

一种改善直流微电网负荷电流分配的下垂控制

李 冰, 李 岚, 王 浩, 柴 伦

(太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要:针对直流微电网中多个储能单元在补充或吸收系统功率的过程中,由于自身初始荷电状态(SOC)不同而出现的过充过放问题以及传统下垂控制法不能实时合理分配储能系统负荷电流的不足,为此研究开发一种新的基于蓄电池 SOC 幂指数的下垂控制方法。与传统方法的不同在于该方法能够根据 SOC 幂指数的变化实时改变下垂系数,使蓄电池 SOC 和负荷电流达到均衡状态。通过对 SOC 控制特性进行分析选出 SOC 幂指数控制算法的合理参数 $n=2$ 、 $p=7$ 。蓄电池充、放电以及负载波动时的自动充放电过程 Matlab/Simulink 仿真计算结果显示,所提方法能够有效均衡 2 组蓄电池的负荷电流与 SOC,且电压波动幅度控制在允许范围内。

关 键 词:直流微电网;分布式储能;负荷分配;SOC 均衡;下垂控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.006 中图分类号:TM743 文章编号:1673-9140(2022)01-0048-07

An improved droop control of load current sharing in DC microgrid

LI Bing, LI Lan, WANG Hao, CHAI Lun

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Multiple energy storage units in DC microgrid may encounter some problems during the progress of supplementing or absorbing the power of a system, such as the overcharging and over-discharging problems due to their different initial state of charge (SOC), and the traditional droop control method cannot reasonably allocate load current of the energy storage system in real-time. A new droop control method based on the battery SOC exponent is developed in response to the above problems. The difference from the traditional method is that the new method can change the droop coefficient in real-time according to the change of the SOC exponent so that the battery SOC and the load current reach an equilibrium state. In the paper, the SOC control characteristics are analyzed, and then the reasonable parameters $n=2$ and $p=7$ of the SOC exponent control algorithm are selected. The automatic charging and discharging process under battery charging, discharging, and load fluctuations is simulated on Matlab. It is shown that the proposed method can effectively balance the load current and SOC of the two battery groups. In addition, the voltage fluctuation amplitude is controlled within the allowable range.

Key words: DC microgrid; distributed energy storage; load distribution; SOC balance; droop control

近年来,随着可再生能源的不断应用和发展,提高电网对可再生能源的综合利用与系统整体能效成

为一种趋势。鉴于例如太阳能等可再生能源均有直流输出特性,且直流微电网^[1-5]中不存在谐波、相位

同步与无功功率损耗等问题,因此,发展直流微电网成为提高可再生能源综合利用的有效手段。然而,在直流微电网中,可再生能源的自身特性会导致系统出现间歇性波动,故需要储能单元对系统缺额或盈余功率进行补偿,从而维持直流母线电压的稳定^[6-7]。同时,储能单元还需要通过合理地控制自身充放电过程,使得负荷电流达到均分效果以改善系统的整体性能。

在直流微电网整体结构中,储能系统通过双向 DC-DC 变换器接入直流母线,其中双向 DC-DC 变换器的控制方法一般包括恒压控制、恒流控制、电压电流双闭环控制、I-V 下垂控制以及 V-P 下垂控制。在储能系统通过充放电平抑可再生能源功率波动和稳定母线电压的过程中,实现负荷电流均分^[8]以及防止储能系统出现过充或过放成为一大研究热点。国内外学者对于储能元件之间功率的合理分配控制策略做了很多研究。文献[9]采用 V-P 下垂控制,通过改变下垂系数的比例关系实现直流微电网内储能元件间的功率分配,同时通过在下垂控制反馈中增加补偿阻抗来提高母线电压的动态性能,但是控制策略中忽略了储能元件的初始荷电 (state of charge, SOC)^[10] 信息;文献[11]采用基于最大功率和自适应下垂控制来协调多组储能元件之间的功率分配,使系统内的有功功率保持平衡,但其中 SOC 仅用于限制控制策略,下垂系数与 SOC 无关;文献[12]提出了一种负荷电流分配与储能元件 SOC 的 n 次方成比例的控制策略,克服了线路阻抗影响,实现负荷电流均分,但是当 SOC 过小时系统会不稳定;文献[13]采用 SOC 指数函数来控制下垂系数的方法,但是由于在实际过程中 SOC 变化较为缓慢,导致下垂系数的变化率较小,系统均流速度慢。

针对以上问题,本文研究开发了一种基于蓄电池 SOC 幂指数的新型下垂控制方法。该方法解决了并联蓄电池储能单元初始荷电状态不同时,以同一速度持续充放电导致的其中一组元件出现过充过放以及负荷电流不均的问题。Matlab/Simulink 的仿真结果验证了该方法能够有效地均分储能元件 SOC 与负荷电流,且能够维持直流母线电压稳定。

1 光伏直流微电网结构与控制方法分析

1.1 光伏直流微电网结构

光伏直流微电网的结构^[14]如图 1 所示。其中光伏电池板作为分布式电源为特定区域内的楼宇等提供电能;储能系统中的超级电容和蓄电池分别作为功率型储能元件与能量型储能元件为系统充当后备电源,系统功率盈余时储能系统吸收功率,反之则补充功率缺额,从而弥补分布式电源的间歇性波动;除此之外,系统中还包括多种可控负载以及可以与系统进行能量交换的电动汽车。为突出重点,本文采用光伏与 2 组蓄电池并联的独立系统结构,并对储能元件负荷电流分配方法进行阐述与研究。

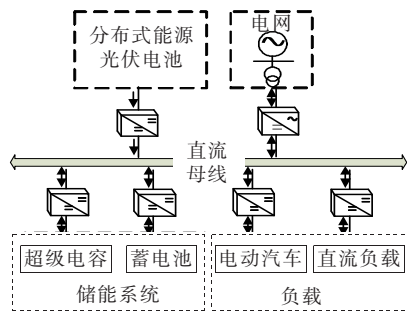


图 1 光伏直流微电网系统

Figure 1 System structure of photovoltaic DC microgrid

1.2 传统下垂控制分析

在微电网中,负荷的分配方法主要采用的是以直流母线电压为信号的 I-V 下垂控制。I-V 下垂控制是在直流母线电压的控制中通过引入电流反馈量和虚拟电阻,将给定的电压指令值进行修正,从而对有差控制的精度和达到的均流效果进行折中。2 台容量相等的储能单元并联简化后的等效模型如图 2 所示。

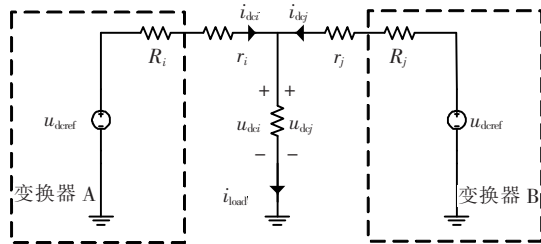


图 2 2 台变换器并联的传统下垂控制模型

Figure 2 Conventional droop control model of two converters in parallel

直流微电网中的传统 I-V 下垂控制的数学表达为

$$\begin{cases} u_{dci} = u_{dref} - R_i i_{dci} \\ u_{dcj} = u_{dref} - R_j i_{dcj} \end{cases} \quad (1)$$

式中 u_{dref} 为储能单元变换器 A、B 的空载时的参考电压； u_{dci} 、 u_{dcj} 分别为变换器 A、B 的输出电压； i_{dci} 、 i_{dcj} 分别为变换器 A、B 的输出电流； R_i 、 R_j 分别为变换器 A、B 的下垂系数。

在电流分配精度要求高的情况下，线路阻抗是不可忽略的。根据图 2 模型可列出并联储能单元等效方程组，即

$$\begin{cases} u_{dci} = u_{dref} - i_{dci}R_i - i_{dci}r_i \\ u_{dcj} = u_{dref} - i_{dcj}R_j - i_{dcj}r_j \\ u_{dci} = u_{dcj} \end{cases} \quad (2)$$

式中 r_i 、 r_j 分别为变换器 A、B 的线路阻抗。式(2)可化简为

$$\frac{i_{dci}}{i_{dcj}} = \frac{R_j + r_j}{R_i + r_i} \quad (3)$$

根据戴维宁等效原理，图 2 所示电路可以化简为

$$u_L = u_{dref} \cdot \frac{R_L}{(R_i + r_i) // (R_j + r_j) + R_L} \quad (4)$$

线路阻抗与下垂系数的大小直接影响了直流母线电压的变化，但是在传统下垂控制中不能根据储能元件的状态实时的调整下垂系数的大小，使得储能元件以单一的速度进行充放电且负荷电流的分配不可控，从而导致低容量的储能元件发生过放现象，或者高容量的储能元件发生过充现象。

2 改进下垂控制方法

考虑到传统下垂控制的缺陷，所提策略以储能元件 SOC 作为中间变量对下垂系数进行实时控制，使得负荷电流逐渐均分，最终达到负荷均流的状态且保持母线电压稳定。

为了使蓄电池的充放电速率与自身荷电状态相关，提出了一种基于 SOC 的改进下垂控制，储能单元的下垂系数与电流之间需要满足的关系为

$$R_i(S_{OCi})i_{dci} = R_j(S_{OCj})i_{dcj} \quad (5)$$

为促进 SOC 平衡及负荷电流的均分，要求每组蓄电池吸收或释放给直流微电网的功率必须关于其电荷状态加权，即在充电过程中，SOC 高的蓄电池组吸收较少电量，SOC 低的蓄电池组吸收较多电量；在放电过程中，SOC 高的蓄电池组释放较多电量，SOC 低的蓄电池组释放较少电量，实现 SOC 的快速均衡。文献[10]中提出的控制算法为

$$R(S_{OC}) = \begin{cases} R_D \exp[p(S_{OC} - A_{SOC})], i_{dc} < 0 \\ R_D \exp[-p(S_{OC} - A_{SOC})], i_{dc} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

然而在实际运行中储能元件的容量问题导致 SOC 的变化率很小，使得算法均流速度很慢。

为使均流速度与精度提高，本文在其基础上进行了关于 SOC 幂指数的改进控制，改进后的控制为

$$u_{dc} = u_{dref} - R(S_{OC})i_{dc} \quad (7)$$

$$S_{OC} = S_{OC0} - \frac{1}{C_{bat}} \int i_{bat} dt \quad (8)$$

$$R(S_{OC}) = \begin{cases} R_D \exp[p(S_{OC}^n - A_{SOCn})], i_{dc} < 0 \\ R_D \exp[-p(S_{OC}^n - A_{SOCn})], i_{dc} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式(7)~(9)中 S_{OC0} 为蓄电池的初始荷电状态； R_D 为一个初始给定的下垂系数； A_{soc} 为蓄电池的平均荷电状态。当 $i_{dc} < 0$ 时，如果储能元件 SOC 值大于平均值，即 $S_{OC} > A_{soc}$ ，则将导致 $R(S_{OC}) < R_D$ ，意味着储能单元将比没有添加 S_{OC} 控制时提供更大的负荷电流；如果 $S_{OC} < A_{SOC}$ ，则 $R(S_{OC}) > R_D$ ，下垂系数增加使其提供的负荷电流减小。当 $i_{dc} > 0$ ，情况与上述相反。值得说明的是，添加的 SOC 控制只在 SOC 不平衡时启动，一旦 SOC 被均衡，下垂系数就会返回初始值 R_D ，恢复传统状态。

由式(2)、(3)、(4)、(8)、(9)可以得到电流不平衡度之间关系，即

$$\Delta i_{dc} = u_{dref} \left[\frac{1}{R_L} - \frac{2 \exp\left(\frac{p \Delta S_{OC}^n}{2}\right) + \frac{R_D}{R_L}}{R_D + 2R_L \cosh\left(\frac{p \Delta S_{OC}^n}{2}\right)} \right] \quad (10)$$

$$\Delta S_{OC} = \Delta S_{OC}^0 - \frac{u_{dc}}{u_{Batt} \cdot C_{Batt}} \int \Delta i_{dc} \cdot dt \quad (11)$$

式中 u_{Batt} 为电池组端电压; C_{Batt} 为蓄电池组容量; ΔS_{OC}^0 为 2 组蓄电池的初始 SOC 差值。由 Δi_{dc} 与 ΔS_{OC} 所示关系作出不同 n 、 p 时两者的关系曲线, 如图 3 所示。

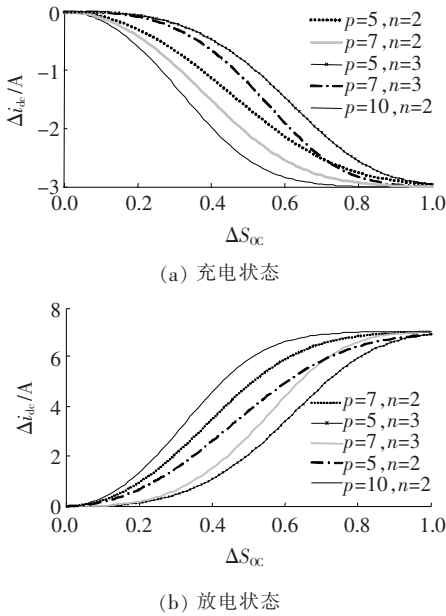


图 3 不同 n 、 p 时 Δi_{dc} 与 ΔSOC 关系曲线

Figure 3 Curves of Δi_{dc} and ΔSOC with different n , p

从 SOC 控制公式可知, $R(S_{OC})$ 与参数 R_D 、 p 、 n 有关。根据 $R(S_{OC})$ 控制公式, 利用 MATLAB/Simulink 得到图 4 所示三维立体图。当 p 值接近 ± 10 时, $R(S_{OC})$ 曲面会发生大幅度的冲击, 不利于系统的稳定, 且 n 值越大, 曲面波动的面积越大, 因此在参数选择时, n 、 p 取值不宜过大。

由图 3 可知, p 、 n 与蓄电池输出电流和 SOC 的均衡速度有关。 n 一定时, p 越大, Δi_{dc} 变化越快, 但是当 ΔSOC 趋近 0 时, 不同 p 值作用下的电流差值不明显, 需要 n 值辅助均衡 SOC, 使得电流在整个范围内都具有较快的变化速度。且由图 3 可知, 在 $\Delta SOC < 0.2$ 的范围内, $n = 2$ 比 $n = 3$ 能使系统获得更快的均流速度。在实际情况下, 2 组蓄电池 SOC 差值一般不会超过 50%。综合考虑以上 2 个条件约束, 本文选择 $p = 7$ 、 $n = 2$ 作为 SOC 改进下垂法的控制参数。

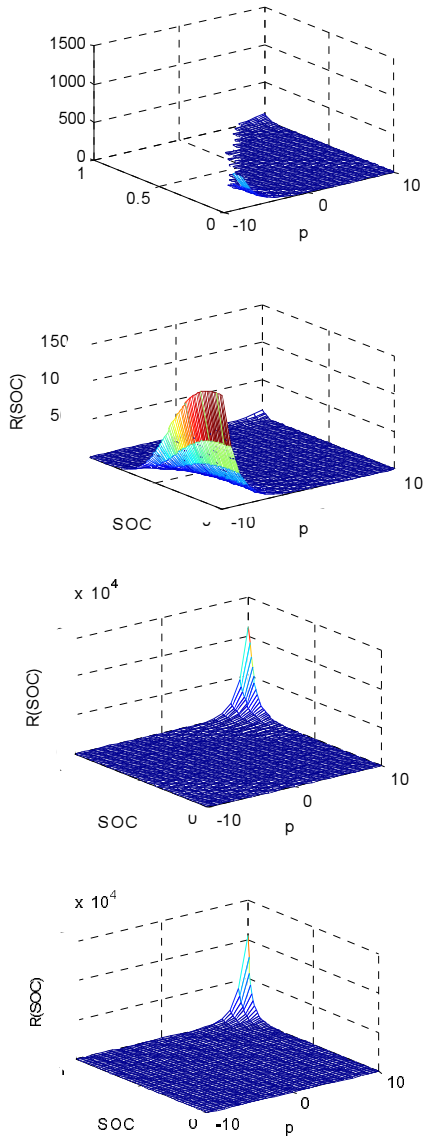


图 4 $R(S_{OC})$ 曲面

Figure 4 Surface diagram of $R(S_{OC})$

3 仿真实验

为了验证本文中所提的含有 SOC 控制和电压前馈补偿的改进下垂控制在维持光伏直流微电网安全稳定运行与均衡储能元件 SOC 和负荷电流方面的有效性, 利用 Matlab/Simulink 搭建了如图 5 所示的仿真模型。仿真中分布式能源采用最大出力为 2 kW 的光伏系统, 储能单元采用 2 组相同容量的蓄电池并联, 直流母线电压为 400 V。

充电情况下, 光伏模块采用 MPPT 控制恒定出力 2 kW, 负载电阻大小设置为 133 Ω , 蓄电池 S_{OC1}

初始值为 50%， S_{OC2} 初始值为 10%；放电情况中，光伏模块控制不变，负载电阻大小设置为 53 Ω ，蓄电池 S_{OC1} 初始值为 100%， S_{OC2} 初始值为 60%且 2

蓄电池均采用含 SOC 的改进下垂控制法，得到的蓄电池输出电流、直流母线电压与蓄电池 SOC 波形如图 6、7 所示。

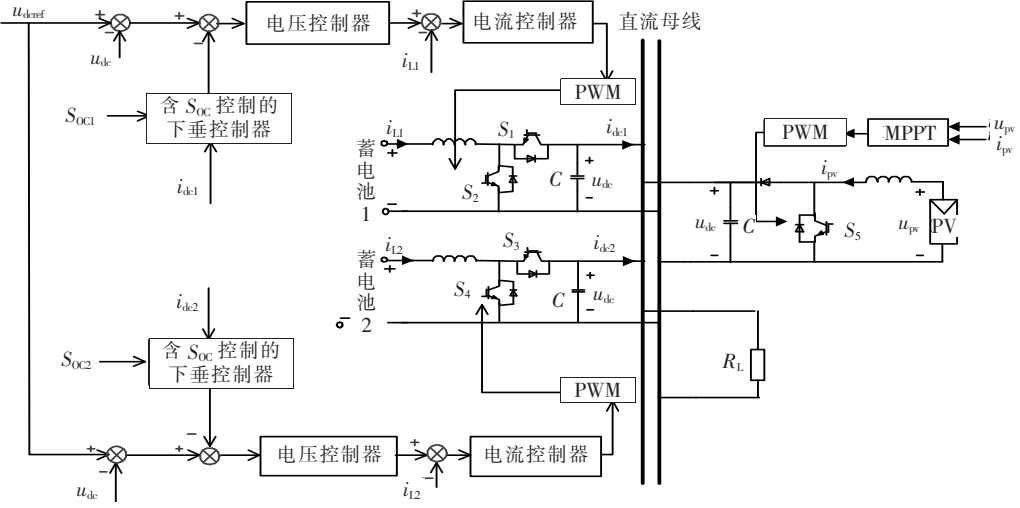


图 5 光伏直流微电网控制系统

Figure 5 Control system of photovoltaic DC microgrid

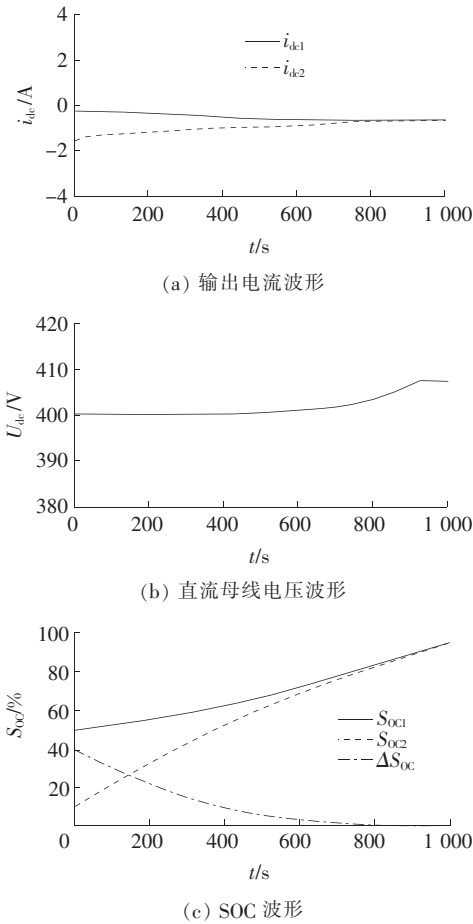


图 6 充电过程 i_{dc} 、 u_{dc} 和 SOC 波形

Figure 6 The waveform of i_{dc} , u_{dc} and SOC in charging mode

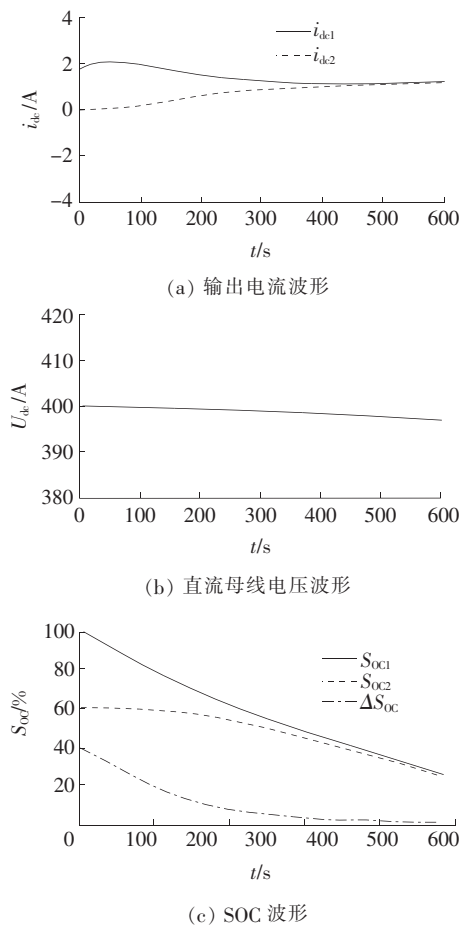


图 7 放电过程 i_{dc} 、 u_{dc} 和 SOC 波形

Figure 7 Waveform of i_{dc} , u_{dc} and SOC in discharging mode

根据充电仿真结果可以看到,2 组蓄电池的 SOC 初始值为 40%,蓄电池 1 的输出电流明显小于蓄电池 2,且 2 组蓄电池输出电流之和为 2 A 左右,符合参数设置。随着充电过程的不断进行,两蓄电池的 SOC 不断均衡,且输出电流在 800 s 左右达到平衡状态;放电情况中蓄电池 1 的输出电流明显大于蓄电池 2,且两蓄电池输出电流之和为 2 A 左右。与充电情况类似,2 组蓄电池的输出电流在 400 s 左右达到一致状态。储能单元负责调节总线电压,但是下垂系数会由于 SOC 算法而不断变化,导致系统电压会发生波动。其中,充电情况时,母线电压波动 8 V 左右,放电情况时,母线电压波动约为 3 V,但是这种干扰产生的电压波动在允许范围内。充放电电流的不断均衡验证了所提策略的有效性,2 组蓄电池自动充放电仿真结果如图 8 所示。

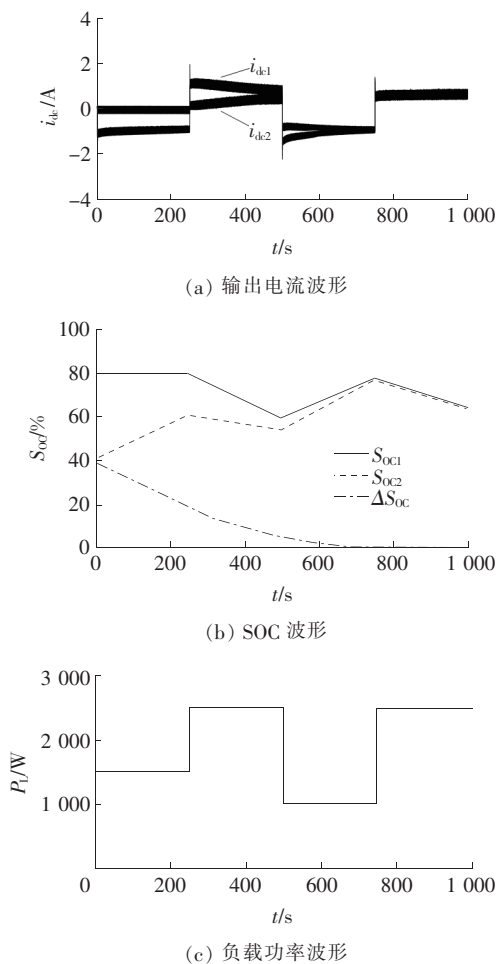


图 8 负载波动时自动充放电仿真波形

Figure 8 Simulation waveform of automatically charging and discharging when the load fluctuates

在自动充放电仿真中,蓄电池 1、2 的 SOC 初始值分别为 80%、40%,负载功率在 250 s 时由 1 500 W 突增至 2 500 W,500 s 时降至 1 000 W,750 s 时又恢复 2 500 W,蓄电池经历了 2 次先充电再放电的过程。由图 8 可知,图 8(a)中蓄电池输出电流随着负载的波动不断的均衡,图 8(b)中 SOC 也随着负载波动不断均衡,最终 2 组蓄电池的 SOC 趋于一致。且算法会自动根据出力大小调整充放电速率,不断地均衡电流。

4 结语

针对直流微电网中不同荷电状态的并联蓄电池组用同一速度进行充放电可能会使其中一组元件产生过充过放的问题,而且 2 组蓄电池不能实时均流的缺陷,本文提出了一种基于 SOC 控制的改进下垂法。通过 Matlab/Simulink 仿真,得到在充、放电情况下,下垂系数能够跟随蓄电池 SOC 实时变化,且 2 组蓄电池的负荷电流与 SOC 能够逐渐达到平衡状态;在负载波动的自动充放电情况下,算法能够根据系统所需的出力大小改变蓄电池的充放电速率,最终使得输出电流与 SOC 趋于一致。仿真结果验证了所提策略的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] 王建建,孙媛媛,马钊,等. 孤岛直流微电网接地运行方式及接地故障特性研究[J]. 供用电,2021,38(1):3-10+24.
WANG Jianjian,SUN Yuanyuan,MA Zhao,et al. Study on grounding method and grounding fault characteristics of islanded DC microgrid[J]. Distribution & Utilization,2021,38(1):3-10+24.
- [2] 汪洋,陈风云,肖文,等. 考虑不确定性和含换电站的直流微电网优化研究[J]. 智慧电力,2020,48(7):46-51.
WANG Yang,CHEN Fengyun,XIAO Wen,et al. Optimization of DC microgrid considering uncertainty and battery swap station[J]. Smart Power,2020,48(7):46-51.
- [3] 王源,南海鹏,关欣. 风水储微电网优化调度策略研究

- [J]. 高压电器, 2020, 56(5): 216-222.
- WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin. Optimal scheduling strategy of wind-hydro-storage micro-grid [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 216-222.
- [4] 张天翼, 郑凯元, 王海风. 聚合相同分布式电源对直流微电网高频振荡稳定性的影响[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 103-108.
- ZHANG Tianyi, ZHENG Kaiyuan, WANG Haifeng. Impact of large number of same aggregated distributed generators on the high-frequency oscillatory stability of a DC microgrids [J]. Electric Power, 2021, 54(8): 103-108.
- [5] 吴跃斌, 祁天星, 马涛, 等. 直流微电网故障限流特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(6): 18-28+34.
- WU Yuebin, QI Tianxing, MA Tao, et al. Analysis of fault current limiting characteristics of DC microgrid [J]. Power Grid and Clean Energy, 2021, 37(6): 18-28+34.
- [6] DRAGICEVIC T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
- [7] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J M. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low voltage DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [8] 郭通, 李燕青, 仝年, 等. 基于自调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 77-82.
- GUO Tong, LI Yanqing, TONG Nian, et al. Control strategy of micro-grid based on self-adjustable droop coefficient [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 77-82.
- [9] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
- ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improved the dynamics characteristics of DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.
- [10] 习伟, 姚浩, 陈波, 等. 基于 SOC 系统数据交互的保护装置设计[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 121-125.
- XI Wei, YAO Hao, CHEN Bo, et al. Design of protection device based on SOC system data exchange [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 121-125.
- [11] 米阳, 吴彦伟, 符杨, 等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 37-45.
- MI Yang, WU Yanwei, FU Yang, et al. Hierarchical coordinated control of island DC microgrid with photovoltaic and storage system [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 37-45.
- [12] 阚志忠, 陈宇飞, 李鹏程, 等. 分布式储能系统电流负荷动态分配方法研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(11): 113-117.
- KAN Zhizhong, CHEN Yufei, LI Pengcheng, et al. A current load dynamic sharing methods used for distributed energy storage systems [J]. Power Electronics, 2016, 50(11): 113-117.
- [13] OLIVEIRA T R, SILVA W W A G, DONOSO-GARCIA P F. Distributed secondary level control for energy storage management in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2597-2607.
- [14] 季宇, 苏剑, 丁保迪, 等. 直流微电网储能系统的无源滑模复合控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 63-70.
- JI Yu, SU Jian, DING Baodi, et al. Research on passive based control combined SMC control of DC micro-grid energy storage system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 63-70.