第 50 卷 第 1 期：127-137 高电压技术 Vol.50, No.1: 127-137
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230066

考虑时变线阻的多储能 SOC 稳定均衡控制策略

卢志刚，苗泽裕，蔡　瑶
（河北省电力电子节能与传动控制重点实验室(燕山大学)，秦皇岛 066004）

摘　要：在直流微电网中，由于线路阻抗大小差异的复杂化，难以保证各储能单元之间达到荷电状态（state-of-charge, SOC）均衡。为此，提出一种考虑时变线阻的 SOC 均衡改进控制策略。首先，通过线路阻抗和 SOC 幂指数构造的平衡因子来修正控制系数，提高 SOC 的辨识度。同时，利用输出电流来约束平衡因子，提高系统的抗扰能力。在 SOC 均衡之后，SOC 平衡因子 G 变为 1，此时依赖线路阻抗信息但不受线路阻抗变化影响，可平稳地保持电流分配。并且结合输出电流构造的电压补偿环节有效地解决了母线电压质量和 SOC 均衡控制效果之间的矛盾。其次，针对基于 SOC 均衡的改进控制策略易受恒功率负载影响的问题，利用混合势函数理论进行建模，得到稳定性判据，有利于保障系统的稳定运行。最后，仿真结果表明，所提出的改进下垂控制能够有效地消除线路阻抗的影响，提高电流分配精度，实现 SOC 均衡，并验证了在各种突发扰动及极端情况下所提控制策略的有效性和正确性。
关键词：直流微电网；储能系统；下垂控制；SOC 均衡；混合势函数理论

Stable Equilibrium Control Strategy for Multi-energy Storage SOC Considering Time-varying Linear Resistance

LU Zhigang, MIAO Zeyu, CAI Yao
(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In DC microgrids, it is difficult to ensure the state of charge (SOC) balance among energy storage units due to the complexity of line impedance. Therefore, an improved SOC equalization control strategy considering time-varying linear resistance is proposed. Firstly, the control coefficient is modified by the balance factor which is constructed by line impedance and SOC power index to improve the identification of SOC. At the same time, the output current is used to constrain the balance factor and improve the anti-disturbance ability of the system. After SOC equalization, G becomes 1. At this time, the current distribution can be maintained smoothly by relying on the line impedance information without being affected by line impedance changes. The contradiction between bus voltage quality and SOC equalization control effect is solved by voltage compensation link combined with output current. Secondly, for the problem that the improved control strategy based on SOC balancing is susceptible to constant power load, the mixed potential function theory is used for modeling to obtain the stability criterion, which is conducive to ensuring the stable operation of the system. Finally, the simulation results show that the improved drooping control proposed in this paper can effectively eliminate the influence of line impedance, improve the accuracy of current distribution, achieve the balance of SOC, and verify the effectiveness and correctness of the proposed control strategy under various sudden disturbances and extreme conditions.
Key words: DC microgrid; energy storage system; droop control; SOC balancing; mixed potential theory

0　引言

在“双碳”战略倡导下，清洁能源的高速发展已势不可挡。随着电力电子化的深入、清洁能源渗透率的不断提高以及现代直流负载的高度普及，直流微电网备受青睐[1-3]。直流微电网包含分布式电源、储能单元以及各类负荷[4]。储能系统被广泛用于补偿分布式电源和负载之间的功率不平衡[5]。合理配置储能系统可以解决波动性、间歇式新能源所带来的不稳定问题，极大地促进清洁能源的有效利用。其控制架构和控制策略的合理性是保障直流微电网安全平稳运行的关键[6]。为了满足系统的工作要求，储能单元一般工作于并联状态。

多个储能单元并联工作时，系统安全平稳运行的关键是保障各个储能单元具有相同的荷电状态

基金资助项目：国家自然科学基金重点项目(52130702)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (Key Program) (52130702).

(state-of-charge, SOC)[7-8]。储能单元通常采用表征电压和功率、电压和电流等关系的下垂控制来实现负荷在各个并联储能单元之间的合理分配[9]。在实际情况中，受天气、环境的影响，各支路线路阻抗的大小差异变得更加复杂化。从而使得输出电流不等，难以保证各储能单元之间达到 SOC 均衡[10]。另外，由于制造差异，各储能单元可能具有不同的内部阻抗、自放电率、温度特性等，这也会造成各储能单元之间 SOC 不均衡[7]。因此，需要合理的控制架构和控制策略来保障系统稳定运行。

为了保证各储能单元能达到 SOC 均衡，国内外学者提出了各种解决方法。文献[11]利用储能单元的 SOC 的 n 次幂来实时改变下垂系数，然而该方法抗干扰能力较差。文献[12]提出一种阻抗检测方法，利用线路阻抗信息来修正下垂系数，改善了负荷分配精度。文献[13]针对的 I-U 下垂控制，通过引入电压变化率来代替电压在下垂控制中的作用，在一定程度上提高电流负荷的分配精度。

在上述研究所提出的均衡控制策略中，由于未考虑线路阻抗的影响或者忽略了 SOC 信息，均无法达到理想的控制效果。基于此，文献[14]提出利用一致性算法实现 SOC 均衡，并且结合滑模控制提高了控制策略的可靠性。文献[15]提出了一种精确的功率分配方法来平衡直流微电网中储能单元之间的 SOC。将 SOC 值反馈到下垂系数当中，实现了精确的功率分配，无论线路电阻的差异如何，都可以实现储能单元之间的 SOC 平衡。文献[16]针对直流微电网，提出一种改进 SOC 幂指数下垂控制，提高了 SOC 均衡速度。然而该方法的控制效果易受线路参数影响，并且该方法不可避免的会造成母线电压跌落。文献[17]提出一种改进下垂控制策略，利用中央控制器发出的同步信号触发采样保持器，调节控制参数，实现 SOC 均衡。该方法通讯信息有较强的依赖性，可靠性较低。在文献[18]所提出的控制策略中，将线路电阻实时补偿到下垂控制中，并且还额外设置了通讯中断控制公式来保障控制效果，但其控制算法相对复杂。

基于以上分析，本文在传统下垂控制的基础上，引入荷电状态以及线路阻抗信息，提出了一种基于 SOC 均衡的改进控制策略。其中，平衡因子的引入可以有效地实现 SOC 均衡，阻抗信息的引入可以稳定的保持电流分配效果，进而可以稳定的保持 SOC 均衡状态。该方法克服了线路阻抗的影响，消除了循环电流，实现了各储能单元间的 SOC 稳定均衡，将直流微电网母线电压保持在可接受的值内，并且在各种突发扰动及极端情况下同样可以获得良好的控制效果，提高了储能单元使用效率并延长其使用寿命。经过仿真验证了所提策略的有效性和正确性。

1 直流微电网传统下垂控制分析

直流微电网的典型拓扑结构如图 1 所示，主要可概括为分布式电源、储能单元及各类负载等[19]。

直流微电网可工作于离网和并网模式，储能电池通过双向 DC/DC 换流器与直流母线相连[20]。各并联换流器通常采用下垂控制，而传统下垂控制因线路阻抗差异等原因，会导致环流、SOC 不均衡等问题[21]。

直流微电网负荷分配方法普遍采用 I-U 或 P-U 下垂控制，这里采用表征电压和电流关系的 I-U 下垂控制方法，其表达式为：

$$u_{\mathrm{dc}} = u_{\mathrm{dcref}} - k_i i_{\mathrm{dc}} \tag{1}$$

式中：k_i 为变换器下垂控制系数；u_{dcref} 为参考电压；u_{dc} 为输出电压；i_{dc} 为输出电流。

直流微电网中两容量相等的储能单元并联的等效模型如图 2 所示，其中 R_{L} 为等效负载；r_i 为线路电阻；$u_{\mathrm{dc}i}$ 为变换器输出端口电压；u_{pcc} 为公共点电压。变换器内部损耗忽略不计。

根据图 2 可得各变换器的输出电流及直流母线电压表达式：

$$i_{\mathrm{dc}} = \frac{u_{\mathrm{dc}} - u_{\mathrm{PCC}}}{r_i} \tag{2}$$

$$u_{\mathrm{pcc}} = u_{\mathrm{dc}} - r_i i_{\mathrm{dc}} \tag{3}$$

把式(1)带入到式(3)中，得到两储能单元输出电流的比值为：

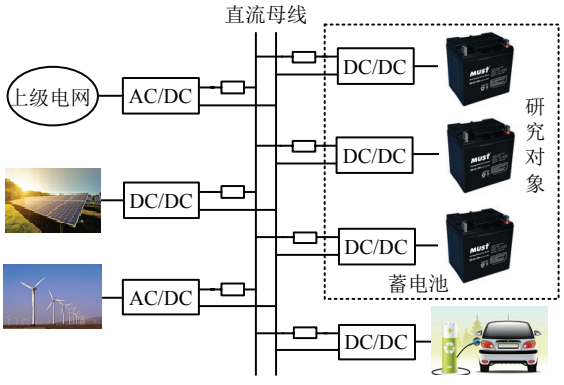


图 1 直流微电网典型结构

Fig.1 Typical structure of DC microgrid

$$\frac{i_{\mathrm{dc1}}}{i_{\mathrm{dc2}}}=\frac{k_2+r_2}{k_1+r_1} \tag{4}$$

由式(4)可知，电流分配不仅受下垂系数影响而且受到线路电阻的影响。联立式(1)和式(3)可得图 3 所示关系，可以看出传统下垂控制中线路阻抗使得电流分配精度明显降低。

储能单元荷电状态可以表示为：

$$S_{\mathrm{OC}i}=S_{\mathrm{OC}i(0)}-\frac{l\int i_{\mathrm{dc}}\mathrm{d}t}{Q_i} \tag{5}$$

式中：$S_{\mathrm{OC}i(0)}$表示初始 SOC 状态；$S_{\mathrm{OC}i}$ 表示当前荷电状态；l 表示变换器输出输入电压比；Q_i 为储能单元容量。对式(5)进行求导，可得 SOC 的变化率：

$$S'_{\mathrm{OC}i}=-\frac{li_{\mathrm{dc}}}{Q_i} \tag{6}$$

式(6)表明，输出电流越大，SOC 变化率越大，荷电状态上升或下降越快。进一步可以得到两个储能单元荷电状态变化率的比值：

$$\frac{S'_{\mathrm{OC1}}}{S'_{\mathrm{OC2}}}=\frac{k_2+r_2}{k_1+r_1} \tag{7}$$

当 $r_1\neq r_2$ 时，无法使得各储能单元 SOC 变化率相等，所以在传统下垂控制下无法实现 SOC 均衡。因此，为保证系统的安全稳定，需要对控制策略加以改进。

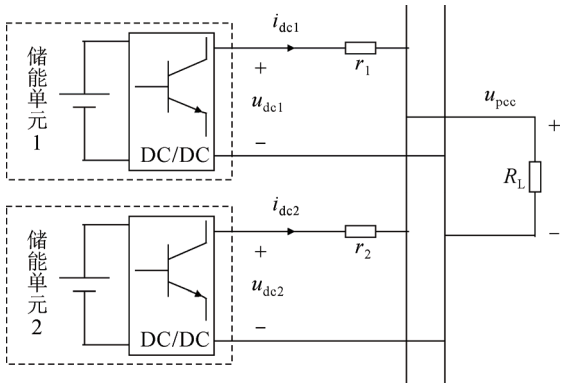


图 2　储能单元等效模型

Fig.2　Equivalent model of energy storage unit

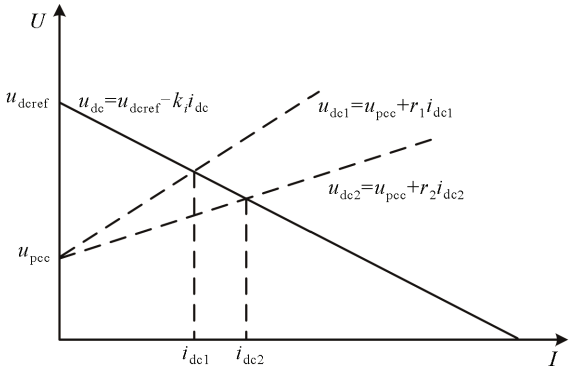


图 3　线路阻抗对电流分配的影响

Fig.3　Effect of line impedance on current distribution

2　基于 SOC 均衡的改进控制策略

2.1　改进控制策略

2.1.1　含线路阻抗信息的 SOC 均衡控制策略

通过以上分析，可以明确系统的控制目标为：消除线路阻抗的影响，在确保各变换器之间平等或按比例的分配电流的同时，保证各储能单元能达到 SOC 均衡，并将电压恢复到可接受的范围。SOC 均衡需要达到两个条件即：各个储能单元的 SOC 相同且输出电流合理分配。

为了达到控制目标，在传统下垂控制的基础上引入线路阻抗和 SOC 信息，提出如下改进下垂控制，具体为：

$$\begin{cases}u_{\mathrm{dc}}=u_{\mathrm{dcref}}-\left(Gk_i-r'_i\right)i_{\mathrm{dci}}\\ G=\left(\dfrac{S^n_{\mathrm{OCave}}}{S^n_{\mathrm{OC}}}\right)\quad \text{放电}\\ G=-\left(\dfrac{S^n_{\mathrm{OCave}}}{S^n_{\mathrm{OC}}}\right)\quad \text{充电}\end{cases} \tag{8}$$

其中：$S_{\mathrm{OCave}}=\dfrac{1}{M}\left(s_1+s_2+\cdots s_i\right)$

$$s_i=\begin{cases}S_{\mathrm{OC}i}, & i_{\mathrm{dc}i}\neq 0\\ 0, & i_{\mathrm{dc}i}=0\end{cases}$$

$$M=m_1+m_2+\cdots m_i$$

$$m_i=\begin{cases}1, & s_i\neq 0\\ 0, & s_i=0\end{cases}$$

式中：S_{OCave}表示所有储能单元的 SOC 的平均值；G 表示 SOC 平衡因子；M 为实时储能单元数；r'_i 表示线路阻抗检测值；n 为幂指数，可以提高 SOC 辨识度，以达到更好的控制效果。

其中，需要说明的是，指数 n 的选取要结合系统要求，如额定功率、系统性能、调节时间等。在两台储能单元并联系统中，当指数 n 变化时，通过系统启动、负荷突变来获得其取值对起始功率、起始电压峰值等指标的影响，结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出起始输出功率与指数 n 成正比，因此需要选取适当的指数 n 使得起始输出功率不超过其额定功率。当系统带恒功率负载运行时，n 值变化不会对恒功率负载突变所带来的母线电压波动产生明显影响，但启动电压峰值会随着 n 取值的

不断增加而增加。所以，n 值越大系统越容易受到恒功率负载的影响。这对 n 值提出了新的要求。

另外，在控制系统的设计中往往会有时间尺度的要求，需要在给定的时间内完成指定精度的控制任务。所以指数 n 的取值需要保证电流分配速率和 SOC 均衡速率满足设计要求。

2.1.2 阻抗检测方法

在 2.1.1 节中，提出改进下垂控制策略，并对其中的关键问题进行了说明。为了保障所提改进下垂控制的控制效果，需要实时精确的测量出线路阻抗值。在现有研究中，已经有很多的线路阻抗检测方法被提出，如：串联扰动电压源法、母线电压测量法和交流注入法等。

根据本文的控制要求，采用基于脉冲宽度调制(pulse width modulation，PWM)载波基频分量的阻抗检测法。变换器输出的电压电流所携带的交流信号可以通过母线电阻、母线电容直接回到负极。等效电路如图 4 所示。

对采集的输出电压电流进行快速傅里叶变换，各个频率中能量最高的一组，其频率在数值上等于控制器提供的 PWM 载波频率，即功率器件开关频率[18]。

结合微电网的结构特点，便可实现对线路阻抗的实时检测。文献[18]和[19]已经充分说明了该方法的合理性，并验证了其可行性，所得线路阻抗表达式如式(9)。

$$\begin{cases} u_{\mathrm{f}}=\displaystyle\int_{t}^{t+T} u_{\mathrm{dc}}\sin\omega t\mathrm{d}t \\ i_{\mathrm{f}}=\displaystyle\int_{t}^{t+T} i_{\mathrm{dc}}\sin\omega t\mathrm{d}t \\ \omega=2\pi f \\ r'=\dfrac{u_{\mathrm{f}}}{i_{\mathrm{f}}}-R_{\mathrm{bus}} \end{cases} \tag{9}$$

式中：u_{f}、i_{f} 分别为电压和电流的高频纹波值；R_{bus}、C_{bus} 分别为直流母线对应的电阻和电容；f 表示开关频率；r'为线路阻抗的检测值。

2.1.3 直流母线电压补偿

本文所提的改进下垂控制可以很好的完成各储能单元之间的 SOC 均衡。但均衡控制部分不可避免的将导致变换器输出电压降低，进而影响母线电压质量。因此，引入电压补偿环节，可以有效地解决母线电压质量和 SOC 均衡控制效果之间的矛盾。本文设计的电压补偿环节为：

$$\Delta U=\frac{k_i}{M}\left(i_{\mathrm{dc1}}+i_{\mathrm{dc2}}+\cdots i_{\mathrm{dci}}\right) \tag{10}$$

所提改进下垂控制的整体结构如图 5 所示，从图中可以看出，改进的控制方式以储能变换器当前自身 SOC 值以及所对应的线路电阻为依据调整输出电流。

2.2 控制策略分析

储能单元 SOC 均衡原理如图 6 所示。以图 2 所示系统放电过程为例，假设两台储能单元的 SOC 关系为 $S_{\mathrm{OC1}}>S_{\mathrm{OC2}}$，由式(8)可得平衡因子 $G_1<1<G_2$。由式(4)可得：

$$\frac{i_{\mathrm{dc1}}}{i_{\mathrm{dc2}}}=\frac{G_2k_2}{G_1k_1} \tag{11}$$

表 1 n 值影响效果表

Table 1 n effect table

n 值	起始功率/W	电压降落/V	电压峰值/V
10	795	1.780	438.8
15	835	1.745	445.5
20	875	1.721	451.8
25	915	1.735	457.8
30	950	1.721	463.4

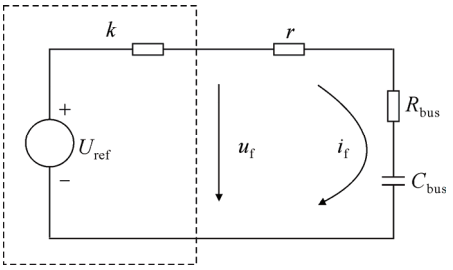


图 4 等效结构图

Fig.4 Equivalent structure diagram

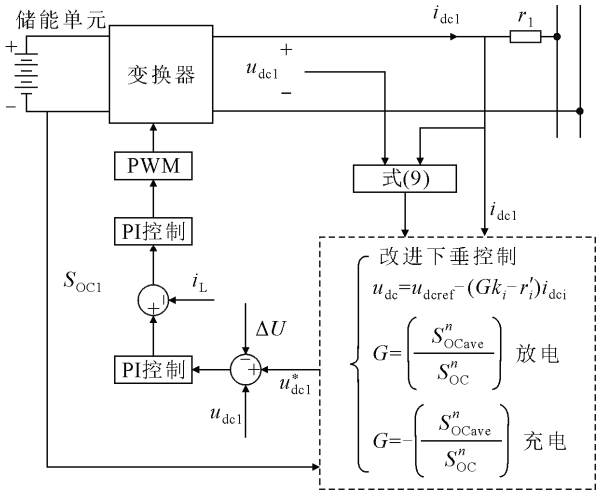


图 5 控制系统整体结构

Fig.5 Overall structure of control system

由此可知：$i_{dc1}>i_{dc2}$，根据式(6)可知一号储能单元的 SOC 变化率更大，所以其剩余容量的下降速度更快。而一号储能单元的剩余容量又相对更多，因此，经过一段调节过程后，输出电流逐渐均衡，SOC 差值逐渐减少，最终实现各个储能单元之间的 SOC 均衡。充电时均衡原理和与放电时同理，此处不再展开说明。

当 SOC 在不同变换器之间没有达到均衡时，本文所提方法能够消除线路参数所带来的影响，并且在一些突发情况下，仍然具备控制能力，实现输出电流合理分配。

当 SOC 在不同变换器之间达到均衡时，平衡因子 G 变为 1。控制算法变为：

$$u_{dc}=u_{dcref}-\left(k_i-r_i\right)i_{dc} \tag{12}$$

由于线路阻抗信息的引入，可以保证电流的分配情况不变，SOC 变化率一直相同，该平衡状态可以稳定的保持，且不受线路阻抗变化的影响。此时，该控制策略仅需自身线路阻抗信息，对通讯的依赖程度大大降低。

因此，在系统调控和运行的整个过程中，都能够在保证各储能单元剩余容量相等的基础上，实现各储能单元 SOC 的变化率始终相等。在各种突发扰动及极端情况下，保持良好的控制效果，保障系统平稳运行。此外，该方法还可以调节 SOC 的平衡速度，如图 7 所示，可看出 n 取值越大，SOC 均衡速度越快。

3　基于混合势函数理论的稳定性分析

在含有储能单元的直流微电网中，本文所引入的控制参数 G 在系统带恒功率负载运行时会引起稳定性问题。n 值越大系统越容易受到恒功率负载的影响，存在失稳风险。恒功率负荷的功率突变是常见的大信号扰动形式[22-24]。因此，本章在基于 SOC 均衡的改进下垂控制前提下，利用混合势函数理论法对含恒功率负载的直流微电网展开分析。

混合势函数模型标准形式为：

$$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{i},\boldsymbol{u})=-\boldsymbol{A}(\boldsymbol{i})+\boldsymbol{B}(\boldsymbol{u})+\boldsymbol{i}^{\mathrm{T}}\cdot(\boldsymbol{\gamma u}-\boldsymbol{\alpha}) \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{i})$为电流势函数；$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{u})$为电压势函数；$\boldsymbol{\gamma}$、$\boldsymbol{\alpha}$为常数矩阵和向量。

建立好混合势函数后，可通过下式验证其正确性。式中：i_ρ、u_σ 为电感电流和电容电压；L_ρ、C_σ 分别为相应的电感和电容。

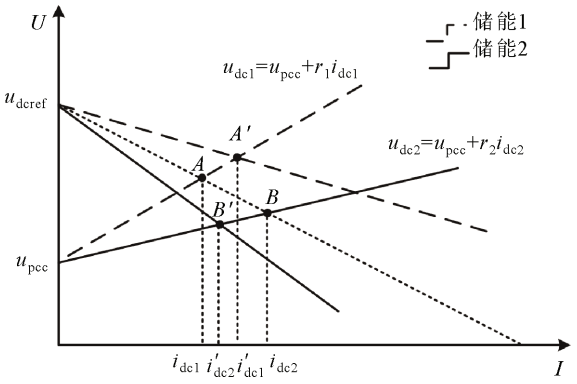


图 6　SOC 均衡过程

Fig.6　SOC equalization process

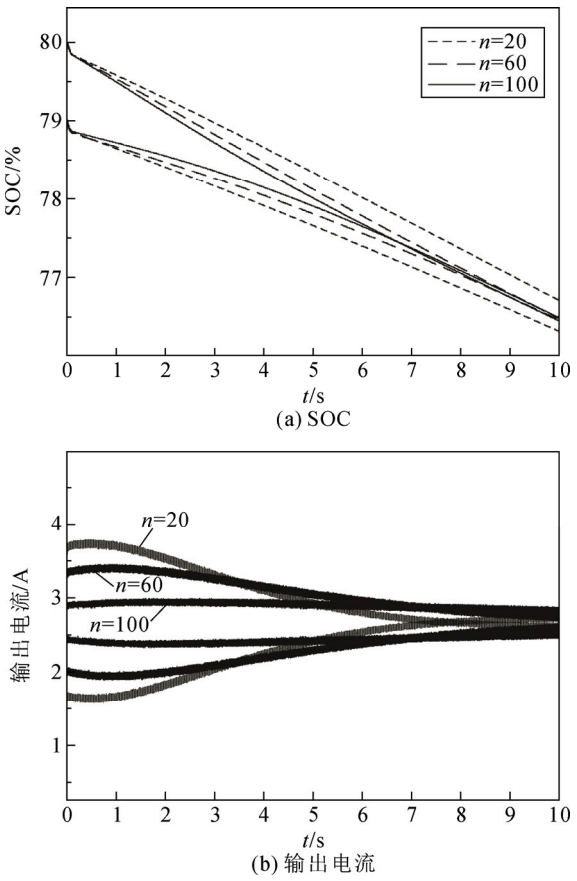


图 7　n 不同取值时的控制效果

Fig.7　n Indicates the control effect of different values

$$\begin{cases} L_\rho\dfrac{\mathrm{d}i_\rho}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\partial P}{\partial i_\rho} \\ -C_\sigma\dfrac{\mathrm{d}u_\sigma}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\partial P}{\partial u_\sigma} \end{cases} \tag{14}$$

根据混合势理论第三条稳定性定理，当满足式(15)和式(16)时系统能稳定运行。

$$\begin{cases}\mu_1+\mu_2>0\\ \mu_1=\min\lambda\left(\boldsymbol{L}^{-1/2}\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{ii}}(\boldsymbol{i})\boldsymbol{L}^{-1/2}\right)\\ \mu_2=\min\lambda\left(\boldsymbol{C}^{-1/2}\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{uu}}(\boldsymbol{u})\boldsymbol{C}^{-1/2}\right)\end{cases}\tag{15}$$

且当$|i|+|u|\to\infty$时：

$$\boldsymbol{P}^*(i,u)=\left(\frac{\mu_1-\mu_2}{2}\right)\boldsymbol{P}(\boldsymbol{i},\boldsymbol{u})+\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{P}_i,\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{P}_i\right)+\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{P}_u,\boldsymbol{C}^{-1}\boldsymbol{P}_u\right)\to\infty\tag{16}$$

应用混合势函数理论，建立如图 8 所示系统的混合势函数模型，如式(17)所示。为便于计算，以带有两个恒功率负载的直流微电网并联系统为例进行分析。其中，r_{L1}、r_{L2} 为负载侧线阻；r_{d1}、r_{d2} 为等效下垂系数；L_i、C_i 为滤波元件；c_0 为等效电容；u_{e} 为母线电压；P_{cpli} 为恒功率负载功率；i_{l1}、i_{l2} 为电感支路电流；u_{c1}、u_{c2} 为电容支路电压。r_{c3}、r_{c4}、C_3、C_4 为阻尼滤波环节的电阻、电容。

$$P=-\frac{r_{\mathrm{L1}}i_{\mathrm{l1}}^2+r_{\mathrm{L2}}i_{\mathrm{l2}}^2}{2}+\frac{u_{\mathrm{e}}^2-2u_{\mathrm{ref}}u_{\mathrm{e}}}{2r_{\mathrm{d1}}}+\frac{u_{\mathrm{e}}^2-2u_{\mathrm{ref}}u_{\mathrm{e}}}{2r_{\mathrm{d2}}}+\begin{pmatrix}i_{\mathrm{l1}}\\ i_{\mathrm{l2}}\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\cdot\begin{pmatrix}1&-1&0\\ 1&0&-1\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}u_{\mathrm{e}}\\ u_{\mathrm{c1}}\\ u_{\mathrm{c2}}\end{pmatrix}+\int\frac{P_{\mathrm{cpl1}}}{u_{\mathrm{c1}}}\mathrm{d}u_{\mathrm{c1}}+\int\frac{P_{\mathrm{cpl2}}}{u_{\mathrm{c2}}}\mathrm{d}u_{\mathrm{c2}}+\frac{(u_{\mathrm{c1}}-u_{\mathrm{c3}})^2}{2r_{\mathrm{c3}}}+\frac{(u_{\mathrm{c2}}-u_{\mathrm{c4}})^2}{2r_{\mathrm{c4}}}\tag{17}$$

经验证，式(17)满足式(14)要求，因此本文推导的混合势函数模型是正确的，由此进一步分析得到：

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{i})=\frac{1}{2}r_{\mathrm{L1}}i_{\mathrm{l1}}^2+\frac{1}{2}r_{\mathrm{L2}}i_{\mathrm{l2}}^2\\ \boldsymbol{B}(\boldsymbol{u})=\frac{u_{\mathrm{e}}^2}{2r_{\mathrm{d1}}}+\frac{u_{\mathrm{e}}^2}{2r_{\mathrm{d2}}}+\int\frac{P_{\mathrm{cpl1}}}{u_{\mathrm{c1}}}\mathrm{d}u_{\mathrm{c1}}+\int\frac{P_{\mathrm{cpl2}}}{u_{\mathrm{c2}}}\mathrm{d}u_{\mathrm{c2}}\\ \qquad\quad+\frac{(u_{\mathrm{c1}}-u_{\mathrm{c3}})^2}{2r_{\mathrm{c3}}}+\frac{(u_{\mathrm{c2}}-u_{\mathrm{c4}})^2}{2r_{\mathrm{c4}}}\end{cases}\tag{18}$$

从而求得：

$$\boldsymbol{C}^{-1/2}\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{uu}}(\boldsymbol{u})\boldsymbol{C}^{-1/2}=\begin{bmatrix}\frac{G_1+G_2}{C_0G_1G_2k_i}&0&0&0&0\\ 0&\frac{u_{\mathrm{c1}}^2-P_{\mathrm{cpl1}}r_{\mathrm{c3}}}{C_1u_{\mathrm{c1}}^2r_{\mathrm{c3}}}&0&0&0\\ 0&0&\frac{u_{\mathrm{c2}}^2-P_{\mathrm{cpl2}}r_{\mathrm{c4}}}{C_2u_{\mathrm{c2}}^2r_{\mathrm{c4}}}&0&0\\ 0&0&0&\frac{1}{C_3r_{\mathrm{c3}}}&0\\ 0&0&0&0&\frac{1}{C_4r_{\mathrm{c4}}}\end{bmatrix}\tag{19}$$

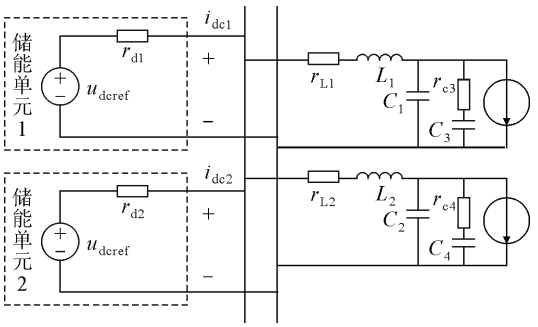


图 8 简化直流微电网的等效模型

Fig.8 Simplified DC microgrid equivalent model

$$\boldsymbol{L}^{-1/2}\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{ii}}(\boldsymbol{i})\boldsymbol{L}^{-1/2}=\begin{bmatrix}\frac{r_{\mathrm{L1}}}{L_1}&0\\ 0&\frac{r_{\mathrm{L2}}}{L_2}\end{bmatrix}\tag{20}$$

式中：$A_{ii}(i)$为 $A(i)$对电流的二阶偏导；$B_{uu}(u)$为 $B(u)$对电压的二阶偏导。

进而可以求得μ_1 与μ_2，根据稳定性要求，μ_1 与μ_2 的值需满足式(15)，由此解得系统的大信号稳定性判据如下。

$$\min\left(\frac{G_1+G_2}{c_0G_1G_2k_i},\frac{u_{\mathrm{c1}}^2-P_{\mathrm{cpl1}}r_{\mathrm{c3}}}{C_1u_{\mathrm{c1}}^2r_{\mathrm{c3}}},\frac{u_{\mathrm{c2}}^2-P_{\mathrm{cpl2}}r_{\mathrm{c4}}}{C_2u_{\mathrm{c2}}^2r_{\mathrm{c4}}},\frac{1}{C_3r_{\mathrm{c3}}},\frac{1}{C_4r_{\mathrm{c4}}}\right)+\min\left(\frac{r_{\mathrm{L1}}}{L_1},\frac{r_{\mathrm{L2}}}{L_2}\right)>0\tag{21}$$

根据混合势理论第三条稳定性定理，当满足式(21)时系统便能够在恒功率负荷突变等扰动下维持稳定，可为参数选择提供参考，为系统设计提供一定的帮助，有利于保障系统的安全运行。

4 仿真分析

为验证本文所提方法的正确性，本文基于 Matlab/Simulink 搭建了如图 2 所示系统的仿真模型，对理论分析结果进行验证，模型参数取值如表 2 所示。

首先对稳定判据进行检验，其次对所提控制方法进行验证，最后在各种突发扰动以及极端情况下，对本文所提控制方法的控制效果进行检验，并与其他幂指数型改进方法进行对比，本文与文献[16]中所提方法进行对比。

4.1 稳定判据分析

本节对所提稳定判据进行仿真分析。分 3 种情况讨论，如表 3 所示。20 s 时由情景 1 切换到情景 2，40 s 时由情景 2 切换到情景 3。

表 2　系统仿真参数

Table 2　System simulation parameters

参数	数值
母线电压/V	400
变换器功率等级/kW	3
初始 SOC	0.8
变换器电感/H	1.2×10^{-3}
线路阻抗 r_1/Ω	1.2
线路阻抗 r_2/Ω	1
线路阻抗 r_3Ω	1.4
n	100
采样频率/kHz	10

表 3　电路参数

Table 3　Circuit parameters

参数	情景 1	情景 2	情景 3
r_{si}/Ω	0.03	0.03	0.03
C_i/μF	5	5	5
L_i/μH	10	10	10
P_{cpl1}/W	2000	2300	2500
P_{cpl2}/W	300	300	300
是否满足判据	满足	满足	不满足

3 种情况切换的仿真结果如图 9 所示。

结果显示，恒功率负载的功率由 2000 W 阶跃变化到 2300 W 时，满足稳定性判据，母线电压依然维持在 400 V 左右，保持稳定；恒功率负载的功率由 2300 W 阶跃变化到 2500 W 时，不再满足稳定性判据，母线电压大幅振荡，系统不稳定，可知混合势理论估计结果可行。

4.2　系统正常运行

在模型中搭建 3 台同容量的储能变换器并联运行的模型。系统正常运行，采用改进控制方式的控制效果如图 10 所示。0~14 s 时，采用传统下垂控制。14 s 后，采用改进下垂控制。

结果显示，14 s 前采用传统下垂控制，各储能单元间的 SOC 偏差逐渐扩大，并且母线电压偏差较大。14 s 后切换至本文所提的改进下垂控制，输出电流依据 SOC 数值关系跳变，电流分配误差以及 SOC 偏差逐渐消除，使得因线路阻抗而产生的 SOC 不均衡现象得以改善，实现 SOC 快速均衡。并且弥补了线路阻抗及均衡控制部分所造成的电压降落，直流母线电压保持在 400 V。

4.3　容量不同

为检验容量不同时的控制效果，设置 3 台储能单元容量比为 3:2:4，其仿真结果见图 11。

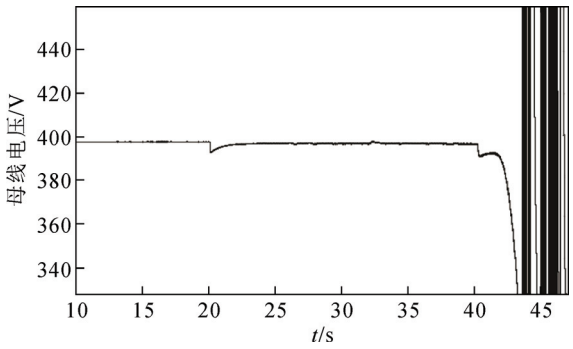
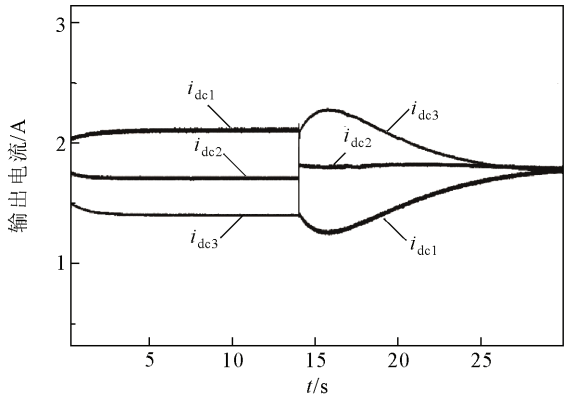
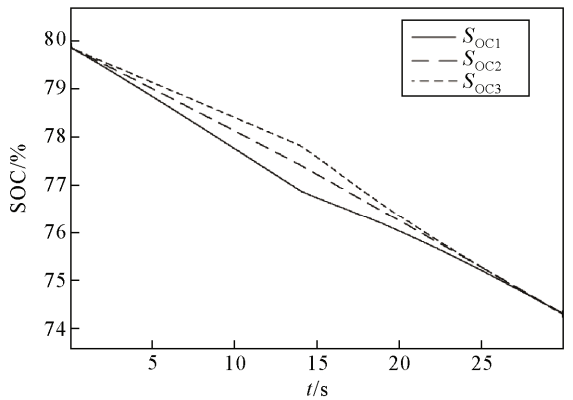


图 9　3 种情况切换时母线电压

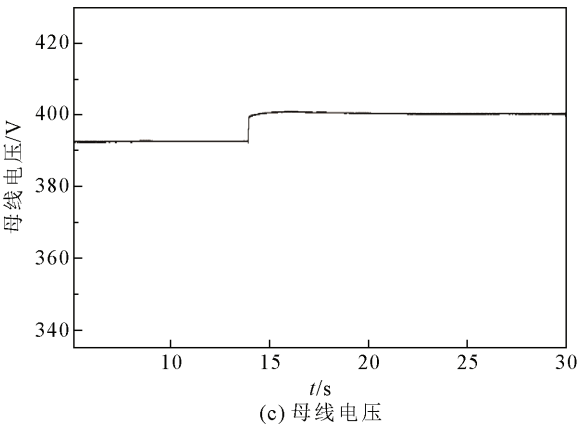
Fig.9　Three cases of switching bus voltage



(a) 输出电流



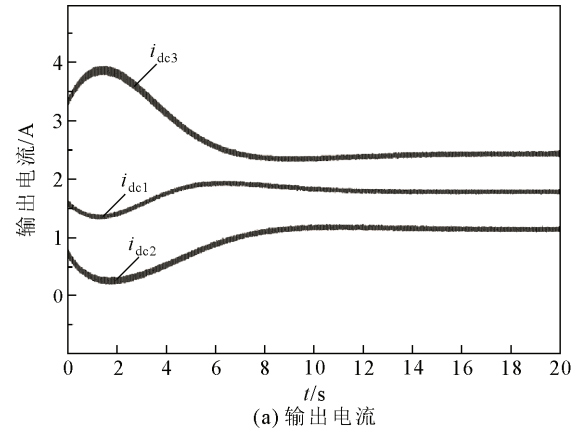
(b) SOC



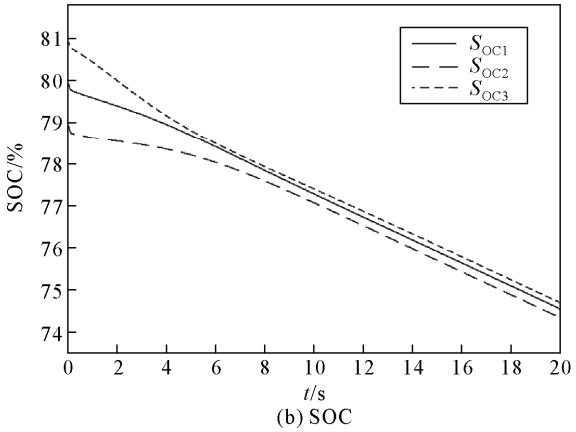
(c) 母线电压

图 10　系统正常运行时仿真结果

Fig.10　Simulation results of normal operation of the system



(a) 输出电流



(b) SOC

图 11 容量不同时仿真结果

Fig.11 Simulation results of different capacities

从结果来看，平衡之后，输出电流可以实现按容分配。此时，各储能单元 SOC 虽然存在少量偏差，但 SOC 均衡倾向不被改变，具有调控能力，将 SOC 偏差限制在极小范围内。

4.4 负载突变

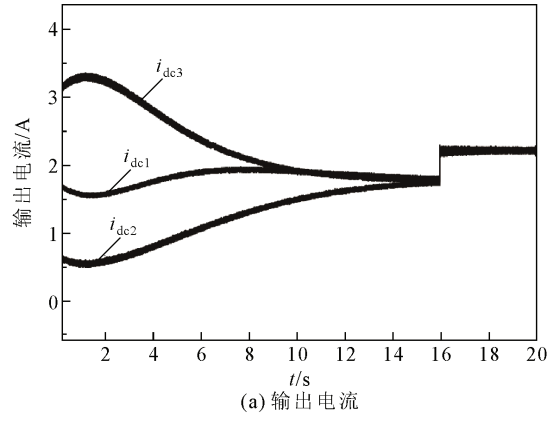
为检验负载变化对控制策略的影响，设置系统运行至第 16 s 时系统等效负载突减。其仿真结果如图 12 所示，同样情况下，采用文献[16]方法的仿真结果如图 13 所示。

结果显示，16 s 时由于负载的突变导致各变换器输出电流有所抬升，进而 SOC 下降速度加快，但一直维持原有调控趋势，依旧能稳定实现电流负荷合理分配和 SOC 均衡，母线电压维持在额定水平。

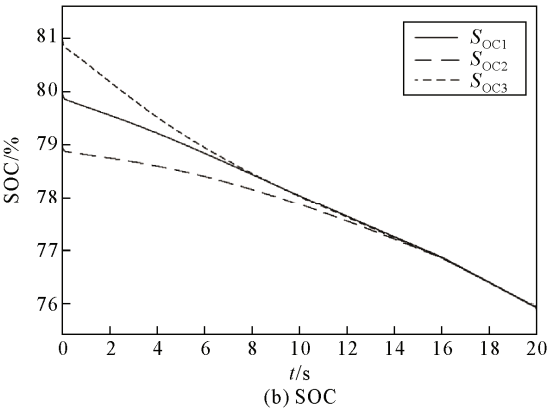
当采用文献[16]所提方法时，各储能单元的电流完成分配后，其 SOC 仍存在少量偏差，并且母线电压进一步降落，因此本文所提控制方法在负载突变时可以取得更好的控制效果。

4.5 线路阻抗变化

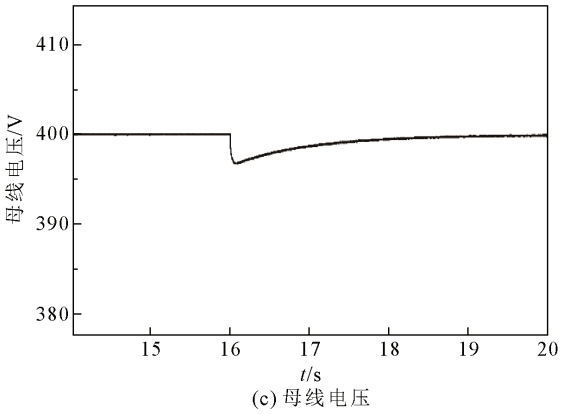
为检验线路阻抗变化产生的影响，6 s 时，将 1 号变换器对应的线路阻抗由 1.2 Ω 增加至 5 Ω，并与



(a) 输出电流



(b) SOC



(c) 母线电压

图 12 负载突变时仿真结果

Fig.12 Simulation results for load mutation

文献[16]中的控制效果作对比。其仿真结果如图 14 所示，采用文献[16]方法的结果如图 15 所示。

结果显示，采用本文所提方法时，线路阻抗的变化，仅会产生短暂的电流波动，并不会对总体的运行趋势及最终的控制效果产生影响。线路阻抗值的变化不会影响电流的分配，各储能单元 SOC 依然能够达到均衡。

采用文献[16]方法时，电流产生较大波动，并且对 SOC 均衡和电流分配结果产生较大影响，无法实现 SOC 均衡。对比可知，本文所提控制方法在线路阻抗变化时具有更好的 SOC 均衡效果。

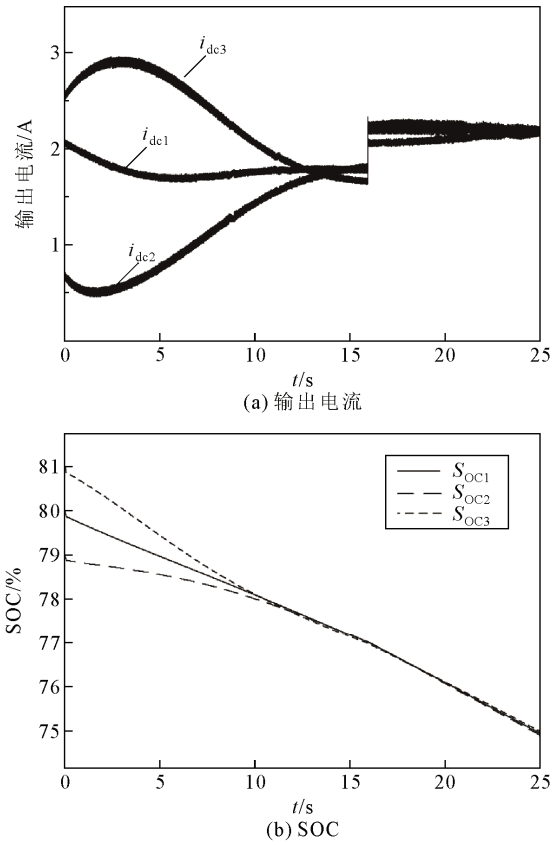


图 13　采用文献[16]方法时仿真结果

Fig.13　Simulation results when using the method of literature[16]

4.6　单台变换器故障切除

本节对单台变换器因故障退出的极端情况进行验证。16 s 时 1 号变换器由于故障退出运行。其仿真结果如图 16 所示，采用文献[16]方法的母线电压情况如图 17 所示。

结果显示，采用本文所提方法，当某台变换器发生故障时，剩余变换器输出电流瞬时升高，但是剩余变换器输出电流、SOC 曲线的变化趋势以及均衡结果均没有因某台变换器的退运而发生改变，母线电压水平也依旧理想。

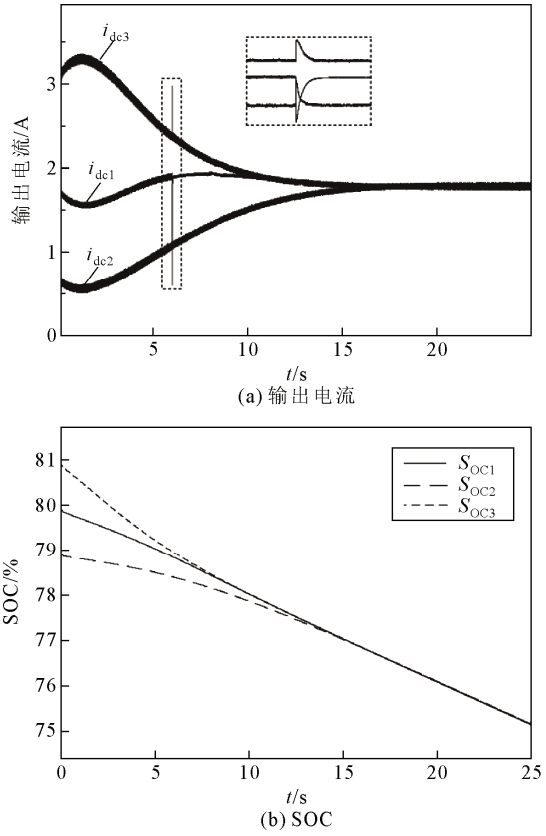


图 14　线路参数突变时仿真结果

Fig.14　Simulation results for abrupt change of line parameters

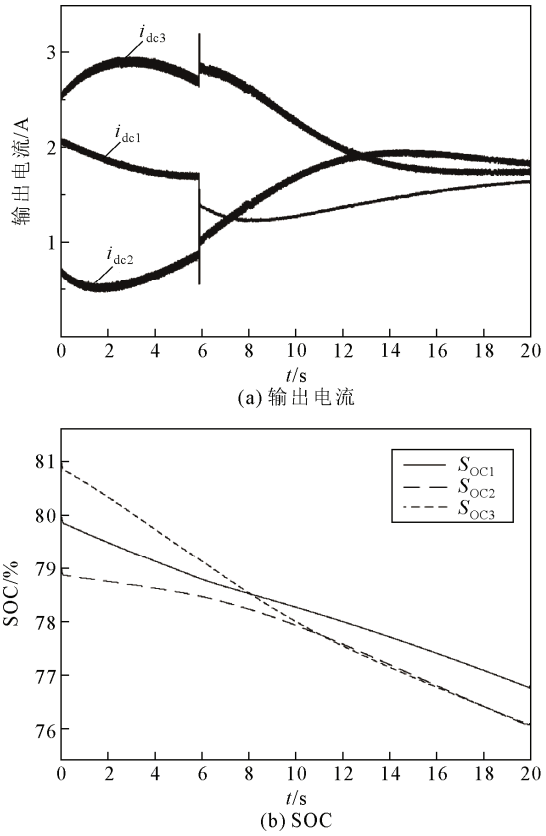
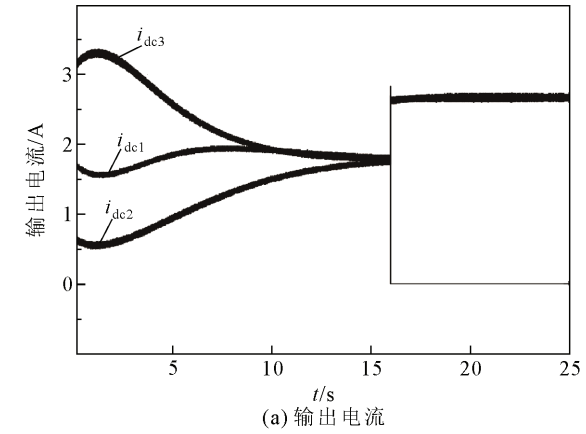
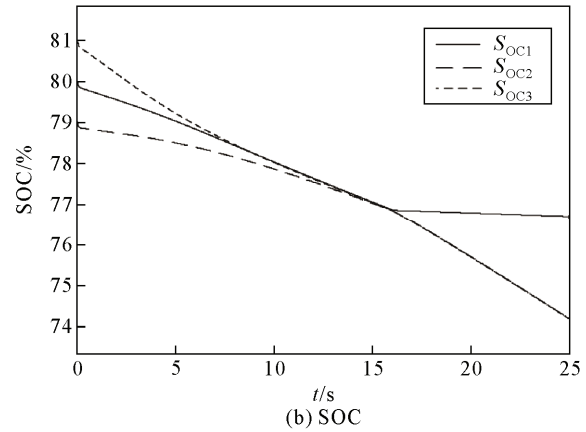


图 15　采用文献[16]方法时仿真结果

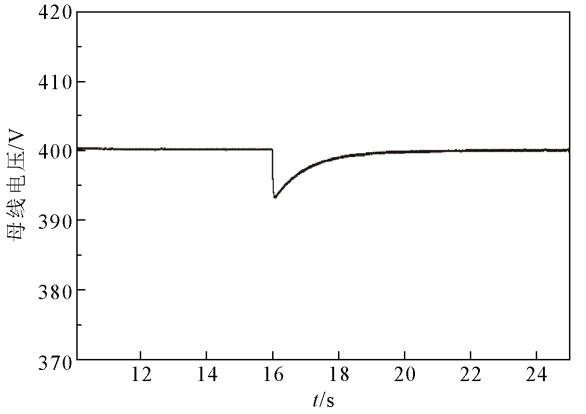
Fig.15　Simulation results when using the method of literature[16]



(a) 输出电流



(b) SOC



(c) 母线电压

图 16 单台变换器故障退出时仿真结果

Fig.16 Simulation results of single converter failure exit

采用文献[16]的方法时，变换器退运之后，母线电压失稳。因此，采用本文所提控制方法，母线电压更加稳定。

5 结论

为消除线路阻抗的影响，在确保电流合理分配的同时，保证各储能单元能达到 SOC 均衡。本文提出一种考虑时变线阻的 SOC 均衡改进下垂控制策略。经过理论与仿真分析，得出以下结论：

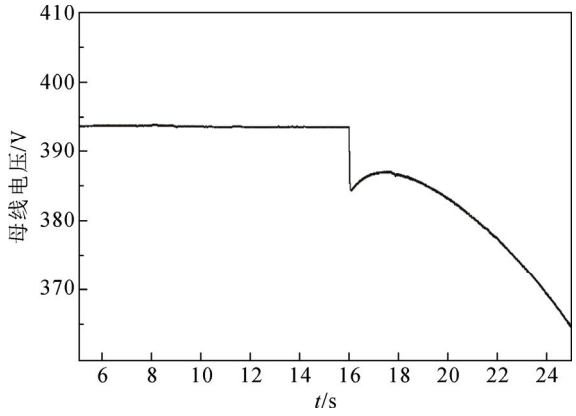


图 17 采用文献[16]方法时仿真结果

Fig.17 Simulation results when using the method of literature[16]

1）电流合理分配是各储能单元实现 SOC 均衡的前提条件，仅确保电流合理分配并不能保证各储能单元之间一定能达到 SOC 均衡。

2）本文所提出的改进下垂控制策可以有效地实现各储能单元之间的 SOC 均衡，在各种突发扰动及极端情况下也可以获得良好的控制效果。并且可以稳定地保持合理的电流分配结果，进而可以稳定维持此均衡状态。另外，在平衡之后直流微电网母线电压能够稳定维持在额定水平。

3）此类基于 SOC 均衡的改进下垂控制易受恒功率负载的影响。本文基于混合势函数理论得到了此时系统的约束条件，为系统设计提供了一定的参考和帮助。

参考文献 References

[1] 朱珊珊，汪 飞，郭 慧，等. 直流微电网下垂控制技术研究综述[J]. 中国电机工程学报，2018，38(1)：72-84.
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84.

[2] 刘 芳，刘 威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.

[3] XU Q W, XIAO J F, HU X L, et al. A decentralized power management strategy for hybrid energy storage system with autonomous bus voltage restoration and state-of-charge recovery[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7098-7108.

[4] 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.

[5] WANG R, SUN Q Y, HU W, et al. SoC-based droop coefficients stability region analysis of the battery for stand-alone supply systems

with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7866-7879.

[6] 李相俊，王上行，惠　东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术，2017，41(10)：3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.

[7] HAN W J, ZOU C F, ZHOU C, et al. Estimation of cell SOC evolution and system performance in module-based battery charge equalization systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4717-4728.

[8] YANG Q, JIANG L, ZHAO H L, et al. Autonomous voltage regulation and current sharing in islanded multi-inverter DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6429-6437.

[9] 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.

[10] SUN X F, HAO Y C, WU Q F, et al. A multifunctional and wireless droop control for distributed energy storage units in islanded AC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 736-751.

[11] LU X N, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2804-2815.

[12] 刘　琛，赵晋斌，王闪闪，等. 基于单脉冲注入的直流微电网线路阻抗检测[J]. 电工技术学报，2018，33(11)：2584-2591.
LIU Chen, ZHAO Jinbin, WANG Shanshan, et al. A line impedance identification based on single pulse injection in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2584-2591.

[13] 杨　捷，金新民，吴学智，等. 一种适用于直流微电网的改进型电流负荷分配控制策略[J]. 中国电机工程学报，2016，36(1)：59-67.
YANG Jie, JIN Xinmin, WU Xuezhi, et al. An improved load current sharing control method in DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 59-67.

[14] 王宇彬，杨晓东，谢路耀，等. 基于滑模控制的直流微电网一致性控制策略[J]. 电工技术学报，2021，36(增刊 2)：530-540，553.
WANG Yubin, YANG Xiaodong, XIE Luyao, et al. Consensus algorithm strategy of DC microgrid based on sliding mode control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Supplement2): 530-540, 553.

[15] HOANG K D, LEE H H. Accurate power sharing with balanced battery state of charge in distributed DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1883-1893.

[16] 李鹏程，张纯江，袁然然，等. 改进 SOC 下垂控制的分布式储能系统负荷电流分配方法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(13)：3746-3754.
LI Pengcheng, ZHANG Chunjiang, YUAN Ranran, et al. Load current sharing method of distributed energy storage systems by improved SOC drooping control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3746-3754.

[17] 米　阳，蔡杭谊，宋根新，等. 考虑不匹配线阻的分布式储能单元荷电状态均衡研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(15)：4441-4450.
MI Yang, CAI Hangyi, SONG Genxin, et al. State-of-charge balancing research of distributed energy storage units with unmatched line impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4441-4450.

[18] 曾国辉，朱相臣，曾志伟，等. 具有公共低压直流母线电压支撑功能的储能单元 SOC 自动均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报，2022，42(19)：7160-7169.
ZENG Guohui, ZHU Xiangchen, ZENG Zhiwei, et al. Energy storage unit state-of-charge automatic equalization control strategy with common LVDC bus voltage support function[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7160-7169.

[19] 朱相臣，赵晋斌，曾国辉，等. 基于载波频率的纹波分析直流微网阻抗检测及均流控制[J]. 中国电机工程学报，2020，40(21)：6894-6902.
ZHU Xiangchen, ZHAO Jinbin, ZENG Guohui, et al. An enhance droop control method with line impedance detection based on carrier frequency ripple analysis in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6894-6902.

[20] 厉泽坤，孔　力，裴　玮. 直流微电网大扰动稳定判据及关键因素分析[J]. 高电压技术，2019，45(12)：3993-4002.
LI Zekun, KONG Li, PEI Wei. Analyses of stability criterion and key factors of DC microgrid under large disturbance[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3993-4002.

[21] 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.

[22] CHANG F Y, CUI X F, WANG M Q, et al. Region of attraction estimation for DC microgrids with constant power loads using potential theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3793-3808.

[23] 滕昌鹏，王玉斌，周博恺，等. 含恒功率负载的直流微网大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报，2019，34(5)：973-982.
TENG Changpeng, WANG Yubin, ZHOU Bokai, et al. Large-signal stability analysis of DC microgrid with constant power loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 973-982.

[24] 刘欣博，刘　宁，宋晓通，等. 基于交流恒功率负载特性的交直流混合微电网系统大信号稳定性判据[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3441-3451.
LIU Xinbo, LIU Ning, SONG Xiaotong, et al. Large-signal stability criteria of AC/DC hybrid microgrid based on AC constant power loads[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3441-3451.



卢志刚(通信作者)
1963—，男，博士，教授，博导
主要从事电力系统经济运行分析与控制方向的研究工作
E-mail: zhglu@ysu.edu.cn

LU Zhigang
Ph.D., Professor
Corresponding author



苗泽裕
1998—，男，硕士生
主要从事高渗透率下微电网稳定性方面的研究工作
E-mail: miaozeyu_ysu@126.com

MIAO Zeyu

收稿日期　2023-01-16　修回日期　2023-06-15　　编辑　陈　蔓