

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190941

一种直流微电网无母线电压偏移的均衡控制策略

刘勇, 雷延科, 盘宏斌

(湘潭大学, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 为解决直流微电网中分布式储能系统存在的剩余容量(State Of Charge, SOC)不均衡问题, 提出一种适用于孤岛直流微电网分布式储能的均衡控制策略。该方案采用对数形式设计参考电压函数, 以单台储能单元的 SOC 与所有储能单元的 SOC 均值的比例作为对数函数输入, 从而实现各储能单元充放电过程中, 各参考电压相对于额定母线电压呈近似对称变化, 继而实现无母线电压偏移的均衡控制。基于此提出利用储能单元的输出功率及其参考电压的比例关系简化了参数选取过程, 通过李雅普诺夫第一法判断了系统的稳定性。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真及实验验证了所提控制策略的正确性和实用性。

关键词: 直流微电网; 分布式储能; SOC 均衡; 参考电压函数; 稳定性分析

A balancing control strategy for DC microgrid without bus voltage offset

LIU Yong, LEI Yanke, PAN Hongbin

(Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: In order to solve the problem of the unbalance of State of Charge (SOC) in a distributed energy storage system in DC microgrid, a balancing control strategy for distributed energy storage of an island DC microgrid is proposed. The scheme adopts a logarithmic form to design a reference voltage function, and takes the ratio of the SOC of a single energy storage unit and the SOC average of all energy storage units as a logarithmic function input. This means that the reference voltages vary approximately symmetrically with respect to the rated bus voltage in the charging and discharging process of each energy storage unit without the bus voltage offset. On this basis, the proportional relationship between the output power of the energy storage unit and its reference voltage is simplified to the parameter selection process. The stability of the system is judged by Lyapunov's first method. Finally, the correctness and practicability of the proposed control strategy are verified by Matlab/Simulink and experiment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577162).

Key words: DC microgrid; distributed energy storage; SOC balancing; reference voltage function; stability analysis

0 引言

近年来, 随着光伏、风能等可再生能源的快速发展, 以及直流负荷的不断提升, 直流微电网的优势逐渐突出。相比于交流微电网, 直流微电网不存在无功、谐波等问题, 使用电力电子器件数量较少, 电能质量较高^[1-3]。由于光伏、风能等可再生能源受环境的影响存在不稳定性, 需要加入分布式储能系统以满足系统高效稳定运行^[4-10]。

对于分布式储能系统, 由于各储能单元的初始条件、使用周期、环境温度等诸多原因, 其 SOC 可

能出现差异, 如果某些储能单元 SOC 过高或过低时, 将启动保护装置将其切除微网系统, 从而降低整个微网的带载能力, 缩短供电时间^[11-14]。为此, 各个储能单元需要根据自身的状态合理输出功率, 从而实现 SOC 均衡^[15-16]。该领域学者在分布式储能均衡控制方面进行了大量研究, 基于 SOC 设计不同形式的均衡控制函数实现 SOC 均衡, 在交流微电网应用中取得了一定的成果^[17-20]。

同样该方面研究在直流微电网领域也不断增多。文献[21]基于 SOC 设计下垂增益函数, 提出了改进 P-V 下垂控制的方法, 为保证电能质量, 需要引入二次控制以提升母线电压至其额定值。文献[22-23]提出了基于 SOC 比例因子设计参考电压函

数的方法以实现 SOC 均衡,但其母线电压会产生一定范围内的偏移。文献[24]提出了改进 I-V 下垂控制的方法,基于 SOC 设计下垂增益函数实现 SOC 均衡。文献[25]对比分析了基于 SOC 设计参考电压函数和基于 SOC 设计下垂增益函数的稳定性,结果表明基于 SOC 设计参考电压函数的稳定性较优。以上所提控制策略在应用时大都需要综合考虑母线电压偏移量、储能变换器的最大输出功率、系统稳定性等多个限定条件,来确定参数范围。

本文提出一种对数型参考电压函数实现 SOC 均衡。所提控制策略的优势在于能实现各储能单元充放电过程中 SOC 均衡的同时,由于各储能单元的参考电压相对于额定母线电压呈近似对称变化,实际母线电压始终稳定于额定母线电压附近,从而实现无母线电压偏移的均衡控制。而且,各储能变换器对应的输出功率相对于负载功率的 N 分之一也呈对称变化(N 代表储能单元数量),由于实际母线电压的变化远小于参考电压的变化范围,因此,仅通过储能变换器的输出功率与其参考电压形成的比例关系即可确定参数范围。

1 SOC 均衡控制策略

直流微电网 DC-DC 变换器的下垂控制表达式为

$$V_{\text{ref}} = V^* - R \cdot x \quad (1)$$

式中: V_{ref} 为电压环参考电压值; V^* 为额定母线电压值; R 为下垂增益; x 为输出功率时,即 P-V 下垂控制; x 为输出电流时,即 I-V 下垂控制。

两种控制策略稍有不同,但都基于系统动态变化过程中的参数变化设计函数表达式,从而实现控制效果。由于传统下垂控制函数不含 SOC 项,因此难以实现 SOC 均衡控制。常见的改进方案有如下两种:改进下垂增益函数,或改进参考电压函数。

$$R_i = f(\text{SOC}_i, k) \quad (2)$$

$$V_i^* = f(V^*, \text{SOC}_i, k) \quad (3)$$

式中: R_i 为储能单元 i 的下垂增益; V_i^* 为储能单元 i 的参考电压; SOC_i 为储能单元 i 的 SOC 值; k 为增益调节项。

对比分析,改进下垂增益函数的均衡控制,通过控制 SOC 较高的储能单元输出较大的电流或较多的功率,从而实现 SOC 均衡,但需要控制各储能单元下垂项 $R \cdot x$ 相等以保证 V_{ref} 相等^[21],为保证电能质量,需要添加二次控制来补偿由该下垂项引起的电压变化。改进参考电压函数的均衡控制,主要以 SOC 的差异来调整参考电压, SOC 不同的储能单元以不同的参考电压工作,实际母线电压将介于

高参考电压和低参考电压之间,因此会产生能量在储能单元之间相互转移的情况,在一定程度上提高了均衡效率,由于本文选择的此种均衡方式,这里暂不详述其过程。此种均衡方案,由下垂项 $R \cdot x$ 所产生的参考电压的变化量相比于由 SOC 所产生的参考电压的变化量可以忽略,也可以将其看作是基于 SOC 的 SOC-V 下垂控制。

2 所提均衡控制策略

本文设计了一种基于 SOC 的对数型参考电压函数,其表达式为

$$V_{\text{ref}_i} = V^* + k \cdot \lg \frac{\text{SOC}_i}{\text{SOC}_{\text{ave}}} \quad (4)$$

式中: V_{ref_i} 为储能单元 i 的参考电压; V^* 为额定母线电压; SOC_{ave} 为所有储能单元的 SOC 的平均值,这里采用动态平均一致算法^[26],其参数获取过程如式(5)、式(6)所示。

$$\text{SOC}_{\text{ave}_i}(k+1) = \text{SOC}_i(k) + \lambda \sum_{j \in N_i} \sigma_{ij}(k+1) \quad (5)$$

$$\sigma_{ij}(k+1) = \sigma_{ij}(k) + \text{SOC}_{\text{ave}_i}(k) - \text{SOC}_{\text{ave}_i}(k) \quad (6)$$

式中: $\text{SOC}_{\text{ave}_i}$ 为通过储能单元 i 计算出的所有储能单元 SOC 的均值; SOC_i 为储能单元 i 的 SOC 值; λ 为比例因子,根据收敛速度和稳定性之间的权衡设计。经过有限次数的迭代,每个储能单元仅通过与相邻单元通信即可获取 SOC 平均值。

其中,储能单元模型及其 SOC 值的计算采用的安时计量法表达式如式(7)、式(8)所示^[17]。

$$V_{\text{battery}_i} = a \cdot e^{b \cdot \text{SOC}_i} - c \cdot e^{-d \cdot \text{SOC}_i} \quad (7)$$

$$\text{SOC}_i(t) = \text{SOC}_i(0) - \frac{1}{C_{e_i}} \int_0^t i_i dt \quad (8)$$

式中: V_{battery_i} 为储能单元 i 的输出电压, a 、 b 、 c 、 d 为其相关系数; $\text{SOC}_i(0)$ 为初始时刻储能单元 i 的 SOC 值; C_{e_i} 为储能单元 i 的容量; i_i 为储能单元 i 的输出电流。

由式(4)可以看出,参考电压的差异由储能单元的 SOC 差值和 k 共同决定, SOC 较高的储能单元,其参考电压值 V_{ref} 大于 V^* ; SOC 较低的储能单元,其参考电压值 V_{ref} 小于 V^* ; 当 SOC 达到一致,所有储能单元的参考电压都等于 V^* ,从而保证实际母线电压值始终稳定在 V^* 附近,这里 V^* 取额定母线电压值。根据充放电的对称性^[27],此文仅以放电工况进行分析。同时,将可再生能源看作反向恒功率源(Constant Power Source, CPS)^[28],仅考虑负载所需功率差额,系统框图如图 1 所示。

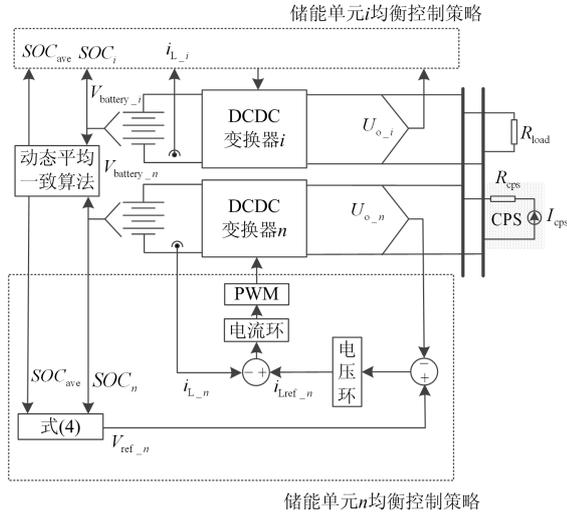


图 1 系统框图

Fig. 1 Diagram of the system

以两台储能单元放电为例进行分析，假定 $SOC_1 > SOC_2$ ，选取合适的 k 值，有 $V_{ref_1} > V^*$ ， $V_{ref_2} < V^*$ 。 V_{ref_1} 、 V_{ref_2} 相对于 V^* 呈对称变化。当两者 SOC 差值较小时，参考电压 V_{ref_i} 的差异较小，由于变换器的等效阻抗产生一定的压降，此时 $U_o < V_{ref_2} < V_{ref_1}$ (忽略线路阻抗， $U_o = U_{o1} = U_{o2}$)，即图 2 中的 $t_1 \sim t_2$ 阶段，两台储能单元以不同速度放电。当两者 SOC 差值较大时，参考电压 V_{ref_i} 的差异较大，此时 $V_{ref_2} < U_o < V_{ref_1}$ ，即图 2 中 $0 \sim t_1$ 阶段，此时储能单元 1 放电维持母线电压的同时，对储能单元 2 充电，随着 SOC 的差别减小，又如图 2 中 $t_1 \sim t_2$ 阶段，两台储能单元以不同速度放电，直至 SOC 一致。当 $SOC_1 = SOC_2$ ，满足 $V_{ref_i} = V^*$ ，如图 2 中 t_2 时刻之后，各储能单元等效于状态相同的电压源以相同且恒定的参考电压工作。

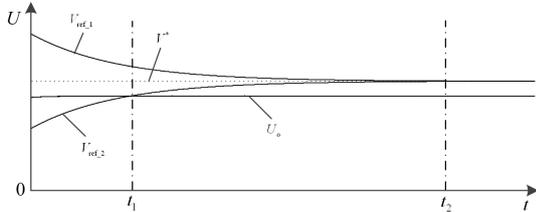


图 2 均衡过程参考电压和母线电压对比

Fig. 2 Comparison of reference voltage and bus voltage in balancing process

3 参数范围选取

由上述分析可知，该均衡过程受参考电压的差异影响，参考电压的差异与 SOC 的差值以及参数 k 的选取有关。对于某储能均衡系统，储能单元之间

的初始 SOC 差值确定，通过选取不同的 k 值可以获得不同的均衡效果。现有均衡控制研究中，一般通过储能变换器最大输出功率、直流母线电压偏移量等条件来限定参数范围。由于本文所提均衡控制策略无母线电压偏移，实际母线电压始终低于额定母线电压一固定值，即变换器等效阻抗所产生的压降值，所以仅需考虑变换器最大输出功率的限制条件即可确定参数范围。

根据双向 Buck/Boost 电路特性，储能单元的输出功率取决于参考电压与实际母线电压的关系：其大小关系决定储能单元的充放电；其差别决定储能单元输出/输入功率的大小。因此存在如下关系。

$$P_{ini_1} + P_{ini_2} + \dots + P_{ini_N} = P_{req} \quad (9)$$

$$\frac{V_{ref_1} - U_o}{P_{ini_1}} = \frac{V_{ref_2} - U_o}{P_{ini_2}} = \dots = \frac{V_{ref_N} - U_o}{P_{ini_N}} \quad (10)$$

式中： P_{ini_i} 为均衡初始时刻储能单元 i 的输出功率 (i 取 $1, 2, \dots, N$)，即 P_{o_i} (储能单元 i 的输出功率) 在初始时刻的大小； P_{req} 为负载所需功率，仅取决于负载功率大小。

同样以两台储能单元放电为例进行分析，同样假定 $SOC_1 > SOC_2$ ，当参考电压差异较大时，即图 2 的 $0 \sim t_1$ 阶段，此时 P_{ini_1} 为正值， P_{ini_2} 为负值，且 $|P_{ini_1}| > |P_{ini_2}|$ ，因此为避免两台储能变换器输出功率越限，只需考虑初始时刻储能单元 1 的输出功率即可。初始时刻储能变换器输出功率与参考电压存在如图 3 所示的对应比例关系。

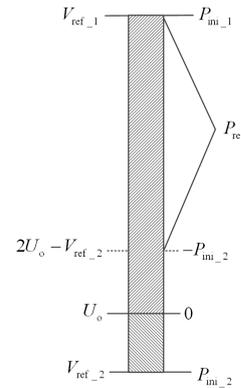


图 3 电压与功率的比例关系

Fig. 3 Proportional relationship between voltage and power

其代数关系满足：

$$\frac{V_{ref_1} - U_o}{P_{ini_1}} = \frac{V_{ref_2} - U_o}{P_{ini_2}} = \frac{V_{ref_1} - (2U_o - V_{ref_2})}{P_{req}} \quad (11)$$

同理, 当参考电压差异较小时, 即图 2 的 $t_1 \sim t_2$ 阶段, 此时 P_{ini_1} 为正值, P_{ini_2} 为正值, 同样满足 $|P_{ini_1}| > |P_{ini_2}|$, 初始时刻储能变换器输出功率与参考电压存在如图 4 所示的对应比例关系。

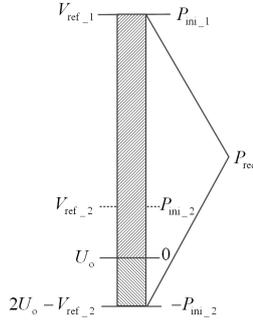


图 4 电压与功率的比例关系

Fig. 4 Proportional relationship between voltage and power

其代数关系满足:

$$\frac{V_{ref_1} - U_o}{V_{ref_1} + V_{ref_2} - 2U_o} = \frac{V_{ref_2} - U_o}{V_{ref_1} + V_{ref_2} - 2U_o} = \frac{1}{P_{req}} \quad (12)$$

假设储能变换器容量, 即最大输出功率限制为 P_{max} , 则需要满足

$$\max \left\{ |P_{ini_1}|, |P_{ini_2}|, \dots, |P_{ini_N}| \right\} < P_{max} \quad (13)$$

联立式(4)、式(11)、式(13)与联立式(4)、式(12)、式(13)得参数 k 的范围表达式相同。

$$k < \frac{(V^* - U_o)(2P_{max} - P_{req})}{\left(\lg \frac{SOC_1}{SOC_{ave}}\right) \cdot P_{req} - \left(\lg \frac{SOC_1}{SOC_{ave}} + \lg \frac{SOC_2}{SOC_{ave}}\right) \cdot P_{max}} \quad (14)$$

对于分布式储能, 储能单元数量大于等于两台。从式(4)可以看出, SOC 最高的储能单元, 其参考电压也最高, 根据上述分析可以看出, 参考电压最高的储能单元, 其输出功率的绝对值也最高。因此考虑参数 k 的选取, 如式(13), 仅需考虑 SOC 最高的储能单元在均衡初始时刻其变换器输出功率不超过变换器容量即可。为方便理解, 前文对比分析了两台储能单元的参考电压差异性不同的情况, 而是否存在充放电形式的能量转移, 根本上取决于参考电压与实际母线电压的大小, 对于本文所讨论的孤岛直流微电网的结构, 其母线电压满足

$$U_o = V^* - R_c \cdot i_{load} \quad (15)$$

$$R_c = R_{c1} // R_{c2} // \dots // R_{cN} \quad (16)$$

$$i_{load} = V^* / (R_c + R_{load}) \quad (17)$$

式中: R_c 为分布式储能变换器并联等效阻抗; R_{ci} 代表储能变换器 i 的等效阻抗 ($i=1, 2, \dots, N$); R_{load} 为负载阻抗; i_{load} 为负载电流。

综合上述分析可以看出, 基于式(4)的均衡控制策略, 使用此参数范围选取的方法, 仅需考虑 SOC 最高的储能单元在均衡初始时刻其变换器的输出功率, 即可确定合适的参数范围。同时, 改变 k 值可以调整均衡速度。

4 稳定性分析

根据前文所述, 结合放电工况下的 Boost DC/DC 电路模型, 其控制策略如图 1 所示, 可以建立如下系统模型。

$$\dot{x}_1 = -I_v x_4 + I_v V_{ref_i} \quad (18)$$

$$\dot{x}_2 = I_c x_1 - I_c x_3 - P_v I_c x_4 + I_c P_v V_{ref_i} \quad (19)$$

$$\dot{x}_3 = (P_c x_4 x_1 + x_4 x_2 - P_c x_4 x_3 - P_v P_c x_4^2 - x_4 + P_v P_c V_{ref_i} x_4 + V_{battery_i}) / L \quad (20)$$

$$\dot{x}_4 = (-P_c x_3 x_1 - x_3 x_2 + P_c x_3^2 + x_3 - P_v P_c V_{ref_i} x_3 + P_v P_c x_3 x_4) / C - x_4 / R_{load} C \quad (21)$$

式中: x_1 代表电压环积分器输出; x_2 代表电流环积分器输出; x_3 代表电感电流 i_{L_i} ; x_4 代表滤波电容电压 U_{o_i} (由于变换器输出侧直接与母线相连, 因此该电压等于母线电压 U_o); P_v 、 I_v 、 P_c 、 I_c 分别代表电压环、电流环的 P、I 控制器参数; L 、 C 代表电路拓扑中的电感和电容。

采用李亚普诺夫第一法判断两台储能单元放电均衡系统的稳定性, 其 Jacobian 矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -I_v \\ I_c & 0 & -I_c & -P_v I_c \\ \frac{P_c x_4}{L} & \frac{x_4}{L} & -\frac{P_c x_4}{L} & a_{34} \\ -\frac{P_c x_3}{C} & -\frac{x_3}{C} & a_{43} & \frac{P_v P_c x_3}{C} - \frac{1}{R_{load} C} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中:

$$a_{34} = \frac{P_c x_1}{L} + \frac{x_2}{L} + \frac{-P_c x_3}{L} - \frac{2P_v P_c x_4 - 1}{L} + \frac{P_v P_c V_{ref_i}}{L} \quad (23)$$

$$a_{43} = \frac{-P_c x_1}{C} - \frac{x_2}{C} + \frac{2P_c x_3 + 1}{C} - \frac{P_v P_c V_{ref_i}}{C} + \frac{P_v P_c x_4}{C} \quad (24)$$

基于表 1, 负载功率 1 800 W, 在参数 k 选取 100、120、140、160、180、200、220 时, 矩阵 A 的特征值分布如图 5 所示。在 k 的合适范围内, 随着 k 的变化, 其特征值分布变化不大, 但始终分布在左半平面, 系统稳定。

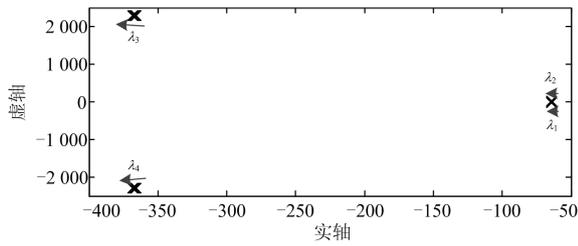


图 5 系统特征值分布

Fig. 5 System eigenvalue distribution

5 仿真实验

为验证本文所提均衡控制策略的有效性和正确性，搭建了如图 1 所示的 Matlab/Simulink 仿真模型。仿真验证两台储能单元均衡时，参数范围选取的合理性及其均衡控制效果，以及三台储能单元均衡时对负载变化及储能单元故障情况下的适应性。其中系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数设置

Table 1 System parameter setting

项目	符号	仿真参数
初始 SOC_1	SOC_1	0.8
初始 SOC_2	SOC_2	0.7
初始 SOC_3	SOC_3	0.6
变换器等效阻抗	R_{ci}	2.36 Ω
变换器容量	P_{max}	2 500 W
额定母线电压	V^*	600 V

为了证明参数范围选取的合理性以及均衡控制效果，仿真两台储能单元 1、2 的均衡控制，负载功率 1 800 W 时，对比 k 取 100、120、140、160、180、200、220 时，储能变换器 1 的最大输出功率值如图 6 所示。可以看出，参数 k 与储能变换器的最大输出功率存在一定的线性关系，采用本文参数范围选取方法，能较方便地选取 k 值合适的工作范围，保证储能变换器的最大输出功率不超过变换器容量，同时满足系统安全稳定运行。在合适的参数范围内， k 值越大均衡效率越高。当 $k=200$ 时，两台储能单元放电均衡过程如图 7 所示，图 7 中 P_{o1} 、 P_{o2} 、 $P_{o总}$ 分别代表储能单元 1、2 的输出功率及两者的功率之和。

由图 7 可以看出，该控制策略实现了 SOC 均衡，由输出功率波形可以看出，2 s 前，储能单元 1 向负载提供功率的同时，对储能单元 2 充电，即此时段储能单元 2 输出功率小于零，对应 SOC 波形中的 SOC_1 较快减小， SOC_2 缓慢增加；2 s 后，两者成比例向负载输出功率，SOC 趋于一致；15 s 时，SOC 达到一致，两者输出功率相等，均衡过程完成，整个均衡过程母线电压始终保持稳定。验证了本文所

提控制策略实现 SOC 均衡过程的同时保证了母线电压的稳定。

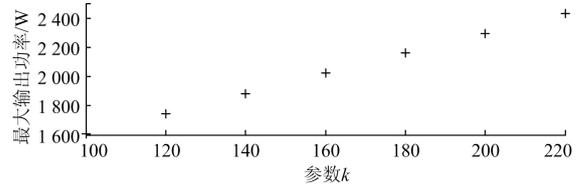


图 6 k 取不同值时储能变换器 1 最大输出功率

Fig. 6 Maximum output power of energy storage converter 1 when k takes different values

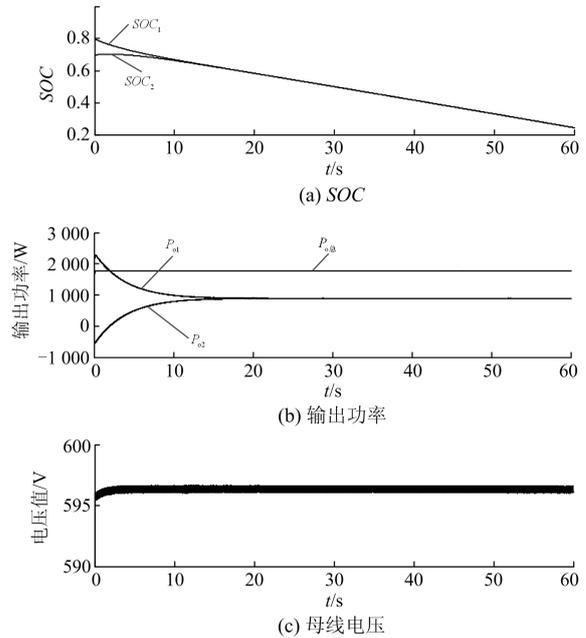
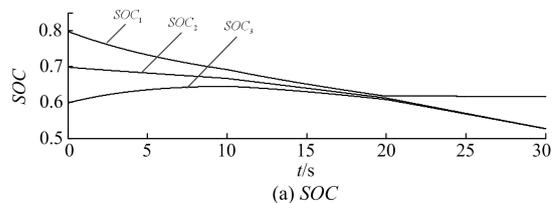


图 7 两台储能单元均衡过程

Fig. 7 Balancing process of two energy storage units

为验证该控制策略的延伸性，仿真三台储能变换器在负载变化及储能变换器故障情况下的动态响应过程。仿真参数如表 1。初始时刻，由三台储能单元同时工作，10 s 时，负载功率由 1 000 W 增大至 1 800 W，20 s 时，储能单元 1 因故障切除系统。根据参数范围选取部分的计算，仅需考虑均衡开始时刻储能单元 1 的输出功率不超过变换器的最大输出功率即可，得 $k < 105$ ，这里取 $k=100$ ，均衡过程如图 8 所示。图 8 中 P_{o1} 、 P_{o2} 、 P_{o3} 、 $P_{o总}$ 分别代表储能单元 1、2、3 的输出功率及三者的功率之和。



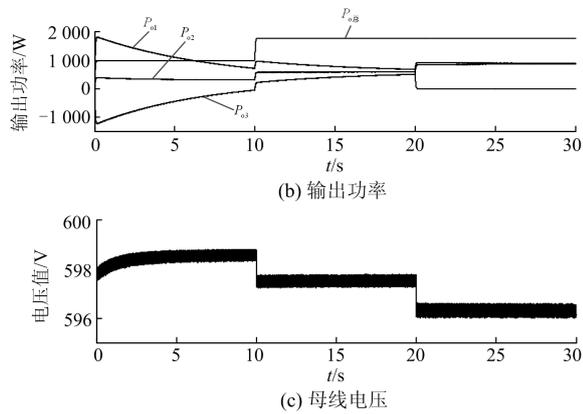


图8 三台储能单元均衡过程

Fig. 8 Balancing process of three energy storage units

由图8可以看出, 工作状态下的储能单元之间的SOC差值始终减小, 由其斜率可以看出充放电情况及其速率的变化、对应输出功率波形的正负变化及大小。负载发生变化时, 其输出功率之和跟随负载功率变化, 各储能变换器能及时响应, 调整自身功率输出, 满足负载功率需求。20 s时储能单元由3台减少至2台, 由于其并联等效阻抗及负载阻抗的变化, 负载电流变化, 母线电压存在较小的波动, 但仍能保证相对稳定的电能质量。验证了负载变化及储能故障情况下仍能达到均衡控制效果, 且能保证负载功率需求及母线电压的稳定。

6 实验结果

为进一步验证所提控制策略的实用性, 搭建了两台储能变换器并联实验平台, 系统结构如图1所示。输入端采用磷酸铁锂电池(48 V)作为均衡对象, 经双向 Buck/Boost 接入直流母线, 模拟孤岛直流微网情况, 为负载供电的同时实现均衡控制。实验平台控制芯片采用 TI 公司 TMS320F2812, 相关参数为: 额定直流母线电压 100 V, 负荷功率(500±100) W, 变换器允许最大功率 1 200 W。

图9为两台储能单元并联, 初始SOC值分别为0.8、0.7, 根据上述理论计算确定合适的参数范围, 继而选取 k 取 200 和 100 时, SOC、输出功率以及实际母线电压的波形对比。可以看出, 在合适的参数范围内, k 值对均衡效果的影响, k 值越大, 参考电压差异越大, 通过能量转移, 均衡效率越高。

图10为投切储能单元和改变负载情况下两台储能单元并联的均衡过程。初始状态下两台储能单元并联, 负载功率 500 W, 随着均衡过程的进行, 一段时间后, 切除储能单元 1, 由储能单元 2 单独供电, 之后负载功率增加至 600 W, 一段时间后又

重新投入储能单元 1 工作。整个变化过程, 系统能及时响应扰动信号, 满足负载需求的同时, 对工作状态下的储能单元进行均衡。

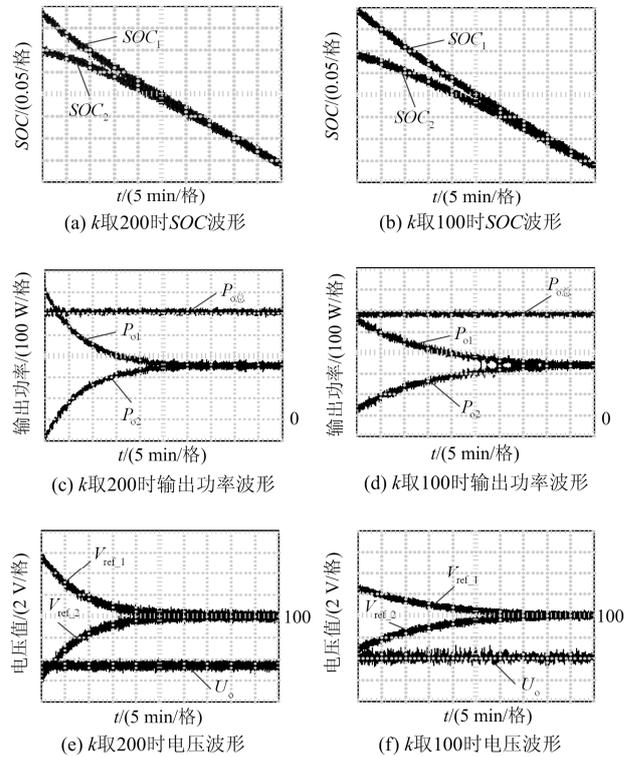


图9 两台储能单元均衡实验结果

Fig. 9 Balancing experimental results of two energy storage units

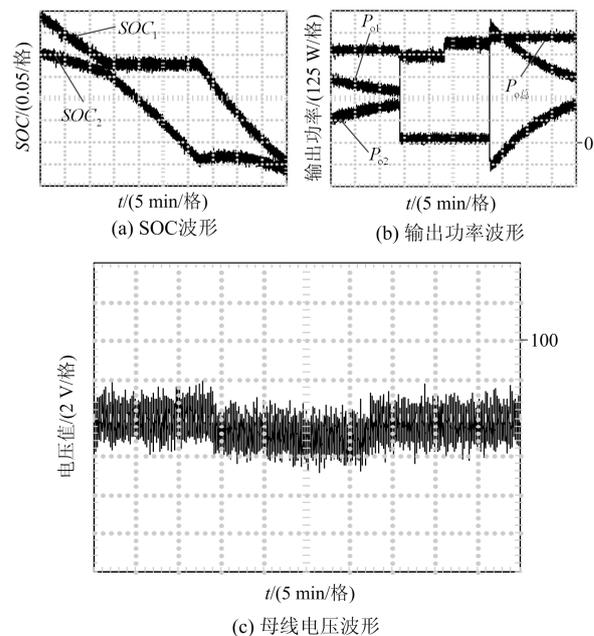


图10 两台储能单元扰动下的均衡实验结果

Fig. 10 Balancing experimental results under disturbance of two energy storage units

7 结论

为了解决分布式储能 SOC 不均衡问题,本文提出了一种采用对数形式设计参考电压函数的均衡控制策略,实现了无母线电压偏移的均衡控制,同时利用储能单元的输出功率及其参考电压的比例关系简化了参数选取过程。通过仿真和实验验证了本文所提控制策略的有效性和正确性,实现 SOC 均衡控制的同时,保证了母线电压的电能质量。该控制策略同样能保证负载变化及储能变换器故障情况下系统稳定运行,也证明了该控制策略的适用性。

参考文献

- [1] MHANKALE S E, THORAT A R. droop control strategies of DC microgrid: a review[C] // 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT), March 1-3, 2018, Coimbatore, India.
- [2] 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, 2016, 8(6): 2597-2607.
- [3] 丁明, 史盛亮, 刘新宇, 等. 交直流混合微网优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 17-25.
DING Ming, SHI Shengliang, LIU Xinyu, et al. Study of optimal configuration of a hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 17-25.
- [4] 邓诗蕾, 王明渝. 直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 40-46.
DENG Shilei, WANG Mingyu. Cooperative control strategy of DC microgrid power flow controller and distributed energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 40-46.
- [5] 赵琦, 管霖, 吕耀棠, 等. 储能电站在含光伏电源配电网中的优化配置[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 1-7.
ZHAO Qi, GUAN Lin, LÜ Yaotang, et al. Optimized configuration of energy storage power station in distribution network with photovoltaic power[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 1-7.
- [6] DAHALE S, DAS A, PINDORIYA N M, et al. An overview of DC-DC converter topologies and controls in DC microgrid[C] // 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS), December 21-23, 2017, Pune, India: 410-415.
- [7] YU H, FENG X, LIU H, et al. Research on an adaptive droop control used in DC micro-grid[C] // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), May 22-26, 2016, Hefei, China: 2634-2638.
- [8] MOKHTAR M, MAREI M I, EL-SATTAR A A. An adaptive droop control scheme for DC microgrids integrating sliding mode voltage and current controlled boost converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(2): 1685-1693.
- [9] 张静炜, 朱想, 赫卫国, 等. 考虑光伏发电和储能系统调压能力的配电网储能容量优化配置[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 30-35.
ZHANG Jingwei, ZHU Xiang, HE Weiguo, et al. Optimized configuration for ess capacity of distribution network considering voltage regulation ability of photovoltaic generation and ESS[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 30-35.
- [10] GAO Y, XUE F, YANG W, et al. Optimal operation modes of photovoltaic-battery energy storage system based power plants considering typical scenarios[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 397-406. DOI: 10.1186/s41601-017-0066-9.
- [11] 修晓青, 唐巍, 李建林, 等. 计及电池健康状态的源储荷协同配置方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3118-3126.
XIU Xiaqing, TANG Wei, LI Jianlin, et al. Collaborative configuration of distributed generation, energy storage and load in microgrid considering state of health[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 3118-3126.
- [12] 冯晓裕, 司新放, 程俊翔, 等. 分布式储能的发展现状与前景[J]. 电气开关, 2017, 55(6): 5-7, 42.
FENG Xiaoyu, SI Xinfang, CHENG Junxiang, et al. Status and prospect of distributed energy storage[J]. Electrical Engineering, 2017, 55(6): 5-7, 42.
- [13] 杨捷, 金新民, 吴学智, 等. 直流微网中混合储能系统的无互联通信网络功率分配策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 135-144.
YANG Jie, JIN Xinmin, WU Xuezhi, et al. A wireless power sharing control strategy for hybrid energy storage systems in DC microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 135-144.
- [14] SUCH M C, MASADA G Y. BESS control on an microgrid with significant wind generation[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA: 1-5.
- [15] WU Q, GUAN R, SUN X, et al. SoC balancing strategy for multiple energy storage units with different capacities in islanded microgrids based on droop control[J]. IEEE

- Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 1932-1941.
- [16] 袁娜娜, 王允建, 张君, 等. 直流微网中基于 SOC 的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 17-23.
YUAN Nana, WANG Yunjian, ZHANG Jun, et al. Improved droop control based on SOC in DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 17-23.
- [17] 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, 2013, 61(6): 2804-2815.
- [18] 吴青峰, 孙孝峰, 王雅楠, 等. 基于分布式下垂控制的微电网分布式储能系统 SOC 平衡策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1247-1256.
WU Qingfeng, SUN Xiaofeng, WANG Yanan, et al. A distributed control strategy for SOC balancing of distributed energy storage systems in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1247-1256.
- [19] 孙孝峰, 郝彦丛, 王宝诚, 等. 微电网分布式储能单元荷电状态平衡和电压恢复[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4047-4055.
SUN Xiaofeng, HAO Yancong, WANG Baocheng, et al. State-of-charge balancing of distributed energy storage units and voltage restoration in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4047-4055.
- [20] 王炜信, 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.
- [21] GHANBARI N, BHATTACHARYA S. Soc balancing of different energy storage systems in DC microgrids using modified droop control[C] // IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 21-23, 2018, Washington, DC, USA: 6094-6099.
- [22] HU R, WEAVER W W. DC microgrid droop control based on battery state of charge balancing[C] // 2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), February 19-20, 2016, Urbana, IL, USA: 1-8.
- [23] HAN B M. Battery SoC-based DC output voltage control of BESS in stand-alone DC microgrid[C] // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), November 22-25, 2016, Singapore, Singapore: 1445-1449.
- [24] 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. Load current sharing method of distributed energy storage systems by improved SOC drooping control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3746-3754.
- [25] LI C, DRAGICEVIC T, PLAZA M G, et al. Multiagent based distributed control for state-of-charge balance of distributed energy storage in DC microgrids[C] // IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 1, 2014, Dallas, TX, USA: 2180-2184.
- [26] KRIEGLEDER M, OUNG R, D'ANDREA R. Asynchronous implementation of a distributed average consensus algorithm[C] // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 3-7, 2013, Tokyo, Japan: 1836-1841.
- [27] 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, 2014, 6(1): 147-157.
- [28] DRAGIČEVIĆ 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, 2013, 29(2): 695-706.

收稿日期: 2019-08-02; 修回日期: 2019-11-11

作者简介:

刘勇(1976—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子变换器及其控制; E-mail: xtdxly@163.com

雷延科(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为分布式储能变换器及其控制; E-mail: 271546222@qq.com

盘宏斌(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为微电网能量优化管理、微电网控制技术等。E-mail: panhonbin_72@163.com

(编辑 魏小丽)