

考虑 SOC 的储能系统自适应功率分配控制策略

熊昊¹, 唐灵修¹, 彭义淞¹, 韩松状¹, 曾雪洋²

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司
电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:为解决直流供电系统中储能单元之间功率分配不合理、荷电状态(state of charge, SOC)控制不均衡的问题,提出考虑 SOC 的储能系统自适应功率分配控制策略。首先,分析了储能单元采用下垂控制时的功率分配特性,在此基础上提出考虑 SOC 和充电/放电均衡因子的自适应下垂控制,并给出了参数设置依据。所提的自适应功率分配控制方法能够在放电时让初始 SOC 较高的储能单元承担更多的放电功率,充电时让初始 SOC 较低的储能单元承担更多的充电功率,并能根据 SOC 动态调整下垂系数和储能单元分配的充放电功率,实现储能单元功率合理分配和 SOC 的快速均衡控制。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真算例,验证了所提考虑 SOC 储能系统自适应功率分配控制方法的有效性。

关键词:储能系统;下垂控制;SOC 均衡;自适应控制;功率分配

中图分类号:TM 614 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)06-0010-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240602

Adaptive Power Allocation Control Strategy for Energy Storage Systems Considering SOC

XIONG Hao¹, TANG Lingxiu¹, PENG Yisong¹, HAN Songzhuang¹, ZENG Xueyang²

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: To solve the problems of unreasonable power allocation and unbalanced state of charge (SOC) control among energy storage units in DC power supply systems, an adaptive power allocation control strategy considering SOC is proposed for energy storage systems. Firstly, the power allocation characteristics of energy storage units adopting droop control are analyzed, and on this basis, an adaptive droop control considering SOC and charging/discharging balance factors is propose, and the basis for parameter setting is provided. The proposed adaptive power allocation control method can enable energy storage units with higher initial SOC to allocate more discharge power, and energy storage units with lower initial SOC to allocate more charging power. In addition, the proposed control method can dynamically adjust the droop coefficient and the charging or discharging power allocated by energy storage unit based on SOC, which can achieve reasonable power allocation of energy storage units and fast balancing control of SOC. Finally, a simulation example is built in PSCAD/EMTDC to verify the effectiveness of the proposed adaptive power allocation control method for energy storage systems considering SOC.

Key words: energy storage system; droop control; SOC balancing; adaptive control; power allocation

0 引言

常见的直流供电系统有变电站应急直流供电系

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0905200);国家电网有限公司科技项目(52199722000D)

统^[1]和直流微电网^[2-3],前者主要用于保障重要负荷停电后的供电,后者主要应用于海岛和偏远地区的供电^[2]。二者虽然规模不一样,但结构类似,均包含 DC/DC 变流器、AC/DC 变流器、直流负荷、交流负荷以及储能系统等^[1,3-4]。其中,储能系统的作用是为了维持直流供电系统的功率平衡和直流电压

的稳定,以及提高系统控制的灵活性和运行的经济性^[5-6]。

通常储能系统是由多个并联运行的储能单元构成^[7],每个单元通过 DC/DC 变流器接入直流母线,其控制的关键和技术难点是如何在多个储能单元之间进行功率分配以及实现荷电状态(state of charge, SOC)的均衡控制^[8-9]。下垂控制具有无需通信、多个单元共同控制直流电压和功率、即插即用等优点^[10],在直流供电系统得到了广泛的应用^[11]。然而传统下垂控制的系数为固定系数,不能根据 SOC 动态调整,更不能实现 SOC 的均衡控制,某些工况下储能单元分配的功率可能也不合理,甚至可能导致电池组过度放电或充电,进而影响电池组的寿命^[12]。为解决这个问题,文献[13]提出通过调整直流参考电压值来均衡 SOC 的控制方法,但均衡速度较慢。文献[14]在直流微电网中提出一种基于 SOC 幂指数的自适应下垂控制的储能功率分配控制方法,能够实现储能单元 SOC 均衡控制,但可能会导致母线电压的波动过大,系统存在失稳风险。文献[15]将双曲正切函数与 SOC 结合,在分布储能直流微电网中提出储能系统的 SOC 均衡控制策略,并引入基于 PI 控制的母线电压补偿策略,可以改善 SOC 均衡控制时直流电压的跌落,但该方法对通信依赖较高。文献[16]提出基于改进动态一致性算法的分布式二次控制方法,能够在通信故障的工况下实现 SOC 的均衡控制,但控制较为复杂,可靠性较低。上述文献大多从 SOC 均衡控制的角度考虑,没有考虑储能单元初始 SOC 对功率分配的影响。由此可见,储能系统之间的功率分配和 SOC 均衡控制依然值得深入研究。

为此,首先研究了常规功率分配下储能单元的下垂系数与其分配功率的关系;接着在此基础上提出了考虑储能单元初始 SOC 和充电/放电均衡因子的储能系统自适应功率分配控制方法,并给出了参数设置的依据;最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真算例。仿真结果表明:所提自适应功率分配方法能够让初始 SOC 较高的储能单元承担更多的放电功率,让初始 SOC 较低的储能单元承担更多的充电功率,并能根据 SOC 动态调整下垂系数和储能单元分配的充放电功率,实现储能单元功率合理分配和 SOC 快速均衡控制;即使通信异常均衡因子失去作用,所提功率分配方法仍然能够实现各储能单元功率自适应分配,并能实现一定程度的 SOC 均衡控制。

1 含储能直流供电系统

1.1 含储能直流供电系统结构

图 1 为典型的含储能系统的直流供电系统,包含 m 个储能单元、 n 个直流负荷、 p 个交流负荷、DC/DC 变流器、AC/DC 变流器,通常还与外部交流电网连接。

储能单元的蓄电池通过双向 DC/DC 变流器接入直流供电系统,主要目的是维持直流电压的稳定和功率的平衡;直流负荷通过 Buck 降压变流器接入直流供电系统;交流负荷通过 AC/DC 变流器与直流供电系统连接,当交流系统断电时,AC/DC 变流器工作在逆变模式为交流负荷供电;当交流系统正常运行时,AC/DC 变流器工作在整流模式为直流负荷和蓄电池充电供电。

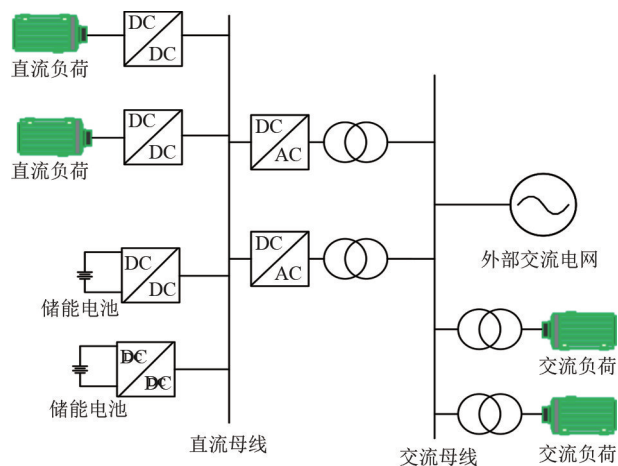


图 1 含储能的直流供电系统模型

当外部交流系统向直流系统供电时,AC/DC 变流器工作在整流状态时,忽略功率损耗,对于直流供电系统,存在式(1)的功率平衡关系。

$$\sum_{i=1}^m P_{\text{bess},i} + \sum_{j=1}^n P_{\text{load},j} = \sum_{l=1}^p P_{\text{AC},l} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{bess},i}$ 为第 i 个储能单元的输出或者吸收的功率; $P_{\text{load},j}$ 为第 j 个直流负荷的能耗功率; $P_{\text{AC},l}$ 为第 l 个 AC/DC 变流器直流与交流系统交换的功率; m 为储能单元的总数; n 为直流负荷 DC/DC 变换器的总数; p 为 AC/DC 变流器的总数。

当外部系统断电,储能作为主要电源,AC/DC 变流器工作在逆变状态,为交流负荷供电,忽略功率损耗时,式(1)的功率平衡关系改写为

$$\sum_{i=1}^m P_{\text{bess},i} = \sum_{l=1}^p P_{\text{AC},l} + \sum_{j=1}^n P_{\text{load},j} \quad (2)$$

对于直流系统,直流电压与不平衡的功率的关系式为

$$\Delta P = -C_{\text{eq}} V_{\text{dc}} \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \quad (3)$$

式中: ΔP 为直流供电系统不平衡的功率; C_{eq} 为直流系统等效的电容; V_{dc} 为直流电压。

由此可见,当负荷波动时,产生的不平衡功率将反应到直流电压上。因此,维持直流电压稳定的关键是控制系统扰动功率的平衡。

1.2 储能单元的工作原理

图 2 为典型的储能单元结构图,主要元件为 2 个开关管(G1 和 G2)、1 个电感(L)、1 个电容(C)和电池组。双向 DC/DC 低压侧接入电池组,高压侧接入直流母线。通过控制 G1 和 G2 的导通或关断实现电池组的充电和放电。当双向 DC/DC 变流器工作于 Buck 降压模式时,对电池组进行充电,电流从高压侧流向低压侧;当双向 DC/DC 变流器工作于 Boost 升压模式,对电池组进行放电,电流从低压侧流向高压侧。

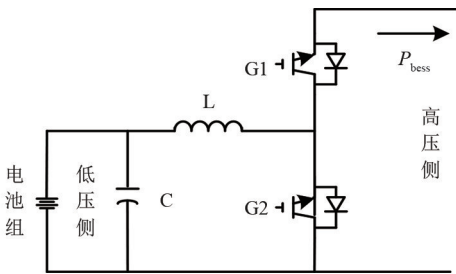


图 2 储能单元结构

2 常规功率分配

当直流系统出现了功率不平衡时,需要储能系统迅速平衡直流系统不平衡的功率,维持直流电压的稳定,其关键点在于如何将不平衡的功率在各个储能单元中分配。

2.1 下垂控制

下垂控制常用于多个储能单元之间的功率分配,其实质是单个储能单元根据测量的直流电压调节其有功输出或输入,多个储能单元共同控制直流电压和维持直流供电系统的功率平衡。

对于图 2 的双向 DC/DC 变流器,下垂控制的表

达式为

$$V_{\text{dref},i} = V_{\text{dcN}} - k_i P_{\text{bess},i} \quad (4)$$

式中: $V_{\text{dref},i}$ 为第 i 个储能单元的直流电压参考值; V_{dcN} 为系统的额定直流电压; k_i 为第 i 个储能单元的功率-直流电压下垂系数。

2.2 下垂控制功率分配的机理

1) 初始功率分配

稳态运行时,对于第 i 个储能单元,直流电压 $V_{\text{dc},i}$ 能够追踪其参考值 $V_{\text{dref},i}$,由式(4)可得

$$V_{\text{dc},i} = V_{\text{dcN}} - k_i P_{\text{bess},i} \quad (5)$$

图 3 为不同下垂系数储能单元的初始功率分配特性。图 3 中左半部分(负半轴)表明储能单元运行在充电状态,对应的功率为负值,功率的负号表示与图 2 所示功率方向相反,负半轴对应的功率值越小表明充电时储能单元对应的充电功率越大;图 3 中的右半部分(正半轴)表明储能单元运行在放电状态,此时储能单元的功率方向与图 2 中所示的功率方向相同。

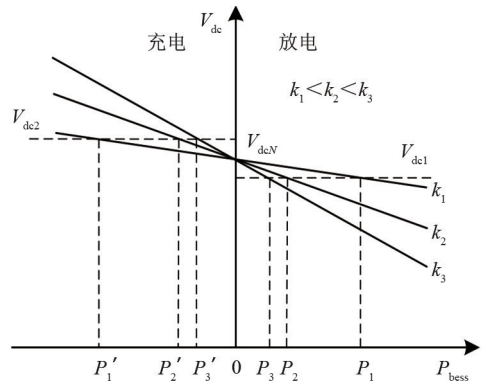


图 3 下垂控制的初始功率分配特性

由式(5)可知,图 3 中的 3 条不同斜率的曲线均要过点 $(0, V_{\text{dcN}})$,其对应的斜率关系为 $k_1 < k_2 < k_3$ 。忽略直流线路的压降,每个储能单元对应的直流电压均相等。当储能单元放电时,直流电压为 $V_{\text{dc}1}$ (小于 V_{dcN}),图 3 中不同下垂系数对应的放电功率关系为 $P_1 > P_2 > P_3 > 0$,即下垂系数越小,储能单元放电时分配的功率越大。当储能单元充电时,直流电压为 $V_{\text{dc}2}$ (大于 V_{dcN}),图 3 中不同下垂系数对应的充电功率关系为 $P'_1 < P'_2 < P'_3 < 0$,即下垂系数越小,储能单元充电时分配的功率也越大。由此可见,在功率初始分配时,下垂系数越小,储能单元分配的功率越多。

2) 扰动功率分配

当系统发生扰动(负荷增加或者减少),直流供

电系统出现功率缺额,第 i 个储能单元的运行点由 $(V_{dc,i0}, P_{bess,i0})$ 切换至运行点 $(V'_{dc,i}, P'_{bess,i})$ 。将扰动前后的运行点代入式(5)可得:

$$V_{dc,i0} = V_{dcN} - k_i P_{bess,i0} \quad (6)$$

$$V'_{dc,i} = V_{dcN} - k_i P'_{bess,i} \quad (7)$$

将式(7)减去式(6),可得:

$$V'_{dc,i} - V_{dc,i0} = -k_i (P'_{bess,i} - P_{bess,i0}) \quad (8)$$

$$\Delta P_{bess,i} = -\frac{\Delta V_{dc,i}}{k_i} \quad (9)$$

式中: $\Delta P_{bess,i}$ 为扰动时第 i 个储能单元的功率变化; $\Delta V_{dc,i}$ 为第 i 个储能单元的直流电压变化; $\Delta P_{bess,i} = P'_{bess,i} - P_{bess,i0}$; $\Delta V_{dc,i} = V'_{dc,i} - V_{dc,i0}$ 。

假设 m 个储能单元能够平衡系统的不平衡功率,则系统的不平衡功率 ΔP 可表示为

$$\Delta P = \sum_{i=1}^m P_{bess,i} = -\sum_{i=1}^m \frac{\Delta V_{dc,i}}{k_i} \quad (10)$$

考虑到储能单元之间的电气距离近,每个储能单元的直流电压变化量一致,式(10)可表示为

$$\Delta P = -\Delta V_{dc,i} \sum_{i=1}^m \frac{1}{k_i} = \Delta P_{bess,i} k_i \sum_{i=1}^m \frac{1}{k_i} \quad (11)$$

第 i 个储能单元分配到功率为

$$\Delta P_{bess,i} = \frac{\Delta P}{k_i \sum_{i=1}^m \frac{1}{k_i}} \quad (12)$$

由式(12)可知,当系统受到扰动时,不平衡功率 ΔP 将在 m 个储能单元之间分配,第 i 个储能单元分配到功率与其下垂系数 k_i 有关。储能单元的下垂系数越小分配的扰动不平衡功率越多,下垂系数越大承担的扰动不平衡功率越少,这与初始功率分配特性一致。

3 考虑 SOC 的自适应功率分配

3.1 电池组充放电区域

为了避免过度充电或者放电影响电池组的寿命,通常会根据电池组的 SOC 来对其充放电进行限制。

假设初始时刻 t_0 电池组的 SOC 为 S_{OC0} , 电池组进行充放电时,任意 t 时刻的 SOC 为

$$S_{OC} = S_{OC0} - \frac{\int_{t_0}^t P_{bess} dt}{Q} \times 100\% \quad (13)$$

式中: S_{OC} 为时刻 t 电池组的 SOC 值; Q 为电池组能

够储存电荷的最大容量; P_{bess} 为电池组充电或者放电的功率。当充电时, $P_{bess} < 0$; 当放电时, $P_{bess} > 0$ 。

因此根据 SOC 的值,将电池组的充放电划分为 5 个工作区域,如图 4 所示。

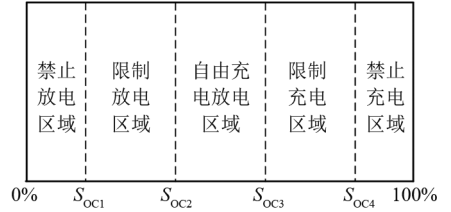


图 4 考虑 SOC 的电池组充放电分区

1) 禁止放电区域: SOC 介于 0% 至 S_{OC1} 。此时不允许电池放电,以避免电池过度放电而影响其寿命。

2) 限制放电区域: SOC 在 S_{OC1} 和 S_{OC2} 之间。在该区域应该随着 SOC 值的减小,逐渐限制电池的放电,减小该储能单元的出力,避免 SOC 达到 S_{OC1} 时直接停止放电,给系统带来更大的功率扰动。

3) 自由充电放电区域: SOC 在 S_{OC2} 和 S_{OC3} 之间。此时不限制电池的充放电,储能单元按照系统的需求进行充放电。

4) 限制充电区域: SOC 在 S_{OC3} 和 S_{OC4} 之间。在该区域应该随着 SOC 值的增大,逐渐限制电池的充电,减小该储能单元充电功率,避免 SOC 达到 S_{OC4} 时直接停止充电,给系统带来更大的功率扰动。

5) 禁止充电区域: SOC 介于 S_{OC4} 至 100%。此时不允许电池充电,以避免电池过度充电而影响其寿命。

由图 4 可知, S_{OC1} 、 S_{OC2} 、 S_{OC3} 、 S_{OC4} 将电池组划分为 5 个充放电区域,其值是由电池组自身的参数决定。参考文献 [16-20], S_{OC1} 的取值范围为 5%~10%, S_{OC2} 的取值范围为 40%~50%, S_{OC3} 的取值范围为 50%~60%, S_{OC4} 的取值范围为 90%~95%。

3.2 考虑 SOC 的自适应下垂控制

储能单元之间在进行功率分配时,通常仅考虑储能单元的容量来设置下垂系数,为固定系数。在功率分配过程中可能会导致电池组过度充电或者放电,而其他储能单元的电池还有充放电的容量,影响电池的寿命。显然采用固定系数的下垂控制不能适应不同 SOC 时储能单元之间的功率分配。因此储能单元之间进行功率分配时,还需要考虑自身电池组的 SOC。

为解决这个问题,提出考虑 SOC 的自适应功率分配控制方法,其核心思想是在下垂系数中引入电

池组的 SOC,在储能单元放电时 SOC 较大的电池组承担更多的放电功率,在充电时 SOC 较小的电池组承担更多的充电功率,并且在充放电过程中根据 SOC 动态调整下垂系数,实现各储能单元的功率合理分配和 SOC 的均衡控制。

结合下垂控制的功率分配特性和图 4,提出考虑 SOC 的储能系统自适应功率分配控制策略,分为放电时的自适应下垂控制和充电时的自适应下垂控制。

1) 放电时的自适应下垂控制

当第 i 个储能单元放电,电池组进入限制放电区域时,应增加该储能单元的下垂系数,减少其分配的功率,减缓电池组放电的速度。因此,放电时,考虑 SOC 的自适应下垂控制的下垂系数的表达式如式(14)所示,特性曲线如图 5 所示。当 S_{OCi} 大于 S_{OC2} 时,此时的下垂系数 k'_i 等于初始值 k_0 ,表明不限制电池组的放电功率,储能单元按照初始下垂系数 k_0 分配功率;当电池组放电进入限制放电区域时,即 S_{OCi} 在 S_{OC1} 和 S_{OC2} 之间,下垂系数 k'_i 随着 S_{OCi} 的减小而增大,对应储能单位分配的功率逐渐减小,直到电池组进入禁止放电区 (S_{OC1}) 时,下垂系数等于最大值 k_{max} ,此时电池组停止放电。

$$k'_i = \begin{cases} k_0, & S_{OCi} \geq S_{OC2} \\ \frac{(k_{max} - k_0)(S_{OCi} - S_{OC2})}{S_{OC1} - S_{OC2}} + k_0, & S_{OC1} < S_{OCi} < S_{OC2} \\ k_{max}, & S_{OCi} \leq S_{OC1} \end{cases} \quad (14)$$

式中, k'_i 为放电时根据储能单元自身 SOC 确定的下垂系数。

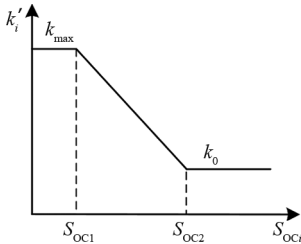


图 5 放电时下垂系数随 SOC 变化的特性曲线

式(14)仅考虑了该储能单元自身的 SOC,未考虑其余储能单元的 SOC,在某些运行工况,不能实现各储能单元的 SOC 均衡。因此,放电过程中还需要考虑各储能单元的 SOC,实现各单元 SOC 的均衡控制,故而引入放电均衡因子。

$$\delta_i = \frac{1}{(1 + a\Delta S_{OCi})^b} \quad (15)$$

$$\Delta S_{OCi} = S_{OCi} - S_{OC_{avr}} = S_{OCi} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{OCi} \quad (16)$$

式中: δ_i 为放电均衡因子; $S_{OC_{avr}}$ 为 m 个储能单元的 SOC 平均值; ΔS_{OCi} 为第 i 的储能单元的 S_{OCi} 与平均值 $S_{OC_{avr}}$ 的差值; a 为均衡因子的差值调节系数; b 为均衡因子幂指数调节系数。

储能单元先根据自身的 SOC 确定下垂系数 k'_i , 再与放电均衡因子相乘可得到最终的下垂系数 k_i 。

$$k_i = \delta_i \cdot k'_i \quad (17)$$

图 6 为放电均衡因子的特性图,当 ΔS_{OCi} 小于 0 时,说明第 i 个储能单元的 S_{OCi} 小于平均值 $S_{OC_{avr}}$,此时均衡因子大于 1, $k_i > k'_i$, 放电均衡因子调大了该单元的下垂系数,其分配的功率减小,即当该单元的 S_{OCi} 小于各储能单元的平均值 $S_{OC_{avr}}$ 时,其分配的放电功率少, SOC 下降速度减慢;当储能单元的 S_{OCi} 大于各单元的平均值 $S_{OC_{avr}}$ 时,均衡因子小于 1, $k_i < k'_i$, 放电均衡因子调小了该单元的下垂系数,分配的放电功率增多, SOC 的下降速度加快。因此在放电均衡因子的作用下,各单元的 SOC 会趋于均衡。

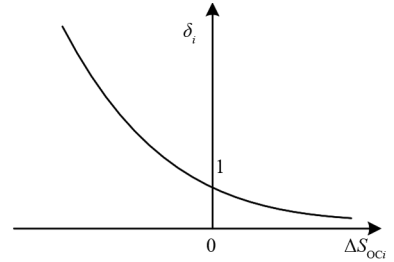


图 6 放电均衡因子特性

2) 充电时的自适应下垂控制

与放电特性类似,充电时自适应下垂控制的下垂系数的表达式如式(18)所示,特性曲线如图 7 所示。当 S_{OCi} 小于 S_{OC3} 时,此时的下垂系数 k_i 等于初始值 k_0 ,表明不限制电池组的充电功率,储能单元按照初始下垂系数 k_0 分配功率;当电池组进去限制充电区域时,即 S_{OCi} 在 S_{OC3} 和 S_{OC4} 之间,下垂系数 k_i 随着 S_{OCi} 的增大而增大,该单元分配的充电功率逐渐减小,电池组充电的速度逐渐减缓,直到电池组进入禁止充电区 (S_{OC4}) 时,下垂系数等于最大值 k_{max} ,此时电池组停止充电。

$$k_i'' = \begin{cases} k_0, S_{OCi} \leq S_{OC3} \\ \frac{(k_{\max} - k_0)(S_{OCi} - S_{OC3})}{S_{OC4} - S_{OC3}} + k_0, S_{OC3} < S_{OCi} < S_{OC4} \\ k_{\max}, S_{OCi} \geq S_{OC4} \end{cases} \quad (18)$$

式中, k_i'' 为充电时根据储能单元自身 SOC 确定的下垂系数。

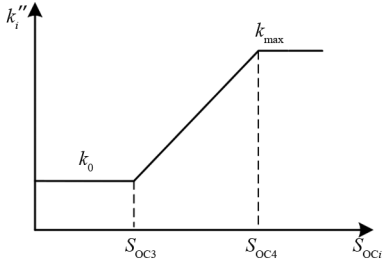


图7 充电时下垂系数随 SOC 变化的特性曲线

与放电类似,储能单元充电时,也需要考虑各单元的 SOC,引入充电均衡因子,如式(19)所示,充电均衡因子特性如图8所示。

$$\gamma_i = \frac{1}{(1 - a\Delta S_{OCi})^b} \quad (19)$$

式中, γ_i 为充电均衡因子。

将充电时根据储能单元自身 SOC 确定的下垂系数 k_i'' 与充电均衡因子相乘,可得到充电时下垂系数 k_i 为

$$k_i = \gamma_i \cdot k_i'' \quad (20)$$

由图8可知,当储能单元的 S_{OCi} 较小时(小于平均值 S_{OCav}), $\gamma_i < 1$, $k_i < k_i''$, 充电均衡因子调小了该单元的下垂系数,分配的充电功率增大, SOC 上升速度加快;当储能单元的 S_{OCi} 较大时(大于平均值 S_{OCav}), $\gamma_i > 1$, $k_i > k_i''$, 充电均衡因子调大了该单元的下垂系数,分配的充电功率减小, SOC 上升速度减慢。因此在充电均衡因子的作用下,各单元的 SOC 会趋于均衡。

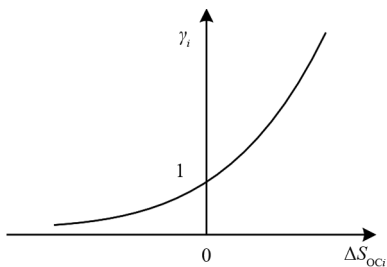


图8 充电均衡因子特性

3.3 参数设置

由第2章可知,下垂系数与功率分配相关,下垂

系数越小,储能单元分配的初始功率和扰动功率均会越多。由式(4)可知,下垂系数还影响着直流电压。为保证直流电压在允许的运行范围内,结合变流器的容量, k_{\max} 定义为

$$k_{\max} = \frac{\Delta V_{dc\max}}{P_s} \quad (21)$$

式中: P_s 为储能单元的额定容量; $\Delta V_{dc\max}$ 为允许的最大直流电压偏差。

式(21)表示在直流电压允许的范围内,储能单元的功率均可调。考虑绝缘和脉冲宽度调制比,直流系统允许的最大直流电压偏差通常为 $0.1 \sim 0.2 \text{ pu}$ [21-22], 因此 k_{\max} 的值为 $0.1 \sim 0.2$ 。

下垂系数也不能太小,太小了会导致储能单元接近定电压控制,会导致储能单元对功率控制不准确。考虑控制的灵活性和功率分配的合理性,结合图5和图7,初始下垂系数 k_0 的取值范围为

$$0.1k_{\max} \leq k_0 \leq 0.3k_{\max} \quad (22)$$

此外,考虑系统的稳定性和功率分配的合理性,由式(17)和式(20)计算出的考虑充电或者放电均衡因子后 k_i 不能超过 k_{\max} , 即 $k_i \leq k_{\max}$ 。

图9和图10分别为放电和充电均衡因子与差值调节系数 a 和幂指数调节系数 b 的特性曲线。由图9和图10可知,在 ΔS_{OCi} 一定时,调整 a 和 b 均可以显著改变均衡因子 δ_i 和 γ_i 的收放特性。当 a 一定时,增加 b 会导致 δ_i 和 γ_i 变化陡峭;当 b 一定时,增加 a 亦会导致 δ_i 和 γ_i 变化陡峭;当 a 和 b 均较小时, δ_i 和 γ_i 对 ΔS_{OCi} 变化不明显,导致均衡因子的均衡效果不明显,但当 a 和 b 均较大时, δ_i 和 γ_i 对 ΔS_{OCi} 变化敏感,较小的 ΔS_{OCi} 会导致储能单元的下垂系数变化幅度过大,功率波动较大,不利于系统稳定运行。因此, a 和 b 不能太大也不能太小,这里参数 a 设置为2, b 设置为5。

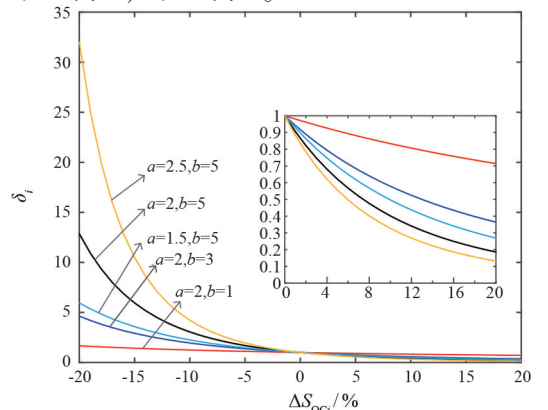


图9 放电均衡因子与调节系数 a 和 b 的特性曲线

值得注意的是,均衡因子 δ_i 和 γ_i 均采用了各单元 SOC 平均值 S_{OCavr} , 需要利用通信链路来获取其余单元的 SOC 信息。当通信链路故障时,不能获取其余单元的 SOC 值,此时将 S_{OCavr} 设置为本单元的 S_{OCi} , 则由式(15)和式(19)计算出的均衡因子 δ_i 和 γ_i 均为 1,表明通信故障时,均衡因子失去控制作用。此时,自适应下垂控制的系数仅仅考虑本单元的 S_{OCi} 值,即由式(14)和式(18)确定下垂系数。

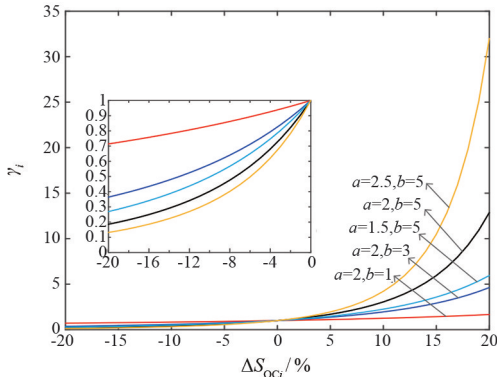


图 10 充电均衡因子与调节系数 a 和 b 的特性曲线

4 仿真分析

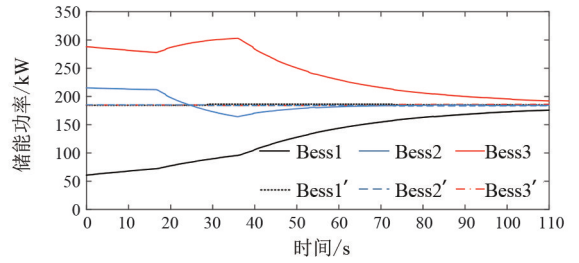
为了验证所提控制策略的准确性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的仿真系统,包含 3 个储能单元、2 个直流负荷、2 个交流负荷和 1 个 AC/DC 变流器。3 个储能单元的 SOC 分别为 60%、50%、40%。所提的自适应下垂控制的参数为: $S_{OC1} = 10\%$, $S_{OC2} = 45\%$, $S_{OC3} = 55\%$, $S_{OC4} = 90\%$, $k_0 = 0.02$, $k_{max} = 0.2$, $a = 2$, $b = 5$ 。

4.1 放电工况验证

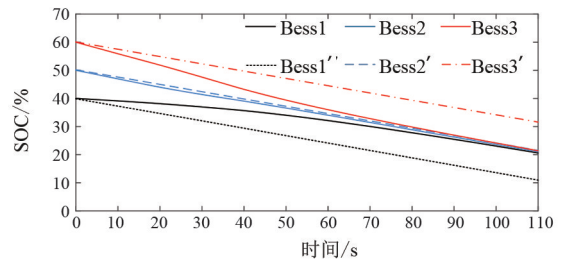
图 11 是储能系统放电工况下的系统响应图, Bess1、Bess2、Bess3 对应的曲线为所提自适应功率分配控制方法的储能单元 1、储能单元 2、储能单元 3 的响应曲线; Bess1'、Bess2'、Bess3' 对应的曲线为传统固定下垂系数的储能单元 1、储能单元 2、储能单元 3 的响应曲线。

从图 11 可知,固定下垂系数下,没有考虑储能单元的 SOC,各单元分配的放电功率一样, SOC 的下降速率一样,不能实现各单元之间的 SOC 均衡分配,在 110 s 时, Bess1 的 SOC 为 10% 左右,而 Bess3 的 SOC 大于 30%,这可能会导致初始 SOC 较小的储能单元过度放电,影响电池组的寿命。在所提的考虑 SOC 的自适应功率分配下,初始时刻 SOC 较大的

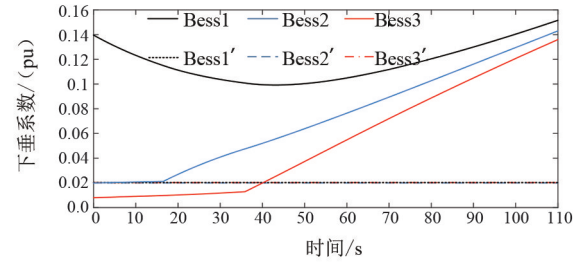
储能单元的下垂系数小,其分配的放电功率多, SOC 较小的储能单元的下垂系数大,其分配的放电功率少。在放电过程中,动态调整下垂系数和分配的放电功率,各储能单元的 SOC 逐渐趋于均衡。在 110 s 时,3 个储能单元的 SOC 都在 20% 左右。在各单元的 SOC 趋于均衡的过程中,各单元的下垂系数也逐渐接近,分配的放电功率也逐渐一致,说明所提的功率分配方法能够实现各储能单元功率合理分配和 SOC 的均衡控制。



(a) 储能单元功率



(b) 储能单元的 SOC



(c) 下垂系数

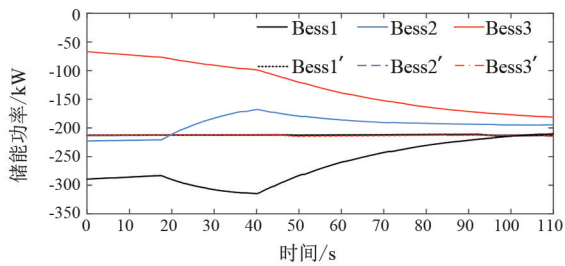
图 11 放电工况下系统的响应曲线

4.2 充电工况验证

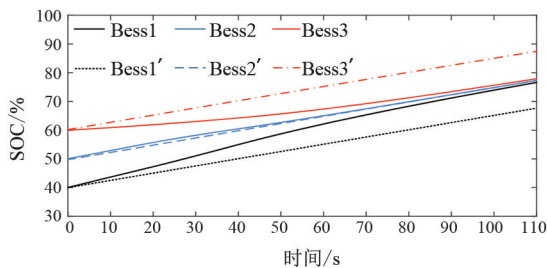
图 12 是储能单元充电工况下的系统响应图, Bess1、Bess2、Bess3 对应的曲线为所提自适应功率分配控制方法的储能单元 1、储能单元 2、储能单元 3 的响应曲线; Bess1'、Bess2'、Bess3' 对应的曲线为固定下垂系数的储能单元 1、储能单元 2、储能单元 3 的响应曲线。

由图 12 可知,与放电工况类似,充电工况时,当采用固定下垂系数,各单元分配的放电功率一样, SOC 的下降速率一样,不能实现 SOC 的均衡控制,可能会导致初始 SOC 较高的储能单元进入过充电,影响电池组的寿命。在所提的考虑 SOC 的自适应

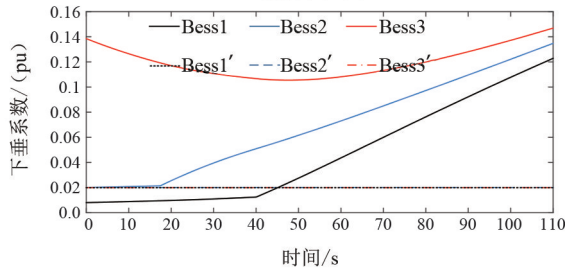
功率分配控制下,初始时刻具有较大 SOC 的储能单元的下垂系数大,其分配的充电功率少;较小 SOC 的储能单元的下垂系数小,其分配的充电功率多。并且在充电过程中,动态调整下垂系数和分配的充电功率,各储能单元的 SOC 逐渐趋于均衡,各单元的下垂系数也逐渐接近,分配的充电功率也逐渐一致,能够实现各储能单元 SOC 均衡控制。



(a) 储能单元功率



(b) 储能单元的 SOC



(c) 下垂系数

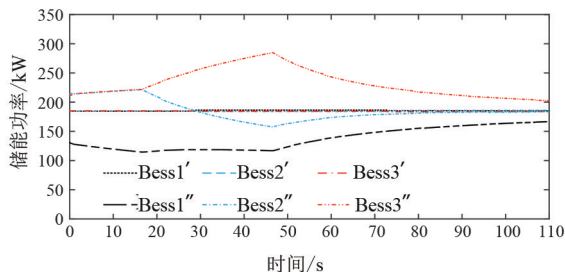
图 12 充电工况下系统的响应曲线

4.3 通信故障验证

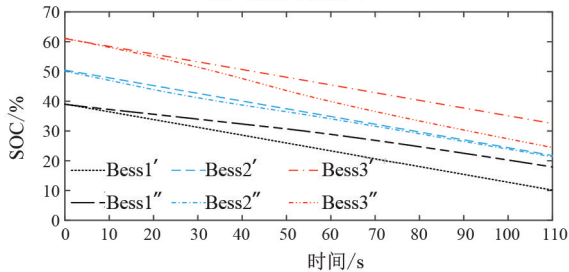
图 13 是通信异常时储能单元放电工况下的系统响应图, Bess1''、Bess2''、Bess3'' 对应的曲线为通信异常下不考虑均衡因子的自适应功率分配控制方法的储能单元 1、储能单元 2、储能单元 3 的响应曲线。

从仿真结果可知,虽然通信故障时获取不到 SOC 的平均值,均衡因子失去作用,但每个单元的下垂系数由于考虑了自身的 S_{OCi} 值,每个单元的按照式(14)自适应确定初始的下垂系数。储能单元 2 和储能单元 3 的 SOC 大于 S_{OC2} 时,此时的下垂系数等于初始值 k_0 ,而储能单元 1 的 SOC 小于 S_{OC2} ,进入限制放电区域,下垂系数大于 k_0 ,因此储能单元 1 分配的放电功率小于储能单元 2 分配的放电功率。在放电过程中,储能单元根据 SOC 动态调整下垂系

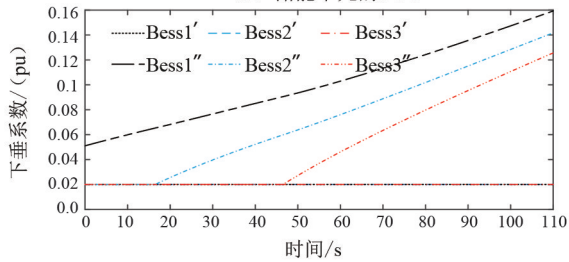
数和分配的放电功率,各储能单元的 SOC 也在逐渐趋向靠近。但与图 11 的通信正常考虑均衡因子的控制效果相比,通信异常下的 SOC 的均衡效果要差点,特别是放电后期各储能单元 SOC 相差不大时,均衡效果不太明显。由此可见,通信异常均衡因子失去作用时,所提的功率分配方法仍然能够实现各储能单元功率自适应分配,并且具有一定 SOC 的均衡控制的效果。



(a) 储能单元功率



(b) 储能单元的 SOC



(c) 下垂系数

图 13 通信异常时放电工况下系统的响应曲线

5 结 论

上面针对直流供电系统中储能单元之间功率分配不合理和 SOC 控制不均衡的问题,提出了一种考虑 SOC 的储能系统自适应功率分配控制策略。该策略在下垂系数中引入电池组的 SOC 和充电/放电均衡因子,实现功率的自适应分配。理论分析和仿真结果均表明,所提自适应功率分配控制策略充分考虑了电池组的 SOC,能够在放电时让初始 SOC 较大的储能单元承担更多的放电功率,在充电时让初始 SOC 较小的储能单元承担更多的充电功率,并在充放电过程中根据 SOC 的值动态调整储能单元的

下垂系数和分配的充放电功率,实现各储能单元功率合理分配和 SOC 快速均衡控制。并且即使通信异常时均衡因子失去作用,所提控制策略仍然能够实现各储能单元功率自适应分配,并在一定程度上实现 SOC 的均衡控制。由此可见,所提控制功率分配方法具有较好的鲁棒性和灵活性,能有效避免因 SOC 不均衡而导致电池组过放电或过充电,延长电池组的寿命,整体控制效果优于传统的下垂控制的功率分配方法。

所提策略没有考虑各个储能单元的容量和变流器的功率差异、线路阻抗对功率分配的影响。未来将在此基础上,对这几个方面开展深入研究,进一步提高储能系统运行的经济性和控制的灵活性。

参考文献

- [1] 施浩楠,倪佳,顾于昊.变电站直流应急电源开发与设计[J].电气开关,2021,59(5):55-57.
- [2] PRABHAKARAN P, GOYAL Y, AGARWAL V. A novel communication-based average voltage regulation scheme for a droop controlled DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1250-1258.
- [3] 丁雨,于艾清,高纯.基于改进一致性算法的独立光储直流微电网电压稳定能量协调策略[J].中国电力,2022,55(3):74-79.
- [4] 马英浩,刘琛,谢开贵,等.电力系统网络传输灵活性及其评价综述[J].中国电机工程学报,2023,43(14):5429-5440.
- [5] 任勇,曾鸣.独立光储直流微网的稳定运行控制策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(22):75-86.
- [6] HU X, LIU Z W, WEN G H, et al. Voltage control for distribution networks via coordinated regulation of active and reactive power of DGs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4017-4031.
- [7] 马海宁,王鲁杨,仇成,等.直流微电网不同荷电状态多储能系统分布式控制[J].电力建设,2022,43(7):87-95.
- [8] 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.
- [9] 吴涵,陈盟,柴利.过载储能系统 SoC 快速均衡控制与分布式功率分配策略[J].控制工程,2023,30(12):2313-2320.
- [10] 韦佐霖,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.
- [11] 朱珊珊,汪飞,郭慧,等.直流微电网下垂控制技术综述[J].中国电机工程学报,2018,38(1):72-84.
- [12] 代广贵,何晋,张博嘉.考虑不同容量的储能 SOC 均衡与功率分配策略[J].电力建设,2023,44(6):12-22.
- [13] GHANBARI N, BHATTACHARYA S. Battery state of charge management by voltage feedback modification[C] // 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), June 19-21, 2019, Detroit, MI, USA. IEEE, 2019:1-5.
- [14] 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.
- [15] 陈勃旭,崔炜,陈宇,等.分布储能直流微电网中多储能荷电均衡控制策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(24):111-120.
- [16] 米阳,钱翌明,张浩杰,等.考虑通信异常的直流微电网储能单元分布式协调控制研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(13):50-59.
- [17] 邓霞,孙威,肖海伟.储能电池参与一次调频的综合控制方法[J].高压技术,2018,44(4):1157-1165.
- [18] 王陈园,傅春明,张文赋,等.基于多电池组 SOC 一致性的光储联合电站平抑策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(6):237-244.
- [19] 陈燕东,刘燕军,张松,等.基于多目标协调的混合储能功率自适应分配方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(2):1-11.
- [20] 李保恩,李献伟,毋炳鑫.基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(11):108-114.
- [21] 曾雪洋,李小鹏,陈刚,等.PMSG 风机直流电容虚拟惯性控制及惯性影响分析[J].四川电力技术,2023,46(3):9-15.
- [22] ZENG X Y, LIU T Q, WANG S L, et al. Comprehensive coordinated control strategy of PMSG-based wind turbine for providing frequency regulation services[J]. IEEE Access, 2019, 7: 63944-63953.

作者简介:

熊 昊(1993),男,硕士,工程师,研究方向为通信新技术应用及工程控制;

唐灵修(1985),男,硕士,研究方向为通信新技术应用及工程控制;

彭义淞(1989),男,硕士,研究方向为控制科学与工程;
韩松状(1996),男,助理工程师,研究方向为通信设备运行维护、通信电源及通信蓄电池检修与管理;

曾雪洋(1992),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制、储能和新能源并网控制、高压直流输电。

(收稿日期:2024-07-23)