

# 孤岛微网中分布式储能 SOC 和效率均衡控制策略

韦佐霖<sup>1</sup>,陈民铀<sup>1</sup>,李杰<sup>2</sup>,陈涛<sup>2</sup>,李强<sup>1</sup>,陈飞雄<sup>1</sup>,凌伟方<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 电气工程学院 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;

2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 401123)

**摘要:**在微网的运行中,不同储能电池的特性和初始状态不一致,会降低电池组间的功率分配精度。针对这一问题,提出了一种基于并联储能单元荷电状态(SOC)和充放电效率的储能均衡控制策略,以均衡电池差异和减少系统有功损失。所提方法采用分布式控制方式,将各分布式储能单元的SOC和充放电效率作为控制输入量,实时调整其输出功率,在满足系统功率需求的同时实现功率均分及并联储能单元间SOC和效率差异均衡。在此基础上,基于各储能单元SOC设计了均衡影响因子,采用两段法优化并联储能单元间SOC的均衡效果。通过MATLAB/Simulink仿真分析了所提控制策略在分布式负载变化、系统电源故障切除及有无均衡影响因子动态变化情况下的SOC均衡效果,仿真结果验证了所提方法的有效性和“即插即用”特性。

**关键词:**孤岛微网;分布式储能;分布式控制;SOC均衡;效率均衡

**中图分类号:**TM 761

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.025

## 0 引言

作为分布式能源接入大电网的一种有效方式,微网MG(MicroGrid)可作为网内的一个独立可控单元,运行于孤岛与并网2种模式。其中,微网的孤岛运行控制比并网运行控制更加复杂。大量可再生能源集成接入系统会降低系统的可靠性和供电质量<sup>[1-2]</sup>,而将分布式电池储能系统DBESS(Distributed Battery Energy Storage Systems)接入微网中能够显著改善这一问题,同时也能提高可再生能源的利用率。

在孤岛交流微网中,多个DBESS一般通过电压源型逆变器并联接入微网,但多个DBESS的接入会使整个系统的控制更加复杂<sup>[3]</sup>。V/F控制和下垂控制是常用的分布式储能控制技术,其中,模拟传统同步发电机“功频静特性”的下垂控制技术在近年来得到广泛关注。下垂控制技术具有高稳定性、灵活性以及无需通信和可实现“即插即用”功能等优点,可作为DBESS间协调控制和负荷分配的一种有效控制方式<sup>[4-5]</sup>。文献[6]在下垂控制中增加跟踪功率变化动态特性的修正项,优化了有功功率分配;文献[7]基于储能电池荷电状态(SOC)和充放电功率提出了一种自适应下垂控制方法,充分发挥了微源的调节潜力、功率支撑能力;文献[8]介绍了一种考虑实时SOC和可变滤波时间常数的新型储能控制策略,能维持SOC值在某一范围内且平滑可再生能源的输出功率。但基于微网中央控制器(MGCC)的设计会增加系统的复杂性、通信成本。另一方面,为了提高传统下垂控制的特性,文献[9-10]提出了一

种基于SOC的改进下垂控制方法,实现功率动态平衡和SOC趋近。上述研究主要是在单一考虑储能电池SOC的基础上实现功率分配,而在同时考虑储能电池SOC、充放电效率等DBESS自身特性的基础上,如何实现并联DBESS间的协调控制、SOC的均衡及系统负荷分配,进而稳定系统电压、频率的研究并不多。

另外,在实际充放电过程中,由于储能单元的硬件参数、容量、电池特性等存在差异,会引起电池组间的配合问题。而且由于传统下垂控制策略并未对基于储能单元SOC的有功均衡问题采取措施,当储能单元初始容量和SOC初始值不一致时,会导致电池组的能量密度和功率分配精度降低,一方面无法准确地控制各储能单元输出的瞬时功率,另一方面各储能单元SOC的均衡问题会引起系统不稳定。同时,电池组的寿命长短除了受容量衰减限制,还受充放电效率的影响,而充放电效率不仅与各储能单元的输出功率密切相关,也在一定程度上取决于当前SOC值<sup>[11]</sup>。因此,若能在传统下垂控制中加入具有改善并联DBESS间SOC均衡效果和效率一致功能的控制环节,进而充分利用整个DBESS配置容量和延长储能系统使用寿命,并能使整个微网系统运行于高效而低成本的方式下。

为了解决上述问题,本文基于孤岛交流微网的分布式结构,提出了一种多个并联运行DBESS的SOC和效率均衡控制策略,采用分布式和分层协调控制架构,通过协调控制并联DBESS间的SOC和放电效率,补偿网内功率缺额,减少有功损失,在放电过程中实现功率动态平衡及多个DBESS间SOC和放电效率的一致;同时,为了更好地调节SOC的均衡速度,设计了基于各储能单元SOC的均衡影响因子优化其放电均衡进程;并引入基于低带宽通信网

收稿日期:2017-03-22;修回日期:2017-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177177,61105125)  
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177177,61105125)

络的分布式二次控制用于调节系统母线电压幅值和频率,维持系统稳定。最后通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了所提方法的可行性和有效性。

## 1 DBESS 的 SOC 和效率均衡控制方法

本文在传统下垂控制策略的基础上,提出了并联 DBESS 的 SOC 和效率均衡控制策略,以充分发挥不同 SOC 值下各 DBESS 的功率调节作用,减少系统有功损失。本节首先介绍微网 DBESS 的均衡控制模型,然后基于此模型提出 DBESS 均衡控制策略,最后介绍了分布式二次控制。

### 1.1 控制模型

本文采用的微网 DBESS 均衡控制模型由两部分组成:第一部分为 DBESS 均衡控制,由有功/无功功率计算单元、基于各储能单元 SOC 和充放电效率的 DBESS 均衡控制单元、传统无功下垂控制单元和电压电流双环控制单元组成,主要实现系统功率分配、DBESS 间 SOC 和效率均衡控制的目的;第二部分为二次控制,以修正第一部分因下垂控制引起的电压和频率偏差。DBESS 均衡控制策略框图见图 1。

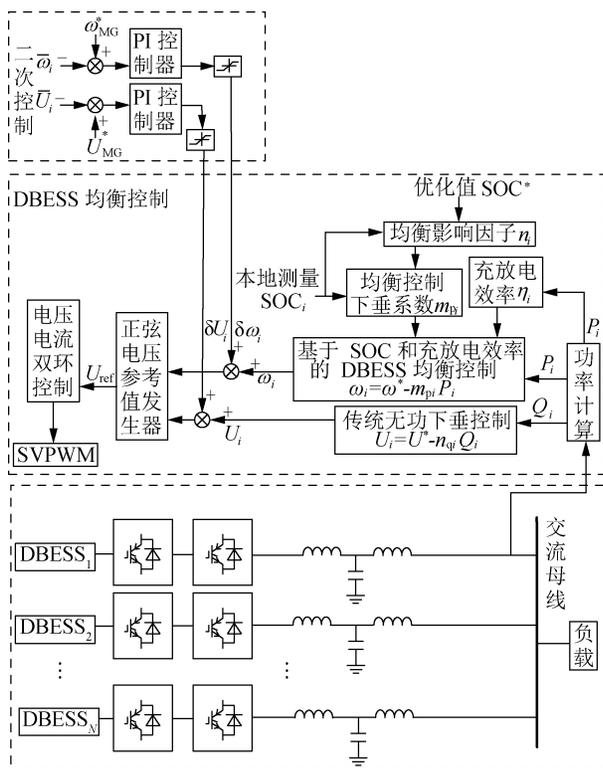


图 1 DBESS 均衡控制策略框图

Fig. 1 Diagram of balancing control strategy for DBESS

其中, DBESS 均衡控制部分通过检测各 DBESS 本地公共母线的线电压和相电流,经功率计算单元和低通滤波得到本地有功功率  $P_i$ 、无功功率  $Q_i$ ,为了增强储能单元的功率分配能力及减少系统有功损失,采集、计算各 DBESS 本地 SOC 值和充放电效率  $\eta_i$ ,将其作为下垂控制输入量,并设计基于各储能单

元 SOC 值的均衡影响因子  $n_i$ ,从而完成均衡控制下垂系数  $m_{pi}$  的设计,实现负荷有功功率在 DBESS 均衡控制器中的分配,得到相应的角频率  $\omega_i$ ;同时  $Q_i$  经传统 Q/V 下垂控制实现无功功率分配,得到相应的电压幅值  $U_i$ 。此外,为了调节由于下垂控制引起的频率和电压偏差,将经二次控制的频率补偿值  $\delta\omega$  和电压补偿值  $\delta U$  分别送入 DBESS 均衡控制器和无功下垂控制器中,得到相应的修正值,并将此修正值与  $\omega_i$ 、 $U_i$  送入电压电流双环控制和空间矢量脉宽调制(SVPWM),产生相应的 IGBT 驱动信号,从而维持系统的稳定运行。本文所提控制策略仅对有功分配进行了改进,而无功功率则按照传统下垂控制策略进行分配。同时,为了讨论方便,本文仅考虑 DBESS 处于放电模式下的情况,当 DBESS 处于充电模式时,本文所提控制策略同样适用。

### 1.2 DBESS 均衡控制策略

由图 1 可见,各 DBESS 分别经 DC/DC、DC/AC 变换器与 LCL 滤波器并联接入交流母线,以补偿系统功率缺额、提高可再生能源渗透率。当逆变器输出阻抗满足强感性要求时,传统下垂控制可表示为:

$$\omega_i = \omega^* - m_{pi} P_i \quad (1)$$

$$U_i = U^* - n_{qi} Q_i \quad (2)$$

其中,  $\omega^*$ 、 $U^*$  分别为本地交流侧频率、电压给定值;  $m_{pi}$ 、 $n_{qi}$  分别为有功、无功功率下垂系数。

在 DBESS 放电过程中,根据下垂控制特性中各 DBESS 间输出功率的比例关系可以得到其输出功率为<sup>[4,9]</sup>:

$$P_i = P_D \frac{1/m_{pi}}{\sum_{j=1}^N 1/m_{pj}} \quad (3)$$

其中,  $P_D$  为系统中可再生能源发电与负荷间的总功率差;  $N$  为系统中 DBESS 个数。

为了支撑孤岛微网的电压与频率, DBESS 持续输出有功功率,其 SOC 逐渐降低, DBESS 中 SOC<sup>[12]</sup> 的计算方法为:

$$SOC_i(t) = SOC_{i\_ini} - \int_0^t \frac{i_{i-bat}(t)}{Q_{i-bat}} dt \quad (4)$$

其中,  $SOC_i(t)$  为各 DBESS 的当前 SOC;  $SOC_{i\_ini}$  为各 DBESS 的 SOC 初始值;  $i_{i-bat}(t)$  为储能单元放电电流大小;  $Q_{i-bat}$  为储能电池容量。

忽略逆变器损耗时,逆变器直流侧输入功率和交流侧输出功率相等,联合式(3)、(4),可得:

$$SOC_i(t) = SOC_{i\_ini} - \frac{P_D}{Q_{i-bat} U_i} \int_0^t \frac{1/m_{pi}}{\sum_{j=1}^N 1/m_{pj}} dt \quad (5)$$

已有文献的研究均是在不同的 DBESS 具有相

同放电效率的前提下展开的,而在实际情况下,由于电池内阻不同,不同 DBESS 会产生不同的有功损失,其放电效率和输出功率与当前 SOC 值密切相关。故各 DBESS 的实际放电功率  $P_i^{\text{dis}}$  为<sup>[13]</sup>:

$$P_i^{\text{dis}} = P_i / \eta_i \quad (6)$$

$$\eta_i(P_i) = a_i - b_i P_i \quad (7)$$

其中,  $\eta_i$  为各 DBESS 的放电效率值;  $a_i$  和  $b_i$  均为各储能单元的放电效率系数。

因此,为了实现负荷功率在并联 DBESS 间的合理分配及其内部 SOC 的动态均衡,使 SOC 较大的 DBESS 具有较强的功率支撑能力, SOC 较小的 DBESS 具有较弱的功率支撑能力,从而实现并联 DBESS 间的 SOC 和输出功率趋于一致的目的,本文采用分布式控制方式,将各储能单元的当前 SOC 值作为下垂控制输入量;同时,为了减少系统有功损失、提高具有较高效率的 DBESS 的利用率,从而使不同 DBESS 间的放电效率趋于一致,亦将其放电效率作为控制输入量,联合式(1)、(5)、(6),可得 DBESS 均衡控制策略表达式为:

$$\omega_i = \omega^* - \frac{m_{p0}}{\text{SOC}_i^{n_i}} \eta_i(P_i) P_i^{\text{dis}} \quad (8)$$

其中,  $m_{p0}$  为初始有功功率下垂系数;  $n_i$  为均衡影响因素。

基于式(8),各 DBESS 根据相应的 SOC 值和放电效率值输出功率补偿系统功率缺额,即实现按照自身剩余容量分配负荷功率的目的;逐步减少 SOC 和放电效率差异,从而在使不同 DBESS 中 SOC 趋于一致的同时使放电效率也趋于一致,实现功率动态平衡及储能系统状态一致的目的。

### 1.3 二次控制

在放电进程中,随着 SOC 的变化,DBESS 均衡控制在分配系统功率时会引起母线电压、频率变化。为了维持系统稳定,引入如图 1 所示的二次控制策略。由于传统二次控制策略高度依赖于中央控制器,使系统缺乏一定的冗余性,故本文采用基于平均频率/电压法的分布式二次控制调节频率/电压。

以 DBESS<sub>k</sub> 为例,其分布式控制器在每一个采样周期采集本地电压  $U_k$ 、频率  $\omega_k$ ,通过低带宽通信网络将其发送给网络中的其他 DBESS 控制器,并接收其他 DBESS 控制器的电压、频率信息,然后在平均电压/频率控制器中对所有收集的电压、频率信息求平均值得  $\bar{U}_k$ 、 $\bar{\omega}_k$ ,最后将其与电压、频率参考值送入 PI 控制器中,产生电压修正量  $\delta U_k$  和频率修正量  $\delta \omega_k$ ,以消除 DBESS<sub>k</sub> 均衡控制中引起的电压、频率偏差,从而提高下垂控制的功率分配精度,实现微网的稳定运行。相应的分布式二次控制设计如下:

$$\delta \omega_k = k_{p\omega} (\omega_{\text{MG}}^* - \bar{\omega}_k) + k_{i\omega} \int (\omega_{\text{MG}}^* - \bar{\omega}_k) dt \quad (9)$$

$$\delta U_k = k_{pU} (U_{\text{MG}}^* - \bar{U}_k) + k_{iU} \int (U_{\text{MG}}^* - \bar{U}_k) dt \quad (10)$$

$$\bar{\omega}_k = \sum_{i=1}^m \omega_i / m \quad (11)$$

$$\bar{U}_k = \sum_{i=1}^m U_i / m \quad (12)$$

其中,  $k_{p\omega}$ 、 $k_{i\omega}$ 、 $k_{pU}$ 、 $k_{iU}$  为二次控制器系数;  $\omega_{\text{MG}}^*$ 、 $U_{\text{MG}}^*$  分别为本地频率、电压控制量;  $m$  为系统中稳定运行的 DBESS 个数。

传统二次控制方法仅是针对固定的下垂系数进行控制,而本文控制策略中,均衡控制系数随储能单元 SOC 和放电效率  $\eta_i$  不断变化,故此控制方法在系统变化情况下的稳定性及参数设计要求更高,同时分布式控制方式能提高系统的冗余性和稳定性。

## 2 均衡影响因子的优化

均衡影响因素  $n_i$  能直接影响并联 DBESS 间 SOC 差异的均衡效果,但因固定均衡影响因素存在自身的局限性,故本节首先分析了在固定均衡影响因素下的均衡效果,然后基于此提出了均衡影响因素的优化设计方案,最后证明了此方案的有效性。

### 2.1 固定的均衡影响因素效果分析

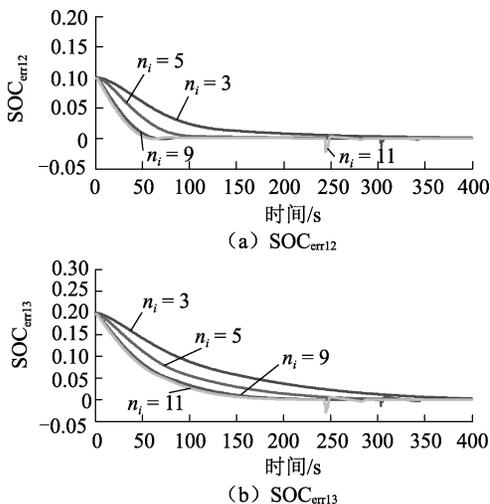
在式(8)中,下垂系数与储能单元 SOC 和均衡影响因素  $n_i$  有关。由于不同  $n_i$  值得到不同的均衡控制下垂系数,从而使各 DBESS 具有不同的功率均分速率。同时,随着 SOC 降低,在系统最大有功功率约束、最大频率偏移约束下,  $m_{pi}$  有一定的约束范围,不再随着 SOC 和  $n_i$  值的变化而变化;此外,在不同的 SOC 下各 DBESS 的放电效率也不一样。因此,有必要分析不同的  $n_i$  值、SOC 初始值对并联 DBESS 间 SOC 差异均衡效果的影响及对其改善的可能性。

为了更为直观地分析上述问题,以 3 个 75 A·h 锂离子蓄电池组成的并联 DBESS 独立支撑孤岛微网工作过程为例。设放电过程中相互并联的 2 个 DBESS 间的 SOC 差值  $\text{SOC}_{\text{err}ij}$  为:

$$\text{SOC}_{\text{err}ij} = \text{SOC}_{i_1} - \text{SOC}_{j_1} \quad (13)$$

DBESS<sub>1</sub> 的 SOC 初值为 0.9,与 DBESS<sub>2</sub>、DBESS<sub>3</sub> SOC 初值的差分别为  $\text{SOC}_{\text{err}12} = 0.1$ 、 $\text{SOC}_{\text{err}13} = 0.2$ ,负荷功率  $P_{\text{load}} = 75 \text{ kW}$ 。分别选取均衡影响因素固定值  $n_i$  为 3、5、9、11 进行仿真,比较其对 DBESS 间  $\text{SOC}_{\text{err}ij}$  的均衡效果,如图 2 所示。

由图 2 可见,随着放电过程中并联 DBESS 内部 SOC 降低,  $\text{SOC}_{\text{err}12}$ 、 $\text{SOC}_{\text{err}13}$  逐渐降低。初始放电阶段,  $n_i$  值越大,越有利于降低  $\text{SOC}_{\text{err}ij}$ 。与之相反,当各 DBESS 内部 SOC 较低且并联 DBESS 间 SOC 差值较小时,  $n_i$  值越小,越有利于降低  $\text{SOC}_{\text{err}ij}$ ,而  $n_i$  值越大,并联 DBESS 间 SOC 差值波动越大,不利于 SOC

图 2 固定  $n_i$  值下 SOC 差值均衡效果Fig.2 Balancing effect of SOC difference under constant  $n_i$ 

的差值均衡。这是因为当各 DBESS 在自身 SOC 较低时,虽然  $n_i$  值越大越能加速 SOC 的差值均衡以及负荷功率分配,但是各 DBESS 输出功率受其最大输出功率约束,进而降低了 SOC 差值的均衡效果。

## 2.2 均衡影响因子设计

由上述分析可知,在约束条件下,在 DBESS 的不同放电阶段,随着 SOC 的降低,不同的  $n_i$  值对并联 DBESS 间 SOC 的均衡效果不同,且较大的  $n_i$  值不利于低 SOC 下各 DBESS 间 SOC 的均衡。因此,应取  $n_i$  值在允许范围内且能根据不同的放电阶段及各 DBESS 当前 SOC 值实时调节  $n_i$  值,使其随着 SOC 的降低而降低。故本文采用基于储能单元 SOC 值的两段法对均衡影响因子  $n_i$  进行优化。

由于  $n_i$  值不同,各 DBESS 分配输出的有功功率也不相同,联合式(3)、(6)、(7)可得各逆变单元分配输出的实际功率为:

$$P_i^{\text{dis}}(a_i - b_i P_i^{\text{dis}}) = P_D \frac{\text{SOC}_i^{n_i}}{\sum_{j=1}^N \text{SOC}_j^{n_j}} \quad (14)$$

由式(14)可见,各 DBESS 的 SOC 值与功率分配成非线性关系,由各逆变单元最大输出功率的限制可得  $n_i$  的约束条件为:

$$\frac{\text{SOC}_i^{n_i}}{\sum_{j=1}^N \text{SOC}_j^{n_j}} \leq \frac{P_{\text{imax}}^{\text{dis}}(a_i - b_i P_{\text{imax}}^{\text{dis}})}{P_D} \leq \frac{a_i P_{\text{imax}}^{\text{dis}}}{P_D} \quad (15)$$

根据式(15)可使  $n_i$  在允许范围内取值,从而使各逆变单元输出功率不越限。

由储能电池的充放电特性<sup>[14-15]</sup>可知,当电池维持在较高的 SOC 下时,其放电效率相对较高,且能提升有效利用次数;而随着总剩余能量的降低,为了保证储能单元在低 SOC 下均衡速度的同时不引起系统波动;且数据表明储能单元 SOC 维持在 40% ~

50%时有利于提高其使用寿命,SOC 过高易使电池饱和,SOC 过低易使电池放电能力不足。考虑以上 3 点,本文将放电过程分为 2 个阶段对  $n_i$  进行优化:高 SOC 快速差值平衡阶段、低 SOC 平稳保持阶段。

a. 高 SOC 快速差值平衡阶段。

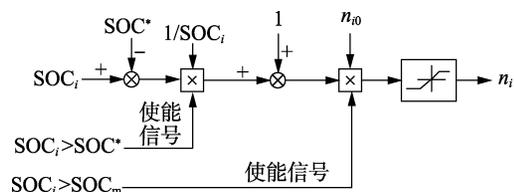
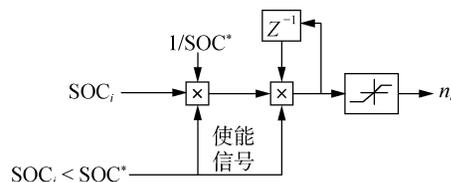
$$\begin{cases} n_i(t) = n_{i0} + \frac{\text{SOC}_i - \text{SOC}^*}{\text{SOC}_i} n_{i0} \\ \text{SOC}_i > \text{SOC}^*, \text{SOC}_i > \text{SOC}_m \end{cases} \quad (16)$$

b. 低 SOC 平稳保持阶段。

$$\begin{cases} n_i(t) = \frac{\text{SOC}_i}{\text{SOC}^*} n_i(t-1) \\ \text{SOC}_i \leq \text{SOC}^* \end{cases} \quad (17)$$

其中, $n_i(t)$ 和 $n_i(t-1)$ 分别为 $t$ 和 $t-1$ 时刻的均衡影响因子取值; $n_{i0}$ 为均衡影响因子初始值; $\text{SOC}^*$ 为各 DBESS 维持最优工作状态的 SOC 设定值; $\text{SOC}_m$ 为系统中剩余能量最低的 DBESS 的 SOC 值。

图 3 与图 4 分别为在初始放电高 SOC 与放电过程中低 SOC 下均衡影响因子  $n_i$  的优化控制框图。在高 SOC 下,各并联 DBESS 的  $n_i$  值在式(16)的作用下也较大,能促进各 DBESS 间的功率分配,加速并联 DBESS 间 SOC 均衡的目的,且能根据 SOC 的变化动态调节  $n_i$  大小;在低 SOC 下,即当各 DBESS 当前 SOC 值小于  $\text{SOC}^*$  时,采用式(17)对  $n_i$  值进行优化,通过 SOC 当前值与  $n_i(t-1)$  值逐渐减小  $n_i$ ,促进并联 DBESS 间 SOC 均衡,且将  $n_i$  限定在合适范围内,不致过大或过小,从而维持系统稳定。

图 3 高 SOC 下  $n_i$  的优化控制框图Fig.3 Optimal control block diagram of  $n_i$  with high SOC图 4 低 SOC 下  $n_i$  的优化控制框图Fig.4 Optimal control block diagram of  $n_i$  with low SOC

## 2.3 均衡影响因子的均衡效果分析

为了验证 2.2 节所提  $n_i$  对  $\text{SOC}_{\text{err}ij}$  的优化效果,在与 2.1 节所建立的不同系统结构基础上,分析  $n_i$  对 SOC 差值均衡的优化效果,如图 5 所示。

对比图 2 与图 5 可见,不管是采用均衡影响因子

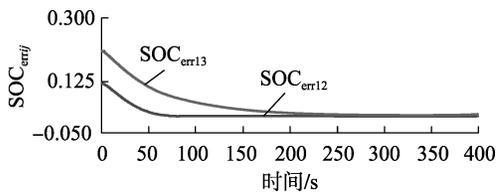


图 5  $n_{i\text{optimal}}$  下 SOC 差值均衡优化效果

Fig.5 Balancing effect of SOC difference under  $n_{i\text{optimal}}$

固定值还是优化值,各 DBESS 间的 SOC 差值均能趋于 0。相比于采用固定值  $n_i = 3$  或 5 时,各 DBESS 采用优化值  $n_{i\text{optimal}}$  时其均衡速度明显更快,且能在一定时间内明显降低 SOC 间差值直至 0。而当各 DBESS 采用固定值  $n_i = 9$  或 11 时,其一致均衡速度略快于采用优化值  $n_{i\text{optimal}}$  的情况,且能迅速均衡 DBESS 间 SOC 差值直至 0,但在均衡后会出现波动,不能保持恒定状态,影响 DBESS 间的均衡;而采用  $n_{i\text{optimal}}$  时,不仅能迅速均衡 SOC 间差值,同时能更好地恒定于一致状态,保持良好的均衡效果,显著改善了并联 DBESS 间的 SOC 均衡能力,证明了本节所设计的均衡影响因子具有更好的一致均衡能力和均衡效果。

### 3 孤岛微网系统结构

为了验证上述所设计优化控制策略的有效性,本文搭建了如图 6 所示的孤岛微网系统仿真结构,其主要由 3 个 DBESS 与其三相逆变单元以及多组分布式负载组成,由 MATLAB/Simulink 实现仿真分析。本文主要考虑当系统中可再生能源的发电能力小于负荷的功率需求时,孤岛电网频率持续跌落,各 DBESS 利用本地信息(电压、频率)并根据自身容量快速调节其输出功率来平滑系统功率差,支撑系统电压与频率的情况。其中,所选 DBESS 均为 75 A·h 锂离子蓄电池,其他系统仿真参数如下:母线电压幅值参考值  $U_{\text{ref}} = 311$  V,母线频率参考值  $f = 50$  Hz, LCL 滤波器左侧电感值  $L_1 = 2.2 \times 10^{-3}$  H, LCL 滤波器右侧电感值  $L_2 = 1.3 \times 10^{-3}$  H, LCL 滤波器电容值  $C = 2.2 \times 10^{-5}$  F, SOC 最小值  $\text{SOC}_{\text{min}} = 15\%$ , 初始有功功率下

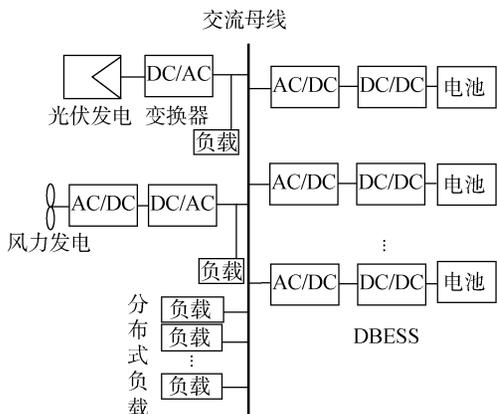


图 6 孤岛交流微网示意图

Fig.6 Schematic diagram of islanded AC microgrid

垂系数  $m_{p0} = 0.000\ 093\ 037$  rad/(s·W), 初始无功功率下垂系数  $n_{q0} = 0.000\ 5$  rad/(s·var), 频率 PI 控制器比例系数  $k_{p\omega} = 0.1$  W·s/rad, 频率 PI 控制器积分系数  $k_{i\omega} = 8.5$  W/rad, 电压 PI 控制器比例系数  $k_{pU} = 0.08$  var/V, 电压 PI 控制器积分系数  $k_{iU} = 1.6$  var·s/V。同时,表 1 给出了各 DBESS 相应的电池放电效率参数。

表 1 储能电池放电效率参数

Table 1 Parameters of energy storage battery discharging efficiency

储能单元	$a_i$	$b_i$	$P_i^{\text{min}}/\text{kW}$	$P_i^{\text{max}}/\text{kW}$
DBESS <sub>1</sub>	0.85	0.007 70	0	30
DBESS <sub>2</sub>	0.88	0.009 05	0	30
DBESS <sub>3</sub>	0.92	0.010 65	0	30
DBESS <sub>4</sub>	0.83	0.006 80	0	30

### 4 仿真实验验证

基于 MATLAB/Simulink 系统仿真模型,本文设计了 4 种实验验证该控制方法的有效性:分析固定  $n_i$  值下,比较控制策略中是否有采用储能单元的放电效率作为控制输入量的均衡效果;分析固定  $n_i$  值下,系统分布式负载变化对控制效果的影响;分析固定  $n_i$  值下,储能单元发生故障时对控制效果的影响;分析  $n_i$  动态变化时, DBESS 均衡控制策略对 SOC 差异均衡效果的影响。

#### 4.1 固定 $n_i$ 值下的 DBESS 均衡控制策略仿真实验验证

##### 4.1.1 放电效率对均衡效果的影响

为了验证考虑放电效率对并联 DBESS 间 SOC 的均衡效果,基于图 6 所示结构,系统接入了 3 组分布式负载  $P_{\text{load1}} = P_{\text{load2}} = P_{\text{load3}} = 25$  kW, 3 个 DBESS 的  $\text{SOC}_{i,\text{ini}}$  分别为 0.9、0.8、0.7, 比较控制策略中、无采用 DBESS 的放电效率作为控制输入量的均衡效果(不考虑  $n_i$  变化,  $n_i$  均取固定值 6), 分别见图 7、图 8。

由图 7、8 可知,在 2 种情况下的初始放电阶段, DBESS<sub>1</sub> 均因其初始 SOC 值较高,在 DBESS 均衡控制策略的影响下 SOC 变化率最大,故分配输出的有功功率较大;反之 DBESS<sub>3</sub> 的 SOC 变化率最小,输出有功功率较小。可以看出,2 种情况下都能实现各储能单元 SOC 的趋近和功率的均衡。相比之下,图 7 中 DBESS<sub>1</sub> 与 DBESS<sub>2</sub> 间 SOC 差值在均衡控制策略下很快就趋于 0, 两者的输出功率也基本均衡,而且 3 个 DBESS 的 SOC 差值均衡速度明显优于图 8。

综上所述,本文所提控制策略能同时基于各 DBESS 自身状态的 SOC 和放电效率值合理地分配负荷功率,不仅表现于使并联 DBESS 间 SOC 差值均衡和功率平衡速度明显更快,且能使不同 DBESS 间 SOC 和放电效率趋于一致以及提高整个 DBESS 系统的均衡效果。

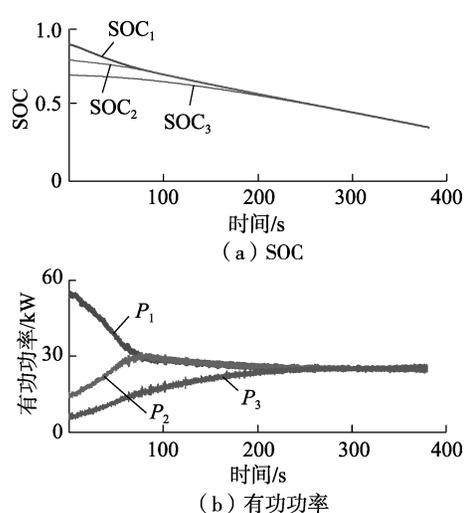


图 7 考虑  $\eta_i$  影响的 DBESS 均衡控制效果  
Fig.7 Balancing control effect of DBESS considering effect of  $\eta_i$

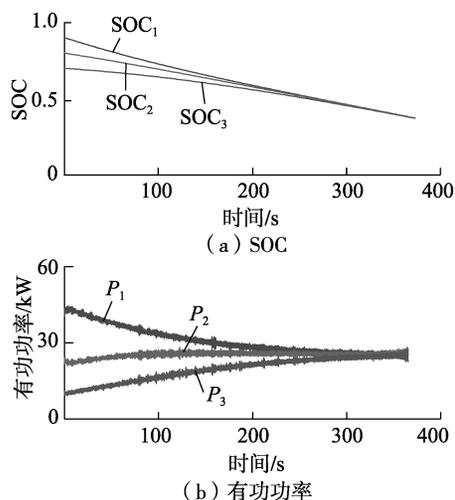


图 8 不考虑  $\eta_i$  影响的 DBESS 均衡控制效果  
Fig.8 Balancing control effect of DBESS without considering effect of  $\eta_i$

#### 4.1.1.2 分布式负载变化

在本节设计中,系统接入 5 组分布式负载: $P_{load1} = P_{load2} = P_{load3} = 20 \text{ kW}$ 、 $P_{load4} = 8 \text{ kW}$ 、 $P_{load5} = 9 \text{ kW}$ 。图 9 给出了本文所提控制策略在分布式负载波动情况下对网内功率分配及系统稳定性影响的仿真波形。

初始放电阶段 ( $t < 110 \text{ s}$ ),  $P_{load1}$ 、 $P_{load2}$ 、 $P_{load3}$  接入系统运行,在均衡控制策略作用下,3 个 DBESS 的 SOC、输出功率及放电效率的差值逐渐变小。 $t = 110 \text{ s}$  和  $t = 160 \text{ s}$  时,  $P_{load4}$  和  $P_{load5}$  分别接入母线;  $t = 260 \text{ s}$  时,负载减少  $10.937 5 \text{ kW}$ 。可以看出,在负载投入或切除时,系统会短暂波动,然后继续朝输出功率差和放电效率差减小的方向趋近,最后各 DBESS 的输出功率达到动态平衡,放电效率也趋于一致;在整个分布式负载变化情况下,无论负载是投入还是切除,3 个 DBESS 间 SOC 差值始终在减小,并始终能快速跟随

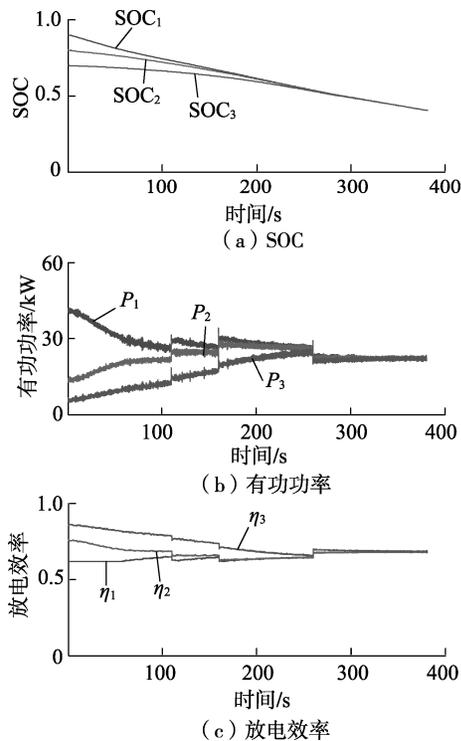


图 9 考虑分布式负载波动的仿真波形  
Fig.9 Simulative waveforms considering distributed load fluctuations

系统负载变化,使系统有功功率根据相应的均衡控制下垂系数比值关系在 3 个 DBESS 间重新分配;当 SOC 差值逐渐减小时,均衡控制下垂系数比例逐渐趋于 1,从而使输出功率逐渐均衡,同时放电效率也达到一致,实现平滑系统功率差的目的,验证了本文所提控制策略能迅速平滑系统功率差且有效地保证了 DBESS 间 SOC 和效率一致的效果。

图 10 给出了整个负载变化过程中系统母线电压幅值和频率变化波形,可以看出,在  $t = 110 \text{ s}$ 、 $t = 160 \text{ s}$  和  $t = 260 \text{ s}$  负载变化时,母线电压幅值和频率都会经历短暂的波动过程,在二次控制的作用下,其最大频率偏移值不超过  $0.2 \text{ Hz}$ ,电压幅值偏移不超

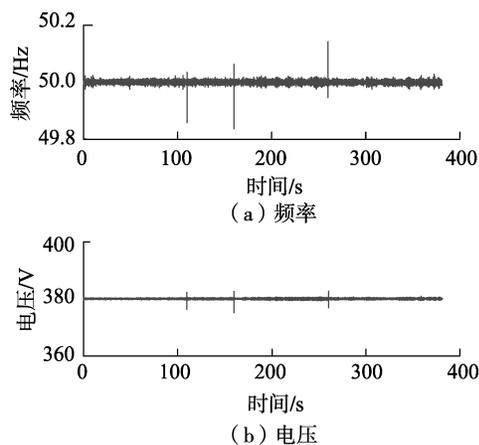


图 10 系统母线电压幅值和频率  
Fig.10 Voltage amplitude and frequency of system bus

过 5 V,且能迅速恢复稳定状态。

### 4.1.3 “即插即用”特性

图 11 为储能单元侧和负荷侧波动下的仿真波形。此仿真是在前文所述 3 个 DBESS 及其三相逆变单元组成的系统基础上并联接入 DBESS<sub>4</sub> 及 4 个分布式负载所组成的新系统上进行的,其中 DBESS<sub>4</sub> 的初始 SOC 值为 60%,其他参数与其他 DBESS 相同,4 组分布式负载为  $P_{load1} = P_{load2} = P_{load3} = 20 \text{ kW}$ 、 $P_{load4} = 10 \text{ kW}$ 。仿真结果验证了微网“即插即用”特性及所提控制策略的延展性。

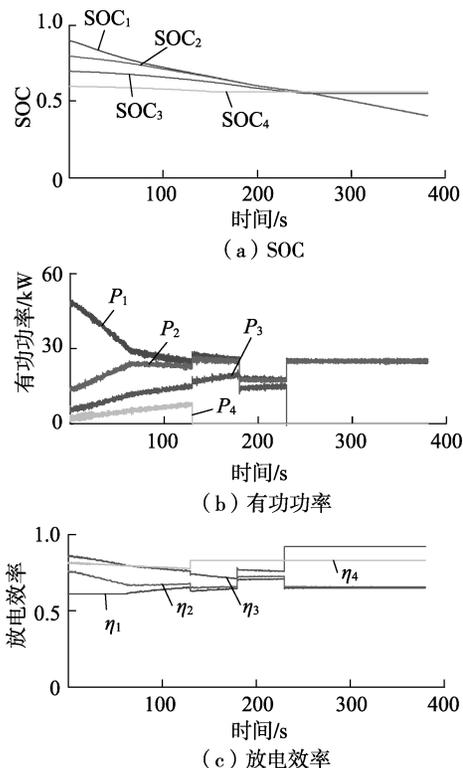


图 11 储能单元侧和负荷侧波动下的仿真波形

Fig.11 Simulative waveforms with fluctuations in DBESS-side and load-side

在  $t = 130 \text{ s}$  前,系统中 4 个 DBESS 带负载正常工作,四者的 SOC 和放电效率趋于相等,且输出功率趋于均等分配。在  $t = 130 \text{ s}$  时,DBESS<sub>4</sub> 切除,系统负载功率完全由其他 3 个 DBESS 承担,在 DBESS 均衡控制策略的作用下,3 个 DBESS 分配的功率变大,继续趋于平衡。同时,其 SOC 和放电效率也趋于相等。在  $t = 180 \text{ s}$  时,切除分布式负载  $P_{load3}$ ,3 个 DBESS 继续趋于均等分配负荷; $t = 230 \text{ s}$  时,DBESS<sub>3</sub> 切除,负载功率由 DBESS<sub>1</sub>、DBESS<sub>2</sub> 共同承担,根据相应的均衡控制下垂系数分配功率,两者的 SOC、放电效率达到一致,且输出功率也相等。上述结论验证了当系统在孤岛状态下出现故障切除的情况时仍可实现各 DBESS 的 SOC、放电效率的均衡及动态均分功率的目的;同时微网“即插即用”特性也得到了验证。此外,频率和电压波动均在允许范围内,见图 12。

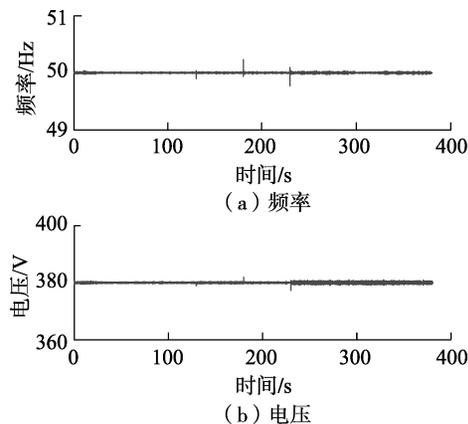


图 12 系统母线电压幅值和频率

Fig.12 Voltage amplitude and frequency of system bus

### 4.2 动态变化 $n_i$ 下的 DBESS 均衡控制策略仿真验证

在本节设计中,为了验证本文所设计的均衡影响因子  $n_i$  对 DBESS 间 SOC 差值的均衡速度和均衡效果的影响,在与 4.1.1 节所建立的相同系统上进行仿真验证。其中, $n_{i0} = 6$ ;  $SOC^* = 45\%$ 。考虑  $n_i$  变化时 DBESS 的均衡控制策略仿真波形如图 13 所示。

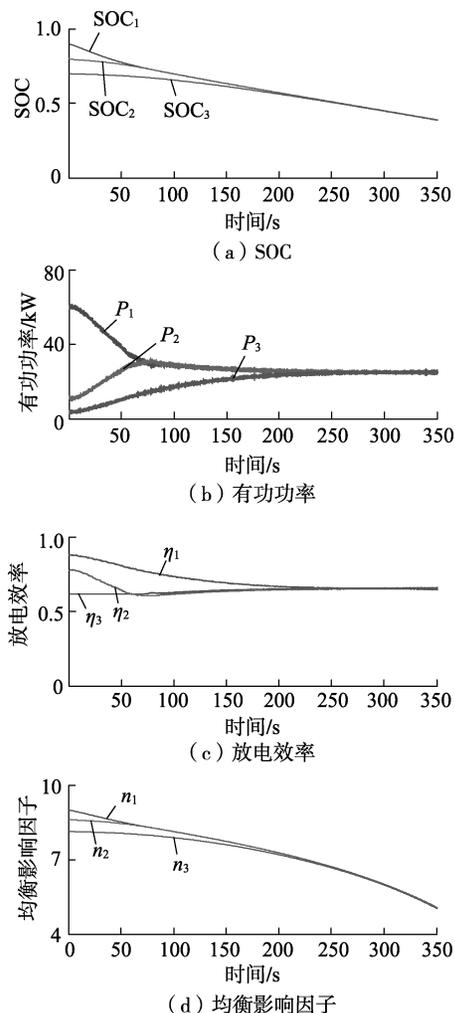


图 13 考虑  $n_i$  变化的 DBESS 均衡控制策略仿真波形

Fig.13 Simulative waveforms of DBESS balancing control strategy considering varying  $n_i$

从图 13 可以看出,  $n_i$  值随着 SOC 的降低均在不断减小, 最终趋于一致。初始放电阶段, 各 DBESS 的 SOC 值均较大, 处于高 SOC 快速差值平衡阶段, 在式(16)的作用下,  $n_i$  值较大, 各 DBESS 的 SOC 变化率较大, SOC<sub>enij</sub> 减小的速度也较快。随着 SOC 降低,  $n_i$  值逐渐减小, 当 SOC 值下降到 45% 时,  $n_i$  转换到低 SOC 平稳保持阶段, 在式(17)的作用下,  $n_i$  继续减小, 保证 SOC 差值均衡速度的同时使其始终维持在一致状态, 同时各 DBESS 的输出功率和放电效率也实现了均衡。与图 7 相比, 图 13 证明了在优化值  $n_i$  的作用下, 各 DBESS 间的 SOC 差异均衡效果、功率分配能力均能得到一定的提升, 最终维持动态平衡; 且能在 SOC 较低时使 SOC 变化更平稳, 波动更小, 很好地避免了储能电池的过充过放。频率和电压波动均在允许范围内, 如图 14 所示, 表明系统在控制策略的作用下能维持在稳定状态。

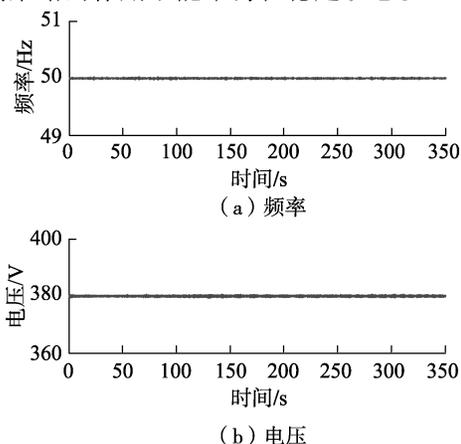


图 14 系统母线电压幅值和频率

Fig.14 Voltage amplitude and frequency of system bus

## 5 结论

为了延长储能系统的寿命及均衡各 DBESS 间的电池差异, 本文提出了一种基于储能单元 SOC 和充放电效率的多个 DBESS 均衡控制策略, 实现孤岛状态下并联 DBESS 间输出功率的动态平衡及各 DBESS 间的 SOC 均衡和充放电效率一致; 有效地降低了低 SOC 储能单元的调节压力, 提高了整个储能系统的使用寿命。同时, 为了充分发挥不同储能单元的充放电特性和优化 SOC 均衡效果, 提出了基于各储能单元 SOC 值的均衡影响因子, 实现调节并联 DBESS 间 SOC 均衡速度的目的。仿真结果一方面验证了本文所提控制策略的有效性, 实现了并联 DBESS 间 SOC 和效率同时均衡的目的, 有效地改善了并联 DBESS 的系统运行特性, 维持储能状态一致的同时减少了系统有功损失; 另一方面也实现了分布式负载变化波动和储能单元故障切除情况下系统稳定运行的目的, 验证了微网“即插即用”的特性, 同时也证明了本文所提控制策略具有一定的鲁棒性。

## 参考文献:

- [1] 王鹤, 李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 19-23  
WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 19-23.
- [2] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.  
HUANG Wei, SUN Changhui, WU Ziping, et al. A review on micro-grid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18.
- [3] 王成山, 武震, 李鹏. 分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 1-8.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Prospects and challenges of distributed electricity storage technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 1-8.
- [4] 彭思敏, 窦真兰, 凌志斌, 等. 并联型储能系统孤岛运行协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 128-134.  
PENG Simin, DOU Zhenlan, LING Zhibin, et al. Cooperative control for parallel-connected battery energy storage system of islanded power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 128-134.
- [5] MOHAMED Y A R I, EL-SAADANY E F. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2806-2816.
- [6] 李福东, 吴敏. 微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 18-25.  
LI Fudong, WU Min. An improved control strategy of load distribution in an autonomous microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 18-25.
- [7] 麻常辉, 潘志远, 刘超男, 等. 基于自适应下垂控制的风光储能微网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 21-27.  
MA Changhui, PAN Zhiyuan, LIU Chaonan, et al. Frequency regulation research of wind-PV-ES hybrid micro-grid system based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 21-27.
- [8] GUO L, ZHANG Y, WANG C S. A new battery energy storage system control method based on SOC and variable filter time constant[C]// 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Washington DC, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [9] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 孤岛运行交流微电网中分布式储能系统改进下垂控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 180-185  
LU Xiaonan, SUN Kai, HUANG Lipai, et al. Improved droop control method in distributed energy storage systems for autonomous operation of AC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 180-185.
- [10] 王伟信, 段建东, 张润松, 等. 孤岛电网中多储能设备 SOC 一致性优化策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 126-135.  
WANG Weixin, DUAN Jiandong, ZHANG Runsong, et al. Optimal state-of-charge balancing control for paralleled battery energy storage devices in islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 126-135.
- [11] STEVENS J W, COREY G P. A study of lead-acid battery efficiency near top-of-charge and the impact on PV system design[C]// Conference Record of the Twenty-fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Washington DC, USA: IEEE, 1996: 1485-1488.
- [12] DRAGIĆEVIĆ T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervi-

sory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.

- [13] AMOROSO F A, CAPPUCINO G. Advantages of efficiency-aware smart charging strategies for PEVs [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 54(1): 1-6.
- [14] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 34-38. ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hongjie, et al. An energy storage control method based on state of charge and variable filter time constant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 34-38.
- [15] KIM J Y, JEON J H, KIM S K, et al. Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3037-3048.

#### 作者简介:



韦佐霖

韦佐霖(1991—),男,四川宜宾人,硕士研究生,主要研究方向为微网运行与控制、分布式储能控制(**E-mail**: weizuolincqu@163.com);

陈民铀(1954—),男,重庆人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为计算机智能及其在电力系统中的应用、分布式发电技术、智能电网(**E-mail**: minyouchen@cqu.edu.cn);

李强(1978—),男,四川成都人,副教授,博士,主要研究方向为微电网控制、复杂网络、演化动力学和量子博弈(**E-mail**: qiangli9@outlook)。

### Balancing control strategy of SOC and efficiency for distributed energy storage in islanded microgrid

WEI Zuolin<sup>1</sup>, CHEN Minyou<sup>1</sup>, LI Jie<sup>2</sup>, CHEN Tao<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, CHEN Feixiong<sup>1</sup>, LING Weifang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Department of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Company Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

**Abstract:** In the operation of microgrid, different types of battery energy storage systems have different characteristics and initial states, which will decrease the power allocation accuracy among battery packs. Aiming at this problem, a balancing control strategy of energy storage based on the SOC (State Of Charge) and charging/discharging efficiency of parallel energy storage units is proposed to balance the difference of batteries and reduce system active loss. The proposed method adopts the distributed control strategy, the SOC and charging/discharging efficiency of each distributed energy storage unit are employed in the controller to adjust its output power in real-time, thus realizing the equal power dispatch and implementing SOC and efficiency error balancing of parallel distributed energy storages. Based on this, the balancing factor is designed based on the SOC of each energy storage unit and the SOC balancing effect of parallel distributed energy storage is optimized by two-step method. The SOC balancing effects of the proposed control strategy are analyzed with MATLAB/Simulink in the conditions of distributed load changing, system power failure removing and whether the balancing factor changing dynamically. Simulative results verify the effectiveness and plug & play characteristic of the proposed method.

**Key words:** islanded microgrid; distributed energy storage; distributed control; SOC balancing; efficiency balancing