

孤岛模式下直流微网中储能单元 SOC 均衡控制策略

明远山, 胡慧慧, 刘凯旋, 何新霞, 董磊

(中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266400)

摘要: 储能单元作为直流微网系统重要的组成部分, 关系到充放电过程中功率的合理分配和母线电压的持续稳定。然而对于含有多个分布式储能的直流微电网系统, SOC 的不均衡必然会降低储能系统的可利用率, 在不同工况下, 为了保证系统正常稳定运行的同时能够实现储能单元 SOC 的快速均衡控制, 首先, 提出一种引入线路阻抗补偿前馈环节和动态调速因子的改进型下垂控制策略, 消除分布式储能单元初始状态不一致和线路阻抗不同所带来的影响; 然后, 通过 Matlab/Simulink 搭建仿真平台实验, 验证所提控制策略在不同充放电工况下运行的可行性和有效性; 最后, 得出结论: 多种工况下相比于原有的控制策略, 本文所提出的动态调速因子控制策略能够有效加快储能的均衡速度, 并维持微电网系统的正常稳定运行。

关键词: 下垂控制; 直流微网; 储能单元; 调速因子

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.006 中图分类号: TM743 文章编号: 1673-9140(2023)04-0057-08

Research on SOC balance control strategy of energy storage unit in DC microgrid in island mode

MING Yuanshan, HU Huihui, LIU Kaixuan, HE Xinxia, DONG Lei

(School of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266400, China)

Abstract: As an important part of DC microgrid system, the energy storage unit is related to reasonable power distribution and continuous stability of bus voltage during charge and discharge process. However, for DC microgrid systems containing multiple distributed energy storage, the imbalance of SOC will inevitably reduce the availability of energy storage systems. In order to ensure the normal and stable operation of the system and realize the fast equalization control of the SOC of the energy storage unit under different working conditions, an improved droop control strategy is proposed by introducing line impedance compensation feedforward link and dynamic speed regulation factor to eliminate the impact of inconsistent initial states of the distributed energy storage units and different line impedance. After that, Matlab/Simulink was used to build a simulation platform experiment to verify the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy under different charging and discharging conditions. Finally, it was concluded that compared with the original control strategy, the dynamic speed regulating factor control strategy proposed in this paper can effectively accelerate the energystorage balancing speed under various working conditions, and maintain the normal and stable operation of the microgrid system.

Key words: droop control; DC microgrid; energy storage unit; dynamic speed regulation factor

收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2023-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(52177203); 中国石油大学(华东)研究生创新基金(CXJJ-2022-10)

通信作者: 董磊(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力电子与新能源发电技术等研究; E-mail: donglei@upc.edu.cn

直流微网是一种将分布式发电设备、储能单元和各种负载连接在一起的小型电力系统,因其能够将太阳能和风能等可再生能源有效并入电网,且不存在无功功率、相位和频率控制以及谐波治理等问题,正受到越来越多的关注^[1-4]。然而,可再生能源发电的间歇性、波动性和随机性使得直流母线电压难以保持稳定,有必要在直流微网系统中引入储能单元。在此背景下,实现各储能单元荷电状态(state of charge, SOC)的均衡控制,避免单个储能单元过度使用,以延长储能单元整体使用寿命就具有重要的现实意义和可观的商业价值^[5-7]。

文献[8-10]针对多储能单元线路或不同线路阻抗的影响,分别提出了相应的SOC均衡控制策略,但并没有消除共同作用的影响;文献[11-13]提出一种基于SOC的下垂控制策略,但只研究了储能单元放电时SOC的均衡控制,并未对其充电时的均衡情况进行分析;文献[14]提出了一种分段自适应协调控制策略,可将储能单元的充放电功率按照各自的SOC进行分配,该方法设定下垂系数与SOC保持线性关系,但均衡控制速度较慢;文献[15-16]采用幂函数下垂控制,提高了SOC的均衡速度,但同时增大了直流母线电压的波动;文献[17]提出SOC幂指数下垂控制策略,同时考虑了SOC均衡速度以及均衡之后均分电流的精度,但SOC平均值的确定需要辅助控制层完成,增加了系统的复杂性;文献[18-19]进一步对传统下垂控制进行了优化,降低了系统复杂性,但是下垂系数函数中的调速因子为固定值,均衡速度会随着均衡过程的进行而逐渐放慢。

本文提出一种改进的下垂控制策略,计及线路阻抗的影响,采用SOC差值代替固定的调速因子,能够合理分配不同储能模块的充放电功率,持续保持较快的均衡速度,同时减小对母线电压造成的影响,即在母线电压稳定的前提下实现储能单元充放电的快速均衡。

1 直流微网系统的构成与运行

本文研究的直流微网系统结构如图1所示,系

统由分布式储能单元、光伏(photo voltaic, PV)模块以及用电负荷组成。光伏模块通过boost电路与直流母线连接;孤岛模式下直流母线与电网断开,光伏模块采用最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,微网系统中的能量全部由光伏发电产生。

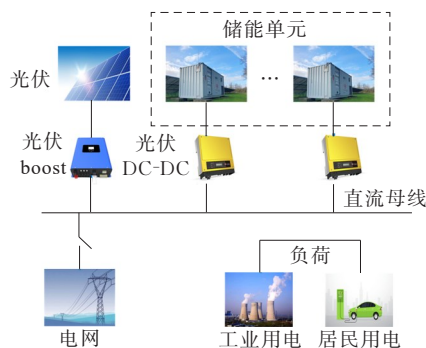


图1 直流微网结构

Figure 1 DC microgrid structure diagram

由于外界光照强度和温度在不断变化,光伏模块产生的功率不可能保持恒定。为了保证用电设备正常运行,并防止并网时产生巨大冲击电流,通过双向DC-DC功率变换器将储能单元接入到直流母线上,能量的双向流动能够有效解决充放电过程中的功率不平衡问题,从而维持母线电压的稳定。

因为不同的储能单元与直流母线之间的线路阻抗存在差异,且SOC初值不同,为了能够快速实现储能单元SOC的均衡控制,本文针对下垂控制策略进行深入优化和改进,能够合理分配不同储能单元间的电流,并维持直流母线电压的稳定,以保障直流微网系统的正常运行。

2 储能单元SOC均衡控制策略

下垂控制指的是在电压电流双闭环的前端引入电流反馈和虚拟阻抗来调节功率变换器之间的输出电流,下垂控制表达式为

$$U_{dci} = U_{ref} - R_{di} i_{dci} \quad (1)$$

式中, U_{dci} 、 i_{dci} 分别为第*i*个储能单元功率变换器的输出电压、电流; R_{di} 为下垂系数; U_{ref} 为直流母线电

压的标称值。

2.1 考虑线路阻抗的改进下垂控制

以包含 2 个储能单元的直流微网系统为例进行分析,储能单元与直流母线相连的等效电路如图 2 所示, R_{line1} 、 R_{line2} 分别为 2 个储能单元距离直流母线的线路阻抗, R_L 为负载阻抗, U_{bus} 为实际的直流母线电压。

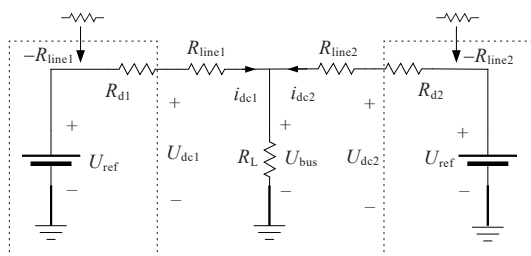


图 2 储能单元并联等效电路

Figure 2 Equivalent circuit of energy storage unit in parallel

对图 2 列写电路方程,可得:

$$\begin{cases} U_{bus} = U_{ref} - (R_{d1} + R_{line1})i_{dc1} \\ U_{bus} = U_{ref} - (R_{d2} + R_{line2})i_{dc2} \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2)有

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{R_{d2} + R_{line2}}{R_{d1} + R_{line1}} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,在下垂系数较小时,线路阻抗的不同会对储能单元的充放电电流造成很大影响。因此,为了减小这种影响,本文在传统下垂控制策略的基础上加入前馈反向下垂系数,反向下垂系数与线路阻抗大小相等(图 2 虚框外箭头所示),即

$$U_{dci} = U_{ref} - R_{di}i_{dci} + R_{linei}i_{dci} \quad (4)$$

因实际线路阻抗难以准确测量,这里取线路阻抗两端电压进行等效替换,即将式(4)改写为

$$U_{dci} = U_{ref} - R_{di}i_{dci} + (U_{dci} - U_{bus}) \quad (5)$$

化简式(5)可得:

$$U_{bus} = U_{ref} - R_{di}i_{dci} \quad (6)$$

则式(3)可以改写为

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{R_{d2}}{R_{d1}} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,充放电电流与下垂系数成反比,且线路阻抗的影响已经被消除。

2.2 基于 SOC 均衡的改进下垂控制

传统的下垂控制中下垂系数为常数,但当储能单元的 SOC 初值不相等时,可能会产生过充过放的问题,缩短了储能单元的使用寿命。因此,有必要根据 SOC 值实时调整下垂系数,以实现 SOC 均衡控制。

调整下垂系数的原则是合理分配不同储能单元承担的功率权重。在储能单元充电过程中, SOC 高的单元吸收较少的功率, SOC 低的单元吸收较大的功率;反之,在放电过程中, SOC 高的储能单元释放较大的功率, SOC 低的储能单元释放较低的功率。最终,不同储能单元的 SOC 达到均衡。

文献[18-19]提出了一种基于指数函数的下垂控制策略,下垂系数与 SOC 的关系式为

$$R_{di} = \begin{cases} k \exp[\rho(S_{OCi} - S_{OC}^{\max})], & \text{充电} \\ k \exp[\rho(S_{OC}^{\min} - S_{OCi})], & \text{放电} \end{cases} \quad (8)$$

式中, S_{OCi} 为第 i 个储能单元的荷电状态; S_{OC}^{\max} 、 S_{OC}^{\min} 分别为 i 个储能单元中 SOC 的最大、最小值^[20]; k 为下垂系数的最大值,也是最终的稳定值; ρ 为固定调速因子。

本文在上述基础上进行研究。假设只有 2 个储能单元,且 $S_{OC1} = S_{OC}^{\max}$ 、 $S_{OC2} = S_{OC}^{\min}$, ΔS_{OC} 为第 i 个储能单元在充电状态下与 S_{OC}^{\max} 之差,或者是充电状态下与 S_{OC}^{\min} 之差,因此 $\Delta S_{OC} = -|S_{OC1} - S_{OC2}|$ 。当储能单元处于充电状态时,将式(8)代入式(7)可得储能单元的充电电流比值:

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{\exp[\rho(S_{OC2} - S_{OC1})]}{\exp[\rho(\Delta S_{OC})]} = \exp[\rho(\Delta S_{OC})] \quad (9)$$

同理,放电状态时储能单元的放电电流比值为

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{1}{\exp[\rho(S_{OC2} - S_{OC1})]} = \frac{1}{\exp[\rho(\Delta S_{OC})]} \quad (10)$$

由此可知,储能单元 SOC 的均衡速度与调速因子 ρ 紧密相关, ρ 越大,电流比相差越大, SOC 的均衡速度也就越快^[21]。

假设储能单元处于放电状态,以 $k=2$ 为例,代入式(8)可得下垂系数与 ΔS_{OC} 之间的函数关系曲

线,如图3所示,可以看出,随着 p 增大,下垂系数与 ΔS_{OC} 变化曲线整体呈现下移的趋势。虽然 p 增大可以加速SOC的均衡速度,但是 p 过大时,系统的响应速度也会变慢(如曲线从 $p=5$ 变化到 $p=7$)。因此,为了保障加速均衡的同时,也能获得更快的响应速度,本文设定一个随 ΔS_{OC} 实时变化的动态调速因子 p' ,即

$$p' = \frac{1}{S_{OC}^{\max} - S_{OC}^{\min}} \quad (11)$$

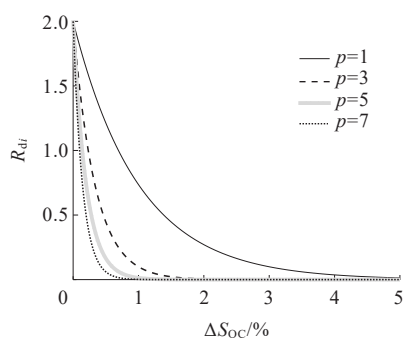


图3 $k=2$ 时 R_{di} 与 ΔS_{OC} 的关系

Figure 3 The relationship between R_{di} and ΔS_{OC} when $k=2$

根据SOC的差值实时调整 p' ,差值较大时 p' 较小,可以提高响应速度;差值较小时 p' 较大,可以提高均衡速度;当 $S_{OC}^{\max} - S_{OC}^{\min}$ 无限接近于0时,因为已经实现了储能单元的SOC均衡,故 p' 取0,同时,为了减小均衡状态下母线电压的波动,取下垂系数为 $0.1k$ 。因此,下垂系数和SOC的关系表示为

$$R_{di} = \begin{cases} k \exp \frac{S_{OCi} - S_{OC}^{\max}}{S_{OC}^{\max} - S_{OC}^{\min}}, & \text{充电} \\ k \exp - \frac{S_{OC}^{\min} - S_{OCi}}{S_{OC}^{\max} - S_{OC}^{\min}}, & \text{放电} \\ 0.1k, & S_{OC}^{\max} - S_{OC}^{\min} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

除了实现SOC均衡控制以外,维持直流母线电压的稳定也至关重要。由图2可知,直流母线电压的偏移量为

$$\Delta U_{bus} = i_{dci} R_{di} \quad (13)$$

若 ΔU_{bus} 过大会导致直流微网系统难以正常运行,也会在并网时产生较大的冲击电流,损坏线路和电气设备。因此,需要对下垂系数进行一定的约束:

$$0 < R_{di} \leq \frac{\Delta U_{bus}^{\max}}{i_{dc}^{\max}} \quad (14)$$

式中, ΔU_{bus}^{\max} 为最大允许的直流母线电压偏差值,根

据文献[22]中的有关规定,母线电压的偏差范围为 $-20\% \sim 5\%$; i_{dc}^{\max} 为双向DC-DC功率变换器允许输出的最大电流。

综合上述分析,下垂系数的选取既要满足各储能单元SOC不相等时能够加快均衡速度,又要防止因下垂系数过大而导致母线电压的波动过大。本文提出的改进型下垂控制策略其总的储能系统控制逻辑框图如图4所示。

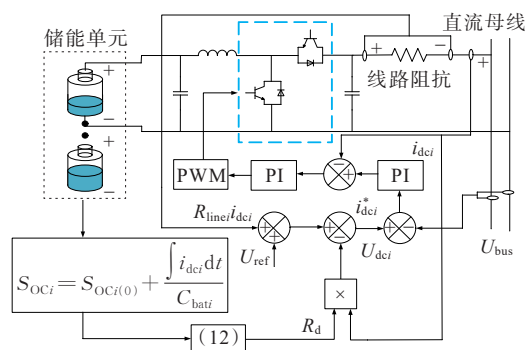


图4 储能系统控制逻辑框图

Figure 4 Control logic diagram of energy storage system

具体流程:首先,根据储能单元的输出电流和初始荷电状态,采用安时积分法估算出SOC值;再将其代入式(12),获得当前下垂系数;然后,将得到的下垂系数与双向DC-DC功率变换器的输出电流相乘作为控制器的输入,经过电压电流双环PI控制;最后,输出PWM驱动双向DC-DC功率变换器,从而实现对直流微网系统的控制^[23-26]。

3 仿真结果与分析

为了验证控制策略的有效性,采用Matlab/Simulink搭建仿真模型,设直流微网系统含有3个容量为 $6 \text{ A} \cdot \text{h}$ 储能单元,其初始SOC分别为50%、55%和60%,负载取 25Ω 的直流电阻,光伏系统的最大功率为 14.5 kW ,采用MPPT控制,直流母线的参考电压为 400 V 。

3.1 稳定充电

在稳定充电的状态下,光伏模块不仅能够满足负载功率需求,同时还会产生过剩功率。此时,过剩的功率流向储能单元,对其进行充电。为了模拟

稳定充电过程,将光伏模块的光照强度设为 1 000 W/m²,所得到的母线电压、充电电流和 SOC 波形如图 5 所示。

因式(14)限定了下垂系数,由图 5(a)波形可知,最终直流母线电压为 410 V,电压波动小于 +5%,满足国家标准规定要求。

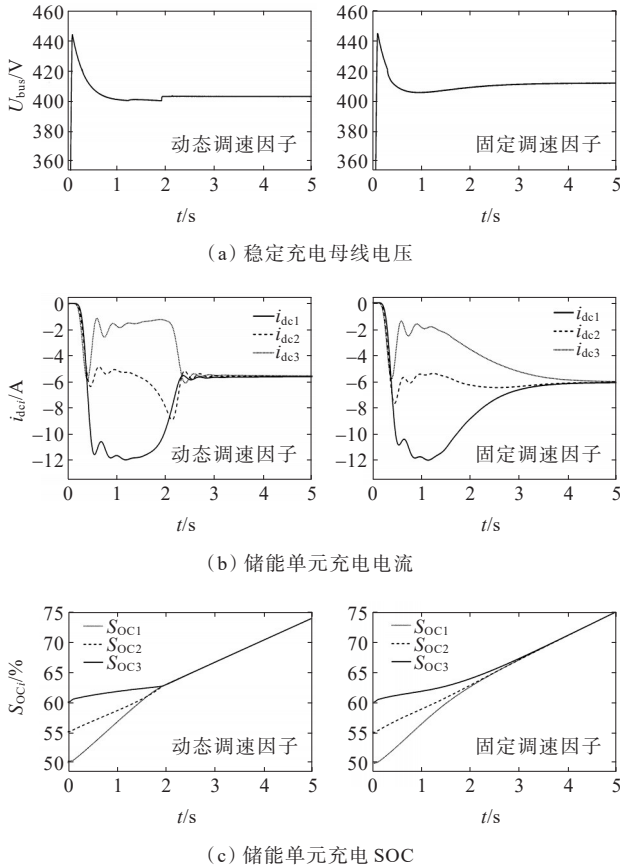


图 5 稳定充电时波形

Figure 5 Stable charge state waveform

由于 3 个储能单元的初始 SOC 不相等,因此系统通过下垂控制进行功率的分配。初始条件下 1、2、3 号储能单元的 SOC 分别为 50%、55%、60%,充电电流分别为 12、6、2A。当采用固定调速因子($p=5$)时,1、3 号储能单元的电流差值逐渐缩小,均衡速度逐渐减慢,并最终在 3.5 s 时达到均衡;而当采用动态调速因子时,由于调速因子时刻随 SOC 的差值变化,储能单元能够始终保持较快的均衡速度,并最终在 2 s 时达到 SOC 的均衡,其充电电流和 SOC 波形如图 5(b)、(c) 所示。说明充电状态下相比于固定的调速因子,采用动态调速因子的下垂控制方法能够有效加快 SOC 的均衡速度。

3.2 稳定放电

在稳定放电的状态下,光伏模块产生的功率满足不了负载需求,需要储能单元释放能量以供给直流微网系统。假设光伏模块的光照强度为 100 W/m²,储能单元投入运行后,系统中的直流母线电压、放电电流和 SOC 波形如图 6 所示。

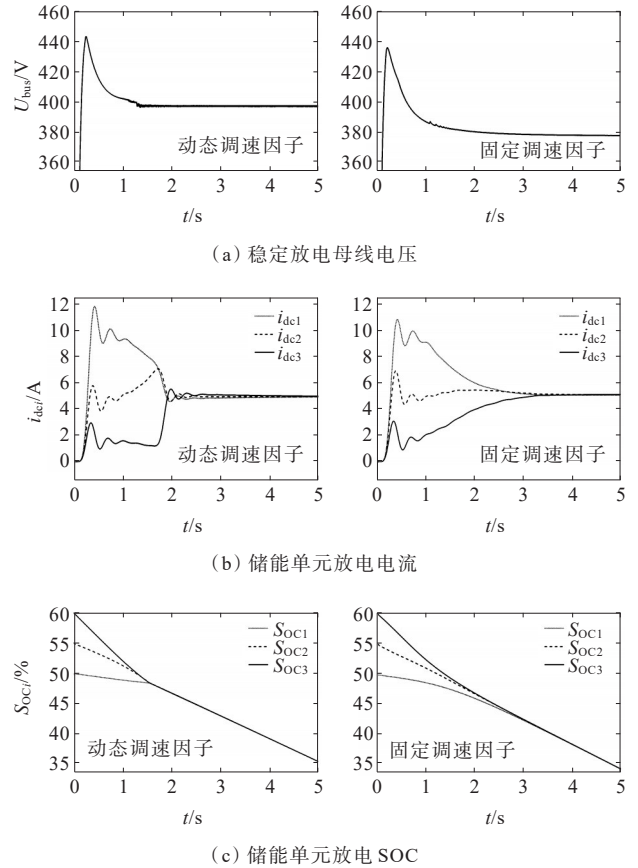


图 6 稳定放电时的波形

Figure 6 Stable discharge state waveform

因式(14)限定了下垂系数,由图 6(a)波形可知,固定调速因子下最终直流母线电压为 377 V,动态调速因子下最终直流母线电压为 395 V,其电压偏移小于 20%,满足国家标准的要求;同时动态调速因子电压波动较小,更有利于直流母线电压稳定。

在稳定放电状态下,1、2、3 号储能单元的放电电流分别为 1、5、9 A。当采用固定调速因子($p=5$)时,由于储能单元的 SOC 逐步接近,其分配的功率也逐步均衡,因此均衡速度开始变缓,最终在 3 s 时达到均衡;而当采用动态调速因子时,能够保持较高的均衡速度,使 SOC 在 1.5 s 时达到均衡。

针对图6分析可知,当采用固定调速因子时,下垂系数随着SOC的差值逐步增大,最终趋近稳定值,因此,母线电压也随着下垂系数的增大逐渐降低并趋近于最终的稳定值;而当采用动态调速因子时,下垂系数在SOC不相等时能够维持相对恒定的值,直到SOC完全均衡时才达到稳态值,这也可以解释图6(a)中在均衡结束前会有一个瞬间的电压波动。

3.3 充放电转换

假设初始光照强度为 100 W/m^2 ,1 s时光照强度改变为 $1\,000\text{ W/m}^2$,所得到的3个储能单元SOC、充放电电流以及直流母线电压变化如图7所示。

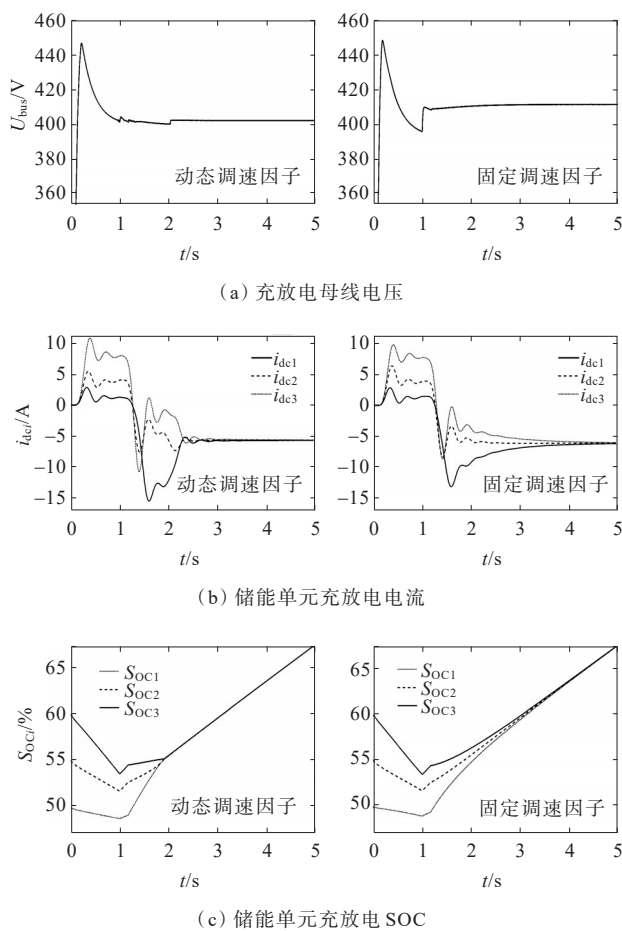


图7 充放电转换时的波形

Figure 7 Charge-discharge conversion waveform

1 s时随着光照的变化储能单元由放电状态转换为充电状态,电流由正值变为负值。当采用固定调速因子($p=5$)时,母线电压由 395 V 变为 410 V ;而当采用动态调速因子时,SOC均衡的速度相对较快,直流母线电压为 403 V ,小于采用固定调速因子时的母线电压。

在初始放电状态下,1、2、3号储能单元的放电电流分别为 $1、4、8\text{ A}$;当转为充电状态时,1、2、3号储能单元的充电电流分别为 $12、4、2\text{ A}$ 。采用固定调速因子在 4 s 时达到SOC均衡,而采用动态调速因子在 2 s 时达到均衡。进一步说明,在充放电状态转换过程中,采用动态调速因子仍能实现快速的SOC均衡控制。

为了验证采用动态调速因子在SOC均衡速度和系统响应速度方面的优越性,保持原有光照条件和储能单元的SOC初值不变,分别采用固定调速因子 $p=3、p=9$ 和动态调速因子进行仿真,得出的SOC状态波形如图8所示。

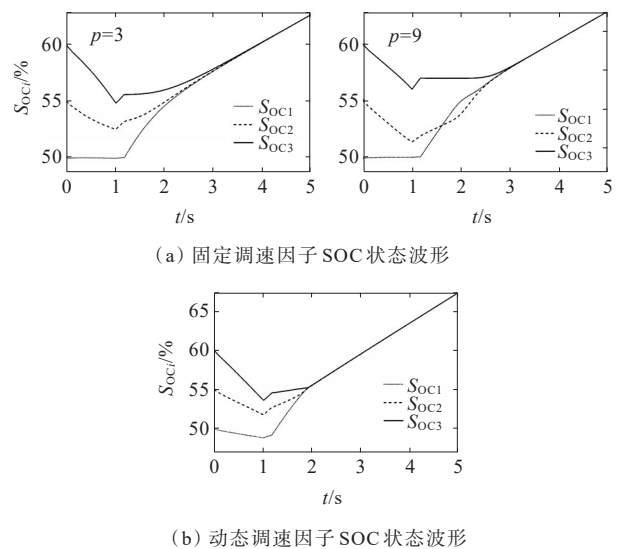


图8 外部条件改变时SOC状态波形

Figure 8 SOC state waveform when external conditions change

假设 $t=1\text{ s}$ 时光照条件发生突变。当采用固定调速因子时,系统最晚在 1.2 s 左右才开始由放电状态转为充电状态;而当采用动态调速因子时,系统即刻转变,响应速度更快。当采用固定调速因子 $p=3$ 时,充电状态下SOC约在 3.3 s 达到均衡;当采用固定调速因子 $p=9$ 时,SOC在 3.1 s 达到均衡,均衡速度更快。但在 $t=1.7\text{ s}$ 时,1号超过了2号储能单元的SOC,发生了均衡超越。对比采用动态调速因子,充电状态下SOC约在 2 s 时达到均衡。这证明采用动态调速因子既可以提高系统的响应速度,也可以加快SOC均衡速度,并且避免均衡超越现象的发生。

4 结语

针对孤岛模式下直流微网储能单元的充放电问题,提出了一种基于SOC均衡的改进型下垂控制策略,在传统下垂控制中加入前馈反向下垂系数,该系数与线路阻抗大小相等,可以消除线路阻抗带来的影响。考虑到储能单元SOC的不一致性,在下垂系数指数函数中设置动态调速因子,能够根据SOC差值实时做出调整,以加快SOC均衡速度和系统响应速度。仿真实验结果证明,该控制策略相较于传统下垂控制能够更快地实现储能单元的SOC均衡,同时保证在充放电过程中直流母线电压稳定在国家标准规定的正常范围内,可满足电网长期安全稳定运行的需要。

参考文献:

- [1] FU Q, NASIRI A, BHAVARAJU V, et al. Transition management of microgrids with high penetration of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(2):539-549.
- [2] 王泉,何怡刚,马恒瑞,等.面向电网辅助服务的虚拟储能电厂分布式优化控制方法[J].电力系统自动化,2022,46(10):181-188.
WANG Xiao, HE Yigang, MA Hengrui, et al. Distributed optimization control method of virtual energy storage plants for power grid ancillary services[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10):181-188.
- [3] 蒋勃,邹彬,张欣宜,等.直流微网储能单元能量动态均衡控制研究[J].电网与清洁能源,2021,37(1):84-89.
JIANG Bo, ZOU Bin, ZHANG Xinyi, et al. Research on energy dynamic balance control of DC microgrid energy storage unit[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1):84-89.
- [4] 郭昆丽,付建哲,闫东,等.考虑不同容量的储能单元荷电状态均衡研究[J].电源技术,2021,45(9):1202-1204+1226.
GUO Kunli, FU Jianzhe, YAN Dong, et al. Research on state of charge balance of energy storage units considering different capacities[J]. Chinese Journal of Power Source, 2021,45(9):1202-1204+1226.
- [5] 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 balance strategy of grid-connected cascaded energy storage system based on improved droop control[J]. Power system Protection and Control, 2021,49(22):120-129.
- [6] 韦伟霖,陈民铀,李杰,等.孤岛微网中分布式储能SOC和效率均衡控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(4):169-177.
WEI Zuolin, CHEN Minyou, LI Jie, et al. SOC and efficiency balance control strategy of distributed energy storage in island microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(4):169-177.
- [7] 隋春杰.光储直流微电网中基于SOC的下垂控制策略研究[D].曲阜:曲阜师范大学,2021.
SUI Chunjie. Research on SOC-based droop control strategy in solar-storage DC microgrid[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2021.
- [8] DIAZ N L, DRAGIĆEVIĆ T, VASQUEZ J C, et al. Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids—a new concept on cooperative control without communications beyond droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(5):2476-2485.
- [9] 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):4441-4451.
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):4441-4451.
- [10] 陆晓楠,孙凯,黄立培,等.直流微电网储能系统中带有母线电压跌落补偿功能的负荷功率动态分配方法[J].中国电机工程学报,2013,33(16):37-46.
LU Xiaonan, SUN Kai, HUANG Lipei, et al. Load power dynamic allocation method with busbar voltage sag compensation function in DC microgrid energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(16):37-46.
- [11] LU X, 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] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. SoC-based droop method for distributed energy storage in DC microgrid applications[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Hangzhou, China, 2012.
- [13] 米阳, 纪宏澎, 何星璐, 等. 多储能独立直流微电网自适应分级协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1980-1989+2213.
- MI Yang, JI Hongpeng, HE Xingtang, et al. Adaptive hierarchical coordination control of multi-energy storage independent DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1980-1989+2213.
- [14] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. Double-quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 147-157.
- [15] LU X, GUERRERO J M, SUN K, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
- [16] OLIVEIRA T, GONÇALVES SILVA W W A, 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.
- [17] 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. Distributed energy storage system load current distribution method with improved SOC droop control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3746-3754.
- [18] 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 coordinated control strategy of independent DC microgrid based on SOC droop control[J]. Power system Protection and Control, 2021, 49(12): 87-97.
- [19] 陈景文, 刘嘉欣, 张文倩. 基于一致性算法的直流微网多储能SoC均衡策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 30-38.
- CHEN Jingwen, LIU Jiaxin, ZHANG Wenqian. State of charge equalization strategy of multi-energy storage in DC microgrid based on consensus algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 30-38.
- [20] YANG Q, JIANG L, ZHAO H, et al. Autonomous voltage regulation and current sharing in islanded multi-inverter DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 6429-6437.
- [21] 李冰, 李岚, 王浩, 柴伦. 一种改善直流微电网负荷电流分配的下垂控制[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 48-54.
- LI Bing, LI Lan, WANG Hao, CHAI Lun. An improved droop control of load current sharing in DC microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 48-54.
- [22] GB/T 35727—2017. 中低压直流配电电压导则[S]. GB/T 35727—2017. Guideline for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system[S].
- [23] 伏祥运, 汤国晟, 崔红芬, 等. 基于DAB的光储型混合系统功率调节与控制[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 138-143.
- FU Xiangyun, TANG Guosheng, CUI Hongfen, et al. Study on power regulation and control based on DAB for a hybrid system with photovoltaic and storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 138-143.
- [24] 袁铁江, 张昱, 栗磊, 等. 计及功率密度约束含氢储能的预装式多元储能电站容量优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 496-506.
- YUAN Tiejia, ZHANG Yu, LI Lei, et al. Capacity optimization configuration of pre-installed multi-energy storage power station considering power density constrained hydrogen storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 496-506.
- [25] 胡治国, 张磊冲, 司少康, 等. 基于电压下垂法的独立直流微网混合储能系统控制策略改进[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 39-44.
- HU Zhiguo, ZHANG Leichong, SI Shaokang, et al. Improvement of hybrid energy storage system control strategy of independent DC microgrid based on voltage sag method[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 39-44.
- [26] 沈威, BAUSCH J, KOCH H. 气体绝缘开关设备(GIS)的运行连续性和模块设计对其运行、维护和扩建的影响[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 136-142.
- SHEN Wei, BAUSCH J, KOCH H. Influence of service continuity and module design of gas insulated switchgear (GIS) on its operation, maintenance and extension[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 136-142.