

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.04.003

# 基于自适应虚拟阻抗的微电网无功均分控制

于惠钧, 龚星宇, 黄 星, 刘安海

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 在微电网多逆变器并联系统中, 由于微电网各逆变器之间存在输出阻抗和馈线阻抗不匹配现象, 采用传统的下垂控制方法难以根据下垂系数合理地进行无功分配, 同时还会产生无功环流问题。为提高无功均衡的精度, 提出了一种基于自适应虚拟阻抗控制的控制策略。该方法在固定虚拟阻抗的基础上增加了积分环节, 结合了改进的无功功率需求值来自适应调节分布式电源单元, 最终补偿馈线阻抗失配, 从而精确均分无功功率。此控制策略不仅无需提前预知馈线阻抗值, 而且不需要通讯平台的参与, 可在结构复杂的微电网中应用。研究表明: 提出的虚拟阻抗无功均分控制方法相比于传统虚拟阻抗方法, 其自适应能力和无功均衡性能更佳。

**关键词:** 微电网; 下垂控制; 虚拟阻抗; 无功均分

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2020)04-0016-06

**引文格式:** 于惠钧, 龚星宇, 黄 星, 等. 基于自适应虚拟阻抗的微电网无功均分控制 [J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(4): 16-21.

## Reactive Power Sharing Control Method Based on Adaptive Virtual Impedance

YU Huijun, GONG Xingyu, HUANG Xing, LIU Anhai

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In the multi-inverter parallel system of micro-grid, due to the mismatch between output impedance and feeder impedance between inverters in micro-grid, it is difficult to realize a rational reactive power distribution according to the sag coefficient by using the traditional droop control method, with even the problem of reactive power circulation to be generated. For an improvement of the accuracy of reactive power balance, a control strategy based on adaptive virtual impedance control has thus been proposed. With an integral link added on the basis of a fixed virtual impedance, the proposed method combines the improved reactive power demand value from the adaptively adjusted Distributed Generation (DG) unit, and compensates the impedance mismatch of the feeder, thus accurately dividing the reactive power evenly. Free of the dependence on the prediction of the impedance of feeders in advance, as well as on the participation of communication platform, this control strategy is applicable in the microgrid with complex structure. The results show that the proposed method is characterized with a better adaptive ability and reactive power balance than the traditional ones.

**Keywords:** microgrid; droop control; virtual impedance; reactive power sharing

收稿日期: 2020-01-11

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2019JJ60055)

作者简介: 于惠钧 (1975-), 男, 河南驻马店人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力电子系统控制技术方面的教学与研究, E-mail: arejunyu@foxmail.com

## 0 引言

近年来, 微电网凭借着多样化的供能模式以及弹性的控制方式, 逐渐成为国内外炙手可热的研究焦点<sup>[1-2]</sup>。在微电网孤岛运行时, 通过调节电压幅值和频率来实现功率均分。传统的下垂控制方法中, 由于系统线路的频率一致, 其各自的有功功率可以实现均衡分配。而无功输出则由于馈线阻抗的不匹配, 不能参照常规下垂系数进行合理分配, 从而在各分布式电源 (distributed generation, DG) 间产生无功环流, 对电能质量和系统的稳定性有很大的影响。因此, 如何实现各 DG 间的无功均分是微电网在运行中首先需要解决的问题。

为了实现无功功率均分, 国内外学者进行了一系列研究。文献 [3] 从补偿线路阻抗不匹配角度设计了一个馈线压降在线估计器, 将其实时估计的电压并入功率控制方案中, 以实现孤岛运行时微电网中的无功均分的精确控制。其不足之处在于为了正确地估计电压降, 微电网在孤岛运行之前应先运行于并网状态。文献 [4] 通过在线路中注入谐波, 以预先获取线路间的阻抗不匹配信息, 但该方法引入的谐波会使得微电网电能质量降低。在下垂控制中, 功率

耦合的现象可以通过引入一定的虚拟阻抗来实现解耦消除, 同时提高无功均分的精度。文献 [5-6] 为调节微源输出阻抗, 利用虚拟阻抗方法, 从电压闭环指令中减掉虚拟阻抗两端的压降。该方式有效降低了线路的阻抗性对输出功率的影响, 不足之处在于微源输出端会出现电压降落的问题。文献 [7] 通过引入适当的虚拟阻抗值, 设计 DG 的等效单元阻抗与其额定值成反比来消除无功功率分配误差。然而虚拟阻抗的控制方法是基于物理馈线已知的情况下, 通常情况下不易获得。

为解决由于馈线阻抗不匹配引起的无功不均分问题, 本研究将自适应虚拟阻抗控制方法应用于孤岛微电网中的 DG 单元, 通过通信实现 DG 单元与微电网中央控制器 (microgrid central controller, MGCC) 之间的信息交换, 并利用 MGCC 自适应调节虚拟阻抗, 补偿馈线阻抗的失配。一旦针对给定负载操作点调节虚拟阻抗, 就可以实现无功功率均分。

## 1 微电网传统下垂控制方法

### 1.1 微电网的结构

图 1 为微电网结构图。

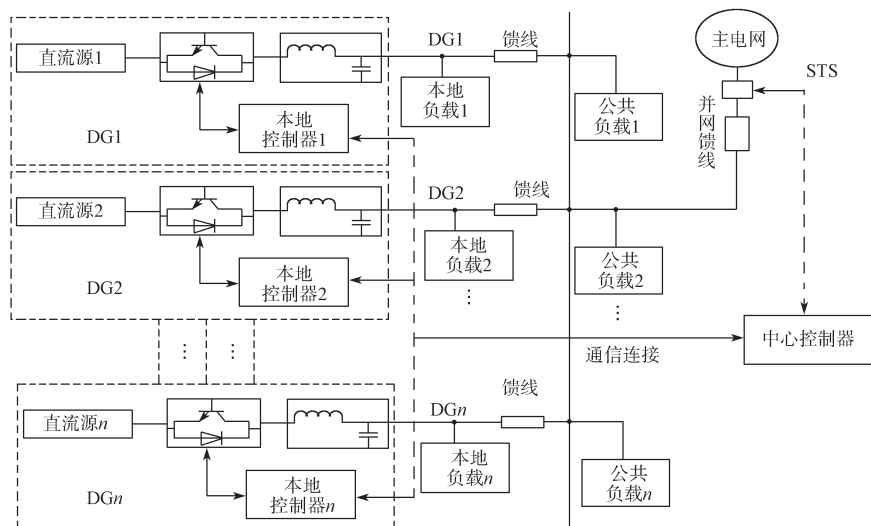


图 1 微电网结构

Fig.1 Schematic illustration of the microgrid

图 1 中, 微电网由多个 DG 单元和负载组成<sup>[7]</sup>。每个 DG 单元由直流链路、逆变器和 LC 滤波器构成, 并通过相应接口和馈线接至公共母线上。MGCC 通过控制公共耦合点 (point of common coupling, PCC) 处的静态传输开关来监测微电网和主电网状态, 以确定微电网是运行在并网模式还是孤岛模式, 并保证微电网并网和孤网间的平滑切换。MGCC 和 DG 单元通过低带宽通信链路交换所需信息。在并网

运行过程中, 各 DG 单元的有功功率和无功功率参考值通常由中央控制器分配, 其均分性能可通过简单的 PI 调节器即可实现。当微电网切换到孤岛运行时, 微电网的电压和频率由逆变器控制, 此时, 微电网内所有负荷的需求必须由这些 DG 单元共同分担。

### 1.2 传统下垂控制策略

在低压配电网中, 每个 DG 单元通过馈线连接到微电网总线。孤岛运行时微电网的简化结构 (两台

DG) 如图 2 所示。

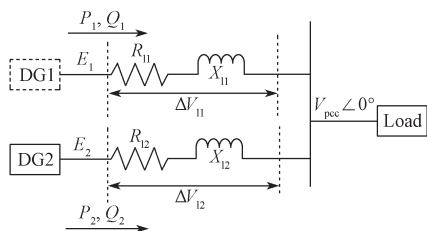


图 2 含有两台 DG 的微电网简化模型

Fig. 2 Simplified model of the microgrid with two DGs

在图 2 中, 流过分布式电源 DG 的有功功率和无功功率可表示为

$$P_i = \frac{R_{li}(E_i V_{pcc} \cos \delta_i - V_{pcc}^2) + X_{li} E_i V_{pcc} \sin \delta_i}{R_{li}^2 + X_{li}^2}, \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{X_{li}(E_i V_{pcc} \cos \delta_i - V_{pcc}^2) - R_{li} E_i V_{pcc} \sin \delta_i}{R_{li}^2 + X_{li}^2}. \quad (2)$$

式 (1) (2) 中:  $E_i$  为第  $i$  个分布式电源的输出电压幅值;  $V_{pcc}$  为公共母线的交流电压幅值;  $\delta_i$  为功角;  $R_{li}$ 、 $X_{li}$  分别为线路的电阻和电抗。

当线路阻抗主要呈现为感性时, 有  $X \gg R$ 。此时, 电阻可以忽略不计, 功角  $\delta_i$  通常较小, 即有  $\sin \delta_i \approx \delta_i$ ,  $\cos \delta_i \approx 1$ , 则式 (1) (2) 可表达如下:

$$P_i = E_i V_{pcc} \delta_i / X_{li}, \quad (3)$$

$$Q_i = (E_i V_{pcc} - V_{pcc}^2) / X_{li}. \quad (4)$$

由式 (3) (4) 可以知道, 有功输出  $P$  值和无功  $Q$  值分别取决于功角  $\delta$  和电压差, 且均成正比<sup>[7]</sup>。同时, 有功功率和无功功率均与线路阻抗  $X_{li}$  成反比。传统的  $P-\omega$  下垂控制表达式如下:

$$\omega_i = \omega_0 - mP, \quad (5)$$

$$m = \Delta\omega / P_{i\max}. \quad (6)$$

式 (5) (6) 中:  $\omega_0$  和  $\omega_i$  分别为第  $i$  个 DG 单元的额定角频率和参考角频率;  $m$  为频率的下垂系数;  $\Delta\omega$  为逆变器所允许的最大频率偏差;  $P$  和  $P_{i\max}$  分别为第  $i$  个 DG 单元的实际和最大实际输出功率。

同理, 传统的  $Q-E$  下垂表达式如下:

$$E_i = E_0 - nQ, \quad (7)$$

$$n = \Delta E / Q_{i\max}. \quad (8)$$

式 (7) (8) 中:  $E_0$  和  $E$  分别为 DG 单元的额定电压幅值和参考电压幅值;  $\Delta E$  为逆变器允许的最大电压偏差;  $n$  为电压幅度的下垂系数;  $Q$  和  $Q_{i\max}$  分别为第  $i$  个 DG 单元的实际和最大无功功率输出。

图 3 为有功功率 - 频率之间的关系图。

从图 3 中可以看出, 在相同频率和电压幅度下, 较大容量的 DG 单元由于其较小的下垂斜率而提供更

多的功率。当系统运行在稳定状态时, 由于各个 DG 单元均工作于同一频率下, 各分布式单元总能通过  $P-\omega$  下垂控制实现精确的有功功率均分。然而, 由于受到馈线阻抗不能匹配以及各端口对应的网络端口差异较大的影响, 各 DG 单元的电压幅值难以统一, 导致无功功率不能通过  $Q-V$  下垂控制进行合理分配, 达到均分的目的。

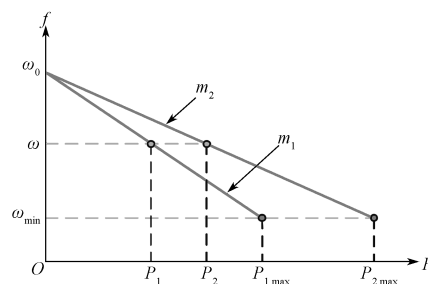


图 3 有功功率 - 频率之间的关系图

Fig. 3  $P-f$  droop control diagram

## 2 微电网的传统下垂控制方法

### 2.1 虚拟阻抗

图 4 所示为串联虚拟阻抗的等效图。一般情况下, 逆变器的无功功率均分误差值  $Q_{error}$  比较大, 故引入虚拟阻抗来调节等效 DG 单元阻抗, 以消除受馈线阻抗影响的无功功率误差。

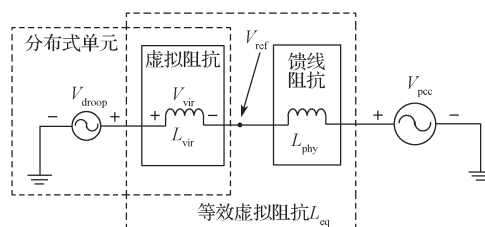


图 4 串联虚拟阻抗控制等效图

Fig. 4 Equivalent of series virtual impedance control

图 4 中, 逆变器的瞬时电压基准  $V_{droop}$  可以通过式 (5) 和 (7) 中导出的角频率和电压幅值得出:

$$V_{droop} = E_i \sin \left( \int \omega_i dt \right). \quad (9)$$

等效虚拟阻抗由 DG 单元控制的虚拟阻抗  $L_{vir}$  和本地馈线阻抗  $L_{phy}$  串联形成:

$$L_{eq} = L_{phy} + L_{vir}. \quad (10)$$

由虚拟阻抗计算出虚拟阻抗压降为

$$V_{vir} = -\omega L_{vir} I_{line\beta}, \quad (11)$$

式中  $I_{line\beta}$  为通过将馈线电流  $I_{line}$  延迟  $1/4$  基本周期的电流。

因此可以得出电压控制回路中的电压参考值为

$$V_{ref} = V_{droop} - V_{vir}. \quad (12)$$

### 2.2 自适应虚拟阻抗

常规虚拟阻抗方法通常被应用于系统的物理馈线已知的前提下, 但由于微电网的结构多样, 故在应用时必须对系统的馈线阻抗进行在线估计, 这会导

致控制器的控制算法复杂, 难度加大。针对该问题, 课题组提出一种无需任何馈线阻抗信息的虚拟阻抗无功均分控制策略。

图 5 为自适应虚拟阻抗控制逆变器结构框图。

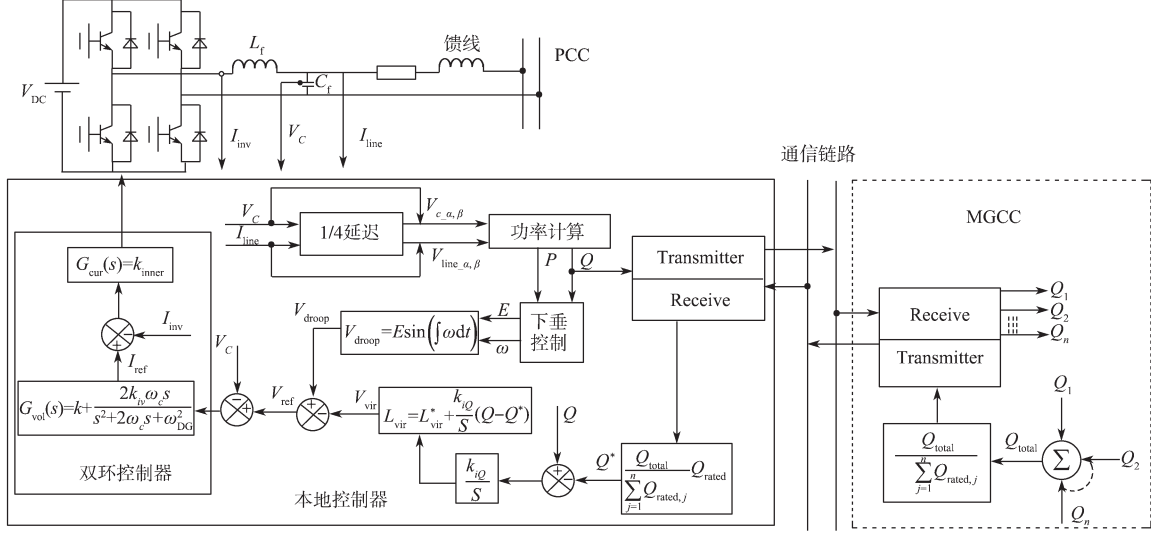


图 5 自适应虚拟阻抗控制逆变器结构图

Fig. 5 Structural diagram of adaptive virtual impedance control inverters

如图所示 5, 逆变器向微网控制器 MGCC 发送各 DG 单元的无功功率输出 ( $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ ) 信息。微网控制器接收到各无功功率信息后, 确定微电网逆变器的总额定无功功率。最后将其反馈回所有逆变器中, 每个逆变器根据所接受到的总额定无功功率来确定各自的无功需求 ( $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_n^*$ )。因此, 每个逆变器的无功功率需求可表示为

$$Q^* = \frac{Q_{total}}{\sum_{j=1}^n Q_{rated,j}} Q_{rated} \quad (13)$$

式中:  $Q_{rated}$  为逆变器的总额定无功功率;  $Q_{total}$  为微网逆变器接收到的所有逆变器的无功功率之和;  $Q^*$  为每个 DG 单元的无功需求。

本研究在固定的虚拟电感  $L_{vir}^*$  的基础上引入了积分环节来调节图 4 所示的 DG 虚拟阻抗。在此之前需要先获取无功功率  $Q$  和无功功率需求  $Q^*$  的值, 并取其之间的差值来自适应地调节 DG 单元  $L_{vir}$  的虚拟阻抗, 具体表示为

$$L_{vir} = L_{vir}^* + \frac{k_{iQ}}{s} (Q - Q^*) \quad (14)$$

式中:  $L_{vir}^*$  为固定虚拟电感;  $k_{iQ}$  为调整虚拟电感的积分增益。

当电网中负载发生变化时, 虚拟阻抗值会自己根

据变化值进行相应的改变, 让无功功率均分误差控制在小的范围内。

### 3 仿真实验与分析

课题组在 Matlab/Simulink 软件平台上搭建了如图 6 所示的含有两台 DG 的微电网微结构仿真模型, 以验证所提出的虚拟阻抗无功均分控制策略的正确性和有效性。

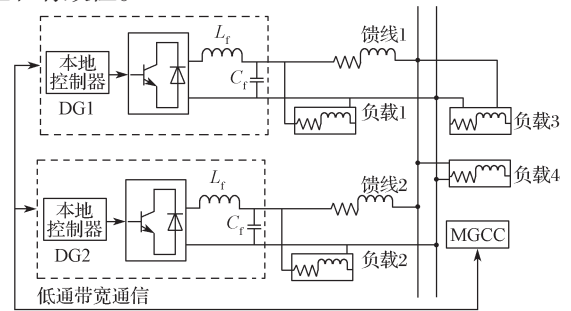


图 6 含两台 DG 单元的微电网控制结构图

Fig. 6 Microgrid control diagram with two DG units

图 6 中微电网模型由两台容量相同的 DG 单元和几个线性负载组成, 由馈线将其连接, 并联接入 PCC 再接入大电网。仿真中使用的各 DG 单元的控制参数如表 1 所示。MGCC 通过低带宽通信与 DG 本地控制器交换所需信息。在额定功率一定的情况下, 两台 DG 机组平均分担负荷的无功和有功需求。

表 1 仿真模型的参数

Table 1 Parameters of the simulation model

参数	取值	参数	取值
$U_{DC}/V$	620	LC滤波器(L/C)	4.5 mH/3.3 $\mu$ F
Feeder1(R/L)	0.2 $\Omega$ /3.0 mH	Feeder2(R/L)	0.2 $\Omega$ /1.5 mH
$U_{rate}/V$	110	f/Hz	50
$L_{vir}^*/mH$	1	$m/(rad \cdot s^{-1})$	0.001 5
$k_{iQ}$	0.000 05	$n/(V \cdot Var^{-1})$	0.001 5
Load1(R/L)	20 $\Omega$ /30 mH	Load3(R/L)	1 $\Omega$ /30 mH
Load2(R/L)	20 $\Omega$ /30 mH	Load4(R/L)	20 $\Omega$ /30 mH

3.1 传统下垂控制仿真分析

采用传统下垂控制方法的两台相同容量的 DG 单元并联运行，仿真结果如图 7 所示。由图可知微网开始运行时，假定负载 1 和 2 处于断开状态，仅负载 3 接入 PCC 处。当  $t=4$  s 时，接入负载 4 至 PCC 处实现阶跃负载变化。在  $t=7$  s 时，DG2 的本地负载（负载 2）连接到系统，此时保持 DG1 的本地负载（负载 1）仍处于断开状态。在此操作后，两个 DG 单元的有功功率出现了短暂的抖动，但很快又趋于一致，实现均分。即两个 DG 单元的线路阻抗不匹配情况下，常规下垂方法控制的有功功率需求可在两个 DG 单元间精确共享。然而，由于失配馈线阻抗的影响，无功功率共享显示出非常差的性能。尤其是当局部负载发生作用后，无功功率分配不均的现象更加严重。

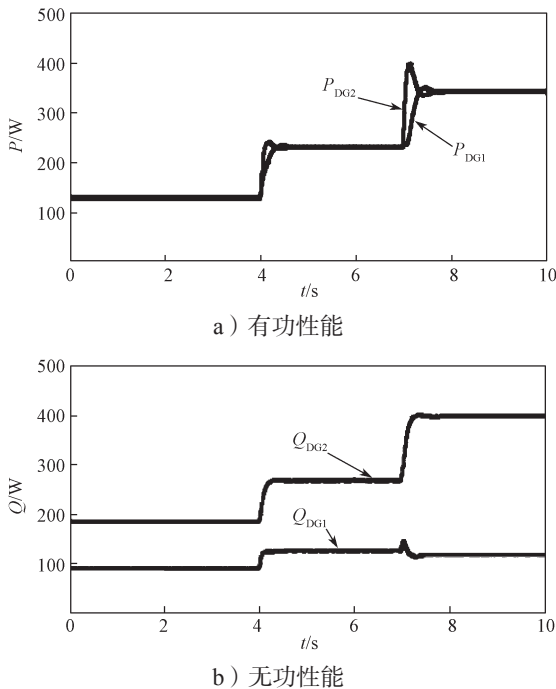


图 7 传统下垂控制的微电网功率性能

Fig. 7 Conventional droop control power performance in microgrid

3.2 采用虚拟阻抗无功均分控制仿真分析

在两台相同容量的逆变器并联运行过程中，采

用本文改进的虚拟阻抗控制无功功率均分策略，仿真过程如下：0~1 s 采用传统控制方法；1~9 s 内采用改进的虚拟阻抗控制方法去补偿传统控制方法中的误差。其中，在  $t=4$  s 时加入负载 4 至 PCC 接口以研究当馈线阻抗发生变化时所采取的控制策略对无功功率的分配情况。在  $t=7$  s 时，保持负载 1 仍然连接至 DG1，突增本地 DG2 的局部负载 2 来研究所提出的控制策略对存在局部负载的情况下的有效性。图 8 为采用虚拟阻抗法的下垂控制的功率性能曲线。

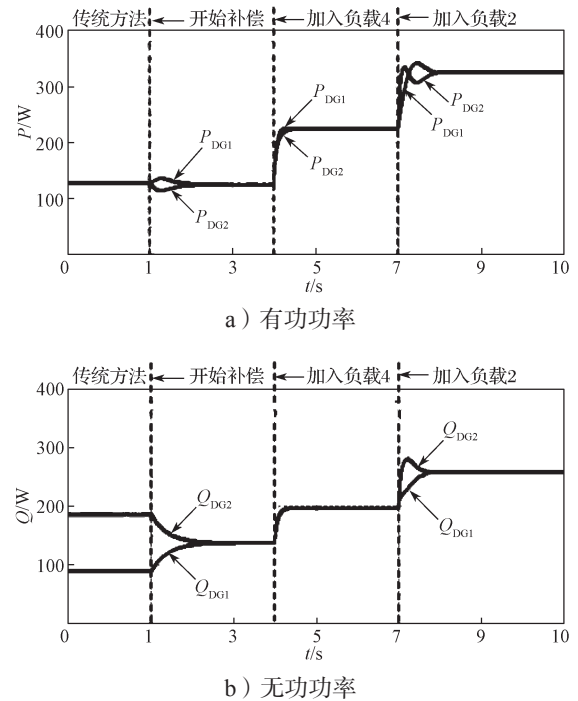


图 8 采用虚拟阻抗法下垂控制的电网功率性能

Fig. 8 Power performance of droop control method with virtual impedance method adopted

由图 8a 可知，所提出的虚拟阻抗无功均分控制方案对于 DG 单元之间的有功功率均分仅引起小的瞬态变化，在  $t=1\sim 2$  s 时采取所提出的控制策略，引起了小的瞬态变化，但很快就恢复了均分。当  $t=7$  s 时，有功功率持续大约 0.5 s 的波动，传统下垂控制方法出现了超调，恢复时间较长，所提出的虚拟阻抗无功均分控制方法同样出现了超调，但是恢复时间较快，系统更加稳定，有功均分更好。

由图 8b 可知，在  $t=0\sim 1$  s 内的传统下垂控制方法中，无功均分性能较差，在  $t=1$  s 时采取所提出的控制策略，两 DG 间的无功偏差开始进行补偿，并在  $t=2$  s 时达到均分效果。在突增馈线阻抗负载 4 后，无功分配也未受到影响，继续保持均分。当  $t=7$  s 时，单独对 DG2 加入本地局部负载 2，此时无功功率持续大约 0.5 s 的波动，传统下垂控制方法出现了超调，而所提出的虚拟阻抗无功均分控制方法则是平滑稳

定地上升, 最终在 0.5 s 后实现均分。这一结果表明, 即使负载发生变化或者施加局部负载, 经过 1.5 s 的暂态持续时间之后, 两 DG 单元的无功功率也是均衡分配的, 无功均分误差几乎为 0。由以上分析可知, 所提出的虚拟阻抗无功均分控制方法相对于传统下垂控制方法而言, 稳定性更好, 无功均衡性能更佳。

## 4 结语

本文在传统的下垂控制上提出了改进的自适应虚拟阻抗的方法来实现同等容量 DG 间的无功功率分配<sup>[8-10]</sup>。1) 精确地实现了分布式微源的无功均分, 仅利用本地信息进行控制, 无需各微源间的信息传输, 保证了微电网即插即用的特性。2) 无需提前在线估计或测量馈线阻抗值, 降低了系统的复杂度和成本。3) 该控制策略对微电网的结构要求较低, 可适用于复杂的阻抗网络中。本策略利用低带宽通信来获取各微源的无功功率信息, 通过调整 DG 单元输出端的虚拟阻抗, 即使馈线阻抗或者局部阻抗不匹配, 也能实现精确的无功功率均分。最后通过仿真验证了该控制策略的可行性和有效性。

### 参考文献:

- [1] 黄宜平, 马晓轩. 微电网技术综述 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 320-328.  
HUANG Yiping, MA Xiaoxuan. Research on Microgrid Technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 320-328.
- [2] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3089-3097.  
CHEN Jie, CHEN Xin, FENG Zhiyang, et al. A Control Strategy of Seamless Transfer Between Grid-Connected and Islanding Operation for Microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3089-3097.
- [3] LI Y W, KAO C. An Accurate Power Control Strategy for Inverter Based Distributed Generation Units Operating in a Low Voltage Microgrid[C]//2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose: IEEE, 2009: DOI:10.1109/ECCE.2009.5316306.
- [4] LI Y, LI Y W. Power Management of Inverter Interfaced Autonomous Microgrid Based on Virtual Frequency-Voltage Frame[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 30-40.
- [5] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids: A General Approach Toward Standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [6] 李圣清, 李静萍. 基于“虚拟复阻抗”的低压微网下垂控制策略 [J]. 电气自动化, 2018, 40(5): 73-76.  
LI Shengqing, LI Jingping. Droop Control Strategy for the Low-Voltage Micro-Grid Based on Virtual Complex Impedance[J]. Electrical Automation, 2018, 40(5): 73-76.
- [7] HE J W, LI Y W, GUERRERO J M, et al. An Islanding Microgrid Power Sharing Approach Using Enhanced Virtual Impedance Control Scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5272-5282.
- [8] 刘磊, 杨燕翔, 王军, 等. 微电网中基于公共负荷侧电压的改进下垂控制 [J]. 电测与仪表, 2018, 55(15): 91-97.  
LIU Lei, YANG Yanxiang, WANG Jun, et al. Improved Droop Control Based on Common Load Side Voltage in Micro-Grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(15): 91-97.
- [9] 翟盼盼, 苟军年, 杨剑锋. 基于自适应下垂法的有功功率均分控制 [J]. 电测与仪表, 2019, 56(10): 105-110.  
ZHAI Panpan, GOU Junnian, YANG Jianfeng. Active Power Sharing Control Based on Adaptive Droop Method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(10): 105-110.
- [10] 裴淑曼, 张军. 基于自适应虚拟阻抗的微电网控制策略研究 [J]. 电测与仪表, 2018, 55(12): 82-87.  
PEI Shuman, ZHANG Jun. Research on Control Strategy of Micro-Grid Based on Adaptive Virtual Impedance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(12): 82-87.

(责任编辑: 申剑)