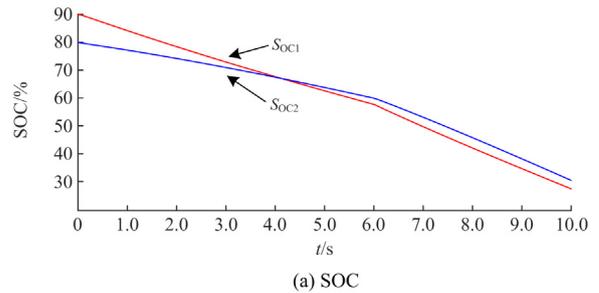
Fig. 9 RLBESS parallel equivalent circuit diagram

表 2 仿真参数

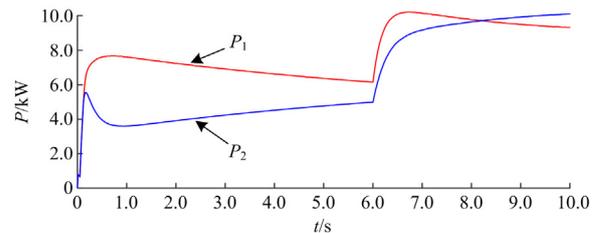
Table 2 Simulation parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
RLBESS 电压	600	RLBESS 容量	220
$V_{dc_i} / V$	550	$C_{ei} / Ah$	180
线路阻抗 $R_i / \Omega$	0.2	调节系数 $k_i$	1/5000
额定电压 $U_0 / V$	850	电枢电阻 $R_a / \Omega$	1/3750
额定角频率	314	转动惯量 $J / (kg \cdot m^2)$	0.5
$\omega_0 / (rad \cdot s^{-1})$	314	阻尼系数 $D$	5
转矩系数 $C_T$	18	变换器电感/H	$6 \times 10^{-3}$
每极磁通 $\phi / Wb$	0.1465	电感器寄生电阻 $R / \Omega$	0.01
变换器输出电容 $C / F$	$4.7 \times 10^{-3}$		

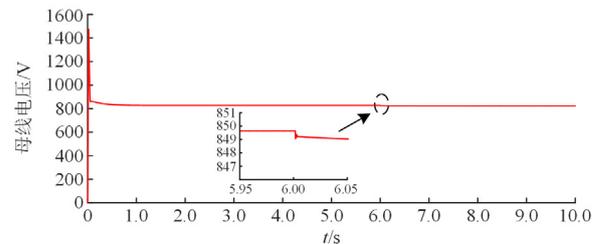
工况 1: 现有基于 VDCG 的 SOC 均衡方案分析  
为了验证现有基于 VDCG 的 SOC 均衡方案对 RLBESS 系统的适用性, 将文献[21]提出的基于 VDCG 的 SOC 均衡方案应用到 RLBESS 系统。仿真结果如图 10 所示。仿真中初始 SOC 分别为 90%和 80%, 在  $t = 6.0 s$  时增加负荷。正常情况下, RLBESS



(a) SOC



(b) 有功功率



(c) 母线电压

图 10 RLBESS 采用文献[21]方案的放电过程

Fig. 10 Discharging process of RLBESS with reference [21]

放电速度很慢,为加快仿真的速度,仿真中设置的负荷值较大,以便尽快获得SOC均衡波形。文献[21]的方案在计算每个RLBESS实际所要承担的功率时没有考虑到电压差异对SOC均衡的影响,导致图10(a)中RLBESS的SOC未能实现均衡。此外,文献[21]引入额外的电压恢复环节对电压进行恢复。因此,图10(c)中的电压基本保持在额定值附近。

工况 2: RLBESS 采用所提方案仿真分析

图 11 为 RLBESS 采用所提方案的放电波形, 2 台 RLBESS 初始 SOC 分别为 90%和 80%, 在  $t = 6.0\text{ s}$  时增加负荷。由图 11(a)可知, 与图10(a)不同, 2 台 RLBESS 的 SOC 差值逐渐缩小, 并在  $t = 4.0\text{ s}$  左右时重合, 说明该方案可以实现非等容/非等压 RLBESS 的 SOC 均衡。由图 11(b)可知, 根据式 (12)设置不同调节系数, 可以使 VDCG 输出的稳态有功功率比等于容量和电压乘积比(4:3), 而文献[21]由于未考虑电压不一致因素, 因此当电压不一致时, 图 10(b)中有功功率呈无规律分配。和图 10(c)

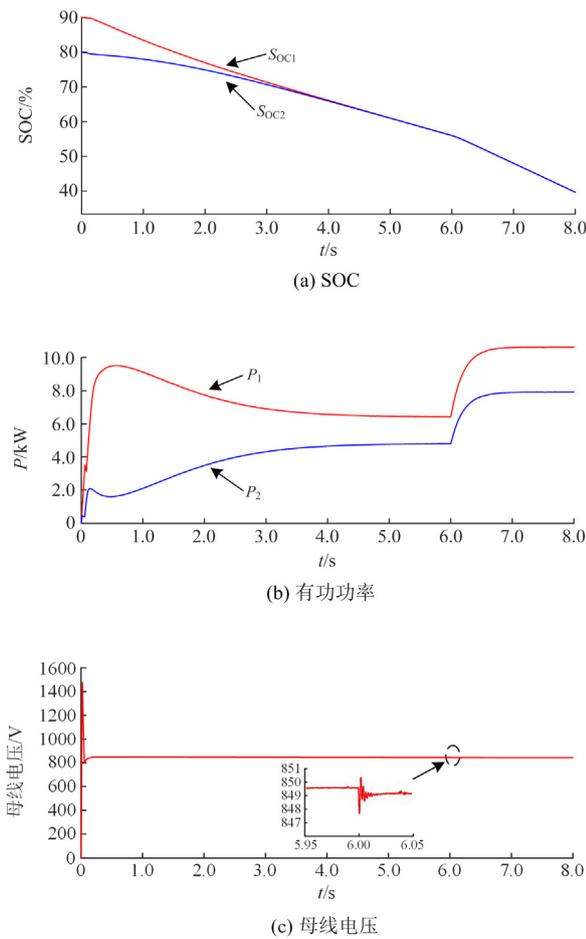


图 11 RLBESS 采用所提方案的放电过程  
Fig. 11 Discharge process of the RLBESS using the proposed scheme

类似, 图 11(c)中电压波动极小, 稳态时在 1 V 范围内波动, 说明所提方案能保持良好的电压效果。通过对比图 3、图 10 和图 11, 说明所提方案能够克服传统 VDCG 和现有基于 VDCG 的 SOC 均衡方案的缺点, 实现 RLBESS 系统 SOC 均衡, 在不需要额外电压恢复控制的前提下, 即可保持良好的电压质量。

工况 3: 等容/等压 RLBESS 采用所提方案仿真分析

图 12 为采用所提方案等容/等压 RLBESS 的放电过程, 2 台 RLBESS 的额定容量均为 180 Ah, 电压均为 600 V, 在  $t = 6.0\text{ s}$  时增加负荷。由图 12(a)分析可知, 所提方案也适用于等容/等压 RLBESS 的 SOC 均衡。根据式(12)可知, 等容/等压情况下调节系数  $k_i$  相等。因此, 与图 11(b)不同, 图 12(b)中 SOC 均衡后, 有功功率均分, 这个结果和理论分析结果一致。同样, 图12(c)说明等容/等压情况下母线电压也不会发生较大偏移。

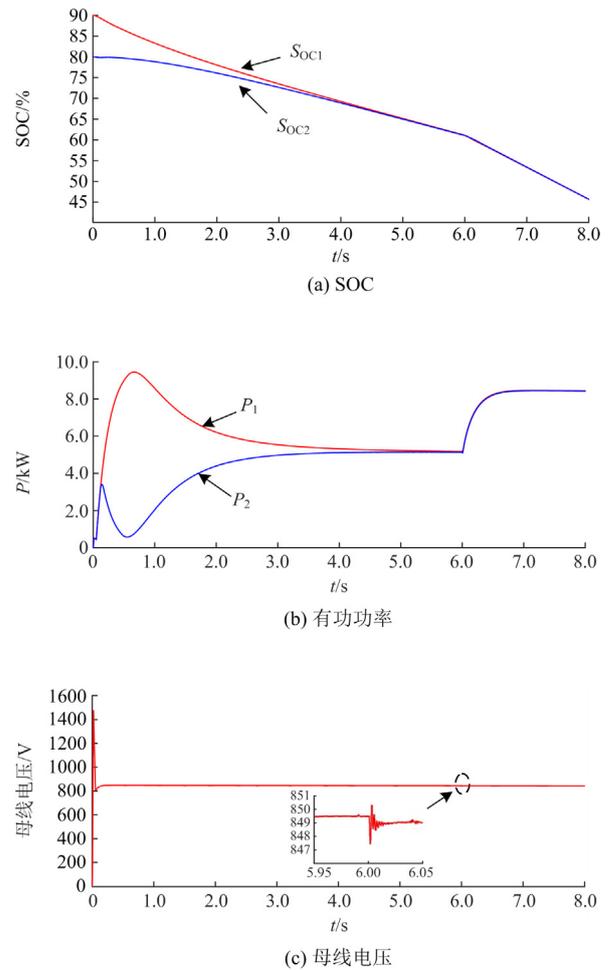
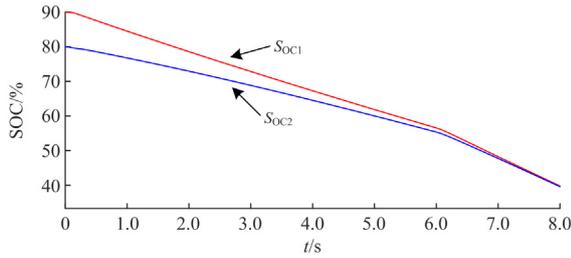


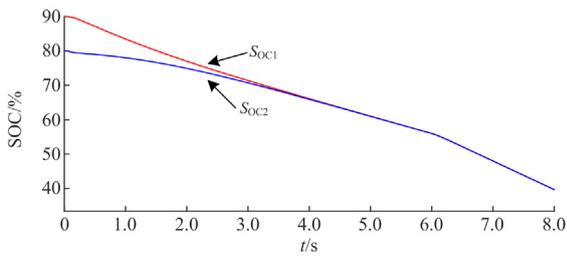
图 12 等容/等压 RLBESS 采用所提方案的放电过程  
Fig. 12 Discharge process of the equal capacities/equal voltage RLBESS using the proposed scheme

工况 4: 均衡系数  $n$  对 SOC 均衡速度影响仿真分析

为验证均衡系数  $n$  对 SOC 均衡速度的影响, 设置 2 台 RLBESS 的容量分别为 220 Ah 和 180 Ah, 均衡系数  $n$  分别为 5 和 15, 初始 SOC 分别为 90% 和 80%, 在  $t = 6.0$  s 时增加负荷。由图 13 可知, 在均衡系数的作用下, 图 13(a) 中 2 台 RLBESS 的 SOC 均衡速度明显慢于图 13(b) 中的均衡速度, 说明适当增大均衡系数  $n$  有助于提高 SOC 的均衡速度。



(a)  $n = 5$  时 SOC 波形

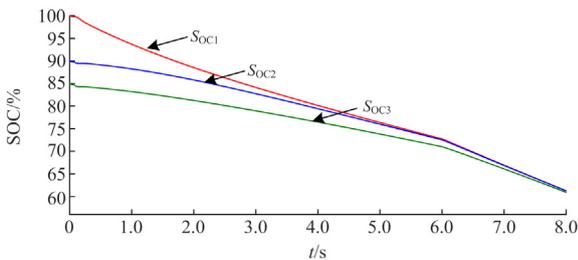


(b)  $n = 15$  时 SOC 波形

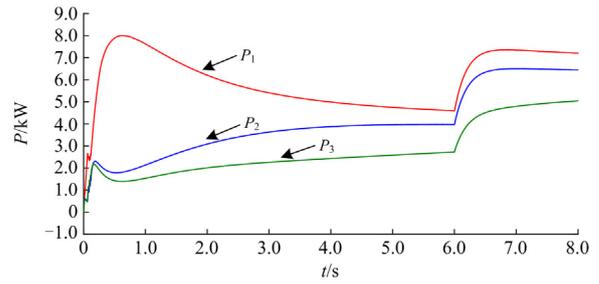
图 13 均衡系数对 SOC 均衡速度的影响分析

Fig.13 Analysis of the influence of balancing coefficient on SOC balancing speed

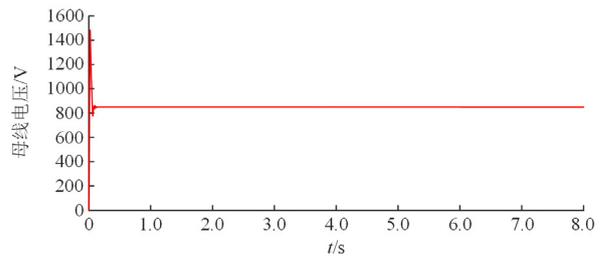
工况 5: 多台 RLBESS 采用所提方案仿真分析  
为验证所提 SOC 均衡方案的可扩展性, 将系统内 RLBESS 的数量由工况 2 中的 2 台增加到 3 台, 额定容量分别为 220 Ah、200 Ah 和 160 Ah, 线路阻抗值分别为  $0.2 \Omega$ 、 $0.3 \Omega$  和  $0.4 \Omega$ , 电压分别为 600 V、580 V 和 550 V, 在  $t = 6.0$  s 时增加负荷。和工况 2 结果类似, 由图 14(a) 可知, 3 台 RLBESS 的 SOC 分别从 100%、90% 和 85% 开始下降, 随着时间的推移 SOC 逐渐均衡。图 14(b) 为 VDCG 输出的有功功



(a) SOC



(b) 有功功率



(c) 母线电压

图 14 多台 RLBESS 放电的过程

Fig.14 Discharging process of multiple RLBESS

率, 稳态时有功功率比仍等于容量和电压乘积比。图 14(c) 为直流母线电压波形, 稳态时维持在额定电压附近。因此, 所提方案不仅能应用于 2 台 RLBESS 的 SOC 均衡, 还适用于多台 RLBESS 组间 SOC 均衡。

## 5 结论

VDCG 控制方案可以模拟直流电机的特性, 具有增大系统惯性的优点, 本文提出一种基于 VDCG 控制的 RLBESS 组间 SOC 均衡方案, 通过理论分析与仿真验证, 得出以下结论:

1) 通过在传统 VDCG 控制的基础上建立  $U-P_m$  关系式并引入 SOC 均衡因子, 设置不同的调节系数, 可对 VDCG 输出的有功功率重新分配, 消除容量/电压差异对 SOC 均衡的影响, 进而实现 RLBESS 的 SOC 均衡。

2) SOC 均衡以后, 在不需要额外的电压补偿环节的前提下保持良好的电压质量。

3) 所提方案克服了现存基于 VDCG 控制非等容锂电池的 SOC 均衡方案不适用于 RLBESS 和需要额外电压调节环节的缺点, 适用于多台 RLBESS, 改变均衡系数  $n$  可以改变 SOC 均衡速度。

## 参考文献

[1] 夏向阳, 邓子豪, 张嘉诚, 等. 基于动力锂离子电池健康状态的全寿命周期优化充电策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 17-24.

- XIA Xiangyang, DENG Zihao, ZHANG Jiacheng, et al. Life cycle optimal charging strategy based on the SOH of power lithium ion battery[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(6): 17-24.
- [2] 岳家辉, 夏向阳, 蒋戴宇, 等. 基于电压数据片段混合模型的锂离子电池剩余寿命预测与健康状态估计[J]. *中国电力*, 2023, 56(7): 163-174.
- YUE Jiahui, XIA Xiangyang, JIANG Daiyu, et al. Remaining useful life prediction and state of health estimation of lithium-ion batteries based on voltage data segment hybrid model[J]. *Electric Power*, 2023, 56(7): 163-174.
- [3] 李建林, 修晓青, 刘道, 等. 计及政策激励的退役动力电池储能系统梯次应用研究[J]. *高电压技术*, 2015, 41(8):2562-2568.
- LI Jianlin, XIU Xiaoqing, LIU Dao, et al. Research on second use of retired electric vehicle battery energy storage system considering policy incentive[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(8): 2562-2568.
- [4] 索克兰, 程林, 许鹤麟, 等. 提升电池储能系统经济性研究方法综述[J]. *全球能源互联网*, 2023, 6(2): 163-178.
- SUO Kelan, CHENG Lin, XU Helin, et al. A review of research methods for improving the economy of battery energy storage system[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2023, 6(2): 163-178.
- [5] KOIWA K, INOO K, ZANMA T, et al. Virtual voltage control of VSG for overcurrent suppression under symmetrical and asymmetrical voltage dips[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(11): 11177-11186.
- [6] WANG P, ZHAO J, LIU K. Parameter-adaptation-based virtual DC motor control method for energy storage converter[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 90795-90804.
- [7] 田艳军, 彭飞, 朱晓荣, 等. 直流微网储能单元的灵活类虚拟同步发电机控制[J]. *高电压技术*, 2020, 46(7): 2316-2328.
- TIAN Yanjun, PENG Fei, ZHU Xiaorong, et al. Flexible virtual synchronous generator control for DC microgrid energy storage unit [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(7): 2316-2328.
- [8] 朱晓荣, 孟凡奇, 谢志云. 基于虚拟同步发电机的直流微网 DC-DC 变换器控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(21): 132-140.
- ZHU Xiaorong, MENG Fanqi, XIE Zhiyun. Control strategy of DC -DC converter in DC microgrid based on virtual synchronous generator [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(21): 132-140.
- [9] 黄崇鑫, 陈振宇, 邓松. 含储能双母线直流微电网电压和功率协调控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 141-149.
- HUANG Chongxin, CHEN Zhenyu, DENG Song. Voltage-power coordinated control of a dual-bus DC microgrid with energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(11): 141-149.
- [10] 刘运鑫, 姚良忠, 周金辉, 等. 基于 LSTM 的锂电池储能装置 SOC 与 SOH 联合预测[J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(1): 37-45.
- LIU Yunxin, YAO Liangzhong, ZHOU Jinhui, et al. Joint prediction of state of charge and state of health based on LSTM for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(1): 37-45.
- [11] 尚彦赞, 宋红为, 杨照光, 等. 基于二阶 RC 模型的锂电池充放电特性分析[J]. *高压电器*, 2023, 59(7): 87-94.
- SHANG Yanyun, SONG Hongwei, YANG Zhaoguang, et al. Charge and discharge characteristics analysis of lithium battery based on second-order RC model[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(7): 87-94.
- [12] 卢艳琴, 周仁友, 黄天翔, 等. 基于改进下垂控制的并网级联型储能系统 SOC 均衡策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(22): 120-129.
- HU Yanqin, ZHOU Renyou, HUANG Tianxiang, et al. SOC balancing strategy of a grid-connected cascaded-type energy storage system based on advanced droop control[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 120-129.
- [13] SU J, LI K, LI Y, et al. A novel state-of-charge-based droop control for battery energy storage systems to support coordinated operation of DC microgrids[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, 11(1): 312-324.
- [14] ZHANG H, ZHANG Q, LIU Y. A modified virtual generator control for DC microgrid with improved dynamic characteristics of DC bus voltage and enhanced current sharing effect[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2022, 17(6): 3445-3456.
- [15] 张勤进, 张瀚文, 刘彦呈, 等. 基于参数自适应的直流微源虚拟发电机控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(18): 90-97.
- ZHANG Qinjin, ZHANG Hanwen, LIU Yancheng, et al. Control strategy of a DC micro-source virtual generator based on parameter adaptive control[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(18): 90-97.
- [16] 马越超, 王生铁, 刘广忱, 等. 基于虚拟直流发电机的风储直流微电网控制策略研究[J]. *高电压技术*, 2020, 46(11): 3819-3831.
- MA Yuechao, WANG Shengtie, LIU Guangchen, et al.

- Research on control strategy of wind storage DC microgrid based on virtual DC generator[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3819-3831.
- [17] ZHAO F, XIAO C, CHEN X, et al. Research on virtual DC generator-based control strategy of DC microgrid with photovoltaic and energy storage[J]. Energy Engineering, 2023, 120(6): 1353-1370.
- [18] 贺帅帅, 王鲁杨, 仇成, 等. 基于虚拟直流电机的储能系统能量均衡控制[J]. 电力电子技术, 2022, 56(5): 41-44.  
HE Shuaishuai, WANG Luyang, QIU Cheng, et al. Energy balance control of energy storage system based on virtual DC motor[J]. Power Electronics, 2022, 56(5): 41-44.
- [19] ZHI N, DING K, DU L, et al. An SOC-based virtual DC machine control for distributed storage systems in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35 (3): 1411-1420.
- [20] WANG S, WANG Z, LIU X, et al. An SOC-based bidirectional virtual DC machine control for energy storage systems in offshore isolated island DC microgrids[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(8): 1501-1527.
- [21] 王正男, 张新慧, 彭克, 等. 虚拟直流发电机控制下 SOC 均衡功率分配策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2923-2931.  
WANG Zhengnan, ZHANG Xinhui, PENG Ke, et al. SOC balanced power distribution strategy under the control of virtual DC generator[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2923-2931.
- [22] 王勉, 唐芬, 赵宇明, 等. 虚拟直流电机的参数自适应控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 148-155.  
WANG Mian, TANG Fen, ZHAO Yuming, et al. Parameter adaptive control strategy for virtual DC motor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 148-155.
- [23] 崔健, 吕志鹏, 盛万兴, 等. 一种新型虚拟直流电机控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 3029-3038.  
CUI Jian, LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, et al. A new control technology based on virtual DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 3029-3038.
- [24] 刘自发, 刘炎. 基于虚拟直流机的直流微电网电压稳定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 62-71.  
LIU ZiFa, LIU Yan. Voltage stability control strategy of a DC microgrid based on a virtual DC machine[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 62-71.
- [25] 王勉, 唐芬, 赵宇明, 等. 虚拟直流电机并联协调控制方法[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3875-3885.  
WANG Mian, TANG Fen, ZHAO Yuming, et al. Virtual DC motor parallel coordinated control method[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3875-3885.
- [26] 张良, 闫凯宏, 冷祥彪, 等. 基于 SOC 下垂控制的独立直流微电网协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 87-97.  
ZHANG Liang, YAN Kaihong, LENG Xiangbiao, et al. Research on coordination control strategy for independent DC microgrid based on SOC drop control [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 87-97.
- [27] 吴青峰, 智泽英, 于少娟, 等. 基于多代理的微电网分布式储能系统健康状态平衡方案[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 104-112.  
WU Qingfeng, ZHI Zeying, YU Shaojuan, et al. Multi-agent based health state balance scheme for microgrid distributed energy storage system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(2): 104-112.
- [28] ZHI N, MING X, DING Y, et al. Power-loop-free virtual DC machine control with differential compensation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 413-422.
- [29] LIN G, MA J, LI Y, et al. A virtual inertia and damping control to suppress voltage oscillation in islanded DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 1711-1721.

收稿日期: 2023-10-17; 修回日期: 2023-11-30

作者简介:

吴青峰(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源并网及控制技术、储能系统状态参数估算及均衡技术; E-mail: 827211907@qq.com

褚晓林(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能系统变换器控制技术。E-mail: 1561803690@qq.com

(编辑 魏小丽)