

## 基于改进下垂控制的微网协调控制策略

苏虎, 曹炜, 孙静, 杨道培

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 微源间的无功环流是由其输出电压幅值的差异引起的。在深入分析并联运行微源间输出电压幅值差异与无功功率出力分配偏差关系的基础上, 将电压幅值反馈的控制策略引入到传统下垂控制中, 降低微源间输出电压的幅值差, 从而抑制无功环流的形成。仿真结果验证了该控制策略的可行性, 同时仿真结果还表明该策略可以有效提高微网运行的稳定性。最后将该控制策略应用到并网过程中, 仿真结果表明电压幅值反馈控制策略可以有效抑制并网过程中频率和电压的震荡。

**关键词:** 微电网; 下垂控制; 无功分配; 环流抑制; 同步并网控制

### Micro-grid coordinated control strategy based on improved droop control

SU Hu, CAO Wei, SUN Jing, YANG Dao-pe

(College of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Reactive circulation is determined by the output voltage amplitude difference between different micro-sources in the micro-grid. On the basis of in-depth analysis of the relationship of the output voltage amplitude difference and reactive power output deviation between parallel operation micro-sources, this paper introduces the feedforward amplitude of the voltage feedback control strategy into conventional droop control, to reduce the amplitude differences of the output voltage between the sources, thus to suppress the reactive power circulation. Simulation results show that the control strategy is feasible and can improve the stability of micro grid operation effectively. Finally simulation results show that the feedforward amplitude of the voltage feedback control strategy can effectively suppress the shock of frequency and voltage during grid synchronization.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A106).

**Key words:** micro-grid; droop control; reactive allocation; circulation suppression; grid synchronization control

中图分类号: TM723; TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)11-0092-07

## 0 引言

近年来, 分布式电源(DG)由于具有污染小、能源利用率高、稳定性好和控制灵活等特点, 受到国内外的广泛关注。微网既可以作为一个独立的系统满足用户侧需求, 又可以与大电网联网运行, 提高供电可靠性, 具有较强的灵活性和可调度性。

微网中并联运行的 DG, 多采用功率/下垂控制方式, 这种控制方式模拟发电机 P-f, Q-V 下垂特性, 所有 DG 同时参与电压和频率的调节, 不需要通信联络就可以实现 DG 之间的功率分配。但在低压微网中, 传统下垂控制由于受到线路阻抗的影响, 难以实现无功功率的合理分配<sup>[1-4]</sup>, 这会引起电压调节

存在一些不协调的问题, 主要表现为 DG 输出电压幅值存在差异。文献[5]指出并联 DG 之间无功环流主要由电压幅值差引起。较大的环流, 不仅增大了逆变器的负担, 还会额外消耗功率。文献[6]提出通过控制器参数设计使得 DG 之间输出阻抗呈 DG 额定容量的反比, 以实现无功合理分配, 但受到线路实际阻抗的影响, 该方法难以精确实现。文献[7]提出将负载侧电压幅值引入到下垂控制方案中, 以抑制无功功率的偏差, 但该方案中需要引入较大的无功下垂系数, 这会影响系统的稳定性。文献[8]提出在传统下垂控制基础上将线路电压叠加到空载电压上以抑制环流的产生, 该方法需要实时测量线路电压, 在线路较长的情况下, 具体实施起来较为困难。

孤网运行时, 微网的电压和频率可能会偏离主网, 直接重合并网开关可能会引起电压和频率的剧烈震荡<sup>[8]</sup>。文献[9]提出在并网过程中采用主从和对

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)  
(2011AA05A106)

等控制相结合的综合控制策略,该控制方式在并网过程中需要进行模式的切换,控制方式较为复杂,切换过程容易产生较大的震荡。

本文阐述了传统下垂控制中下垂系数与功率分配的关系;论述了无功功率分配出现偏差的原因,及这种偏差会导致并联运行的 DG 之间输出电压存在幅值差,并对传统下垂控制进行改进以降低 DG 之间输出电压的幅值差,以抑制环流;最后将该策略运用到同步并网中以抑制频率和电压的震荡。

## 1 下垂控制的原理

下垂控制的原理是 DG 在线路等效阻抗呈感性时,可以实现 P-f 和 Q-V 的解耦<sup>[10]</sup>,如图 1 所示,含有两个并联运行的下垂控制机组的微网简化模型。

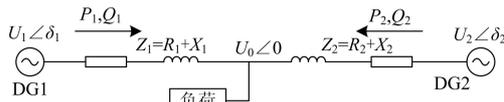


图1 两DG微网结构图

Fig. 1 Diagram of a microgrid with two DGs

图 1 中任意一个 DG,其 P/f, Q/V 下垂特性如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$f_i = f_{ni} - m_i (P - P_{ni}) \quad (1)$$

$$U_i = U_{ni} - n_i (Q - Q_{ni}) \quad (2)$$

在  $X_i \gg R_i$  情况下,输出的有功和无功如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_i U_0 \sin \delta_i}{X_i} \\ Q_i = \frac{U_i U_0 \cos \delta_i - U_0^2}{X_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f_i$  和  $U_i$  分别为 DG 输出电压的频率和幅值;  $P_i$  和  $Q_i$  分别为 DG 输出有功功率和无功功率;  $f_{ni}$ 、 $U_{ni}$ 、 $P_{ni}$ 、 $Q_{ni}$  分别为额定的频率、空载电压、有功功率和无功功率;  $m_i$  和  $n_i$  分别为有功和无功下垂系数;  $\delta_i$  很小,可近似为 0;  $R_i$  为线路电阻与 DG 内电阻的等效电阻;  $X_i$  为线路电抗与 DG 内电抗等效电抗。其中,  $i=1,2$ 。

## 2 孤岛运行模式下的协调控制策略

### 2.1 有功/频率协调控制策略的研究

微网中各个 DG 额定输出功率可能不同,下垂控制的 DG 按照其功率额定值比例决定其分担负荷的比例,这样分布式电源出力才更合理; DG 输出频率必须一致,由式 (1) 可知,在系统达到稳定后,

频率的减小量  $\Delta f$  必须相同。

对于图 1 中的 DG,在系统达到稳定后,需要满足式 (4) 和式 (5)。

$$P_{n1} / P_1 = P_{n2} / P_2 \quad (4)$$

$$\Delta f = m_1 (P_1 - P_{n1}) = m_2 (P_2 - P_{n2}) \quad (5)$$

由式 (4) 和式 (5) 可得式 (6)。

$$m_1 P_{n1} = m_2 P_{n2} \quad (6)$$

对于含  $n$  个下垂控制机组的微网,可得

$$m_1 P_{n1} = m_2 P_{n2} = \dots = m_i P_{ni} \quad (7)$$

因此,在 DG 额定功率既定情况下,若按照 DG 额定功率的反比取下垂系数,则有功输出可按 DG 额定功率的比例进行分配,并且有利于维持系统频率的稳定性。根据式 (5) 可知,有功下垂系数即为最大允许输出有功时对应的频率偏差与对应的输出有功功率和额定有功功率差之比。

## 2.2 电压协调控制策略的研究

### 2.2.1 电压协调控制存在的问题

与有功调节类似,无功功率分配按式 (8) 进行。

$$n_1 Q_{n1} = n_2 Q_{n2} = \dots = n_i Q_{ni} \quad (8)$$

与求取有功下垂系数类似,无功下垂系数即为最大允许输出无功时对应的电压幅值偏差与对应的输出无功功率和额定无功功率差之比。

但实际中, DG 无功出力难以按照无功下垂系数反比进行分配<sup>[11]</sup>。在低压微网中,线路阻抗比值较大,线路电阻不能忽略,有功功率和无功功率存在较强耦合<sup>[12]</sup>,下式为文献[7]推导出的 DG 输出无功功率公式 (9)。

$$Q_i = -\frac{R_i}{X_i} P_i + \frac{U_i^2 - U_i U_0 \cos \delta_i}{X_i} \quad (9)$$

由式 (9) 可知, DG 的无功分配由于电阻与电感比值较大会受到有功功率的影响,而且等效电抗  $X_i$  的不同也会影响无功功率的分配。

由于无功功率分配存在偏差,会引起并联运行 DG 之间电压幅值的差异。下边仍以图 1 中的微网为例来对其原因进行说明。

如果取  $n_1 = n_2$ ,按照式 (8) 的分配原则, DG 的无功输出应该是相同的,但实际受到线路阻抗的影响,输出无功功率  $Q_1$  与  $Q_2$  会存在偏差。若取相同空载电压  $u_n$ ,则 DG1 和 DG2 的 Q/V 下垂特性曲线是重合的,如图 2 所示,由于无功功率分配存在偏差, DG1 和 DG2 输出电压幅值  $u_1$  和  $u_2$  是不相同的。

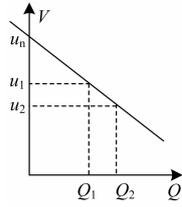


图2 DG输出电压幅值差异图

Fig. 2 Diagram of output voltage amplitude difference

由式(2)可知,无功功率分配偏差实际引起的是  $n_1Q_1$  与  $n_2Q_2$  不同,在取相同空载电压的情况下,  $n_1Q_1$  与  $n_2Q_2$  相差越大, DG 之间输出的电压幅值差就越大。电压幅值差是并联 DG 之间形成无功环流的主要原因,如果要降低并联运行的 DG 之间的无功环流就必须降低并联运行的 DG 之间输出电压幅值的差异。

### 2.2.2 改进下垂控制策略

为解决上述 DG 之间存在电压幅值差的问题,本文在传统下垂控制无功控制环节(如图 3 虚线框内所示)的基础上引入逆变器输出电压幅值反馈,如图 3 所示。

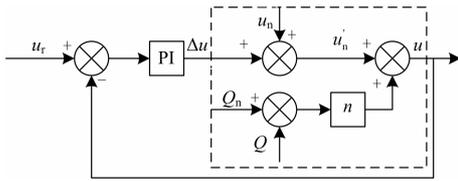


图3 电压幅值反馈控制图

Fig. 3 Diagram of feedback control of output voltage amplitude

将 DG 输出电压幅值与合理的电压给定值  $u_r$  比较后,经过 PI 调节器后,产生空载电压的补偿量  $\Delta u'$ ,使空载电压值  $u_n$  补偿为  $u_n'$ ,从而改变系统运行点,使得输出电压幅值  $u$  等于  $u_r$ 。

假设 PI 控制器比例积分参数分别为  $k_p$  和  $k_i$ ,上述控制方式输出电压幅值  $u$  如式(10)所示。

$$(u_r - u)(k_p + k_i/s) + u_n - n(Q - Q_n) = u \quad (10)$$

$$\text{则: } u = u_r - \frac{(u_r - u_n) + n(Q - Q_n)}{1 + k_p + k_i/s} \quad (11)$$

对式(11),若  $t \rightarrow \infty, s \rightarrow 0$ ,则  $u \rightarrow u_r$ ,在系统达到稳态时,输出电压幅值能够达到设定电压值,从而使得 DG 输出电压幅值变得可控。其控制原理如图 4 所示。

在未引入电压幅值反馈的情况下,系统处于运行点 C,无功下垂控制环节输出电压幅值为  $u$ ,加

入电压幅值反馈之后,无功下垂曲线向上平移(假定电压幅值  $u$  小于整定值  $u_r$ ),系统在 D 点达到稳定,输出电压幅值达到  $u_r$ 。

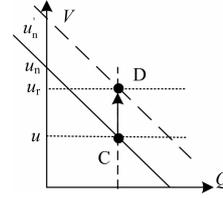


图4 电压幅值反馈控制原理

Fig. 4 Principle of feedback control of output voltage amplitude

若对多个 DG 采用相同控制方式,并根据负荷需求设置相同的  $u_r$ ,则 DG 输出电压幅值就能达到一致,从而大大降低 DG 间由于输出电压幅值不同而产生的无功环流。

### 2.2.3 改进下垂控制策略对系统稳定性的影响

分布式电源需要经过电力电子器件接入微网,因此其响应速度很快,系统受到一个很小扰动后,系统频率和电压可能在短时间发生较大的变化,严重影响系统的稳定性<sup>[13]</sup>。本文所采用的电压幅值反馈策略,使 DG 输出电压幅值在受到扰动后能够快速跟随给定电压值,增强电压的稳定性,有效降低电压幅值波动对系统稳定性造成的影响,提高系统的稳定性,同时由于 PI 调节器的作用,系统的动态性能能够得到提高(对系统稳定性改善效果可详见图 9 对比仿真)。

## 3 并网协调控制策略研究

在孤网运行向并网运行转化的过程中,需要快速实现孤网和大电网之间频率和电压的同步控制,以减少并网冲击<sup>[14-15]</sup>。本文所采用的并网控制方式如图 5 所示,在并网之前同时闭合 CB1 和 CB2,启动同步并网控制策略,使 PCC 两端的电压差、相位差逐渐减少到符合并网条件的范围内<sup>[16]</sup>,然后闭合 PCC 处的断路器,从而实现并网。控制方式如图 5 所示。

同步并网控制策略是利用公共点两端电压幅值差和相位差量经过 PI 调节器形成电压和频率的正反馈,分别对额定频率和额定空载电压进行补偿,产生下垂控制器频率和电压的参考值,改变 DG 运行点,使微网频率和电压与大电网同步。本文将电压幅值反馈控制策略引入到电压调节方式中(如图 5(b)所示),以降低在并网过程中,微电网频率和电压的震荡。

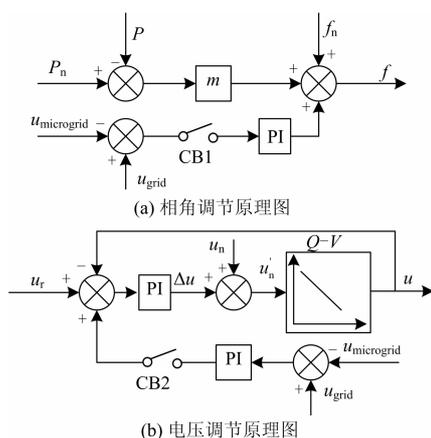


图5 同步并网控制图

Fig. 5 Principle of grid synchronization control

### 4 算例仿真

如图 6 微网简化模型所示, 该微网系统由两个分布式电源组成, 都采用下垂控制方式。在 Matlab/Simulink 平台上对所提出的改进下垂控制理论进行验证。其中算例 1 分析在引入改进下垂控制策略前后对微网在负荷变化时 DG 功率分配、输出电压幅值差以及稳定性方面的影响, 算例 2 分析同步并网过程中引入改进下垂控制策略对系统稳定性的影响。

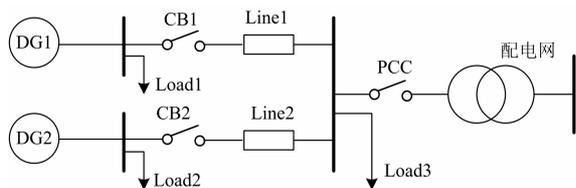


图6 微网简化结构图

Fig. 6 Simplified diagram of a microgrid

其中 DG 参数如表 1 所示。

表1 微网中DG参数

Table 1 Parameters of DGs

	DG1	DG2
$P_n$	40 kW	20 kW
$Q_n$	0	0
$P$ - $f$ 下垂系数 $m$	0.000 1	0.000 2
$Q$ - $V$ 下垂系数 $n$	0.001	0.001
额定频率 $f_n$	50 Hz	50 Hz
空载电压幅值 $u_n$	236 V	236 V

各个负荷情况: Load1: 20 kW+0 kvar, Load2: 20 kW+0 kvar, 正常情况下 Load3 为 35 kW+10 kvar。各线路参数: Line1: 0.314+j0.2 Ω,

Line2: 0.628+j0.4 Ω。

#### 算例分析1

Load3 在 0.2 s 时增加 5 kW, 在 0.6 s 时 Load3 减小 5 kW; 仿真时间为 0.9 s, 取 0.02~0.9 s 的波形图。采用传统下垂控制仿真波形如图 7 所示。

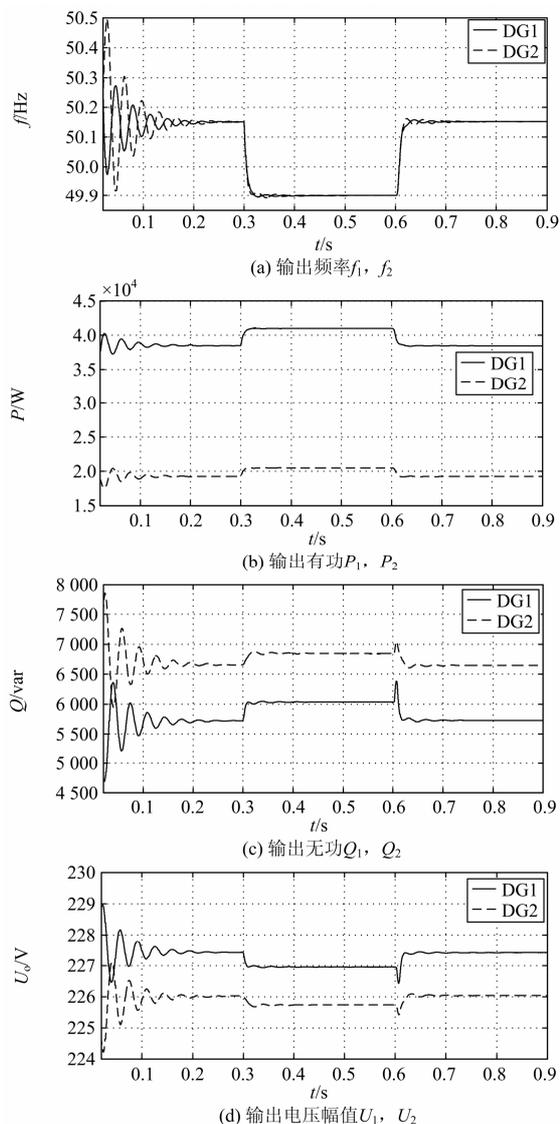


图 7 传统下垂控制下的仿真结果

Fig. 7 Simulation results under traditional droop control

由图 7 可知, 采用传统下垂控制方式, 在负荷变动前后, DG1 和 DG2 输出频率在稳定后都能够保持一致, 有功输出比值能够保持 2:1, 但是系统动态响应时间较长, 负荷改变时频率和电压幅值有一定的震荡; 无功功率分配存在一定的偏差, 不能够按 1:1 进行, 输出电压幅值存在一定差异。

下面采用改进的下垂控制策略, 给定输出电压值  $u_r=227$  V。仿真波形如图 8 所示。

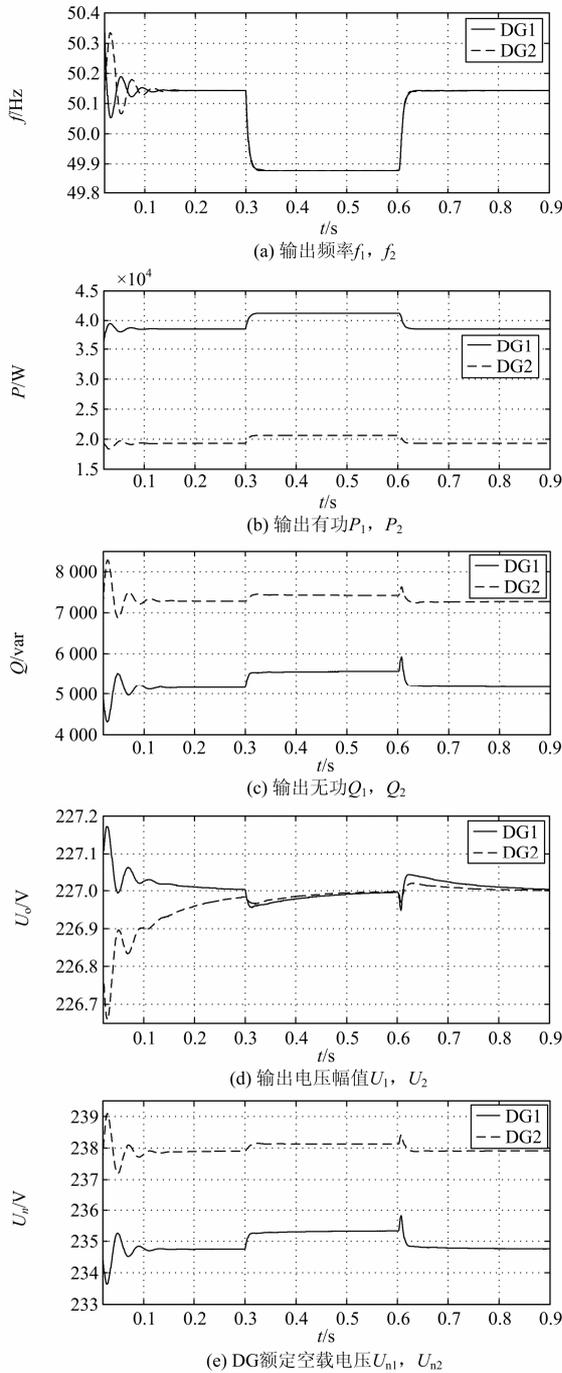


图 8 改进下垂控制下的仿真结果

Fig. 8 Simulation results under improved droop control

由图 8 可知，采用改进下垂控制方式，在负荷变动前后，DG1 和 DG2 输出频率在稳定后都能够保持一致，有功功率输出比值能够保持 2:1，而且频率和电压动态性能及稳定性得到提高，在负载变化时，频率和电压幅值震荡都很小；无功输出仍存在一定的偏差，但是 DG 输出电压幅值差很小，在负载变化时，DG 输出电压能够很快达到给定值；

从图 8 (e) 可知，通过对额定电压的补偿，DG1 额定空载电压到 238 V 左右，DG2 额定空载电压减小到 235 V 左右。

较大下垂系数可能会引起系统频率失稳<sup>[17]</sup>，下面将 DG 有功下垂系数增大 2 倍，其他条件不变，仿真时间 0.6 s，输出频率仿真如图 9 所示。

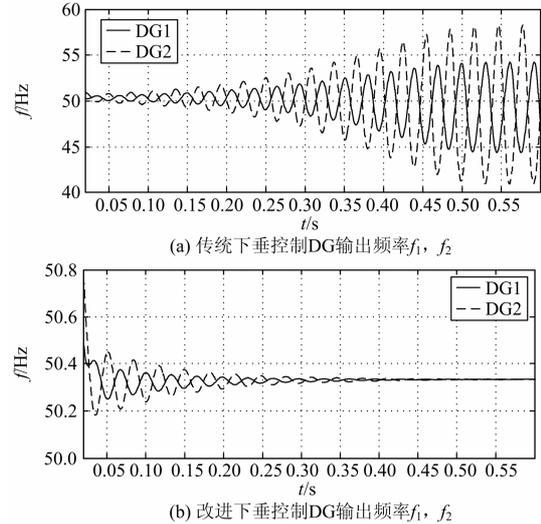


图 9 改进前后频率输出仿真

Fig. 9 Simulations of output frequency before/after improvement

由图 9 可知，采用传统下垂控制方式时 DG 输出频率已经失稳；而采用改进下垂控制方式后，频率最终稳定并达到一致。因此，电压幅值反馈控制策略能够提高系统的稳定性。

#### 算例仿真 2

在本算例中，Load3 为 30 kW+10 kvar，其他条件与算例 1 相同。微网 0 s 开始处于孤岛运行状态，0.2 s 时刻启动预同步控制器，在达到并网要求时，PCC 处断路器合闸。整个仿真过程如图 10 所示。

如图 10 所示，0.2 s 之前，DG 稳定情况下输出频率比大电网高 0.25 Hz 左右，PCC 两侧电压幅值差为 5.5 V 左右，在 0.2 s 启动预同步控制器，DG 有功出力 and 无功出力开始增加，同时 DG 输出频率降低，母线端电压幅值升高，经过 0.08 s，DG 输出频率与大电网差值缩减到 0.08 Hz 左右，PCC 两侧电压幅值降低到 1 V 左右，达到并网条件，PCC 处断路器合闸，合闸之后 DG 输出频率出现震荡，但震荡幅值不超过 0.2 Hz，电压幅值差出现 1 V 左右震荡，并很快减小为 0，大约在 0.45 s 左右，DG 输出频率达到 50 Hz，按额定功率输出有功功率，DG 输出无功则有所降低。

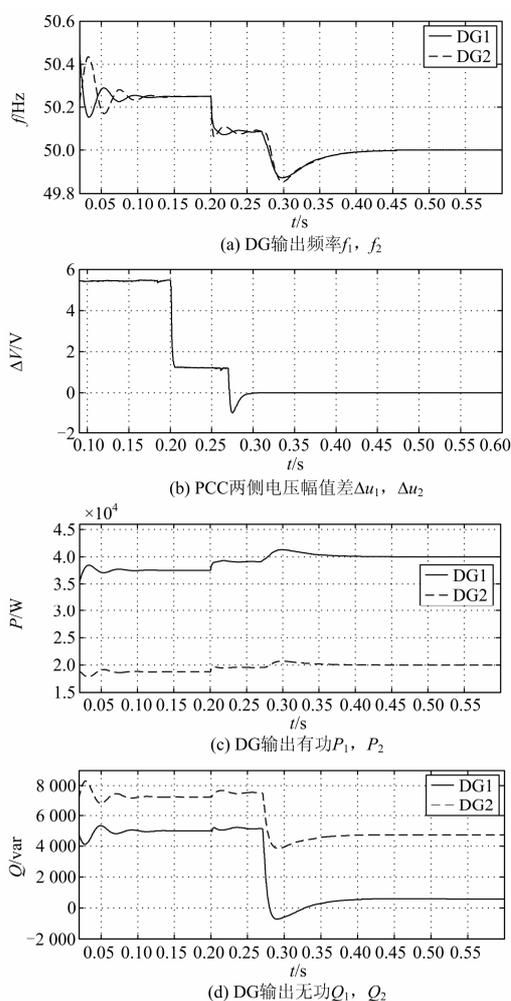


图10 同步并网控制仿真结果

Fig. 10 Simulation results of grid synchronization control

## 5 结论

并列运行的下垂控制机组, 由于线路阻抗的影响会导致无功功率不能进行合理分配, 进而导致 DG 之间输出电压幅值会存在差异, 从而导致无功环流的产生。本文在传统下垂控制的基础上对无功调压环节进行改进, 通过仿真可知该改进策略在不影响 DG 有功分配的同时, 可有效地降低 DG 之间输出的电压幅值差; 仿真还表明该方法可以提高系统频率和电压的稳定性及动态性能, 提高微网运行的电压质量。将该控制策略运用到微网同步并网过程中, 仿真结果表明, 该同步并网控制策略简单实用, 能够有效抑制在并网过程中电压和频率的震荡, 实现无缝切换。

## 参考文献

- [1] LI Yun-wei, KAO Ching-nan. An accurate power control strategy for inverter based distributed generation units operating in a low voltage microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [2] MOREIRA C L, RESENDE F O, LOPES J A P. Using low voltage microgrids for service restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 395-403.
- [3] LI Yun-wei, KAO Ching-nan. An accurate power control strategy for inverter based distributed generation units operating in a low voltage microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [4] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77-84.  
SUN Xiao-feng, Lü Qing-qiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77-84.
- [5] IYER S V, BELUR M N, CHANDORKAR M C. Analysis and mitigation of voltage offsets in multi-inverter microgrids[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2011, 26(1): 354-343.
- [6] 吕志鹏, 罗安, 蒋雯倩. 多逆变器环境微电网环流控制新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 40-47.  
Lü Zhi-peng, LUO An, JIANG Wen-qian. New circulation control method for micro-grid with multi-inverter micro-sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 40-47.
- [7] 艾欣, 金鹏, 孙英云. 一种改进的微电网无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 147-155.  
AI Xin, JIN Peng, SUN Ying-yun. An enhanced reactive sharing control strategy of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 147-155.
- [8] 张纯, 陈民轴, 王振存. 微网运行模式平滑切换的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 1-6.  
ZHANG Chun, CHEN Min-you, WANG Zhen-cun. Study on control scheme for smooth transition of micro-grid operation modes[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 1-6.
- [9] 赵冬梅, 张楠, 刘燕华. 基于储能的微网并网和孤岛运行模式平滑切换综合控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 301-306.  
ZHAO Dong-mei, ZHANG Nan, LIU Yan-hua. Synthetical control strategy for smooth switching between grid-connected and islanded operation modes of microgrid based on energy storage system[J]. Power

- System Technology, 2013, 37(2): 301-306.
- [10] 王成山, 高菲, 李鹏. 低压微网控制策略研究[J]. 电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.  
WANG Cheng-shan, GAO Fei, LI Peng. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [11] 谢玲玲, 时斌, 华国玉, 等. 基于改进下垂控制的分布式电源并联运行技术[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 992-998.  
XIE Ling-ling, SHI Bin, HUA Guo-yu, et al. Parallel operation technology of distributed generations based on improved droop control[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 992-998.
- [12] 程军照, 李澎森, 吴在军. 微电网下垂控制中虚拟电抗的功率解耦分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 27-32.  
CHENG Jun-zhao, LI Peng-sen, WU Zai-jun. Analysis of virtual reactance power decoupling in microgrid droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 27-32.
- [13] 杜威, 姜齐荣, 陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 26-36.  
DU Wei, JIANG Qi-rong, CHEN Jiao-rui. Virtual inertia frequency control strategy in microgrid power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 26-36.
- [14] 唐西胜, 邓卫, 齐智平. 基于储能的微网并网/离网无缝切换技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 279-284.  
TANG Xi-sheng, DENG Wei, QI Zhi-ping. Research on grid-connected/islanded seamless transition of microgrid based on energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 279-284.
- [15] 徐瑞林, 徐鑫, 郑永伟, 等. 基于改进下垂控制的微网运行控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 15-19.  
XU Rui-lin, XU Xin, ZHENG Yong-wei, et al. Improved droop control scheme for micro-grid operation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(6): 15-19.
- [16] 高晓芝, 李林川, 张蕾. 含电压源型逆变器和同步电机接口的微网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 145-150.  
GAO Xiao-zhi, LI Lin-chuan, ZHANG Lei. Microgrid control with voltage source inverter interface and synchronous generator interface[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 145-150.
- [17] 肖朝霞, 王成山, 王守相. 含多微型电源的微网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 81-85.  
XIAO Zhao-xia, WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Stability analysis of multiple micro-source in microgrids based on small-signal mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 81-85.

收稿日期: 2013-08-12; 修回日期: 2013-10-14

作者简介:

苏 虎 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术; E-mail: scyi2010@126.com

曹 炜 (1963-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制;

孙 静 (1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网控制。