

# Research on the Hierarchical Control of DC Microgrid Based on Droop Control

Fangchen Huang, Jing Hui

Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Email: [huangfangchen001@126.com](mailto:huangfangchen001@126.com), [jingh@126.com](mailto:jingh@126.com)

Received: Dec. 7<sup>th</sup>, 2016; accepted: Dec. 21<sup>st</sup>, 2016; published: Dec. 26<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

For the sake of improving the performance of poor voltage regulation of traditional droop control, this paper proposes a hierarchical control strategy of DC microgrid based on droop control, which can achieve a reasonable distribution of current and power, and compensate the deviation of the bus voltage. Firstly, the characteristics of the traditional droop control and the problem of the voltage deviation are analyzed. Then, the two stage controller is introduced to solve the problem of voltage sag, and the stability of the two stage controller is analyzed. In the meantime, the overall design of the three stage control of DC micro grid is presented. Finally, simulation results in Matlab/Simulink environment verify the effectiveness of the proposed method, and experimental results are carried out to evaluate the droop concept as well as secondary voltage compensation.

## Keywords

Microgrid, Distributed Generation, Droop Control, Hierarchical Control

---

# 基于下垂控制的直流微网的分层控制的研究

黄芳辰, 惠 晶

江南大学轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡

Email: [huangfangchen001@126.com](mailto:huangfangchen001@126.com), [jingh@126.com](mailto:jingh@126.com)

收稿日期: 2016年12月7日; 录用日期: 2016年12月21日; 发布日期: 2016年12月26日

文章引用: 黄芳辰, 惠晶. 基于下垂控制的直流微网的分层控制的研究[J]. 电气工程, 2016, 4(4): 223-231.

<http://dx.doi.org/10.12677/jee.2016.44029>

## 摘要

为改进传统下垂控制较差的电压调节的性能, 本文提出了一种基于下垂控制的直流微网的分层控制策略, 实现合理的电流和功率的分配, 同时补偿母线电压的偏离。首先分析了传统下垂控制的特点及引发的电压偏离问题; 其次引入二级控制器解决了电压跌落的问题, 并分析二级控制器稳定性; 同时给出了直流微网的三级控制的整体设计。最后在Matlab/Simulink环境下的仿真结果验证了该方法的有效性, 且在dSPACE实验平台上验证了下垂理论和电压跌落补偿。

## 关键词

微网, 分布式发电, 下垂控制, 分层控制

## 1. 引言

近年来, 微网作为一种新概念, 结合分布式发电和能量存储系统, 已被发展起来处理一些可能非常不同于传统电网的问题, 如新策略、协调以及控制等[1]。交流微网的提出促进可再生能源和传统交流系统的连接[2] [3]。然而, 像二次调频、无功功率流动、谐波抑制等质量问题的繁琐解决方案[4] [5], 微网框架已逐渐推向方便易行的直流微网[6] [7] [8]。直接来源于直流源供应的直流功率的固有的优势已成为直流微网不可替代的需要[9], 同时, 在[10]提出, 直流微网的电压控制可实现超高质量供电, 且多方面的优势, 如高效率、可靠性、易整合等同样在[11]中提到。

当直流微网运行时, 微网中分布源和负载或外电网之间实现能量传递通常是功率电子变换器。为避免并行运行于微网的功率变换器之间出现环流和不采用通信装置的方式下, 下垂控制方法经常得以应用。下垂方法由输出电压的负比例环节构成。于是, 虚拟输出阻抗可实行于该控制环中。该控制环, 又称自适应电压定位, 已被应用于提高电压调节的暂态响应。然而, 负比例部分会导致电压幅值的下降, 即所谓的电压偏离。并且, 供应输出功率越多, 引起电压的偏离也越多。

为解决上述问题, 本文采用一种外部控制环, 称为二级控制, 二级控制用来补偿电压的偏离。二级控制器也将微网电压同步于电网电压。在同步后, 额外的三级控制器管理微网和电网之间的功率流动。

## 2. 传统下垂控制

为研究传统下垂控制对双变换器的电流分配, 本文将两变换器并联, 简化图如图1所示。

传统下垂控制数学表达式为:

$$U_{dcref} = U_N - R_D I_d \quad (1)$$

其中,  $U_{dcref}$  为变换器参考电压,  $U_N$  为变换器空载电压,  $R_D$  为虚拟阻抗, 其值取决于直流微网的允许最大电压扰动与微源的最大输出电流的比值, 如下:

$$V_{ref} = V_n - \varepsilon_v / 2 \quad (2)$$

$$R_D = \varepsilon_v / I_{max} \quad (3)$$

上式中,  $\varepsilon_v$  是最大容许的偏离电压,  $I_{max}$  是最大输出电流。

在忽略线路阻抗的情况下, 由图1可知:

$$\frac{i_{d1}}{i_{d2}} = \frac{R_{D2}}{R_{D1}} \quad (4)$$

由 4 式可知, 控制虚拟阻抗比就可以很好地控制电流的分配。

然而, 它存在不可避免的缺点——产生的电压偏离。

为克服传统下垂控制缺陷, 本文给出了改进下垂控制的方法——二级控制。

### 3. 传统下垂问题的解决(二级控制)

为解决传统下垂控制带来的电压偏离, 采用二级控制。二级控制器的补偿器  $G_{MG}(s)$  捕捉直流微网侧电压  $V_{MG}$ , 与参考电压  $V_{MG}^*$  进行比较, 然后将误差处理后, 产生的恢复电压  $\delta V_0$  送给所有一级控制的输入侧, 从而使电压恢复到额定值(如图 5 所示)。为精准实现电压恢复, 采用低带宽通信实现较好地恢复到精确电压等级, 同时, 也能预防环流的发生[12]。为模拟二级控制的低带宽通信特性, 在控制结构中引入延迟环节, 改延迟环节和二级控制补偿器直接相连, 如图 2 所示。通过设置不同延迟时间, 可模拟二级控制的通信带宽, 其中  $G_c$  为电流环传递函数。

在改变通信带宽时间, 即改变延迟时间情况下, 二级控制闭环系统主导极点变化情况如图 3 所示。从图 3 可知, 当延迟时间变大, 即降低通信带宽时, 闭环主导极点  $\lambda_1$  向虚轴移动, 且最终收敛在实轴负半轴。同时, 主导极点  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  趋向于虚轴。值得注意的是, 即使延迟时间增大到 0.02 s, 即通信频率约 50 Hz,  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的取值为  $-5.9 \pm j12.9$ , 系统仍具有一定的稳定裕度, 因此, 二级控制的稳定性得以保证。

补偿器  $G_{MG}(s)$  表达如下:

$$\delta V_0 = k_{p1}(V_{MG}^* - V_{MG}) + k_{i1} \int (V_{MG}^* - V_{MG}) dt \quad (5)$$

其中  $k_{p1}$ ,  $k_{i1}$  二级补偿器的控制参数。注意到,  $\delta V_0$  必须限定不超过最大容许偏离电压  $\varepsilon_v$ 。根据公式(5), 公式(1)可变为:

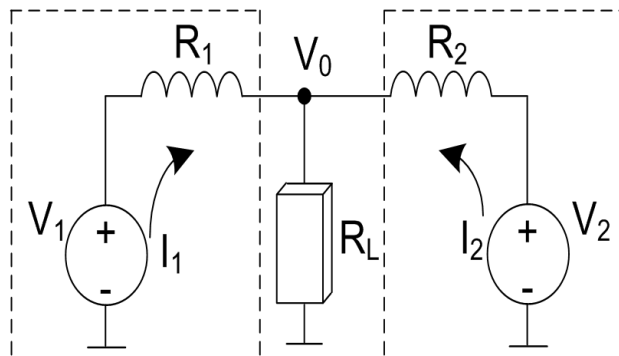


Figure 1. Equivalent circuit of two parallel-connected dc power supplies

图 1. 两并联直流微源的等效图

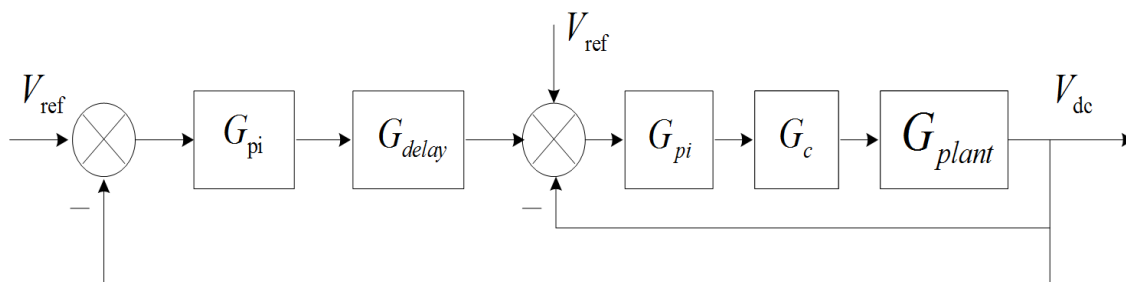


Figure 2. Control structure diagram of secondary control

图 2. 二级控制结构图

$$V_0^* = V_{ref} + \delta V_0 - R_D I_0 \tag{6}$$

因此, 只要控制好  $\delta V_0 = R_D I_0$ , 就可以较好地完成电压偏离的补偿。

#### 4. 直流微网分层控制的设计

本文设计的直流微网分层控制如图 4 所示。包括一级控制、二级控制、三级控制。一级控制由电压电流环以及下垂控制组成, 完成基本的电流和功率分配; 二级控制实现补偿一级控制的电压的偏离; 三

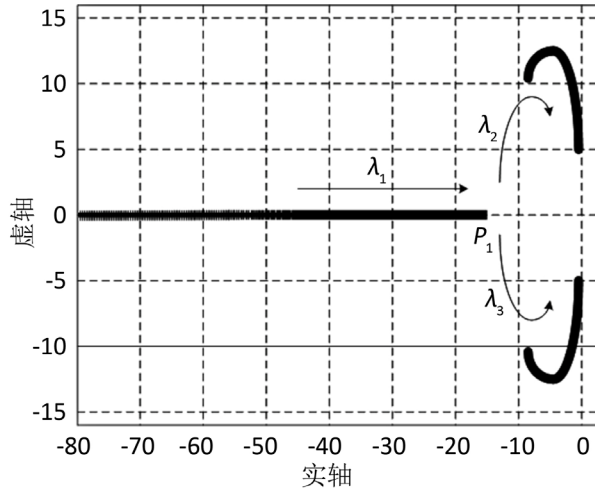


Figure 3. Close-loop dominant poles distribution of secondary control under different communication bandwidth

图 3. 不同通信宽带下二级控制闭环主导极点分布情况

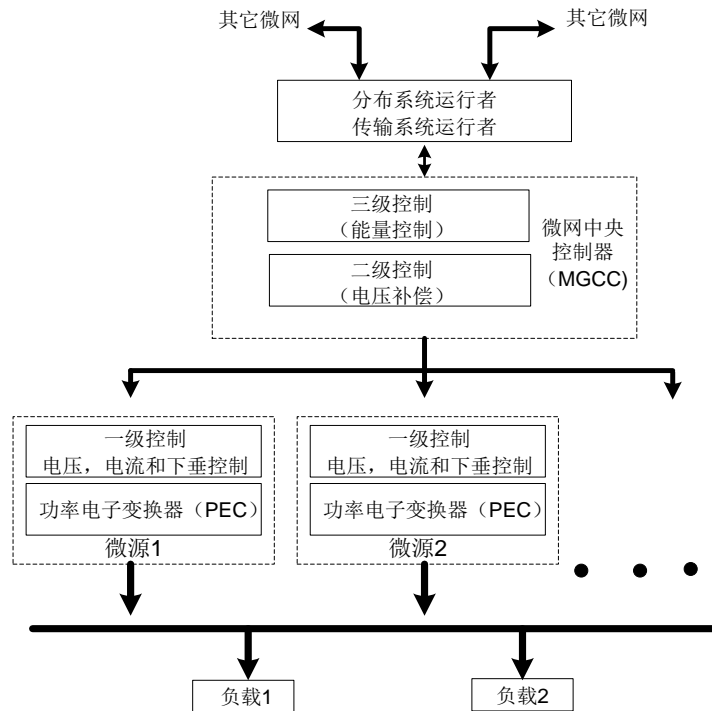


Figure 4. Design block diagram of DC microgrid hierarchical control

图 4. 直流微网分层控制设计框图

级控制实现与外界能量的交换。

本文的具体直流微网分层控制图如图 5 所示, 便于简化, 将直流电网用外部直流源代替。这里, 此直流电网可为一个直流配电系统或者连接到电网交流部分的 DC/AC 的变换器前端母线。

#### 4.1. 一级控制

本文的一级控制由传统的下垂控制和电压电流组成的内环控制器构成, 内环控制器的目标就是维持微网内部的电压等级。当两个变换器并联工作时, 在所有变换器假定理想状态下, 两变换器之间分配相等电流。然而, 由于电感和电容的分量扰动及非理想性, 精确相同的电流分配和等输出电压是不可能实现, 即使很小的电压偏差也会在变换器之间产生环流, 为此, 本文采用基于下垂方法的一级控制, 从而避免环流发生, 同时较好地完成电流分配。

一级控制提供阻性输出阻抗给功率变换器, 以便两变换器参考电压的偏离,  $\Delta V_0^* = V_{01}^* - V_{02}^*$ 。于是, 两变换器之间的电流分配  $\Delta I_0 = I_{01} - I_{02}$  可表达如下:

$$\Delta I_0 = \Delta V_0^* / R_D \quad (7)$$

本控制级不仅考虑到变换器的并联运行, 也提高输出电压的动态响应。

然而, 正如第 1 部分所述, 下垂控制不可避免地引起电压偏离。

#### 4.2. 二级控制

为解决一级控制的电压偏离, 采用二级控制。在补偿器的作用下, 可以较好的补偿来自下垂控制的电压的降落。补偿器的输出  $\delta V_0$  等于  $R_D I_0$ , 由 6 式可知, 即可得出  $V_0^* = V_{ref}$ , 从而使电压恢复到额定电压。

上文已经讨论过二级控制过程, 这里不再赘述。当微网连接到直流电网时(为简化, 这里采用直流源代替), 首先测量直流电网的电压, 该电压作为二级控制层的参考电压。接着, 在同步过后, 通过静态旁

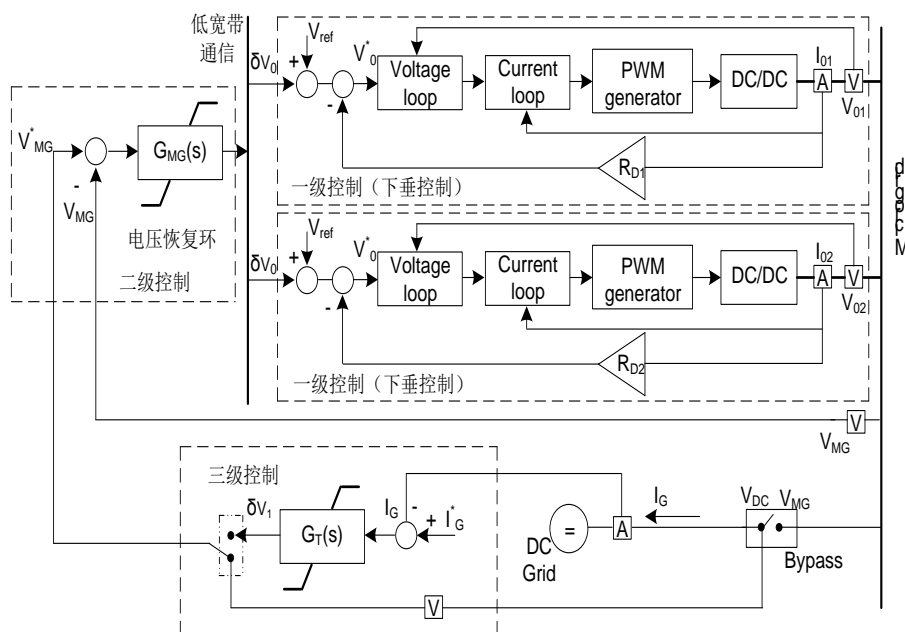


Figure 5. Detail hierarchical control diagram of DC microgrid

图 5. 具体直流微网的分层控制框图

路开关, 直流微网连接到直流电网。

### 4.3. 三级控制

当微网连接到直流电网时, 通过改变微网的参考电压从而控制功率的流动。正如图 5 的三级控制模块所示, 通过测量流过静态开关的电流(或功率)  $I_G$ , 与理想的正或负参考电流  $I_G^*$  比较(或功率), 从而微网可向直流电网输入或输出能量。三级控制器可表达如下:

$$\delta V_1 = k_{p2} (I_G^* - I_G) + k_{i2} \int (I_G^* - I_G) dt \quad (7)$$

其中  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$  是三级控制补偿器的控制参数。这里, 在超过超大限制  $\pm \varepsilon_v$  情况下,  $\delta V_1$  是饱和的。注意到, 取决于  $I_G^*$  的信号, 向直流电网输出功率 ( $I_G^* > 0$ ), 也可从直流电网吸收功率 ( $I_G^* < 0$ )。

## 5. 仿真结果与分析

为了验证本文提出的直流微网的分层控制策略的有效性, 两种情形进行了仿真。仿真模型采用两个并联的 DC-DC Buck 变换器构成直流微网。微网电压选择为 400 V, 虚拟输出阻抗分别选 1  $\Omega$ 、2  $\Omega$ , 在整个仿真期间, 负载每隔 10 ms 在 4 kw 与 12 kw 之间每隔 10 ms 切换, 仿真参数如表 1 所示, 仿真过程如表 2 所示。

**Table 1.** DC microgrid control system parameters

**表 1.** 直流微网控制系统参数

参数	符号	值	单位
一级控制 380			
虚拟阻抗	$R_D$	1、2	$\Omega$
二级控制 $C_{batt}$ 200			
比例项	$k_{p1}$	1	-
积分项	$k_{i1}$	5000	$S^{-1}$
三级控制 $P_{pv}$ 15			
比例项	$k_{p2}$	10	V/A
积分项	$k_{i2}$	3000	V/As

**Table 2.** Simulation scenario

**表 2.** 仿真过程

时间 (ms)	描述	模式
5	二级控制激活	孤岛
10	负载在 4 kw~12 kw 之间改变	孤岛
15	并网	并网
20	负载在 12 kw~4 kw 之间改变	并网
30	负载在 4 kw~12 kw 之间改变	并网
35	与电网断开	孤岛
40	负载在 12 kw~4 kw 之间改变	孤岛
50	仿真结束	孤岛

### 5.1. 情形 1——向外部直流电网输出 10A 电流

如图 6(a)所示, 在 0~5 ms 之间, 由于一级控制(下垂控制), 微网电压下降, 偏离 400 V。在 5 ms 时, 二级控制启动, 补偿一级控制带来的电压下降。图 6(b)表明, 在整个孤岛和并网模式中, 电流分配比例保持不变, 在图 6(c)中, 在 15 ms 时, 三级控制启动。以产生电压偏离为代价, 在 10 A 参考电流给定情况下, 微网可向微网输出理想电流。(注意到, 电流的增加会产生较高的电压下降)。

### 5.2. 情形 2——向外部直流电网吸收 20A 电流

在图 7(a)和图 7(c)中, 在 15 ms 时, 由于三级控制产生负电压偏移, 才使微网向电网吸收 20 A 电流。在 20 ms 时, 负载在 12 kw 和 4 kw 之间切换, 引起了微网电压的升高, 而由于负载的下降, 微网不再需要 20 A 电流供应负载, 因此, 变换器不在供应功率, 且吸收电流限定在 10 A。

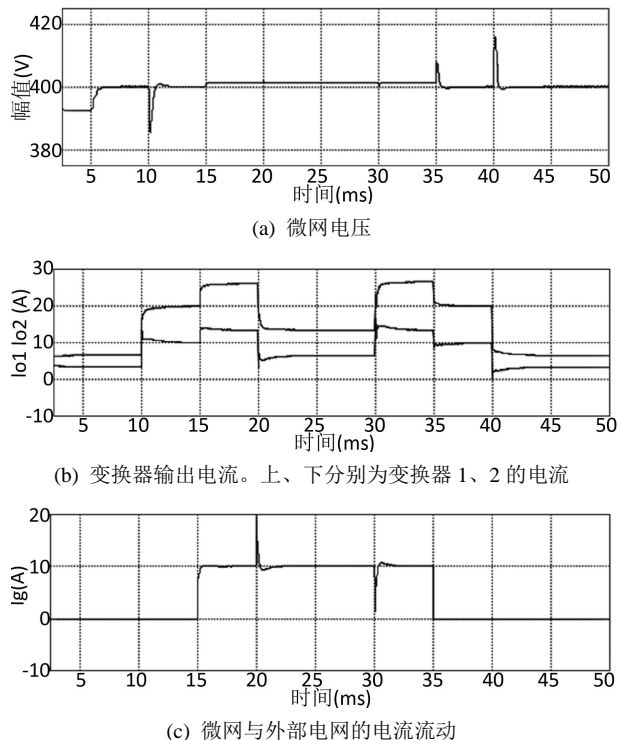
## 6. 实验结果与分析

为充分证明本文提出方法的有效性, 在实验室搭建了半实物半仿真 dSPACE1103 平台。维图如图 1 所示, 系统参数同表 1。

在本文提出的控制系统中, 直流电压跌落的补偿和电流的较好的分配可同时实现。图 8 为在负载扰动的情况下的系统响应, 在  $t = 0$  s 之前, 传统下垂控制分配电流和功率, 且产生的电压跌落如图 8(a)所示。在  $t = 0$  s 时, 二级控制启动, 电压恢复启动, 响应较快, 电流分配比例保持相同且持续供载(图 8(b))。

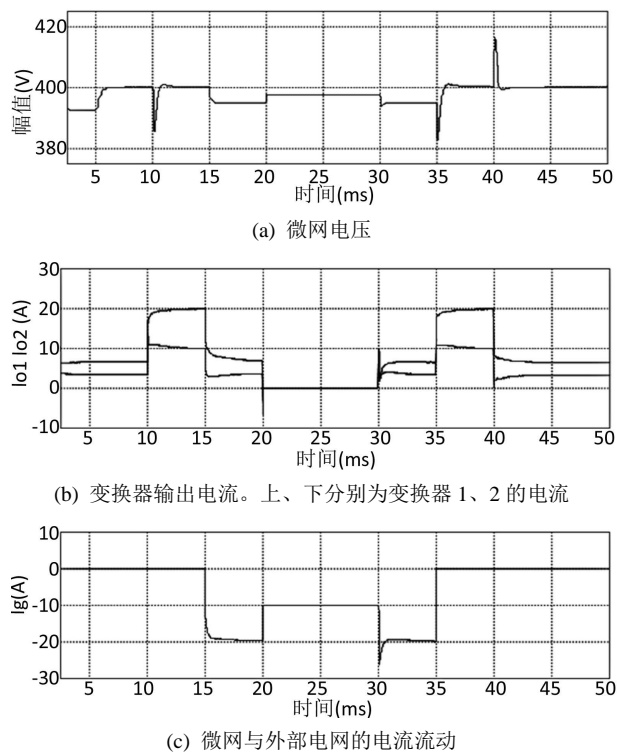
## 7. 结论

本文提出了包含三级控制的基于下垂控制的分层控制系统, 将此控制策略应用到直流微网, 补偿了



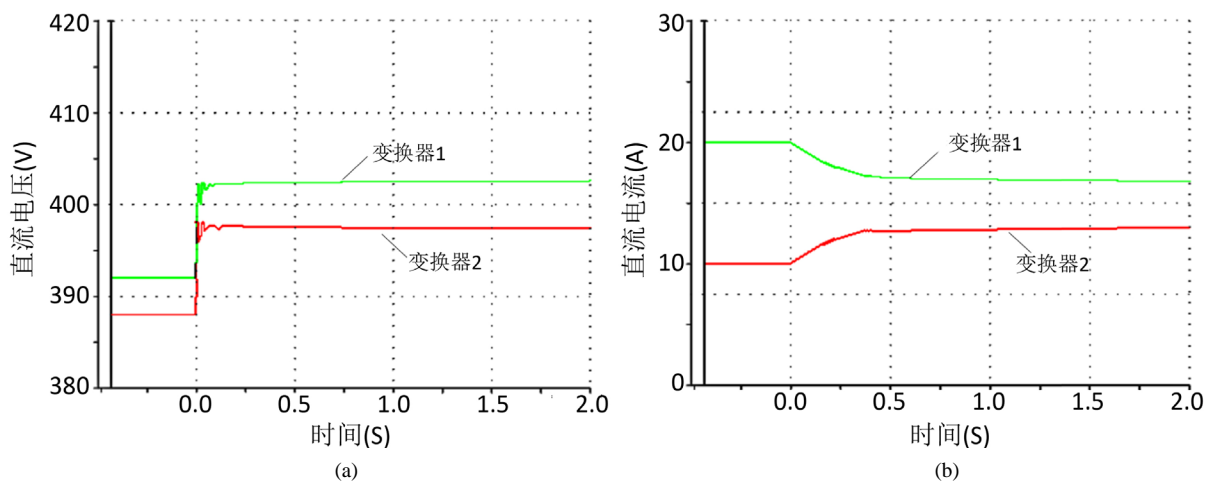
**Figure 6.** Behavior of the voltage and current of the DC microgrid in case 1

**图 6.** 情形 1 的 DC 微网电压电流状态



**Figure 7.** Behavior of the voltage and current of the DC microgrid in case 2

**图 7.** 情形 2 的 DC 微网电压电流状态



**Figure 8.** Transient response with load step (load changes from  $0.6 \Omega$  to  $1.1 \Omega$ ): (a) Voltage restore; (b) Current sharing

**图 8.** 暂态响应(负载在  $0.6 \Omega$  和  $1.1 \Omega$  变化): (a) 电压恢复; (b) 电流分配

由传统下垂控制带来的电压偏离, 解决了并联变换器无法同时实现较理想的电流分配与电压调节的难题。同时, 三级控制器的引出, 使微网更加灵活地控制与外部微网的能量交换。最后, 搭建了 dSPACE 平台, 且验证了在负载改变的情况下, 分层控制器能够保持良好的性能。

### 基金项目

国家自然科学基金(51407084)。



## 参考文献 (References)

- [1] Hatzigiorgiou, N., Asano, H., Iravani, R. and Marnay, C. (2007) Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, **5**, 78-94. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583>
- [2] Wang, X., Guerrero, J.M., Chen, Z. and Blaabjerg, F. (2010) Distributed Energy Resources in Grid Interactive AC Microgrids. *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Hefei, 16-18 June 2010, 806-812.
- [3] Sao, C.K. and Lehn, P.W. (2008) Control and Power Management of Converter Fed Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, **23**, 1088-1098. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.922232>
- [4] Laakson, H. and Kauhaniemi, K. (2009) Voltage and Current THD in Microgrid with Different DG Unit and Load Configurations. *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Prague, 8-11 June 2009, 1-4.
- [5] Huang, J.Y., Jiang, C.W. and Xu, R. (2008) A Review on Distributed Energy Resources and Microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 2474-2483. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.004>
- [6] Salomonsson, D., Soder, L. and Sannino, A. (2007) An Adaptive Control System for a DC Microgrid for Data Centers. *2nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE Industry Applications Conference*, **4**, 2414-2421.
- [7] Ito, Y., Zhongqing, Y. and Akaqi, H. (2004) DC Microgrid Based Distribution Power Generation System. *The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Xi'an, 14-16 August 2004, 1740-1745.
- [8] Viczel, P. (2007) Power Electronic Converters in DC Microgrid. *IEEE 5th Int. Compatibility in Power Electronics*, Piscataway, NJ, 29 May-1 June 2007, 1-6.
- [9] Kakigano, H., Miura, Y., Ise, T., *et al.* (2006) DC Microgrid for Super High Quality Distribution-System Configuration and Control of Distributed Generation and Energy Storage Devices. *37th IEEE PESC*, Korea, 18-22 June 2006, 1-7.
- [10] Brena, M., Tironi, E. and Ubezio, G. (2004) Proposal of a Local DC Distribution Network with Distributed Energy Resources. *11th International Conference on Harmonic and Quality of Power*, Piscataway, NJ, 12-15 September 2004, 397-402.
- [11] Liu, X., Wang, P. and Loh, P.C. (2011) A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **2**, 278-286. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2116162>
- [12] Kroposki, B., Basso, T. and DeBlasio, R. (2009) Microgrid Standards and Technologies. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, 20-24 July 2008, 1-4.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jee@hanspub.org](mailto:jee@hanspub.org)