第 50 卷 第 11 期：5142-5151 高电压技术 Vol.50, No.11: 5142-5151
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230093

基于 VSG 的微电网非等容锂电池 SOC 均衡方案

吴青峰[1]，褚晓林[1]，刘立群[1]，何俊强[1]，薄利明[2]
（1. 太原科技大学电子信息工程学院，太原 030024；2. 国网山西省电力公司电力科学研究院，太原 030001）

摘　要：微电网锂电池逆变器采用传统虚拟同步发电机(virtual synchronous generator，VSG)控制方案和现有基于 VSG 的荷电状态(state of charge，SOC)均衡方案均无法实现非等容锂电池的 SOC 均衡。为了实现非等容锂电池 SOC 均衡，提出了一种基于 VSG 控制的非等容锂电池 SOC 均衡方案。通过对传统 VSG 控制参数和线路阻抗参数进行修正，使逆变器输出有功功率与电池容量成正比，消除了容量对 SOC 的影响，再以 SOC 为变量对逆变器输出有功功率进行调节，实现了非等容锂电池的 SOC 均衡。此外，建立了 VSG 小信号模型，分析了控制参数对系统稳定性的影响。最后，利用 Matlab/Simulink 仿真软件和实验平台进行仿真和实验验证。结果表明：所提方案能够实现多台等容和非等容锂电池 SOC 均衡，延长锂电池服役寿命，并验证了控制参数会对系统稳定性造成影响。
关键词：微电网；非等容锂电池；虚拟同步发电机；功率分配；荷电状态均衡；小信号建模

SOC Balancing Scheme of Non-equal Capacity Lithium Battery in Microgrid Based on VSG

WU Qingfeng[1], CHU Xiaolin[1], LIU Liqun[1], HE Junqiang[1], BO Liming[2]
(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: The traditional virtual synchronous generator (VSG) control scheme and the existing VSG-based state of charge (SOC) balancing scheme of the microgrid lithium battery inverter cannot achieve SOC balancing of non-equal capacity lithium batteries. In order to achieve SOC balancing of non-equal capacity lithium batteries, a non-equal capacity lithium battery SOC balancing scheme based on VSG control is proposed. By modifying the traditional VSG control parameters and line impedance parameters, the inverter output active power is proportional to the battery capacity, eliminating the influence of capacity on SOC, and then the inverter output active power with SOC is adjusted as the variable to achieve SOC balancing for non-equal capacity lithium batteries. In addition, a VSG small signal model is established to analyze the influence of control parameters on system stability. Finally, the Matlab/Simulink simulation software and experimental platform are used for simulation and experimental verification. The results show that the proposed scheme can be adopted to achieve SOC balancing of multiple equal and non-equal capacity lithium batteries, extend the service life of lithium batteries. It is verified that the control parameters can affect the system stability.
Key words: microgrid; non-equal capacity lithium battery; virtual synchronous generator; power distribution; state of charge balancing; small signal modeling

0　引言

微电网内发电单元主要为光伏、风电等可再生能源(renewable energy sources，RES)，具有低碳排放、可再生性等优点，是我国实现“碳达峰”和“碳中和”目标的重要手段[1-2]。交流微电网内光伏、风电等 RES 发电具有不确定性，为确保对负荷进行稳定供电，通常会将 RES 与锂电池储能系统(lithium battery energy storage systems，LBESS)通过逆变器接入到电网[3]。受 LBESS 安装容量、老化进度以及制造工艺差异等方面的影响，LBESS 之间的初始 SOC 和容量通常互不相同[4]。倘若在放电的过程中 LBESS 的 SOC 下降速率不一致，则会使 SOC 较低的 LBESS 率先完成放电，从而降低 LBESS 的容量利用率和使用寿命[5]。因此，非等容 LBESS 的 SOC 均衡十分重要。

为实现 LBESS 的 SOC 均衡，学者提出了基于下垂控制的方案。文献[6]提出的改进型下垂控制 SOC 均衡策略，通过引入 SOC 功率指令项调节 SOC

基金资助项目：国家重点研发计划(2018YFA0707305)；山西省高等学校科技创新项目(2021L289)；国网山西省电力公司科技项目(520530200015).
Project supported by National Key R&D Program of China (2018YFA0707305), Scientific and Technological Innovation Projects of Higher Institutions in Shanxi Province (2021L289), Science and Technology Project of State Grid Shanxi Electric Power Company (520530200015).

下降速度，直到各 LBESS 的 SOC 均衡。但该方案没有考虑到 LBESS 非等容时的情况。针对此问题，文献[7]提出一种分布式下垂控制，通过 SOC 平衡因子控制逆变器输出的有功功率，从而实现非等容 LBESS 的 SOC 均衡。上述基于下垂控制的 SOC 均衡方案存在惯性小、系统易失稳的缺点。

针对下垂控制惯性小的问题，学者提出了虚拟直流发电机(virtual DC generator，VDCG)和虚拟同步发电机(virtual synchronous generator，VSG)控制策略[8-9]。文献[10]提出基于 VDCG 的风机后级变换器控制策略，在工作模式切换时使 SOC 达到上限的次数减少，从而减少系统的失负荷率。文献[11]提出了一种基于 VDCG 控制的 SOC 均衡方案，根据 LBESS 的 SOC 初值对功率进行分配，实现了多台非等容 LBESS 的 SOC 均衡，但该方案不适用于交流微电网。针对交流微电网，文献[12]提出一种模糊自适应 VSG 控制策略，避免了 LBESS 充放电时 SOC 超限，但未涉及 SOC 的均衡问题。针对 SOC 均衡的问题，文献[13]提出了一种用于具有级联 H 桥变换器的 LBESS 分布式 VSG 控制方法，但该方案只适用于级联 H 桥拓扑。文献[14]提出一种完全无通信基于 VSG 的并联储能系统 SOC 均衡策略，但该方案仍假设系统中所有 LBESS 的容量相等。

综上所述，现有基于 VSG 的 SOC 均衡方案均存在不能实现非等容 LBESS 的 SOC 均衡的不足。为此，本文提出一种基于 VSG 的非等容 LBESS 的 SOC 均衡方案。该方案首先分析了容量差异对 SOC 均衡效果的影响，给出非等容 LBESS 背景下 VSG 的改进方法，并通过合理分配逆变器输出的有功功率实现非等容 LBESS 的 SOC 均衡；然后建立系统的小信号模型，分析控制参数对系统稳定性影响；最后通过仿真和实验验证了所提策略的可行性。

1 传统 VSG 控制策略

1.1 传统 VSG 的结构

VSG 控制模拟同步发电机的外在特性，由于同步发电机在不同的条件下拥有多阶数学模型，因此为简化控制，采用 2 阶模型作为 VSG 的核心模型，其转子机械方程[15]为：

$$\begin{cases} J\dfrac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{\omega_0}-\dfrac{P_{\mathrm{e}}}{\omega_0}-D(\omega-\omega_0) \\ \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\omega \end{cases} \tag{1}$$

式中：P_{m} 为机械功率；P_{e} 为电磁功率(即逆变器输出有功功率 P[16])；J 为转动惯量；D 为阻尼系数；ω、ω_0 分别为实际角频率和额定角频率；θ 为输出功角。

传统 VSG 控制包括有功-频率控制、无功-电压控制、电压电流双环控制等，其总体控制框图如图 1 所示[17]。其中，U_{dc} 为直流电压源，R_{L} 为电感寄生电阻，L_{f}、C_{f} 分别为滤波电感和滤波电容，Z_{line} 代表线路阻抗。

VSG 有功-频率控制通过虚拟调频器和转子机械方程来实现，虚拟调频器的表达式[18]为：

$$P_{\mathrm{m}}=P_0+K_\omega(\omega_0-\omega) \tag{2}$$

式中：P_0 为 VSG 的额定功率；K_ω 为频率系数。

VSG 无功-电压控制表达式[19]为：

$$E=E_{\mathrm{N}}+K_Q(Q_0-Q) \tag{3}$$

式中：E、E_{N} 分别为 VSG 的实时电压和额定电压；Q_0、Q 分别为 VSG 的无功参考值和实时无功功率；K_Q 为调压系数。

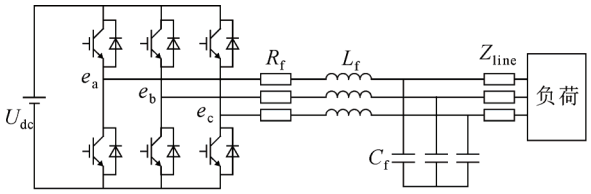
1.2 传统 VSG 控制下 LBESS 的 SOC 特性分析

若要分析传统 VSG 控制下 LBESS 的 SOC 特性，首先需要得到 LBESS 的 SOC 值，根据文献[20]得到的 SOC 估算计算式如下：

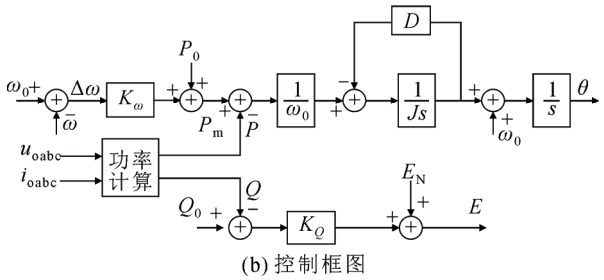
$$C_{\mathrm{SO}i}=C_{\mathrm{SO0}}-\frac{\int i_i\,\mathrm{d}t}{C_{\mathrm{e}i}}\approx C_{\mathrm{SO0}}-\frac{\int P_i\,\mathrm{d}t}{U_{\mathrm{DC}}C_{\mathrm{e}i}} \tag{4}$$

式中：C_{SO0} 和 i_i 分别为 LBESS 的初始 SOC 和输出电流；U_{DC} 为 LBESS 的端电压；$C_{\mathrm{e}i}$ 为 LBESS 的容量；P_i 为逆变器的输出功率。

图 2 为 2 台非等容 LBESS 并联采用传统 VSG 控制的放电过程，仿真中设置 2 台 LBESS 的初始



(a) 主电路



(b) 控制框图

图 1 传统 VSG 总体控制框图

Fig.1 Traditional VSG overall control diagram

SOC 分别为 90%和 80%，容量分别为 50 Ah 和 25 Ah，t=0.6 s 时加重负荷。根据式(4)可知，由于初始 SOC 和容量的差异，导致图 2(a)中 2 台 LBESS 的 SOC 无法实现均衡。从图 2(b)可知，传统 VSG 控制下，稳态时 2 台逆变器输出的有功功率处于均分状态。同时，可以看出 VSG 控制下系统惯性明显增加。

2 基于下垂控制的锂电池SOC均衡方案分析

文献[21]提出一种基于下垂控制的非等容 LBESS 的 SOC 均衡方案，其表达式如式(5)所示。该方案在引入和容量相关的系数以后，容量对 SOC 的影响被消除了，通过调节 SOC 均衡因子 G (G=(1−$k_{\mathrm{SOC}}C_{\mathrm{SO}i}$))可以实现对逆变器输出有功功率的调节，从而实现 SOC 的均衡控制。

$$f = f_{\mathrm{ref}} - \frac{m}{C_{\mathrm{e}i}} P(1 - k_{\mathrm{SOC}} C_{\mathrm{SO}i}) \tag{5}$$

式中：f_{ref}为额定频率；$C_{\mathrm{e}i}$表示各个 LBESS 的容量；$m/C_{\mathrm{e}i}$ 表示与容量相关的系数；$(1-k_{\mathrm{SOC}}C_{\mathrm{SO}i})$表示 SOC 均衡因子。

将文献[21]中提出的 SOC 均衡方案移到 VSG 控制上，得到的仿真图如图 3 所示。仿真中设置 2 台 LBESS 的容量分别为 50 Ah 和 25 Ah，初始 SOC 分别为 90%和 80%，在 t=6.0 s 时加重负荷。由图 3(a)可知，由于没有考虑 J 和 D 参数的影响，导致 SOC 无法实现均衡。图 3(b)为逆变器输出的有功功率，由于引入容量系数，导致稳态时有功功率不能均分。因此，本文研究一种基于 VSG 的非等容 LBESS 的 SOC 均衡方案。

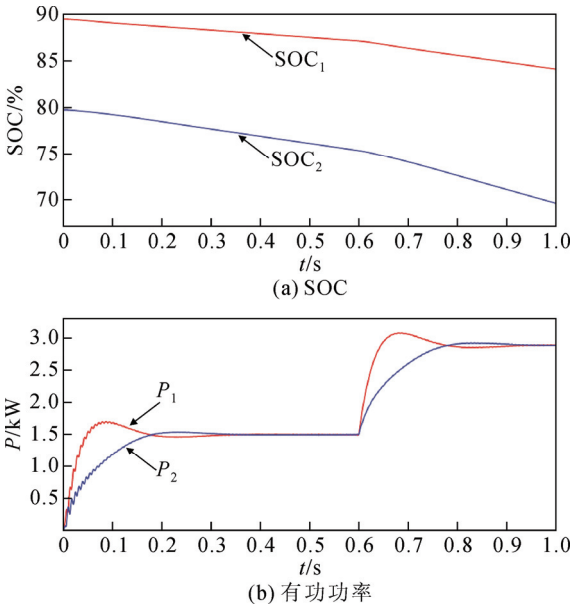


图 2 非等容 LBESS 采用传统 VSG 控制的放电过程

Fig.2 Discharge process of non-equal capacity LBESS controlled by traditional VSG

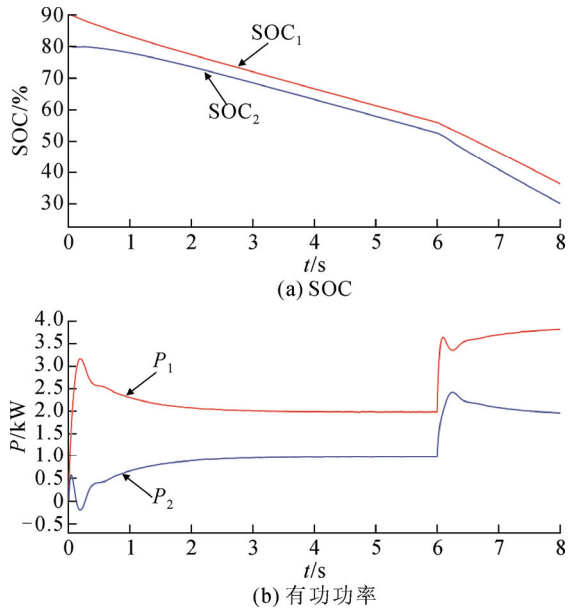


图 3 LBESS 采用文献[21]方案的放电过程

Fig.3 Discharging process of LBESS with reference [21]

3 所提非等容锂电池 SOC 均衡方案

3.1 容量对 SOC 的影响分析

LBESS 的端电压一般为相等的常数[22]，然而实际工况中，受温度、老化程度、安装容量以及制造工艺等方面的影响，LBESS 之间的容量是有差异的。以 2 台 LBESS 为例进行分析，根据式(4)，若 2 台 LBESS 的 SOC 均衡，则满足式(6)。

$$C_{\mathrm{SO01}} - \frac{\int P_1 \mathrm{d}t}{U_{\mathrm{DC}} C_{\mathrm{e1}}} = C_{\mathrm{SO02}} - \frac{\int P_2 \mathrm{d}t}{U_{\mathrm{DC}} C_{\mathrm{e2}}} \tag{6}$$

假设 2 台电池的容量比为 2:1，即：

$$C_{\mathrm{e1}} = 2C_{\mathrm{e2}} \tag{7}$$

根据式(6)和式(7)可知，SOC 均衡时满足：

$$\frac{\int P_1 \mathrm{d}t}{2U_{\mathrm{DC}} C_{\mathrm{e2}}} = \frac{\int P_2 \mathrm{d}t}{U_{\mathrm{DC}} C_{\mathrm{e2}}} \tag{8}$$

由式(8)可知，要想实现 LBESS 的 SOC 均衡，则需要消除容量对 SOC 的影响，使 LBESS 逆变器输出的稳态有功功率比等于容量比，即满足式(9)。

$$P_1 = 2P_2 \tag{9}$$

3.2 非等容 LBESS 有功功率分配原则

本文以 2 台 LBESS 并联为例，孤岛模式下 2 台 LBESS 并联等效电路图如图 4 所示。E_i、θ_i 分别为 VSG 的电压幅值和相角，Z_i=R_i+jX_i 为等效线路阻

抗，α_i 为阻抗角，I_i(i=1、2)为输出电流，Z_L 为公共负载，U_L 为负载端电压，I_3 为负载电流。

由图 4 可知，LBESS 并联时逆变器输出的有功功率[23]为：

$$P_i=\frac{E_iU_L\cos(\alpha_i-\theta_i)-U_L^2\cos\alpha_i}{Z_i} \tag{10}$$

由式(10)可知，有功功率受电压幅值、相角和线路阻抗等方面的影响，容易出现功率耦合，不利于系统稳定运行。当等效线路阻抗呈感性时，$\cos\alpha_i\approx0$，且系统稳定运行时 θ 会很小，有 $\sin\theta\approx\theta$[24]，由式(10)可得逆变器输出的有功功率比为：

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{E_1\theta_1X_2}{E_2\theta_2X_1} \tag{11}$$

然而在实际运行中，VSG 输出相位基本相同，可以忽略其相位差[25]。由于采用无功下垂控制使 2 台 VSG 的输出电压幅值有差异，且其差异主要由线路阻抗压降造成，不会过于悬殊[26]，因此有功功率分配主要和线路阻抗有关。

为了使逆变器输出的稳态有功功率比等于容量比，需要设置各 VSG 的控制参数。设 2 台 LBESS 的容量比为 N，那么有功功率 P、机械功率 P_m 和额定功率 P_0 需要满足：

$$P_1:P_2=P_{m1}:P_{m2}=P_{01}:P_{02}=N \tag{12}$$

为了得到 VSG 中控制参数 J 和 D 的关系，将式(1)的转子机械方程进行拉氏变换得：

$$\begin{cases}Js\Delta\omega=\dfrac{P_m}{\omega_0}-\dfrac{P}{\omega_0}-D\Delta\omega_0\\ s\theta=\omega\end{cases} \tag{13}$$

整理式(13)得到相角 θ 表达式为：

$$\theta(s)=\frac{1}{s}\left(\frac{P_m-P}{\omega_0}\cdot\frac{1}{Js+D}+\omega_0\right) \tag{14}$$

由前面分析可知，VSG 的输出相位基本相同，其相位差为零，对式(14)应用终值定理得：

$$\lim_{t\to\infty}\Delta\theta(t)=\lim_{s\to0}s\Delta\theta(s)=0 \tag{15}$$

$$\frac{N(P_{m2}-P_2)}{J_1s+D_1}=\frac{P_{m1}-P_1}{J_1s+D_1}=\frac{P_{m2}-P_2}{J_2s+D_2} \tag{16}$$

化简后可得：

$$\frac{J_1}{J_2}=\frac{D_1}{D_2}=N \tag{17}$$

另外，在系统稳定运行时频率 f 相等，对应的角频率 ω 也相同，根据式(2)可得：

$$\frac{P_1}{P_2}=N=\frac{P_{01}+K_{\omega1}(\omega_0-\omega)}{P_{02}+K_{\omega2}(\omega_0-\omega)} \tag{18}$$

化简得：

$$\frac{K_{\omega1}}{K_{\omega2}}=N \tag{19}$$

由以上分析可得，要实现有功功率值和电池容量成正比，需要同时满足以下条件：

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{K_{\omega1}}{K_{\omega2}}=\frac{J_1}{J_2}=\frac{D_1}{D_2}=\frac{X_2}{X_1} \tag{20}$$

3.3 LBESS 的 SOC 均衡方案

上面的分析表明，通过设置各 VSG 的控制参数，使有功功率值和电池容量成正比，消除了容量对 SOC 均衡的影响。为实现 LBESS 的 SOC 均衡，首先建立 SOC 差异与功率差异的表达式为：

$$\Delta C_{SO}=\Delta C_{SO0}-\frac{\int\Delta P\mathrm{d}t}{U_{DC}C_e} \tag{21}$$

为了使 ΔC_{SO}=0，需要增加与 SOC 有关的差异部分，由于机械功率 P_m 与 VSG 的输入功率有相同的物理意义[27]，倘若忽略逆变器功率损耗，则两者近似相等。因此，通过调节 P_m 来改变逆变器的输出功率，可使 SOC 较高的 LBESS 输出更多的功率，使 SOC 较低的 LBESS 输出较低的功率。本文在传统 VSG 有功频率控制的基础上，增加了基于 SOC 均衡的控制项，其控制框图如图 5 所示。

由 SOC 均衡控制框图可以得到系统稳定运行时的功频表达式为：

$$\omega=\omega_0+\frac{P_0C_{SOi}}{K_\omega+D}-\frac{P}{K_\omega+D} \tag{22}$$

图 6 为加入 SOC 均衡策略的功频曲线，频率和功率依然拥有下垂特性，曲线 1 和 2 分别为 2 台 LBESS 逆变器输出的功频曲线。初始时 $C_{SO1}>C_{SO2}$，

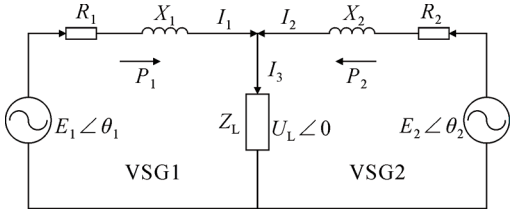


图 4 LBESS 并联等效电路图

Fig.4 LBESS parallel equivalent circuit diagram

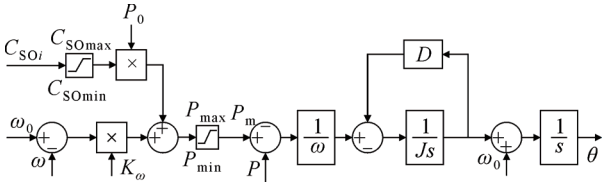


图 5 基于 VSG 的 SOC 均衡控制框图

Fig.5 SOC balancing control block diagram based on VSG

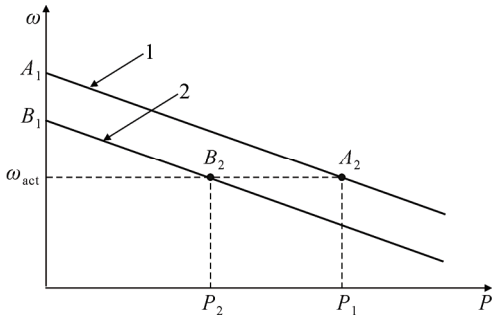


图 6 功频曲线

Fig.6 Power frequency curve

根据式(22)可知 SOC 越大其空载频率越高，2 台 LBESS 分别工作于 A_1 和 B_1 点；根据前面的分析，系统稳定运行时逆变器输出的频率相等，2 台 LBESS 的工作点分别调整至 A_2 和 B_2，此时 $P_1>P_2$；根据式(4)可知 C_{SO1} 的下降速度大于 C_{SO2}，SOC 差值减少，随着时间的推移，2 台 LBESS 的 SOC 将逐渐均衡。

4 系统小信号稳定分析

基于 VSG 控制方案的系统其稳定性会受到控制参数的影响[28]。接下来通过建立 VSG 小信号模型，来分析关键参数 K_ω、J 和 D 对系统稳定性的影响。根据前面的分析，在加入了 SOC 均衡的控制项后，得到 ω 的表达式为：

$$\omega=\omega_0+\frac{P_0C_{SOi}-P}{J\omega_0 s+D\omega_0+K_\omega} \tag{23}$$

将式(4)、式(10)和式(23)进行小信号扰动后得：

$$\begin{cases}\hat{P}_m=P_0\hat{C}_{SOi}+K_\omega(\omega_0-\omega)\\ \hat{P}=\dfrac{E_iU_L}{X_i}\hat{\theta}\\ \hat{\omega}=\dfrac{P_0\hat{C}_{SOi}-\hat{P}}{J\omega_0 s+D\omega_0+K_\omega}\\ \hat{C}_{SOi}=-\dfrac{\hat{P}}{sU_{DC}C_{ei}}\end{cases} \tag{24}$$

式中：“^”为扰动后的变量，由频率和功率角的关系可得扰动满足：

$$\hat{\omega}=s\hat{\theta} \tag{25}$$

综合可得 VSG 小信号模型如附录 A 图 A1 所示。推导可得系统的特征方程为：

$$J\omega_0Ks^3+(D\omega_0+K_\omega)Ks^2+AKs+P_0A=0 \tag{26}$$

式中：$A=E_iU_L/X_i$；$K=U_{DC}C_{ei}$。

VSG 控制下改变关键参数 J、D 和 K_ω 后的根轨迹图见附录 A 图 A2，特征方程参数见附录 A 表 A1。图 A2(a)为关于转动惯量 J 的根轨迹，J 从 0.2 增大到 5，由图 A2(a)可知随着转动惯量 J 逐渐增大，λ_3 基本保持不变，λ_1 和 λ_2 逐渐向右半平面移动，同时也表明系统的稳定性逐渐变差，因此 J 的取值不宜过大。图 A2(b)为阻尼系数 D 从 1 增大到 100 的特征根分布情况，初始时系统的 2 个根靠近虚轴，随着阻尼系数的增大，这 2 个根逐渐向实轴靠拢，之后 λ_1 向左移动，λ_2 向右半平面移动，此时系统的稳定性也开始变差。当 J 取 0.5 和 D 取 20 时，K_ω 由 1.0 rad/kW 变化到 10.0 rad/kW，系统的特征根如图 A2(c)所示，初始时 K_ω 值较小，随着 K_ω 增大，系统的 2 个根 λ_1 和 λ_2 逐渐向左移动，系统的稳定性增强，倘若 K_ω 继续增大，将沿着实轴向相反的方向移动，此时系统处于临界阻尼状态。因此，合理选择 J、D 和 K_ω 的大小对 VSG 控制的实现十分重要。

5 仿真与实验验证

为验证所提基于 VSG 非等容 LBESS 的 SOC 均衡方案的有效性，利用 Matlab/Simulink 仿真软件按照图 1(a)搭建了 2 台等容/非等容 LBESS 的仿真模型。同时，利用实验室储能实验平台对所提方案进行实验验证，以确认所提方案的工程应用效果。仿真和实验参数见附录 A 表 A2。

5.1 仿真验证

5.1.1 等容 LBESS 采用所提方案

图 7 为等容 LBESS 采用所提方案的放电过程，2 台 LBESS 的初始容量均为 50 Ah。图 7(a)为 2 台 LBESS 的 SOC 波形，在 t=6.0 s 时加重负荷，初始 SOC 分别为 90%和 80%，由图 7(a)可知 2 台 LBESS 的 SOC 在 t=4.0 s 以后下降速率一致，说明该方案可以实现等容 LBESS 的 SOC 均衡。图 7(b)说明在 LBESS 等容的工况下，逆变器输出的有功功率均分，并且在调节的过程中具有惯性。仿真结果证明所提方案适用于等容 LBESS 的 SOC 均衡。

5.1.2 非等容 LBESS 采用所提方案

图 8(a)和图 8(b)是非等容 LBESS 采用所提方案的放电波形，2 台锂电池的容量分别为 50 Ah 和 25 Ah，在 t=6.0 s 时加重负荷，初始 SOC 分别为 90%和 80%。由图 8(a)可知，2 台锂电池的 SOC 差值逐渐缩小，并在 5 s 时重合，说明该方案可以实现非等容锂电池的 SOC 均衡。由图 8(b)可知，通过 3.2 节所提的功率分配原则，可以使逆变器输出的稳

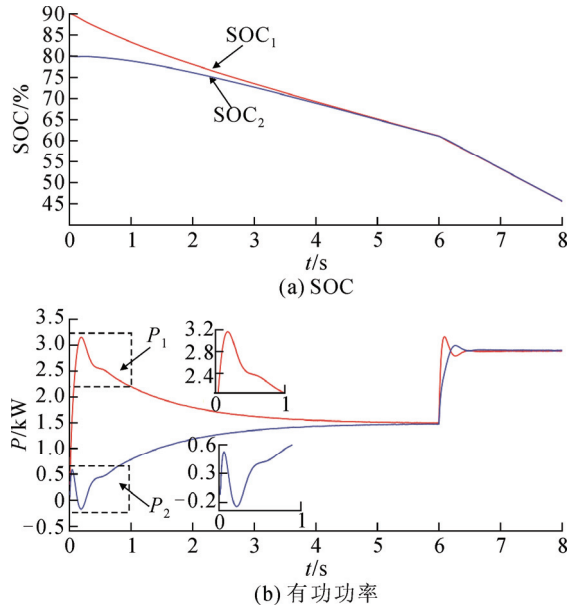


图 7 等容 LBESS 采用所提方案放电过程

Fig.7 Discharge process of the equal capacities LBESS using the proposed scheme

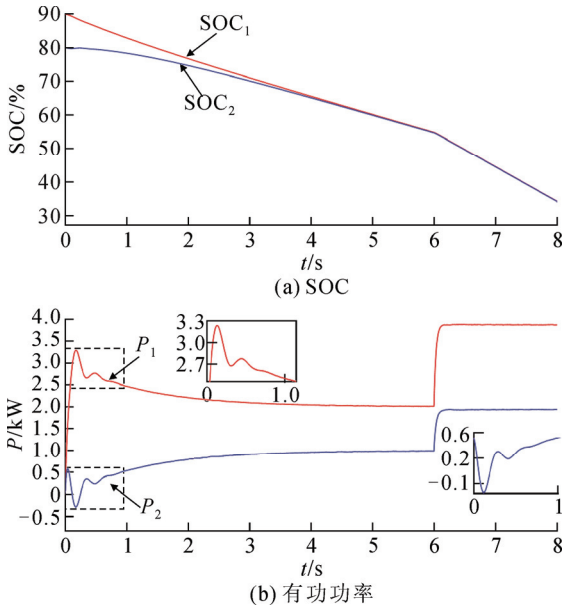


图 8 非等容 LBESS 采用所提方案放电过程

Fig.8 Discharge process of the non-equal capacities LBESS using the proposed scheme

态有功功率比等于容量比(2:1)，这也是实现非等容 LBESSSOC 均衡的关键。

5.1.3 控制参数对系统稳定性影响

以有功功率为例说明控制参数对系统稳定性的影响。图 9 为改变参数 J、D 和 K_ω 后逆变器输出的有功功率，初始时 J_1=1、J_2=0.5，D_1=20、D_2=10，$K_{\omega1}$=5 000、$K_{\omega2}$=2 500。保持 D 和 K_ω 不变，将 J_1 和 J_2 分别增大至 2 和 1 后的有功功率为 P_1 和 P_2，在 0~1 s 内，系统暂态有功功率波动较大，由前面小信号模型分析可知，转动惯量增大会使系统的稳定性下降。令 J 和 K_ω 不变，D_1 和 D_2 增大至 50 和 25 后的有功功率为 P_3 和 P_4，由图 9 可知在 0~1 s 内有功功率波动变小，说明增大阻尼系数 D 有利于系统稳定，但系统调节时间变长。P_5 和 P_6 为保持 J 和 D 不变，K_ω 分别增大至 10 000 和 5 000 后的有功功率，由图 9 可知 K_ω 增大系统的稳定性变好，在 0~1 s 暂态功率波动变小。

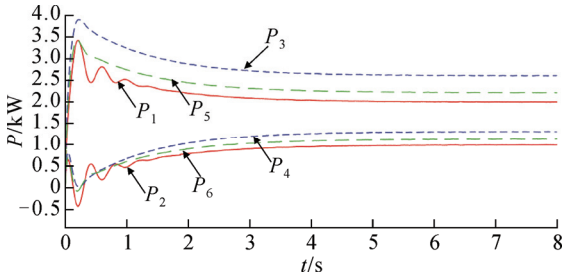


图 9 控制参数对系统稳定性的影响

Fig.9 Influence of control parameters on system stability

5.1.4 多台 LBESS 采用所提方案

为验证所提方案的可拓展性，将系统内 LBESS 的数量由 2 台扩展到 3 台，初始容量分别为 60 Ah、40 Ah 和 20 Ah。在 t=6.0 s 时加重负荷，由图 10(a)可知，3 台 LBESS 的 SOC 分别从 100%、90%和 80%开始下降，随着时间的增加 SOC 逐渐均衡。图 10(b)为逆变器输出的有功功率，稳态时有功功率比仍等于容量比(3:2:1)。因此，所提方案不仅能实现 2 台

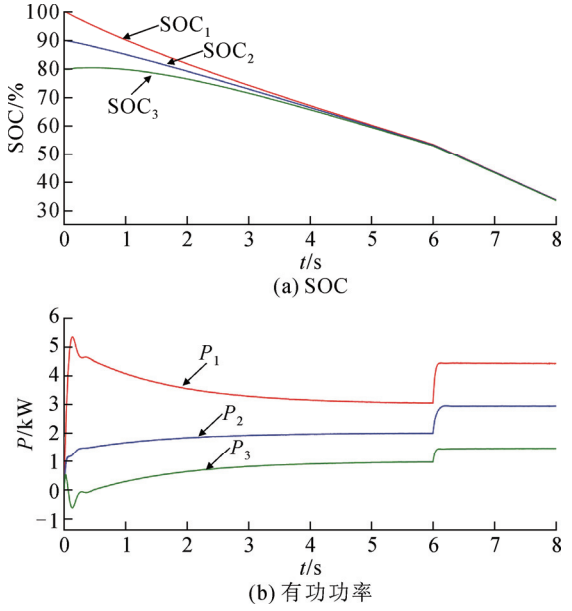


图 10 多台 LBESS 放电过程

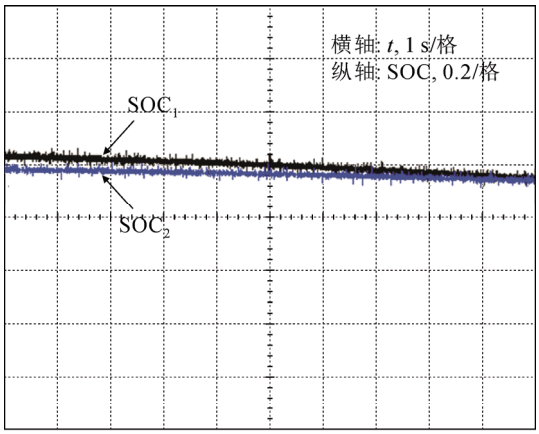
Fig.10 Discharging process of multiple LBESS

LBESS 的 SOC 均衡，还适用于多台 LBESS 间的 SOC 均衡。

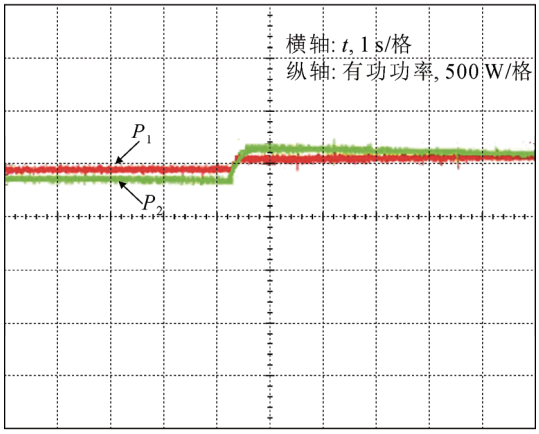
5.2 实验验证

5.2.1 等容 LBESS 采用所提方案

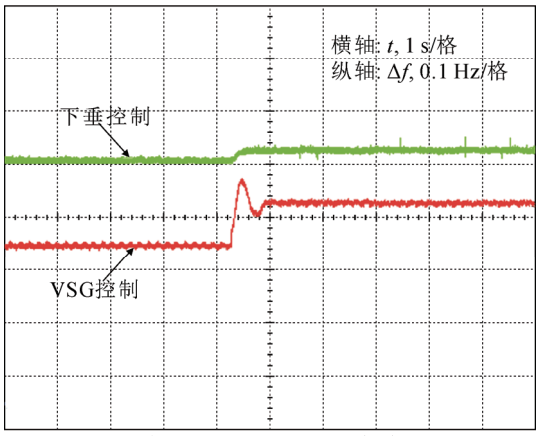
为进一步验证仿真结果的可靠性，在实验平台上对所提方案进行实验验证。鉴于实验平台和文章篇幅的限制，仅对部分仿真工况进行实验验证，图 11 为示波器采集到的实验波形。实验中，2 台 LBESS 容量均为 40 Ah，在 t_1 时刻另一台负荷加入系统。从图 11(c)下垂控制和 VSG 控制下频率偏移值 $\Delta f(\Delta f=f_{ref}-f)$的对比波形可以明显看出，VSG 控制下，系统惯性提高了。图 11 实验波形和图 7 仿真波形基本一致，证明了设计方案的有效性和实用性。



(a) SOC



(b) 有功功率



(c) 下垂控制和VSG控制下频率波形对比

图 11 基于 VSG 的 SOC 均衡策略实验波形

Fig.11 Experimental waveforms of SOC equalization strategy based on VSG

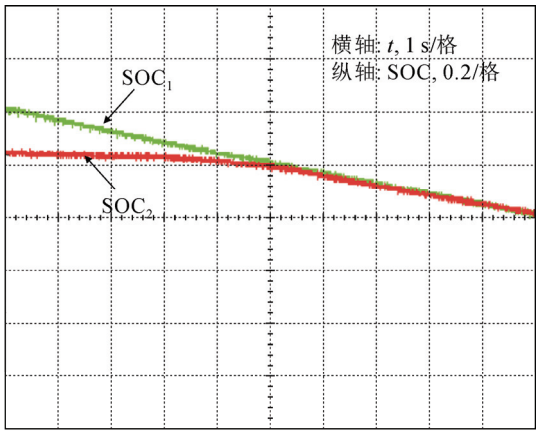
5.2.2 非等容 LBESS 采用所提方案

LBESS 非等容工况下所提控制方案的控制效果见图 12，实验中 2 台 LBESS 容量分别为 40 Ah 和 20 Ah，在 t_1 时刻切入负荷 2。与图 8 的控制效果基本一致，表明所提方案能够实现非等容工况下的 SOC 均衡，且有功功率输出波形和容量成比例关系。

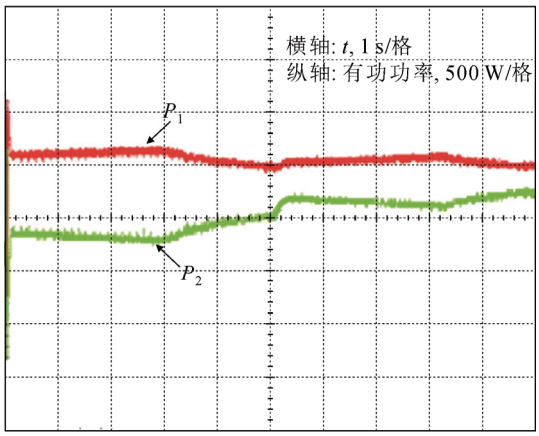
6 结论

1)LBESS 的容量差异会影响 SOC 的均衡效果，通过对传统 VSG 和 SOC 参数综合分析，推导出转动惯量、阻尼系数和频率系数 3 个参数需要与 LBESS 成正比，线路阻抗与电池容量成反比，才能消除容量差异对 SOC 均衡的影响。

2)在 VSG 控制方案的基础上引入 SOC 均衡项，



(a) SOC



(b) 有功功率

图 12 非等容 LBESS 的 SOC 均衡策略实验波形

Fig.12 Experimental waveforms of SOC balancing strategy for non-equal capacity LBESS

通过调节 VSG 输出的有功功率实现 SOC 均衡。并通过小信号分析，验证了转动惯量、阻尼系数和频率系数对系统稳定性的影响作用。

3）所提方案弥补了现存基于下垂控制非等容锂电池 SOC 均衡方案不适用于 VSG 控制方案和惯性小的不足，克服了现有基于 VSG 控制的 SOC 均衡方案无法实现非等容锂电池 SOC 均衡的缺点。

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

参考文献 References

[1] 康重庆，杜尔顺，郭鸿业，等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术，2023，47(5)：1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750.

[2] 张祥宇，赵欣艳，付 媛，等. 直流微网的多端暂态电压主动支撑控制技术[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4006-4016.
ZHANG Xiangyu, ZHAO Xinyan, FU Yuan, et al. Multi-terminal transient voltage active support control technology for DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4006-4016.

[3] MIAO M, LOU S H, ZHANG Y X, et al. Research on the optimized operation of hybrid wind and battery energy storage system based on peak-valley electricity price[J]. Energies, 2021, 14(12): 3707.

[4] 刘 璐，牛 萌，郑伟杰，等. 考虑内部参数不一致性的储能系统用锂电池组建模[J]. 电力系统自动化，2021，45(19)：15-23.
LIU Lu, NIU Meng, ZHENG Weijie, et al. Modeling of lithium-ion battery packs for energy storage system considering inconsistency of internal battery parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 15-23.

[5] MORSTYN T, SAVKIN A V, HREDZAK B, et al. Multi-Agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4735-4743.

[6] 户艳琴，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.

[7] 吴青峰，孙孝峰，王雅楠，等. 基于分布式下垂控制的微电网分布式储能系统 SOC 平衡策略[J]. 电工技术学报，2018，33(6)：1247-1256.
WU Qingfeng, SUN Xiaofeng, WANG Yanan, et al. A distributed control strategy for SOC balancing of distributed energy storage systems in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1247-1256.

[8] 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)：2316-2326.
TIAN Yanjun, PENG Fei, ZHU Xiaorong, et al. Flexible analogous virtual synchronous generator control for energy storage units in DC microgrid[J]High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2316-2326.

[9] 王开让，赵一名，孟建辉，等. 基于自适应模型预测控制的光储虚拟同步机平滑并网策略[J]. 高电压技术，2023，49(2)：831-839.
WANG Kairang, ZHAO Yiming, MENG Jianhui, et al. Smooth grid-connected strategy for photovoltaic-storage virtual synchronous generator based on adaptive model predictive control[J]High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 831-839.

[10] 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)：3819-3829.
MA Yuechao, WANG Shengtie, LIU Guangchen, et al. Research on virtual DC generator-based control strategy of DC microgrid with wind/energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3819-3829.

[11] 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.

[12] 张福民，白 松，李占凯，等. 基于 VSG 技术的微电网储能荷电状态控制策略[J]. 电网技术，2019，43(6)：2109-2115.
ZHANG Fumin, BAI Song, LI Zhankai, et al. Control strategy for microgrid storage system's state of charge based on virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2109-2115.

[13] CAI Y C, QI D L. A distributed VSG control method for a battery energy storage system with a cascaded H-bridge in a grid-connected mode[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 343-352.

[14] CHEN M, ZHOU D, BLAABJERG F. A decentralized adaptive SOC balancing strategy in VSG-based islanded power system[C]//IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Toronto, Canada: IEEE, 2021: 1-6.

[15] LIANG X D, ANDALIB-BIN-KARIM C, LI W X, et al. Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 46-60.

[16] 任碧莹，邱姣姣，刘 欢，等. 基于虚拟同步发电机双机并联系统的参数自调节优化控制策略[J]. 电工技术学报，2019，34(1)：128-138.
REN Biying, QIU Jiaojiao, LU Huan, et al. Optimization control strategy of self-adjusting parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 128-138.

[17] LIU A D, LIU J, WU Q. Improvement of VSG transient performance based on power feedforward decoupling control[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(20): 4080-4095.

[18] 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.

[19] 葛平娟，涂春鸣，肖 凡，等. 面向暂态稳定性能提升的 VSG 参数灵活控制策略[J]. 中国电机工程学报，2022，42(6)：2109-2123.
GE Pingjuan, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Transient stability enhancement of a VSG based on flexible switching of control parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2109-2123.

[20] 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. SOH balancing scheme for distributed energy storage systems in microgrid based on multi-agent[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(2): 104-112.

[21] WU Q F, GUAN R Z, SUN X F, et al. SOC balancing strategy for multiple energy storage units with different capacities in islanded microgrids based on droop control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 1932-1941.

[22] PASETTI M, FERRARI P, BELLAGENTE P, et al. Artificial neural

network-based stealth attack on battery energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5310-5321.

[23] 张福东，朴政国，郭裕祺，等. VSG 转动惯量的自适应控制策略研究[J]. 太阳能学报，2020，41(10)：93-100.
ZHANG Fudong, PIAO Zhengguo, GUO Yuqi, et al. Research on adaptive control strategy of VSG rotational inertia[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(10): 93-100.

[24] HOU X C, SUN Y, ZHANG X, et al. Improvement of frequency regulation in VSG-Based AC microgrid via adaptive virtual inertia[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1589-1602.

[25] 周　晖，王　跃，李明烜，等. 孤岛并联虚拟同步发电机暂态功率分配机理分析与优化控制[J]. 电工技术学报，2019，34(增刊 2)：654-663.
ZHOU Hui, WANG Yue, LI Mingxuan, et al. Analysis and optimal control of transient active power sharing between islanded parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Supplement2): 654-663.

[26] 万晓凤，詹子录，丁小华，等. 基于虚拟同步发电机的多逆变器并联改进控制策略[J]. 电机与控制学报，2020，24(2)：118-127.
WAN Xiaofeng, ZHAN Zilu, DING Xiaohua, et al. Improved control strategy of multi-inverter parallel based on virtual synchronous generator[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(2): 118-127.

[27] 许振宇，陈　殷，石梦璇，等. 基于一致性算法的并联虚拟同步机系统小信号模型分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(7)：2427-2437.
XU Zhenyu, CHEN Yin, SHI Mengxuan, et al. Small-signal analysis of consensus-algorithm-based parallel virtual synchronization generators system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2427-2437.

[28] CHEN S M, SUN Y, HAN H, et al. A modified VSG control scheme with virtual resistance to enhance both small-signal stability and transient synchronization stability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 6005-6014.



WU Qingfeng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

吴青峰(通信作者)
1987—，男，博士，副教授，硕导
主要从事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的研究
E-mail: 827211907@qq.com



CHU Xiaolin

褚晓林
1998—，男，硕士生
主要从事储能系统变换器控制技术研究
E-mail: 1561803690@qq.com

收稿日期　2023-01-17　修回日期　2023-08-10　　编辑　何秋萍

附录 A

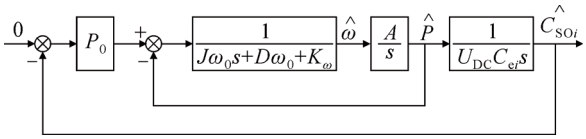


图 A1　VSG 小信号模型

Fig.A1　VSG small signal model

表 A1　特征方程参数

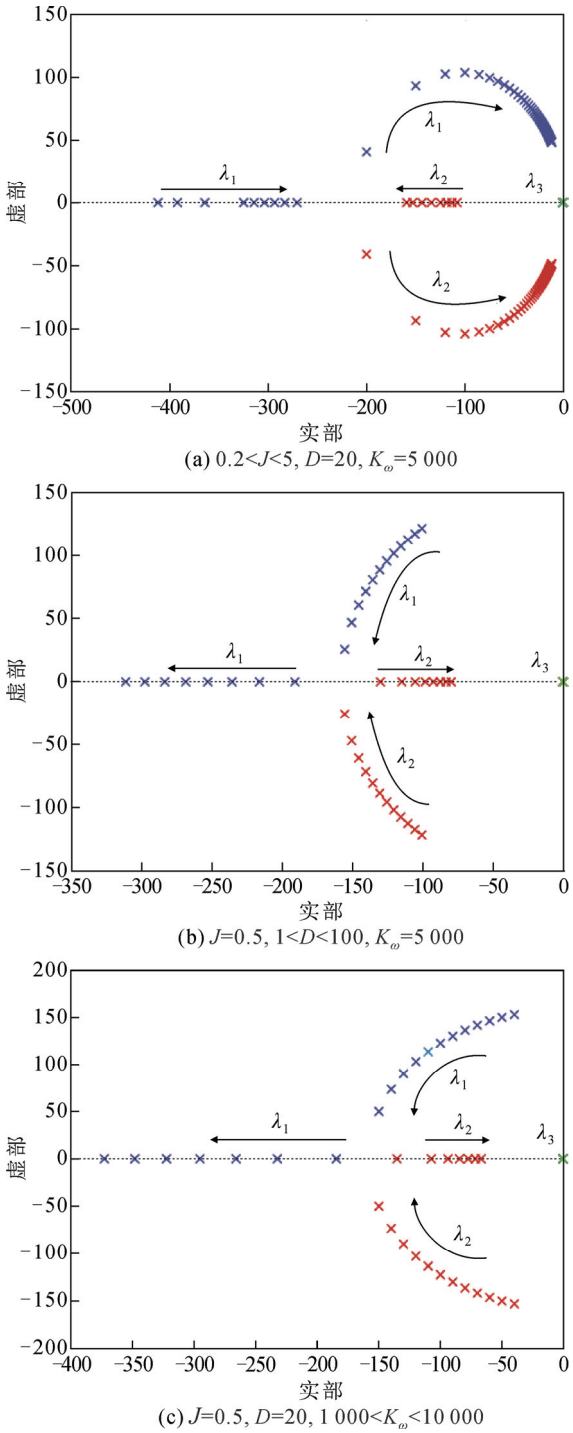
Table A1　Characteristic equation parameters

参数名称	符号	数值
直流额定电压/V	V_{DC}	700
LBESS 容量/Ah	C_{ei}	50
额定角频率/(rad·s^{-1})	ω_0	314
转动惯量/(kg·m^2)	J	0.2~5
阻尼系数/(N·m·s·rad^{-1})	D	1~100
负载电压/V	U_L	300
额定功率/kW	P_0	10
电压幅值/V	E_i	313
频率系数/(rad·kW^{-1})	K_ω	1~10
等效电抗/Ω	X_i	0.15

表 A2　仿真和实验参数

Table A2　Simulation and experimental parameters

参数	符号	仿真值	实验值
直流额定电压/V	U_{DC}	700	200
线路阻抗/Ω	Z_{line1}	0.01+j0.25	0.2+j1.0
	Z_{line2}	0.02+j0.5	0.4+j2.0
额定角频率/(rad·s^{-1})	ω_0	314	314
额定功率/kW	P_{01}	30	0.4
	P_{02}	15	0.2
转动惯量/(kg·m^2)	J_1	1	0.02
	J_2	0.5	0.01
阻尼系数/(N·m·s·rad^{-1})	D_1	20	0.4
	D_2	10	0.2
频率系数/(rad·kW^{-1})	$K_{\omega1}$	5.0	0.06
	$K_{\omega2}$	2.5	0.03



(a) 0.2<J<5, D=20, K_ω=5 000

(b) J=0.5, 1<D<100, K_ω=5 000

(c) J=0.5, D=20, 1 000<K_ω<10 000

图 A2　J、D 和 K_w 变化时系统特征根轨迹

Fig.A2　Root locus of system characteristics with J、D and K_ω changes