



Aalborg Universitet

AALBORG
UNIVERSITY

Lu, Xiaonan; Sun, Kai; Huang, Lipei; Xiao, Xi; Guerrero, Josep M.

Published in:
Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao

Publication date:
2013

Document Version
Early version, also known as pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Lu, X., Sun, K., Huang, L., Xiao, X., & Guerrero, J. M. (2013). . *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao*, 33(16), 37-46. <http://www.pcsee.org/CN/abstract/abstract25928.shtml>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

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

陆晓楠¹, 孙凯¹, 黄立培¹, 肖曦¹, Josep M. Guerrero²

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
2. 奥尔堡大学能源技术系, 奥尔堡, 丹麦, 9220)

Dynamic Load Power Sharing Method with the Elimination of the Bus Voltage Deviation for the Energy Storage Systems in DC Micro-Grids

ABSTRACT: In order to take advantage of the dispersed energy storage units in the DC micro-grids, an improved state-of-charge (SoC) based droop control method for energy storage systems was proposed in this paper. Dynamic load power sharing among different energy storage units was achieved by using this method. Specifically, the coefficient in the conventional droop control method was set to be inversely proportional to the n^{th} order of SoC. The speed of SoC and output power equalization can be adjusted by changing the exponent n of SoC. Since the above method was realized based on droop control, the deviation in the DC bus voltage was involved. Secondary control method was employed in this paper in order to restore the bus voltage to its reference value. The conventional secondary control was used for the droop control method with constant droop coefficient. In the above improved droop control method, the droop coefficient was changed by the SoC. It acted upon secondary control as a disturbance. In this paper, the feasibility of secondary control for the SoC-based droop control method was tested. The model of the overall control system was obtained and the system stability was thereby studied based on it. Simulation validation was realized by Matlab/Simulink and a $2 \times 2.2\text{kW}$ prototype based on dSPACE1103 was implemented for the experimental demonstration.

KEY WORDS: distributed energy storage; droop control; state-of-charge; secondary control; DC microgrids

摘要: 为了充分发挥直流微网中储能系统的作用, 本文提出了一种适用于直流分布式储能系统的基于储能单元剩余容量 (State-of-charge, SoC) 的改进下垂控制方法。利用该方法可以实现负荷功率在不同储能单元之间的动态分配。具体来讲, 该方法中设置传统下垂控制中的下垂系数和储能单元 SoC 的 n 次幂呈反比。通过改变 SoC 的幂指数 n , 可以实现对 SoC 及输出功率均衡速率的调整。由于上述控制方法基于下垂控制实现, 因此会带来直流母线电压跌落。本文引入二次控制方法, 以提升母线电压至其额定取值。传统的二次控制针对固定系数的下垂控制进行母线电压跌落补偿, 而在上述改进的下垂控制方法中, 下垂系数根据 SoC 改变, 以扰动的形式作用于二次控制系统。本文验证了二次控制对于

改进下垂控制方法的适用性。本文建立了控制结构的整体模型, 并根据该模型对控制系统的稳定性进行了验证。利用 Matlab/Simulink 进行了仿真验证, 并搭建了基于 dSPACE1103 的 $2 \times 2.2\text{kW}$ 样机平台, 对所提出的控制结构进行了实验验证。

关键字: 分布式储能; 下垂控制; 剩余容量; 二次控制; 直流微电网

0 引言

随着可再生能源在现代电力系统中的比重不断提升, 学者们提出了微电网的概念, 以实现在区域内对多种可再生能源形式的高效控制^[1-6]。由于传统的电力系统属于交流系统, 因此对于微电网的研究大多集中在交流微电网上。而由于许多新能源单元具有直流输出形式, 且直流系统不存在相位同步、谐波和无功功率损耗等方面的问题, 因此近年来直流微电网逐渐得到了人们的重视^[7-12]。

微电网中的可再生能源大多通过电力电子接口变换器接入系统^[13], 而负荷功率在不同变换器之间的分配是微电网运行的一项重要研究内容之一^[14-19]。在各种功率分配方式中, 下垂控制由于无需高频通信即可实现功率分配要求, 满足了分布式接入的需要, 因此得到了广泛的关注和使用^[14-19]。下垂控制具有多方面的优点, 但其在使用的过程中会带来母线电压的跌落, 因此会对电压质量造成一定的影响。为了解决上述问题, 学者们借鉴传统电力系统的方法, 引入了适用于微电网的二次控制策略, 以解决电压跌落问题, 提升母线电压支撑能力^[15]。

在微电网系统中, 可再生能源输出的不稳定性会降低系统性能, 对供电质量带来较大的影响。为了平抑能量波动, 解决能量供给波动性波动性, 提升供电可靠性, 微电网系统中通常需要增加储能装置。考虑到微电网系统中可再生能源的接入特点, 其中的储能单元通常分布式接入公共母线^[8]。对于

微电网中的分布式储能系统，为了实现负荷功率的合理分配，需要根据各储能单元的输出能力，决定其所需要提供的功率。特别是在功率等级相近的分布式储能系统中，剩余容量较大的储能单元需要提供较多的负荷功率，而剩余容量较小的储能单元需要提供较少的负荷功率。与此同时，由于剩余容量较大的储能单元输出的功率较多，其剩余容量的下降速度相对较快。相反，由于剩余容量较小的储能单元输出的功率较少，其剩余容量的下降速度相对较慢。因此，经过一段过渡过程后，不同储能单元的剩余容量趋于相等，而其输出功率亦随之趋于相等，进而实现了负荷功率在不同接口变换器之间的均衡。

本文针对直流微电网系统中的下垂控制特点，对于每台变换器，设置下垂控制系数为其对应的储能单元的剩余容量的 n 次幂。由此实现根据储能单元剩余容量调整下垂系数，进而达到负荷功率在不同分布式储能单元之间的合理分配的目的。同时，通过改变幂指数 n 的取值，可以调整负荷功率动态分配的速率。为了补偿下垂控制带来的母线电压跌

落，引入了针对直流母线电压的二次控制策略。传统的二次控制作用于下垂系数固定的下垂控制方法，而本文针对提出的下垂系数动态变化的改进下垂控制方法，对二次控制的适用性进行了进一步的验证。理论分析结果验证了所提出的基于剩余容量的下垂控制方法以及对应的二次控制策略的合理性。同时，利用推导得到的小信号模型，验证了控制系统的稳定性。基于 Matlab/Simulink 建立了仿真模型，验证了理论分析结果。同时，搭建了基于 Matlab/Simulink 的仿真模型及基于 dSPACE1103 的 $2 \times 2.2\text{kW}$ 并联变换器实验平台，通过仿真和实验验证了理论分析结果。

1 控制模型分析

1.1 基于储能单元剩余容量的改进下垂控制方法

带有分布式储能单元的直流微电网的典型结构如图 1 所示^[20]。其中，接口变换器采用并联方式接入公共直流母线，负荷需要在各接口变换器之间合理分配。

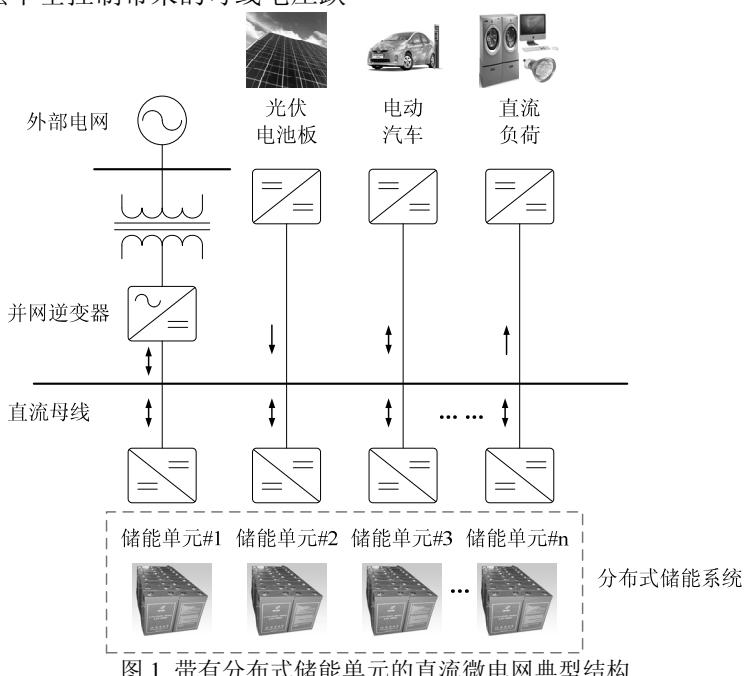


图 1 带有分布式储能单元的直流微电网典型结构

Fig. 1 Typical configuration of the DC microgrid with distributed energy storage unit

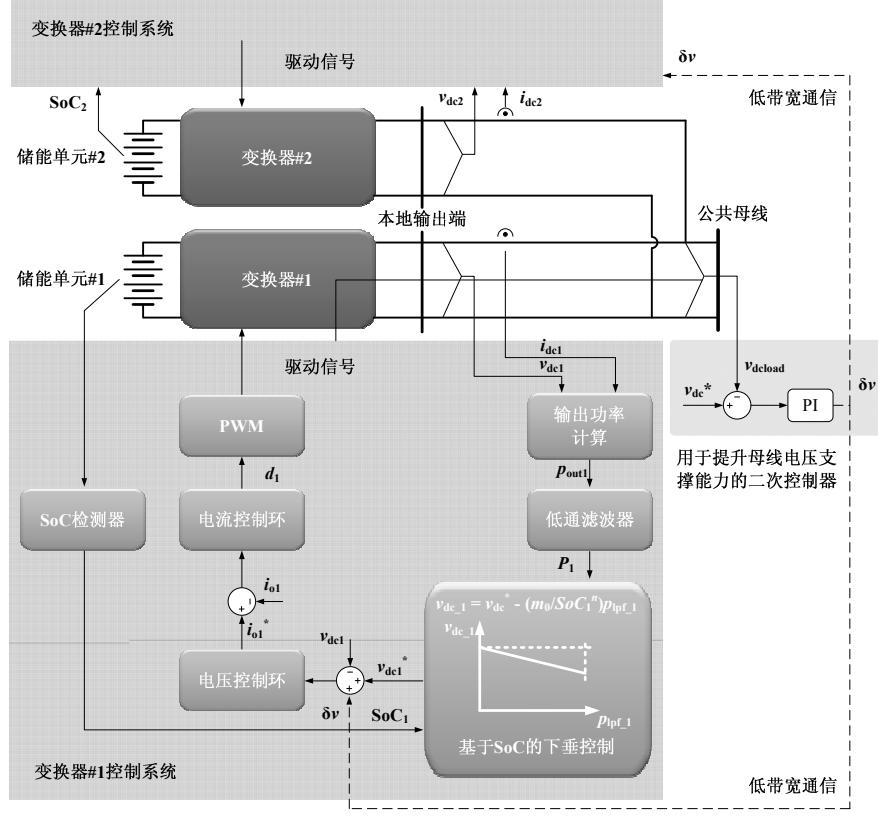


图 2 控制系统整体结构
Fig. 2 Overall control diagram

直流微电网中的下垂控制方法表述为

$$v_{dc} = v_{dc}^* - m_p \cdot P \quad (1)$$

其中, v_{dc} 为每台变换器的直流输出电压, P 为经过低通滤波器滤波的输出有功功率, m_p 为下垂系数。

下面具体推导得到基于剩余容量的改进下垂控制系统模型, 控制系统的整体结构如图 2 所示。

以两个分布式储能单元组成的系统为例, 各储能单元的剩余容量的计算方法为

$$SoC_1 = SoC_{1 t=0} - \frac{1}{C_e V_{in1}} \int p_{in1} dt \quad (2)$$

$$SoC_2 = SoC_{2 t=0} - \frac{1}{C_e V_{in2}} \int p_{in2} dt \quad (3)$$

其中, $SoC_{1 t=0}$ 和 $SoC_{2 t=0}$ 为初始剩余容量, p_{in1} 和 p_{in2} 为变换器输入功率, 即储能单元输出功率, C_e 为储能单元容量, V_{in1} 和 V_{in2} 为储能单元输出端电压。

根据储能单元电压输出特性, 在较大的 SoC 变化范围内, 储能单元的输出电压均保持不变。只有在 SoC 非常低的情况下, 储能单元的输出电压才会发生较明显的跌落。由于 SoC 的变化速率非常缓慢, 且 SoC 过低的储能单元将被切除, 因此此处近似认为各储能单元的输出电压为恒定值。

在忽略变换器损耗的情况下, 可以近似得到

$$p_{in1} \approx p_{out1} \quad (4)$$

$$p_{in2} \approx p_{out2} \quad (5)$$

其中, p_{out1} 和 p_{out2} 为两台变换器的输出功率。因此, 式 (2)、(3) 可写成

$$SoC_1 = SoC_{1 t=0} - \frac{1}{C_e V_{in1}} \int p_{out1} dt \quad (6)$$

$$SoC_2 = SoC_{2 t=0} - \frac{1}{C_e V_{in2}} \int p_{out2} dt \quad (7)$$

本文提出基于电池剩余容量的改进下垂控制方法, 其表达式为

$$v_{dc1} = v_{dc}^* - (m_0 / SoC_1^n) \cdot P_1 \quad (8)$$

$$v_{dc2} = v_{dc}^* - (m_0 / SoC_2^n) \cdot P_2 \quad (9)$$

其中, m_0 为当电池剩余容量为 1 时的初始下垂系数。

从式 (8)、(9) 中可以看出, 在改进的下垂控制方法中, 下垂系数和储能单元剩余容量的 n 次幂呈反比。一般来讲, 由于微电网系统的物理尺度不会很大, 因此, 对于接入同样电压等级系统的两台变换器近似可得,

$$v_{dc1} \approx v_{dc2} \approx v_{load} \quad (10)$$

其中, v_{load} 为公共连接点处的负荷母线电压。

联立 (8) ~ (10), 可得

$$\frac{P_1}{SoC_1^n} = \frac{P_2}{SoC_2^n} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,变换器的输出功率和剩余容量的n次幂呈正比关系,即剩余容量较大的储能单元提供较多的负荷功率,而剩余容量较小的储能单元提供较少的负荷功率。进而,前者的剩余容量下降速度快于后者,最终二者趋于相等,实现负荷均衡的目的。

通过小信号扰动可以对系统的稳定性进行分析。

对式(6)、(7)进行小信号扰动,可得

$$s \cdot \hat{SoC}_1 = -\hat{p}_{out1} / (C_e V_{in1}) \quad (12)$$

$$s \cdot \hat{SoC}_2 = -\hat{p}_{out2} / (C_e V_{in2}) \quad (13)$$

考虑到下垂控制中低通滤波器的影响,

$$\hat{P}_1 = G_{lpf} \cdot \hat{p}_{out1} \quad (14)$$

$$\hat{P}_2 = G_{lpf} \cdot \hat{p}_{out2} \quad (15)$$

其中, G_{lpf} 选取为一阶低通滤波器,即

$$G_{lpf} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (16)$$

其中, ω_c 为滤波器截止频率。

将(14)、(15)代入(12)、(13),可得

$$s \cdot \hat{SoC}_1 = -\hat{P}_1 / (C_e V_{in1} G_{lpf}) \quad (17)$$

$$s \cdot \hat{SoC}_2 = -\hat{P}_2 / (C_e V_{in2} G_{lpf}) \quad (18)$$

对(8)、(9)进行小信号扰动,可得

$$m_0 \cdot \hat{P}_1 = n SoC_1^{n-1} (V_{dc}^* - V_{dc1}) \cdot \hat{SoC}_1 \quad (19)$$

$$- SoC_1^n \cdot v_{dc1}$$

$$m_0 \cdot \hat{P}_2 = n SoC_2^{n-1} (V_{dc}^* - V_{dc2}) \cdot \hat{SoC}_2 \quad (20)$$

$$- SoC_2^n \cdot v_{dc2}$$

为了简化表达式,设

$$k_{dc1} = n SoC_1^{n-1} (V_{dc}^* - V_{dc1}) / (C_e V_{in1}) \quad (21)$$

$$k_{dc2} = n SoC_2^{n-1} (V_{dc}^* - V_{dc2}) / (C_e V_{in2}) \quad (22)$$

因此,联立式(17)~(20),可得

$$m_0 \cdot \hat{P}_1 = -k_{dc1} \cdot \hat{P}_1 / (s G_{lpf}) - SoC_1^n \cdot v_{dc1} \quad (23)$$

$$m_0 \cdot \hat{P}_2 = -k_{dc2} \cdot \hat{P}_2 / (s G_{lpf}) - SoC_2^n \cdot v_{dc2} \quad (24)$$

在变换器公共连接点处,满足

$$\hat{p}_{out1} + \hat{p}_{out2} = p_{load} \quad (25)$$

其中, p_{load} 为负荷功率,其满足

$$p_{load} = \frac{v_{dcload}^2}{R_{load}} \quad (26)$$

对式(26)进行小信号扰动,并考虑低通滤波器的作用,可得

$$\hat{p}_{lpf_1} + \hat{p}_{lpf_2} = \frac{2V_{dc} \cdot G_{lpf}}{R_{load}} \cdot \hat{v}_{dcload} \quad (27)$$

其中, R_{load} 为负荷电阻。

联立式(10)、(23)、(24)、(27),可以得到系统的特征方程

$$A \cdot s^3 + B \cdot s^2 + C \cdot s + D = 0 \quad (28)$$

其中,各项系数为

$$A = SoC_1^n R_{load} (m_0 \omega_c + k_{dc2}) + SoC_2^n R_{load} (m_0 \omega_c + k_{dc1})$$

$$B = SoC_1^n R_{load} (m_0 \omega_c^2 + 2\omega_c k_{dc2})$$

$$+ SoC_2^n R_{load} (m_0 \omega_c^2 + 2\omega_c k_{dc1})$$

$$+ 2V_{dcload} (m_0 \omega_c + k_{dc1})(m_0 \omega_c + k_{dc2})$$

$$C = SoC_1^n R_{load} k_{dc2} \omega_c^2 + SoC_2^n R_{load} k_{dc1} \omega_c^2$$

$$+ 2V_{dcload} \omega_c (m_0 \omega_c k_{dc1} + m_0 \omega_c k_{dc2} + 2k_{dc1} k_{dc2})$$

$$D = 2V_{dcload} k_{dc1} k_{dc2} \omega_c^2$$

利用式(28)得到的特征方程,可以得到改进的下垂控制方法对于不同的SoC及其幂指数n的闭环主导极点分布,如图3所示。此处所使用的系统参数如表1所示。在图3中,相同灰度而不同标号的极点对应SoC相同而幂指数n不同的极点;不同灰度而相同标号的极点对应SoC不同而幂指数n相同的极点。可以看出,在SoC及其幂指数n的变化过程中,系统主导极点均位于左半平面,系统的小信号稳定性得以保证。

需要指出的一点是,为了尽可能保证系统可靠运行,需要控制直流微电网中下垂系数不超过其取值上限,该上限由直流电压的最大跌落决定。为了满足上述条件,首先需要保证幂指数n取值不宜过大,否则在SoC较低的情况下,下垂系数会增长过快;其次,需要控制储能单元不要过度放电,即不要达到SoC过低的情况,这一方面保证了储能单元输出电压不至于大幅度跌落,另一方面也保证了不会由于SoC过低造成下垂系数过大的问题。

1.2 功率均衡速率调整

在上述方法中,功率均衡速率可以通过改变剩余容量的幂指数n进行调整。根据式(11)的负荷功率分配关系,可得

$$SoC_1 = SoC_{1,t=0} - \frac{p_{load}}{C_e V_{in1}} \int \frac{SoC_i^n}{\sum_{i=1}^2 SoC_i^n} dt \quad (29)$$

$$SoC_2 = SoC_{2,t=0} - \frac{p_{load}}{C_e V_{in2}} \int \frac{SoC_i^n}{\sum_{i=1}^2 SoC_i^n} dt \quad (30)$$

根据表 1 中提供的系统参数, 对式 (29)、(30) 进行数值求解, 可得 SoC_1 和 SoC_2 在每一时刻的取值, 进而通过式 (11) 所示的负荷功率分配关系, 可以得到每台变换器的输出功率在每一时刻的取值。所得数值求解结果如图 4 所示。从图中可以看出, 选取 $t=1500s$ 为例。在此时刻, 对应于幂指数 n 取值为 2, 3 和 6 的情况, SoC_1 和 SoC_2 之差分别为 3.24%, 1.86% 和 0.34%。由此可见, 随着幂指数 n 增大, SoC_1 和 SoC_2 的均衡速率有所提升。与此同时, 在幂指数 n 取值分别为 2, 3 和 6 的情况下, 当 $t=1500s$ 时, 两台变换器的输出功率之差分别为 118.2W, 100.3W 和 36.5W。因此, 随着幂指数 n 增大, 负荷功率均衡速率同样有所提升。综合上述分析可得, 通过调整幂指数 n 的取值, 可以调节负荷功率在各个变换器之间的均分速率。幂指数 n 取值增大, 负荷均分速率有所提升。

表 1 系统参数

Table 1 System Parameters

参数	符号	取值	单位
SoC_1 初始值	$SoC_{1,t=0}$	90	%
SoC_2 初始值	$SoC_{2,t=0}$	80	%
低通滤波器截止频率	ω_c	126	rads ⁻¹
变换器#1 输入电压	V_{in1}	200	V
变换器#2 输入电压	V_{in2}	200	V
直流母线电压	V_{dcload}	700	V
负载电阻	R_{load}	200	Ω
负载功率	p_{load}	1800	W
变换器功率等级	P_{max}	2500	W
开关频率	f_s	8	kHz

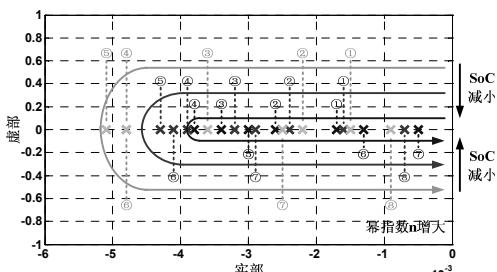


图 3 基于 SoC 的下垂控制系统在 SoC 和幂指数 n 分别变化情况下的闭环极点分布

Fig. 3 Positions of close-loop poles of the SoC -based droop control with different $SoCs$ and exponents

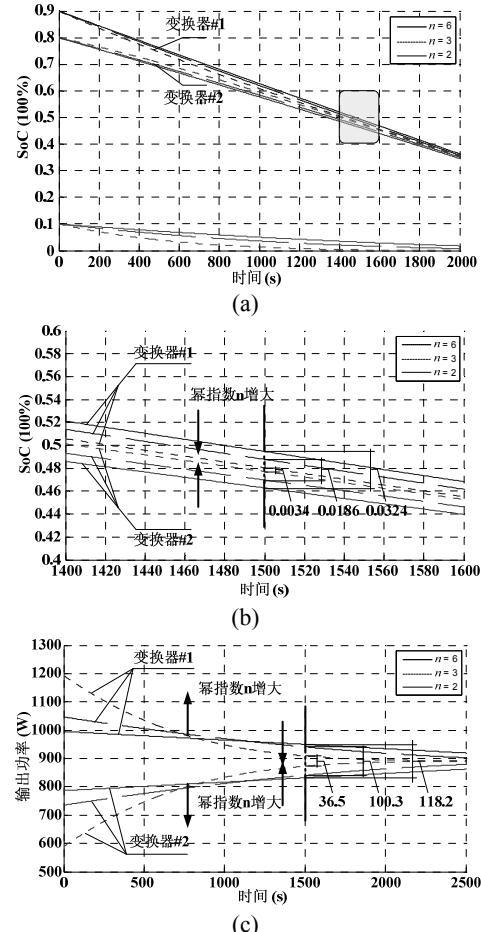


图 4 幂指数 n 对 SoC 及输出功率均衡速率的影响

(a) 幂指数 n 不同情况下的 SoC 波形

(b) (a)中方框区域放大结果

(c) 幂指数 n 不同情况下的输出功率波形

Fig. 4 Influence of the exponent n on the SoC balancing and output power equalization speed

(a) SoC waveforms with different exponent n

(b) Zoomed-in result of the square region in (a)

(c) Output power waveform with different exponent n

1.3 直流母线电压跌落补偿

上述功率分配方法基于下垂控制实现, 因此会带来母线电压的跌落。为了对电压跌落问题进行补偿, 本文引入了针对直流母线电压的二次控制方法。传统的二次控制方法针对下垂系数固定的控制系统提出。在下垂系数不断变化的情况下, 其对于基于储能单元剩余容量的下垂控制方法的适用性将在下面进行验证。

直流微电网中用于补偿母线电压跌落的二次控制方法结构如图 2 所示, 其通过低带宽通信线, 将公共 PI 控制器输出的补偿量叠加到每台变换器本地直流输出电压的给定值上, 实现对电压跌落的补偿。具体来讲, 二次控制部分的控制模型可以简化为图 5 所示结构, 其中 G_d 为用于模拟低带宽通信的延迟环节。从图中可以看出, 不断变化的 SoC

在功率负反馈支路中以扰动的形式影响二次控制的效果。

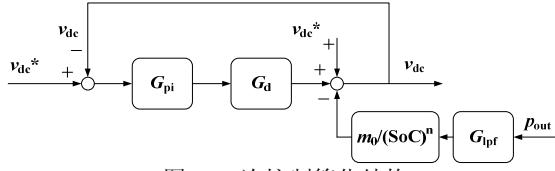


图 5 二次控制简化结构

Fig. 5 Control diagram of the secondary control

由图 5 可得，

$$v_{dc} = v_{dc}^* - \frac{(1/SoC^n) \cdot m_0 G_{lpf}}{1 + G_{pi} G_d} \cdot p_{out} \quad (31)$$

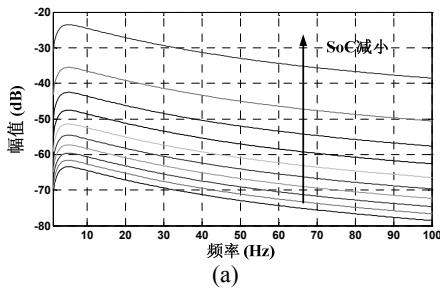
由式 (31) 可得二次控制系统在 SoC 及其幂指数 n 变化的情况下频域分析结果，如图 6 所示。从图中可以看出，随着 SoC 的不断减小及幂指数 n 的不断增大，系统在较大的范围内均可稳定运行。

2 仿真验证

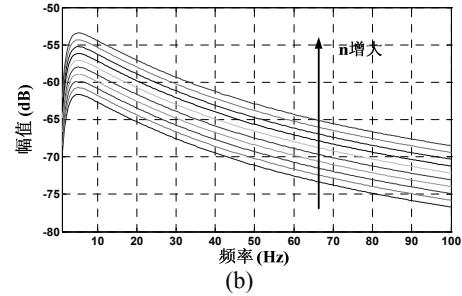
基于 Matlab/Simulink 搭建了系统仿真模型，对理论分析结果进行验证。模型参数取值如表 1 所示。

当幂指数取值为 2 时，两个储能单元的 SoC 变化波形如图 7 (a) 所示，每台变换器的输出功率波形如图 7 (b) 所示。从图 7 中可以看出，由于使用了基于剩余容量的改进下垂控制方法，两个储能单元的剩余容量及两台变换器的输出功率均逐渐趋于相等。同理，当幂指数取值分别为 3 和 6 时，对应的 SoC 和输出功率波形如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 中同样可以看出改进下垂控制的作用效果。

纵向比较图 7、图 8 和图 9 的结果可以看出，随着幂指数 n 取值的增大，SoC 以及输出功率达到均衡的速率有所提升。当幂指数 n 的取值为 6 时，可以在给定的时间内实现两台变换器输出功率的均等分配。



(a)



(b)

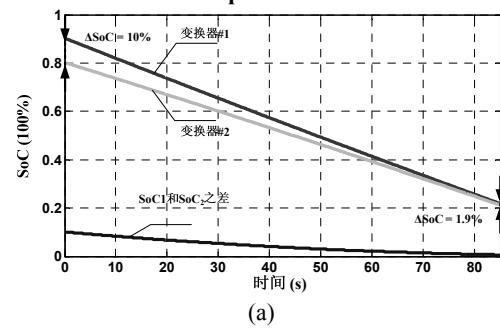
图 6 SoC 及幂指数 n 变化情况下二次控制系统的频域分析结果

(a) SoC 减小情况下的频域分析结果

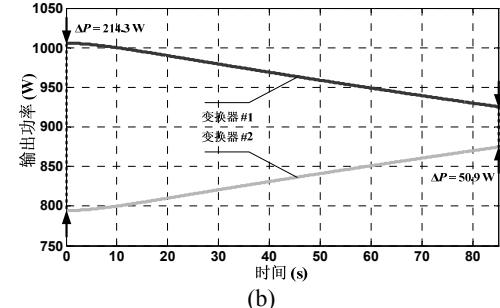
(b) 幂指数 n 增大情况下的频域分析结果

Fig. 6 Frequency domain analysis result of secondary control system with different SoC and exponent n

- (a) Frequency domain analysis result with decreasing SoC
- (b) Frequency domain analysis result with increasing exponent n



(a)



(b)

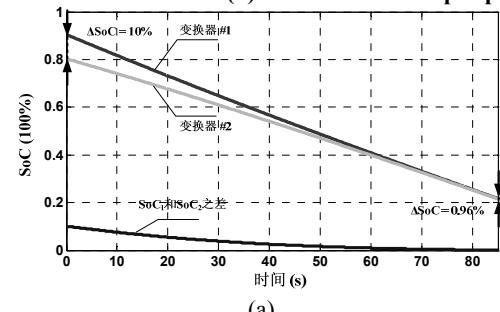
图 7 n=2 情况下的 SoC 及输出功率波形（仿真结果）

(a) SoC 波形

(b) 输出功率波形

Fig. 7 SoC and power sharing waveforms for the SoC-based droop control when n=2 (Simulation).

- (a) Waveforms of SoC. (b) Waveforms of output power.



(a)

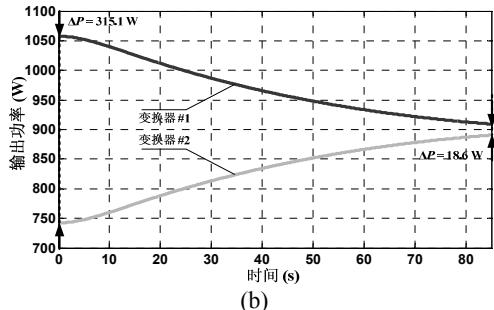


图 8 n=3 情况下的 SoC 及输出功率波形 (仿真结果)
(a) SoC 波形
(b) 输出功率波形

Fig. 8 SoC and power sharing waveforms for the SoC-based droop control when n=3 (Simulation).
(a) Waveforms of SoC. (b) Waveforms of output power.

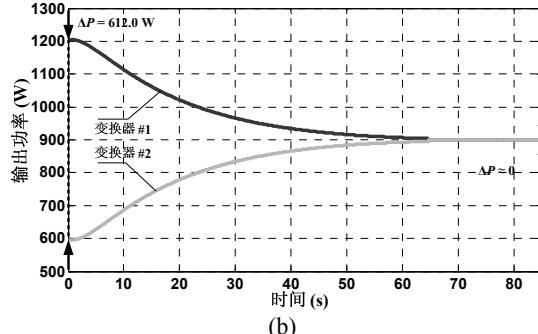
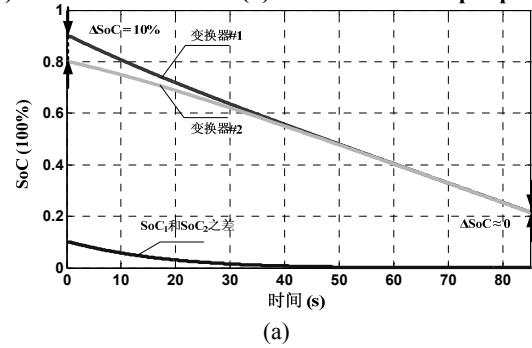


图 9 n=6 情况下的 SoC 及输出功率波形 (仿真结果)
(a) SoC 波形
(b) 输出功率波形

Fig. 9 SoC and power sharing waveforms for the SoC-based droop control when n=6 (Simulation).
(a) Waveforms of SoC. (b) Waveforms of output power.

为了进一步验证所提出的方法，利用搭建的仿真模型进行了包含多个储能单元的分布式储能系统测试。在具有三台变换器的系统中，三个储能单元的 SoC 以及每台变换器的输出功率波形如图 10 所示。从图中可以看出，三个储能单元的 SoC 及各自的输出功率逐渐趋于相等，满足设计要求。当系统中的储能单元的 SoC 过低需要切除时，系统的暂态运行性能如图 11 所示。从图中可以看出，在 t_0 时刻之前，三台变换器均正常工作，三个储能单元共同供给负荷功率。在改进的下垂控制方法的作用下，三台变换器的输出功率不断趋于相等。而在 t_0 时刻，储能单元#3 切除，负荷功率转为由#1 和#2

储能单元供给，因此，在 t_0 时刻之后，储能单元#3 的剩余容量保持不变，而储能单元#1 和#2 的剩余容量继续在改进下垂控制的作用下不断趋于相等。由于 t_0 时刻储能单元#3 切出系统，因此 t_0 时刻之后储能单元#3 不在输出功率，而负荷功率在储能单元#1 和#2 中分配，两个储能单元提供的功率同样不断趋于相等，满足控制系统设计要求。

二次控制系统的验证结果如图 12 所示。如图 12 所示，当二次控制开启时，下垂控制带来的直流母线电压跌落得以补偿，母线电压恢复到正常水平。

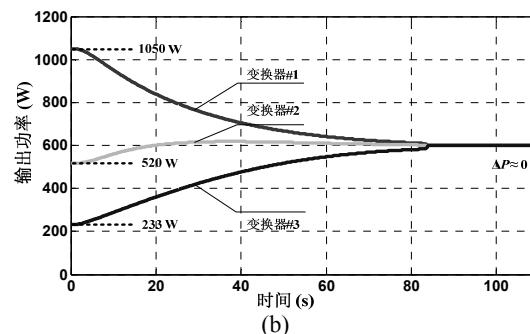
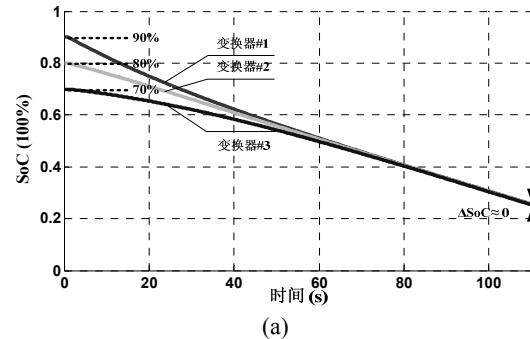
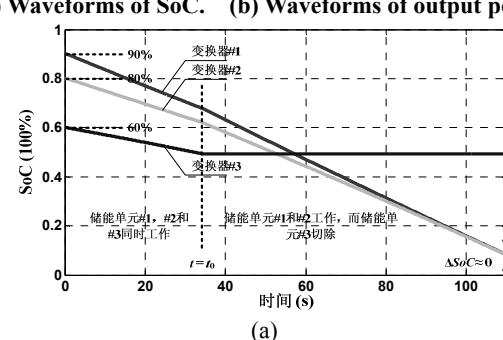


图 10 带有三个储能单元的系统中 SoC 及输出功率波形 (仿真结果)
(a) SoC 波形
(b) 输出功率波形

Fig. 10 SoC and power sharing waveforms in the multiple converter system with three ESUs (Simulation).

(a) Waveforms of SoC. (b) Waveforms of output power.



(a)

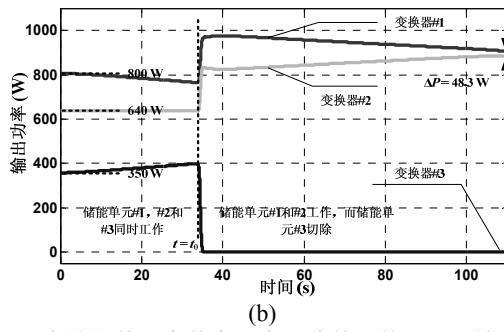


图 11 三个储能单元中其中一个切除前后的 SoC 及输出功率波形 (仿真结果)

(a) SoC 波形

(b) 输出功率波形

Fig. 11 SoC and power sharing waveforms when one of the energy storage units is cut-off (Simulation).

(a) Waveforms of SoC. (b) Waveforms of output power.

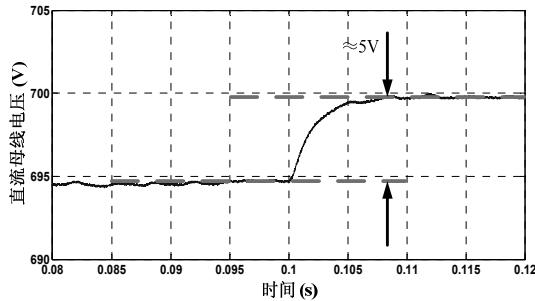


图 12 二次控制提升直流母线电压波形 (仿真结果)

Fig. 12 DC bus voltage restoration by the secondary control (Simulation).

3 实验验证

基于 dSPACE1103 搭建了 $2 \times 2.2\text{kW}$ 的实验平台, 以对理论分析结果进行验证。系统参数同样如表 1 所示。图 13-图 15 分别为幂指数 n 取值为 2, 3 和 6 的情况下的储能单元剩余容量及变换器输出功率波形。从图中可以看出, 在改进的下垂控制作用下, 储能单元剩余容量及变换器输出功率逐渐趋于相等。对于较大的幂指数 n 的取值, SoC 及输出功率的均衡速率较大。对于二次控制的验证结果如图 16 所示。在二次控制开启之前, 直流母线电压跌落约为 5V; 在二次控制开启之后, 直流母线电压跌落得以补偿, 母线电压恢复为额定值 700V。

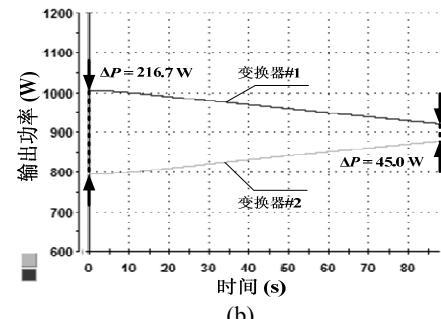
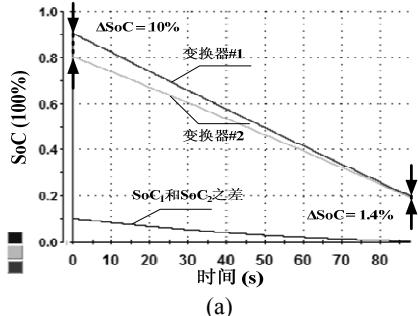


图 13 n=2 情况下的 SoC 及输出功率波形 (实验结果)

(a) SoC 波形

(b) 输出功率波形

Fig. 13 SoC and power sharing waveforms for the SoC-based droop control when $n=2$ (Experiment).

(a) Waveforms of SoC.

(b) Waveforms of output power.

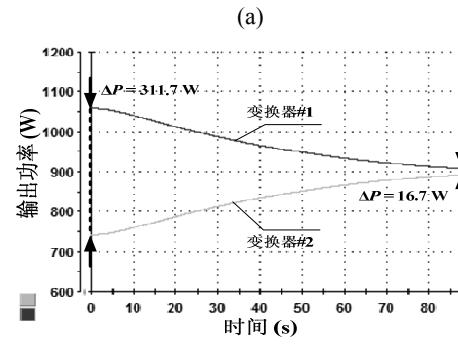
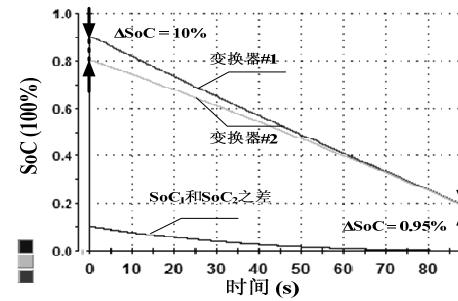


图 14 n=3 情况下的 SoC 及输出功率波形 (实验结果)

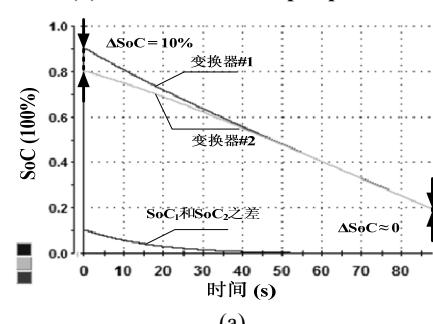
(a) SoC 波形

(b) 输出功率波形

Fig. 14 SoC and power sharing waveforms for the SoC-based droop control when $n=3$ (Experiment).

(a) Waveforms of SoC.

(b) Waveforms of output power.



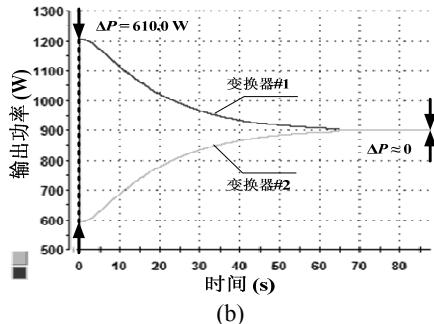


图 15 n=6 情况下的 SoC 及输出功率波形（实验结果）
 (a) SoC 波形
 (b) 输出功率波形

Fig. 15 SoC and power sharing waveforms for the SoC-based droop control when n=6 (Experiment).
 (a) Waveforms of SoC.
 (b) Waveforms of output power.

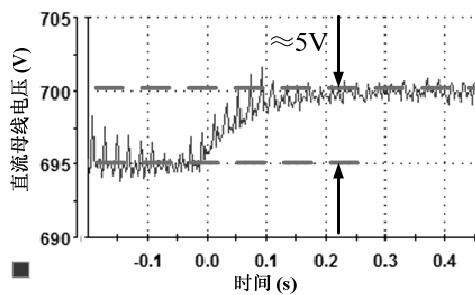


图 16 二次控制提升直流母线电压波形（实验结果）
Fig. 16 DC bus voltage restoration by the secondary control (Experiment).

4 结论

本文针对直流微电网分布式储能系统的特点，提出了基于储能单元剩余容量的改进下垂控制方法。同时，通过引入二次控制方法，对改进的下垂控制方法造成的直流母线电压跌落进行补偿，提升了微电网系统的整体运行性能。具体来讲，

1) 利用所提出的改进下垂控制方法，使得剩余容量较大的储能单元提供较多的负荷功率；而剩余容量较小的储能单元提供较少的负荷功率。进而，前者的剩余容量下降速度较快，而后的剩余容量下降速度较慢，最终二者趋于相等。因此，各储能单元的输出功率亦随之趋于相等。最终，实现了负荷功率在不同储能单元之间均衡的目的。

2) 利用二次控制方法对上述改进的下垂控制方法带来的直流母线电压跌落进行补偿，使得母线电压恢复到额定取值，验证了二次控制对下垂系数不断变化的改进下垂控制方法的作用效果。

3) 在建立控制系统模型的基础上，通过对系统稳定性的分析，验证了上述基于储能单元剩余容量的动态负荷分配方法以及相应的基于二次控制

的母线电压提升方法的可行性。

参考文献

- [1] 杭丽君, 李宾, 黄龙, 姚文熙等. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振 PR 电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 51-58.
 Hang Lijun, Li Bin, Huang Long, Yao Wenxi, et al. A multi-resonant PR current controller for grid-connected inverters in renewable energy systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 32(12): 51-58 (in Chinese).
- [2] 胡雪峰, 王璐, 龚春英, 肖嵒等. 可再生能源并网发电馈网电流中的谐波分析及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30: 167-170.
 Hu Xuefeng, Wang Lu, Gong Chunying, Xiao Lan, et al. Harmonic analysis and suppression strategies of grid current for renewable energy grid integration system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 30: 167-170 (in Chinese).
- [3] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stevens, et al. The certs microgrid concept - white paper on integration of distributed energy resources. Technical report, U.S. Department of Energy, 2002.
- [4] 张庆海, 彭楚武, 陈燕东, 金国彬等. 一种微电网多逆变器并联运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 126-132.
 Zhang Qinghuai, Peng Chuwu, Chen Yandong, Jin Guobin, et al. A control strategy for parallel operation of multi-inverters in microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 32(25): 126-132 (in Chinese).
- [5] 关雅娟, 邬伟扬, 郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 52-60.
 Guan Yajuan, Wu Weiyang, Guo Xiaoqiang. Control strategy for three-phase inverters dominated microgrid in autonomous operation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 31(33): 52-60 (in Chinese).
- [6] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
 Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [7] X. She, A. Q. Huang, S. Lukic, M. E. Baran. On integration of solid-state transformer with zonal DC microgrid [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2012, 3(2): 975-985.
- [8] H. Kakigano, A. Nishino, Y. Miura, T. Ise, Distribution voltage control for DC microgrid by converters of energy

- storages considering the stored energy [C]// Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, USA, 2010: 2851-2856.
- [9] T. F. Wu, K. H. Sun, C. L. Kuo, C. H. Chang, Predictive current controlled 5-kW single-phase bidirectional inverter with wide inductance variation for DC-microgrid applications [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2010, 25(12): 3076-3084.
- [10] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2010, 25(12): 3066-3075.
- [11] A. A. A. Radwan, Y. A. I. Mohamed, Linear active stabilization of converter-dominated DC microgrids [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2012, 3(1): 203-216.
- [12] S. Anand, B. G. Fernandes, J. M. Guerrero, Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low voltage DC microgrids [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2013, 28(4): 1900-1913.
- [13] F. Blaabjerg, Z. Chen, S. B. Kjaer. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems [J], IEEE Trans. Power Electron., 2004, 19(5): 1184-1194.
- [14] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2009, 56(3): 726-736.
- [15] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. Vicuña, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - a general approach toward standardization [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2011, 58(1): 158-172.
- [16] J. He, Y. W. Li. An enhanced microgrid load demand sharing strategy [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2012, 27(9): 3984-3995.
- [17] N. Pogaku, M. Prodanović, T. C. Green. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2007, 22(2): 613-625.
- [18] Y. Li, Y. W. Li. Power management of inverter interfaced autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2011, 2(1): 30-40.
- [19] Y. W. Li, C. N. Kao. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2009, 24(12): 2977-2988.
- [20] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 钱照明等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106.
Wu Weimin, He Yuanbin, Geng Pan, Qian Zhaoming, et al. Key technologies for DC micro-grids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.