

# 基于模糊理论的柔性配电网多储能 SoC 均衡控制策略研究

班国邦<sup>1,2</sup>, 徐玉韬<sup>1</sup>, 袁旭峰<sup>4</sup>, 刘玉洁<sup>4</sup>, 阚鹏<sup>4</sup>, 马晓红<sup>2,3</sup>

(1.贵州电网有限公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002;

2.南方电网公司防冰减灾重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

3.贵州电网有限责任公司凯里供电局, 贵州 凯里 556099;

4.贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 光伏和风电等分布式电源在柔性配电网中的渗透率不断提高, 为减弱其间歇性出力对电力系统的不利影响, 引入了储能系统。但由于各储能单元在电池特性、硬件参数配置等方面存在差异, 将导致储能单元的有效使用寿命缩短。本文针对分布式储能单元 SoC 不均衡及输出电压波动的问题, 提出一种基于模糊理论的 SoC 均衡控制方法。以各储能单元的荷电状态和储能端口的电压偏差量为模糊控制的输入, 得到各储能单元的参考电压叠加值; 以此间接控制 DC/DC 变换器, 改变储能单元的输入/输出电流, 从而实现对储能单元的充放电控制; 最终使剩余电量达到均衡, 同时维持储能系统输出电压稳定。利用 PSCAD 仿真软件对文中的基于模糊理论的柔性配电网多储能 SoC 均衡控制策略进行仿真, 证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 均衡控制; 储能系统; 荷电状态; 柔性配电网; 模糊理论

文章编号: 2096-4633(2022)12-0001-08 中图分类号: TM910 文献标志码: A

DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2022.12.009

随着光能、风能等分布式能源 (distributed generation, DG) 在配电网渗透率的提高<sup>[1]</sup>, 其出力波动性、间歇性将会对系统安全可靠运行造成较大的影响。而储能单元实时充放电功能可以对系统功率进行“削峰填谷”, 提高可再生能源利用率。当系统中出现多个储能单元运行时, 可能会出现某个储能单元过度充电放电的情况<sup>[2]</sup>, 影响某个储能单元的使用寿命; 同时, 其他储能单元处于闲置状态, 降低了系统的整体效率。因而研究多储能单元荷电率 (state of charge, SoC) 均衡控制具有重要的前景和意义<sup>[3]</sup>。

文献[4]提出在直流微网中多储能单元分级运行控制方法, 通过动态电压临界值将储能划分为4种模式, 通过检测自身的 SoC 以动态调整各工作模式的电压区间, 以直流母线电压信号作为运行模式判据, 在不同的工作模式间进行切换。文献[5]为了提高能量转移效率, 加快电路均衡速度, 提出一种控流均衡速度, 在均衡控制策略启动时, 通过判断均衡后的 SoC 来判断是否达到均衡值, 同时控制均衡器的开关以及能量的传递方向, 直到 SoC 值一致。

文献[6]以 SoC 为对象设计了加权因子, 将实际 SoC 值与系统平均 SoC 值进行比较, 通过权重因子改变电池电源模块输出电压分配, 重新改变充放电速率, 进而实现储能元件之间的动态均衡。文献[7]提出了通过局部集中控制与修改下垂控制相结合的 SoC 均衡控制方法。文献[8]通过采集 SoC 值以及充放电效率作为下垂控制输入量, 计算 SoC 影响因子, 从而在传统固定下垂系数的基础上的得到均衡控制结果的下垂系数, 进而使储能元件的分配功率得到修正, 结果实现 SoC 均衡。文献[9-10]也是在传统下垂控制的基础上进行改进, 采集各个储能单元的荷电量来修正下垂系数, 实现 SoC 均衡。

本文利用 B2B-VSC 拓扑结构的优点在直流环节接入储能元件, 在两端柔性互联配电网的基础上在直流侧实现 PV(光伏)以及储能的集中接入。本文在此基础上提出一种基于模糊理论的 SoC 均衡控制策略, 该策略以各储能电池荷电状态和储能端口的电压偏差量为模糊控制的输入, 输出参考电压的叠加值。改变电压参考值以改变参考电流, 从而改变储能电池的充放电控制。

## 1 PV、储能并网拓扑结构

### 1.1 并网模型

图 1 所示是两端交直流混合配电网系统拓扑结构,2 条交流馈线通过隔离变压器与 VSC 换流器相连,电压等级为 10kV。考虑到直流侧接入 PV 的控制方式比交流侧接入相对简单,且利用电压源换流器将馈线柔性互联在一起具有较高的供电可靠性和潮流控制能力<sup>[11-14]</sup>。因此以其为背景,在此基础上实现 PV 集中接入直流侧。

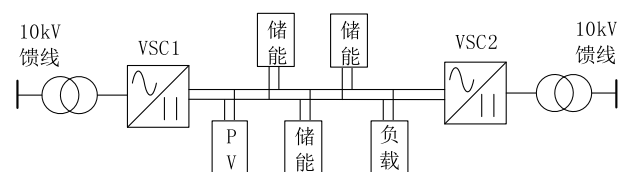


图 1 拓扑结构

Fig.1 Topology structure

### 1.2 储能单元充放电控制

储能电池可以根据系统需求控制储能电池的充放电状态,储能技术具有四象限功率快速响应和精确调节能力,可快速而精确地实现功率调节从而提高系统的供电能力。当可再生能源有剩余时,储能电池处于充电状态;当系统出现功率缺额时,储能电池处于放电工作状态<sup>[15]</sup>。如图 2 所示为传统储能电池系统控制框图,外环是直流输出端电压环,参考电压与输出电压的差值经过 PI 控制得到参考电流。内环为储能单元电流环,以所测量的储能单元与最终参考电流的差值为输出<sup>[16]</sup>。

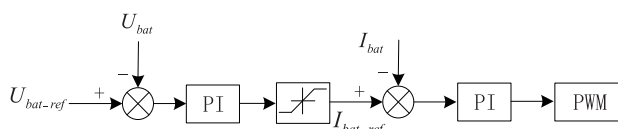


图 2 充放电控制框图

Fig.2 Block diagram of charge and discharge control

其基本充放电规则为:当 DG 输出功率大于负荷所需功率时,各储能单元在未达到充电上限时处于稳定充电状态;当 DG 输出功率小于负荷所需功率时,各储能单元在未达到放电下限时处于稳定放电状态。

## 2 基于模糊理论的控制策略

### 2.1 N 级 SoC 均衡策略

要实现储能电池荷电量之间的均衡,首先要取得每个储能电池的剩余可用荷电量。SoC 作为电池

剩余电量情况判断的重要依据,本文提出荷电量因子,其定义为某储能电池的荷电量与平均剩余荷电量的比值,其表达式为:

$$\lambda_n = \frac{SOC_k}{SOC} = \frac{SOC_k}{\frac{1}{n-1}(\sum_{i=1}^n SOC_x - SOC_i)} \quad (1)$$

$$SOC = \frac{1}{n-1}(\sum_{i=1}^n SOC_x - SOC_i) \quad (2)$$

$$\lambda_n = \frac{\text{该蓄电池剩余荷电量}}{\text{蓄电池平均剩余荷电量}} \quad (3)$$

式中:SoC<sub>x</sub> 为单独某 SoC 的剩余荷电量,SoC<sub>i</sub> 为选定的储能单元的剩余电量<sup>[17-18]</sup>。

### 2.2 SOC 均衡控制

储能电池过充或者过放都会导致寿命的降低,本文在控制中加入充放电的上下限控制,其控制如图 3 所示。

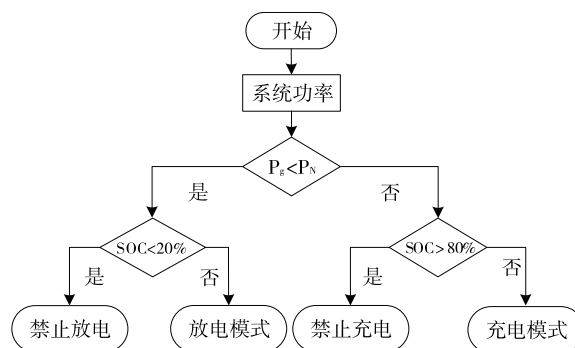


图 3 控制流程图

Fig.3 Control flow chart

控制规则为:当储能电池 SoC 高于上限时,禁止充电;当储能电池 SoC 低于下限时,禁止放电,当储能电池 SoC 处于正常范围 20% ≤ SoC ≤ 80% 时,储能电池正常充放电。

储能电池的充放电控制技术直接决定整个储能系统性能优劣,一方面影响储能电池的充放周期和充放电次数及有效使用寿命,另一方面在储能容量不足或储能状态切换时影响系统运行的可靠性。本文针对传统控制方法不能实现多个储能电池单元之间的 SoC 趋于一致的问题,考虑模糊控制善于处理界限不分明的定性知识和经验<sup>[19-25]</sup>,提出图 4 所示控制策略,即通过检测系统的实时工况,利用模糊规则获取考虑换流器功率裕度的附加直流电压偏差指令,从而解决多组并联储能电池的 SoC 不一致问题,提升储能电池组的使用寿命。

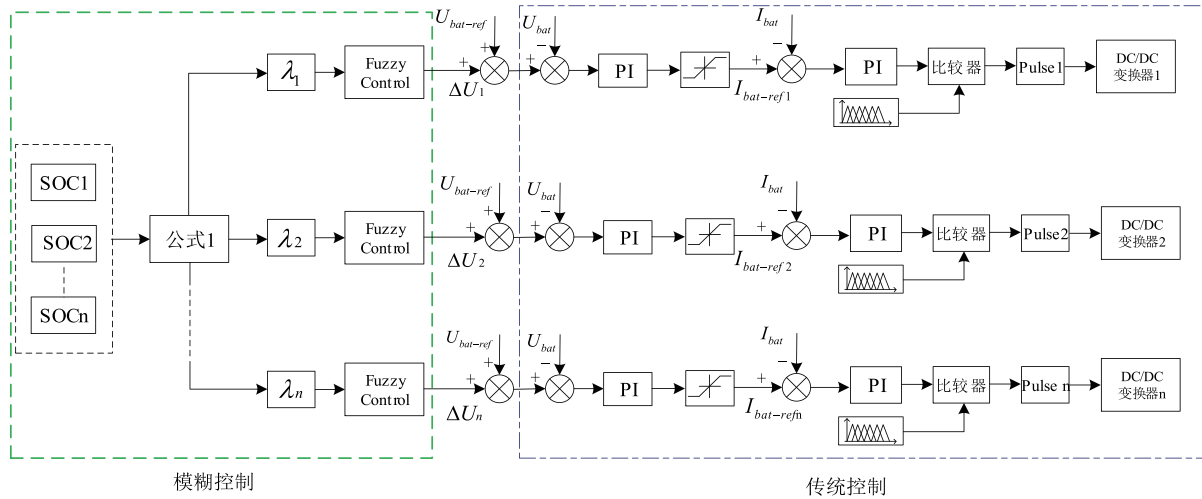


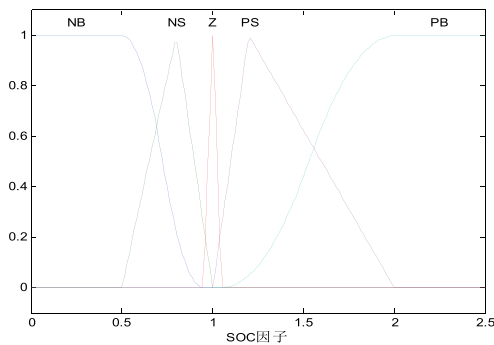
图 4 模糊控制系统整体控制框图

Fig.4 The overall control block diagram of the fuzzy control system

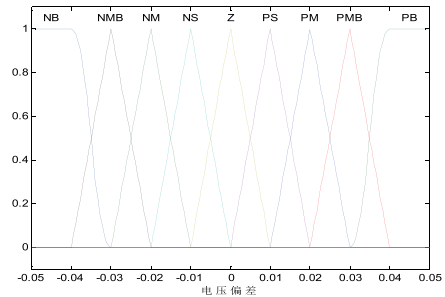
为实现 SoC 之间的均衡,该控制系统首先测得每个储能电池的荷电量,通过公式(1)~(3)得到 SoC 因子。以 SoC 因子和电压偏差量为模糊控制的输入,得到电压偏差因子,以电压偏差因子的大小改变参考电压的大小,从而改变参考电流,进而实现 SoC 均衡。

2.3 模糊控制设置

该模糊控制系统是一个双输入单输出的系统,文章选择 SoC 因子和电压偏差量为输入控制信号。直接通过模糊规则对电压参考因子做出调整,输入一共两个变量为  $\lambda_k$  和  $\Delta U\%$ ,定义其模糊集合为 {NB, NS, Z, PS, PB} {NB, NMB, NM, NS, Z, PS, PM, PMB, PB} 输出一个变量  $\Delta U_{deref}$ ,输出变量的模糊集为 {NB, NS, Z, PS, PB},在理想情况下,分别建立输入、输出的控制隶属度函数,如图 5 所示。

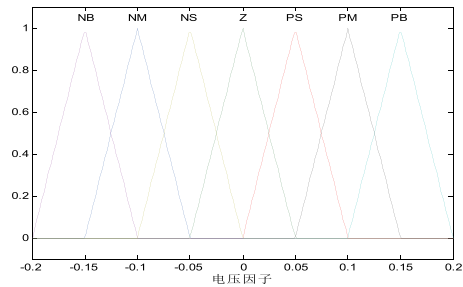


(a) 输入:SoC 因子  
(a) Input:SoC factor



(b) 输入:电压偏差

(b) Input:voltage deviation



(c) 输出:电压因子

(c) Output:voltage factor

图 5 模糊控制输入输出隶属度函数

Fig.5 Fuzzy control input and output

以电压偏差输入变量为例进行说明,SoC 因子和电压因子可以参考电压偏差变量的隶属度函数表示,当电压偏差为 0 时则对应为 Z 形隶属度函数,其表达式如式(4)所示。

$$f(\Delta U_{dc}; a, b) = \begin{cases} 1, & \Delta U_{dc} \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{\Delta U_{dc} - a}{b - a}\right)^2, & a \leq \Delta U_{dc} \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{\Delta U_{dc} - a}{b - a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq \Delta U_{dc} \leq b \\ 0, & \Delta U_{dc} \geq b \end{cases} \quad (4)$$

当直流电压偏差指标为正时对应为三角形隶属度函数,其表达式如(5)所示:

$$f(\Delta U_{dc}; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \Delta U_{dc} \leq a \\ \frac{\Delta U_{dc} - a}{b - a}, & a \leq \Delta U_{dc} \leq b \\ \frac{c - \Delta U_{dc}}{b - a}, & b \leq \Delta U_{dc} \leq c \\ 0, & \Delta U_{dc} \geq c \end{cases} \quad (5)$$

隶属度函数中的参数  $a, b, c$  可以按照偏差范围以及模糊子集的个数进行选取也可以根据经验进行选取。用输入输出的总的范围除以模糊子集的个数可得到单个模糊子集的范围,即可得到每个子集  $a, b, c$  值的大小。电压偏差为  $-0.05 \sim 0.05$ p.u., 式(4)中,  $a = -0.04, b = -0.02$ ; 式(5)中,  $a = -0.04, b = -0.02, c = -0.01$ 。其模糊逻辑推理表如表 1 所示。

表 1 模糊逻辑推理表

Tab.1 Fuzzy logic rules for controller

电压因子	电压偏差									
	NB	NMB	NM	NS	Z	PS	PM	PMB	PB	
	NB	Z	Z	Z	Z	Z	NS	NM	NM	NB
SOC 因子	NS	PM	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	PS	PM	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z	Z	Z	Z

1)以电压偏差为“Z”时为例:当电压偏差为零时,则说明整个系统功率平衡,分布式电源发电功率和系统所需功率大小相等,因此电压偏差因子为零,储能电池处于传统控制模式下。

2)以 SoC 因子等于零时为例:当 SoC 为 Z 时,说明储能电池之间的荷电量相同,无需切换到模糊控制,此时电压偏差因子为 0,保持传统的充放电控制即可。

3)以电压偏差为“NB”,SoC 为“NB”为例,当电压偏差为 NB 时,则说明电压小于额定电压,低于标准值,此时系统所需功率大于分布式电源所发功率,需要储能电池放电支持系统功率平衡。当模糊控制系统检测到 SoC 因子为 NB 时,则代表该储能电池元件相较于其余储能系统荷电量偏低,且电压偏差量较大,则输出电压偏差因子为 0,正常充放电。

4)当电压偏差为“PS”,SoC 因子为“NB”时,表明分布式能源发出功率大于系统所需功率,电压上升,此时储能电池应该吸收多余的不平衡功率。当检测到某一储能电池的 SoC 因子为“NB”时,表明该储能电池荷电量较低,禁止放电,因此输出“NS”的偏差因子,以降低参考电压,使该储能电池吸收更多的不平衡功率。

根据表 1 可建立如下图 6 所示模糊逻辑推理图。

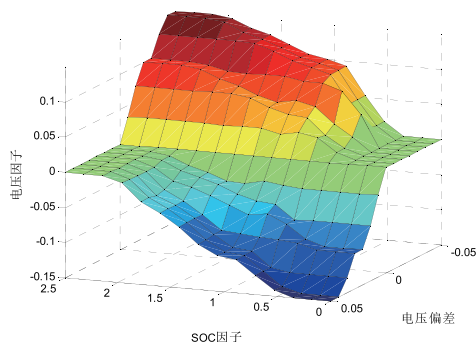


图 6 模糊逻辑推理图

Fig.6 Fuzzy logic reasoning diagram

### 3 仿真实验

#### 3.1 仿真参数

本节在 PSCAD 仿真软件中搭建如图 1 所示拓扑模型,系统参数如表 1 所示。直流侧采用 4MW 恒功率负载,光伏单元采用最大功率点控制,通过改变光照强度来改变输出功率的大小。

表 2 系统参数

Tab.2 System parameters

符号	参数	数值
V	交流侧线电压	10 kV
F	交流系统频率	50 Hz
SOC1	SOC1 初始剩余电量	58%
SOC2	SOC2 初始剩余电量	56%
SOC3	SOC3 初始剩余电量	60%
PL	直流负荷	4MW



### 3.2 场景 1

PV1、PV2 出力以及直流侧负荷不发生波动;其中 PV1、PV2 出力均为 1MW,直流负荷为 6MW,系统处于稳定状态。直流母线电压为 20kV;两端换流器传输功率按参考功率传输,系统稳定运行,仿真结果如图 7 所示。

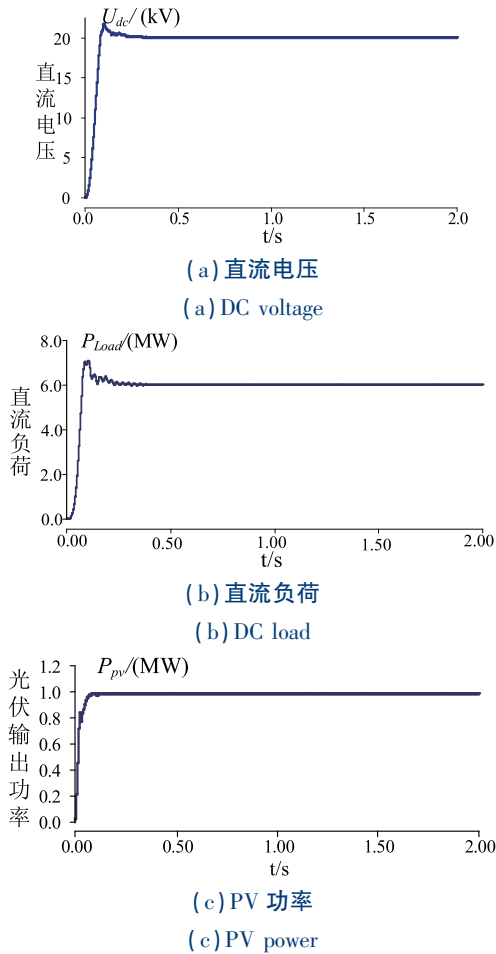


图 7 场景 1 仿真结果

Fig.7 Simulation results of scenario 1

### 3.3 场景 2

在场景 1 的背景下,考虑直流负荷在 1s 时增加 4MW,PV1、PV2 出力不变,维持恒定。此时直流负荷突然增加导致可再生能源输出功率小于系统所需功率,此时直流电压下降。为了维持系统功率平衡,由储能电池出力补偿光伏发电量与负载之间的功率差值。三组储能电池根据自身的 SoC 成比例分配其输出功率,使其 SoC 逐渐趋于一致,且输出功率差值也逐渐减小。

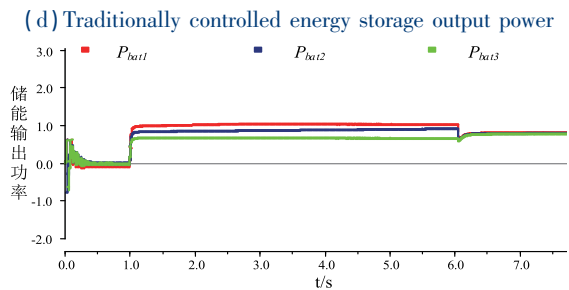
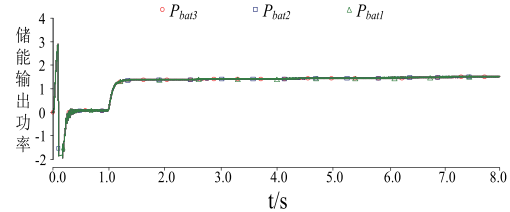
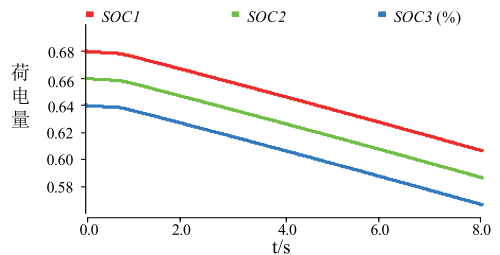
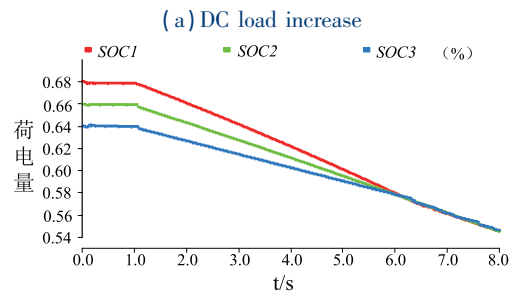
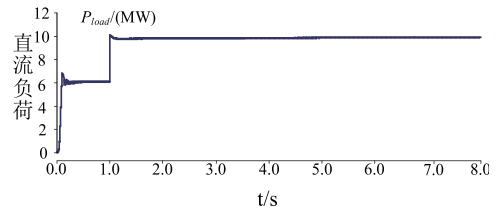


图 8 场景 2 仿真结果

Fig.8 Simulation results of scenario 2

从图 8(a) 直流负荷功率可以看出,1s 时,直流负荷增加 4 MW。此时系统功率出现缺额。当检测

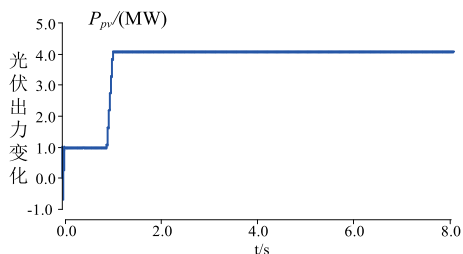
到系统功率和电压出现变化时,为了维持电压恒定,蓄电池释放功率维持系统功率平衡,同时荷电量开始下降。图(b)为未改进时三组蓄电池的释放功率情况,可以看出三组蓄电池之间的放电功率是一样的,并未将蓄电池之间 SoC 均衡的情况考虑进去。图(d)为传统控制下蓄电池之间的 SoC,可以看出蓄电池都是以相同的速度减少荷电量,不会达到均衡,其中 SoC1 曲线的荷电量大于 SoC3 的荷电量,当经过一段时间的充放电之后,明显 SoC3 会先达到释放功率的极限值,而 SoC1 还留有一定的荷电量限度。当蓄电池之间 SoC 的差异较大时,过度放电的情况会更明显。

而采用模糊控制时,系统会根据剩余的 SoC 决定蓄电池的放电速率。剩余荷电量大的蓄电池则采用较快的速率充电,使不同蓄电池的荷电量达到均衡。达到某一均衡值后以相同的速率放电,不会存在某个蓄电池过度充放电。从图(e)可以看出,1s 后,蓄电池开始放电,SoC 较大的蓄电池 1 放电功率大于另外两个蓄电池的放电功率,6s 左右时,当三个蓄电池之间的 SoC 达到均衡之后,则以大小相同的功率放电。

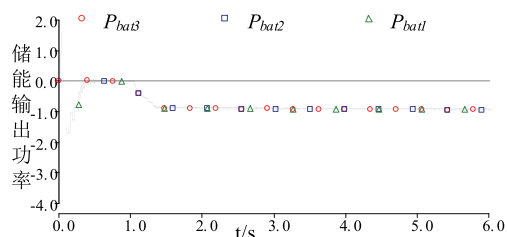
从仿真分析可知,所提控制策略在系统负荷突然增加时,可以由蓄电池迅速放电补充功率缺额。所提改进的控制策略可以在补充系统功率缺额的同时维持 SoC 均衡,提高系统供电可靠性。

### 3.4 场景 3

在场景 1 的前提下,考虑负荷不发生变化,PV1,PV2 出力增加。此时光伏出力功率大于系统所需功率,直流电压上升。因此储能电池吸收多余的不平衡功率维持光伏发电与负载之间的功率差值,储能电池组之间根据自身的 SoC 成比例分配其吸收功率,使其 SoC 趋于一致,电压偏差逐渐减小。

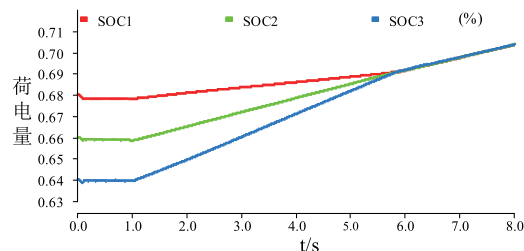


(a) PV1 出力增加  
(a) PV1 output increased



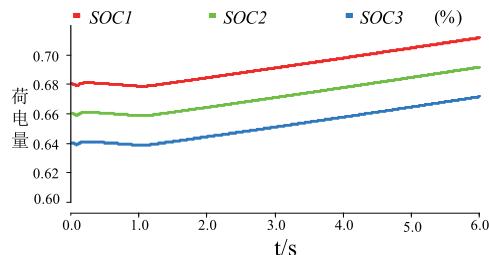
(b) 传统控制下储能输出功率

(b) Energy storage output power under traditional control



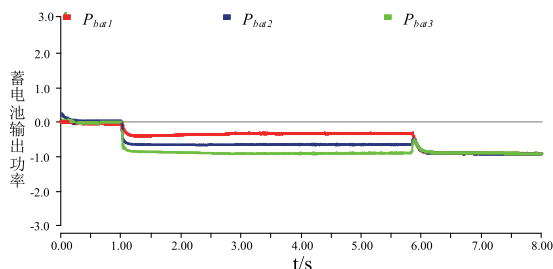
(c) 基于模糊控制下的 SoC

(c) SoC based on fuzzy control



(d) 传统控制下的 SoC

(d) SoC under traditional control



(e) 模糊规则控制下蓄电池输出功率

(e) Battery output power under fuzzy rule control

图 9 场景 3 仿真结果

Fig.9 Simulation results of scenario 3

图(a)所示为 1s 时,光伏出力增加 3 MW。当检测到系统功率与分布式能源的功率不匹配时,蓄电池开始启动充电功能,将光伏所产生的多余的不平衡功率存储起来,促进其就地消纳,可以提升间歇性能源的利用率。图(b)所示为传统控制下蓄电池充电功率,三组蓄电池以相同的速率充电,充电功率的大小相同。图(d)为传统控制下三组蓄电池 SoC 变化情况,由于充电功率大小相等,而 SoC 变化速率

相同,如果持续充电,SoC1 的荷电量会先达到充电上限。

由图 9(c)、(e)可知,改进的控制策略在促进分布式能源就地消纳的同时考虑了蓄电池之间 SoC 均衡的情况。1s 时,蓄电池的荷电量开始上升,此时蓄电池开始充电吸收系统多余的不平衡功率。改进控制策略下的荷电量可以趋近于某一相同的值,达到荷电量均衡。

#### 4 结论

本文针对直流配电中心不平衡功率在储能电池之间不能合理分配导致的 SoC 不均衡问题,提出了基于模糊控制的 SoC 均衡策略。在 PSCAD 平台上进行仿真验证,并得出如下结论。

1)传统充放电控制在遭遇到不平衡功率时,会将不平衡功率在储能电池之间均匀分配,容易导致储能电池的荷电量超出上限或下限,降低储能电池寿命。

2)不平衡功率的增加或者减少会导致直流电压发生变化,文章通过模糊控制得到电压因子从而改变参考电压的大小,进而达到 SoC 均衡,维持直流电压恒定。

3)仿真结果表明,基于模糊逻辑算法的控制方法可以消除储能电池荷电量之间的差异,而且在各种情况下都能合理有效的维持 SoC 均衡。

#### 参考文献:

- [1] 屈尹鹏,孙元章,徐箭,等.基于解析灵敏度的不平衡配电网分布式发电出力优化[J].电力系统自动化,2021,45(19):117-125.
- [2] 邵振,邹晓松,袁旭峰,等.柔性配电网背景下的储能应用研究评述[J].电测与仪表,2020,57(03):86-93.
- [3] WANG Bo, ZHANG Cuo, DONG Zhaoyang. Interval optimization based coordination of demand response and battery energy storage system considering SoC management in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(04): 2922-2931.
- [4] ZHI Na, DING Ke, DU Liang, et al. An SoC-based virtual DC machine control for distributed storage systems in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(03): 1411-1420.
- [5] GAO Xueping, FU Lijun. SOC optimization based energy management strategy for hybrid energy storage system in vessel integrated power system [J]. IEEE Access, 2020, vol.8: 54611-54619.
- [6] WANG Bo, ZHANG Cuo, LI Chaojie, et al. Hybrid interval-robust adaptive battery energy storage system dispatch with SoC interval management for unbalanced microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(01): 44-55.
- [7] BI Kaitao, YANG Weilin, XU Dezhi. Dynamic SoC balance strategy for modular energy storage system based on adaptive droop control [J]. IEEE Access, 2020, vol.8: 41418-41431.
- [8] HAN Hua, ZHU Yuanhao, SHI Guangze, et al. A local-distributed and global-decentralized SoC balancing method for hybrid series-parallel energy storage system [J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(02): 2289-2299.
- [9] Thales Augusto Fagundes, Guilherme Henrique Favaro Fuzato, Plínio Gongalves Bueno Ferreira, et al. Fuzzy controller for energy management and SoC equalization in DC microgrids powered by fuel cell and energy storage units [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2022, 3(01): 90-100.
- [10] 谈竹奎,徐玉韬,谢百明,等.向无源端网络供电的多端 MMC-HVDC 控制策略研究[J].电力大数据,2019,22(10):1-8.
- [11] TAN Zhukui, XU Yutao, XIE Baiming, et al. Research on multi-terminal MMC-HVDC control strategy for powering passive networks [J]. Power Systems and Big Data, 2019, 22(10): 1-8.
- [12] BI Kaitao, ZHANG Shuaishuai, ZHU Yixin, et al. An improved SoC balancing strategy for HVDC modular energy storage system based on low bandwidth communication with enhanced current regulation accuracy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(04): 3355-3364.
- [13] SHI Guangze, HUA Han, YAO Sun, et al. A decentralized SoC balancing method for cascaded-type energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(03): 2321-2333.
- [14] C. Y. CHUN, B. H. CHO, J. KIM. State-of-charge and remaining charge estimation of series-connected lithium-ion batteries for cell balancing scheme [C]. 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). Osaka, Japan, 2015: 1-5.
- [15] 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(04):169-177.
- [16] WEI Zuolin, CHEN Minyou, LI Jie, et al. Balancing control strategy of SoC and efficiency for distributed energy storage in islanded microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(04): 169-177.
- [17] 彭思敏,曹云峰,蔡旭.大型蓄电池储能系统接入微电网方式及控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(16):38-43.
- [18] PENG Simin, CAO Yunfeng, CAI Xu. Control of large scale battery energy storage system interface to microgrid [J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2011, 35(16):38-43.
- [16] 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(06):2804-2815.
- [17] 徐玉韬, 袁旭峰, 谈竹奎, 等. 基于智能直流配电中心的配电网有功功率调制技术[J]. 南方电网技术, 2018, 12(07):8-13+37.
- XU Yutao, YUAN Xufeng, TAN Zhukui, et al. Active power modulation of smart DC distribution center for power distribution grid[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(07):8-13+37.
- [18] H. Kakigano, A. Nishino, T. Ise. Distribution voltage control for DC microgrid with fuzzy control and gain-scheduling control[C]. IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. Jeju, South Korea: IEEE, 2011:256-263.
- [19] A. WANG, L. LIU, J. QIU, et al. Event-triggered robust adaptive fuzzy control for a class of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(08):1648-1658.
- [20] S. WANG, X. HUANG, J. M. López, et al. Fuzzy adaptive-equivalent consumption minimization strategy for a parallel hybrid electric vehicle[J]. IEEE Access, 2019, vol.7:133290-133303.
- [21] S. M. Said, M. Aly, B. Hartmann, et al. SMES-based fuzzy logic approach for enhancing the reliability of microgrids equipped with PV generators[J]. IEEE Access, 2019, vol.7:92059-92069.
- [22] Y. TIAN, Z. CAO, D. HU, et al. A fuzzy PID-controlled iterative calderon's method for binary distribution in electrical capacitance tomography[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, vol.70:1-11.
- [23] K. Alobeidli, V. Khadkikar. A new ultracapacitor state of charge control concept to enhance battery lifespan of dual storage electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, vol.67(11):10470-10481.
- [24] 吴铁洲, 王越洋, 石肖. 基于模糊控制的锂离子电池恒定极化充电方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(15):147-152.
- WU Tiezhou, WANG Yueyang, SHI Xiao. A constant polarization method for lithium-ion batteries based on fuzzy control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(15):147-152.
- [25] 熊焰, 李强泽, 方家琨, 等. 车网协同的有序充电动态模糊控制方法[J]. 电器与能效管理技术, 2021(05):48-54.
- XIONG Yan, LI Qiangze, FANG Jiakun, et al. Dynamic fuzzy control method of orderly charging based on vehicle grid cooperation[J]. Low Voltage Apparatus, 2021(05):48-54.

收稿日期: 2022年10月8日

作者简介:



班国邦(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高电压电气技术及柔性直流配电技术工作。

(本文责任编辑: 秦健)

## Research on Balanced Control Strategy of Energy Storage SoC Based on Fuzzy Rules

BAN Guobang<sup>1,2</sup>, XU Yutao<sup>1</sup>, YUAN Xufeng<sup>4</sup>, LIU Yujie<sup>4</sup>, KAN Peng<sup>4</sup>, MA Xiaohong<sup>2,3</sup>

(1. Guizhou Electric Power Research Institute, Guiyang 550002, Guizhou, China;

2. Key Laboratory of Ice Prevention and Mitigation of Southern Power Grid Company, Guiyang 550002, Guizhou, China;

3. Kaili Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Kaili 556099, Guizhou, China;

4. College of Electrical Engineering of Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** The penetration of distributed power sources such as photovoltaic and wind power in the flexible distribution network is increasing. In order to reduce the adverse impact of intermittent output on the power system, the energy storage system is introduced. However, due to the differences in battery characteristics, hardware parameter configuration and other aspects of each energy storage unit, the effective service life of the energy storage unit will be shortened. Aiming at the problem of SoC imbalance and output voltage fluctuation of distributed energy storage unit, this paper proposes an SoC equalization control method based on fuzzy theory. Taking the state of charge of each energy storage unit and the voltage deviation of the energy storage port as the input of fuzzy control, the reference voltage superposition value of each energy storage unit is obtained. This indirectly controls the DC/DC converter to change the input/output current of the energy storage unit, thus realizing the charge and discharge control of the energy storage unit. Finally, the remaining power is balanced and the output voltage of the energy storage system is stable. In the PSCAD simulation software, the fuzzy theory based SoC balancing control strategy for flexible distribution network is simulated and verified, which proves the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** balancing control; energy storage system; state of charge; flexible distribution network; fuzzy theory