

DOI: 10.7667/PSPC162039

# 用于多微源低压微电网的虚拟阻抗反下垂控制

麦倩屏, 陈鸣

(中山大学太阳能系统研究所, 广东省光伏技术重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:** 针对含有多个不同额定容量微源的低压微电网系统, 其负荷功率按微源容量比例进行分配的性能对系统的稳定及高效运行十分重要。反下垂控制策略因受微电网线路阻抗不平衡的影响存在有功功率分配误差问题, 应用虚拟阻抗可抑制这种误差, 但传统的虚拟阻抗方法会导致较大的电压跌落。因此, 提出一种引入虚拟阻抗的新型反下垂控制方法, 在实现功率按容量比例分配的同时保证电压和频率的稳定控制。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建含有六个具体微源的低压微电网系统进行孤岛/并网模式下多工况的仿真分析, 较为全面地验证了该控制策略的有效性。

**关键词:** 低压微电网; 反下垂控制; 线路阻抗; 功率分配; 虚拟阻抗

## P-V/Q-f droop control strategy with virtual impedance for low-voltage microgrid with multiple micro sources

MAI Qianping, CHEN Ming

(Institute of Solar Energy System, Guangdong Provincial Key Laboratory of Photovoltaic Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The performance of load power distribution according to the proportion of DGs' capacities to is very critical for the stability and high efficiency of the low-voltage microgrid system with multiple micro sources in different rated capacities. Due to the unbalanced line impedances, P-V/Q-f droop control strategy always has active power sharing issues. The application of virtual impedance method can reduce this power sharing error, while it may lead to great voltage drop. As a result, an improved P-V/Q-f droop control strategy based on the introduction of virtual impedance is proposed to achieve a reasonable sharing of power according to DGs' capacities and ensure the control stability of the voltage and frequency at the same time. Finally, a low-voltage microgrid system with six specific micro sources is constructed in PSCAD/EMTDC platform, where the simulation and analysis under various operating conditions and in island/grid-connected mode are carried out. The simulation results verify the effectiveness of the control strategy comprehensively.

**Key words:** low-voltage microgrid; P-V/Q-f droop control; line impedance; power distribution; virtual impedance

## 0 引言

微电网是指由多种分布式电源、储能系统、能量转换装置、负荷及监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统。微电网对内是一个能够实现自我控制、保护和管理的独立自治系统, 对外可作为一个整体通过公共连接点(PCC)接入到电网系统, 依据电网系统和用户负荷的需求运行在孤岛、并网两种模式下<sup>[1-2]</sup>。

对等控制, 顾名思义, 各微源(DG)不分主从, 具有相同的控制地位。每个微源都能依靠接入电网系统点的就地信息执行控制, 无需依赖通信设备<sup>[3]</sup>。各微源通常采用下垂控制(Droop control)方法, 能自动分担负荷和能源的随机波动, 在微电网运行模式切换时也无需更换控制方法, 实现“即插即用”的功能<sup>[4]</sup>。传统的下垂控制方法利用有功-频率(P-f)特性曲线和无功-电压(Q-V)特性曲线来模拟大电网中同步电机的外特性<sup>[5]</sup>, 让微源根据各自的下垂曲线调整输出电压的幅值和频率, 从而实现功率的合理分配。

文献[6-7]在传统下垂控制的基础上引入虚拟阻抗以实现较好的功率解耦控制, 但文中没有考虑虚拟阻抗对输出电压产生跌落的影响, 也没有解决线路阻抗不平衡时无功功率分配不均的问题。针对传统虚拟阻抗法引起电压跌落较大的缺点, 文献[8]引入了一种虚拟负阻抗使总输出阻抗呈纯感性, 抵消系统阻抗中的阻性成分, 抑制系统环流。但文中并没有体现出输出电压质量和功率分配精度的提高。文献[9]采用动态虚拟阻抗, 使其随负载电流和电压降落变化从而改善电能质量, 但忽略了线路阻抗不平衡的情况。针对传统下垂控制存在的无功均衡问题, 文献[10]提出一种基于全局无功均衡误差最小化思想的虚拟阻抗优化方法, 但文中误差函数的优化计算较为繁杂, 且没有考虑虚拟阻抗对输出电压的影响。文献[11]通过电压粗调和微调环节的配合来适应负荷功率变化, 从而实现功率均分以及较好的电能质量, 但文章没有考虑逆变器额定容量不同的情况。

低压微电网中线路阻抗主要呈阻性<sup>[12]</sup>, 采用反下垂控制更为合适。该方法利用了线路阻抗呈阻性时有功-电压(P-V)和无功-频率(Q-f)的下垂特性<sup>[13]</sup>, 与传统下垂控制十分类似, 易于实施, 且具有损耗小、频率变化小等优势<sup>[14]</sup>。同样, 反下垂控制在线路阻抗不平衡时也存在有功功率均衡问题<sup>[15]</sup>。文献[16]在反下垂控制基础上引入虚拟阻抗使总输出阻抗与逆变器额定容量相匹配来改善功率分配, 但需要通过修正下垂特性曲线来减小虚拟阻抗对输出电压的影响。

针对含有多个不同额定容量微源的低压微电网系统, 在线路阻抗不平衡的情况下实现负荷功率按容量比例分配的同时保证一定的输出电能质量, 本文提出了一种引入虚拟阻抗的新型反下垂控制方法。在反下垂控制的基础上引入了母线电压幅值反馈补偿项, 该反馈项本质上也是一种虚拟阻抗方法且能保证电能质量。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建微电网系统, 仿真分析并验证了所提控制方法的有效性。

## 1 反下垂控制方法

### 1.1 反下垂控制原理

多微源并联运行等效电路如图 1 所示。其中微源逆变器可等效为带内阻的电压源,  $V_i$  和  $\phi_i$  为逆变器输出电压的幅值和相角; 将微源的等效输出阻抗和微源与 PCC 点间的线路阻抗合并为等效阻抗  $Z_i \angle \theta_i$ ;  $V_{PCC}$  和  $\phi_L$  为 PCC 电压的幅值和相角, 它与

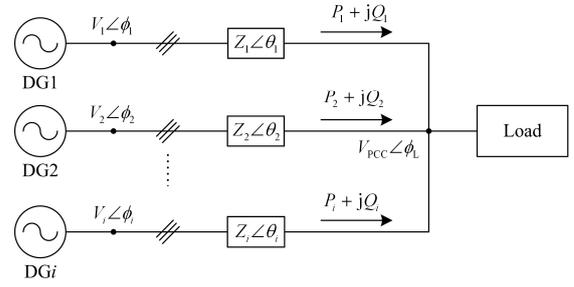


图 1 多微源并联运行等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of multiple distributed generations parallel operation

逆变器输出电压的相位差为  $\phi = \phi_i - \phi_L$ ;  $P_i$  和  $Q_i$  为各微源注入到 PCC 处的有功功率和无功功率, 其表达式为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} P_i = \frac{V_i \cdot V_{PCC}}{Z_i} \cos(\theta_i - \phi) - \frac{V_{PCC}^2}{Z_i} \cos \theta_i \\ Q_i = \frac{V_i \cdot V_{PCC}}{Z_i} \sin(\theta_i - \phi) - \frac{V_{PCC}^2}{Z_i} \sin \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

低压微电网中线路阻抗主要呈阻性, 即  $Z_i \approx R_i$ ,  $\theta_i \approx 0^\circ$ 。相位差  $\phi$  通常较小, 即有  $\sin \phi \approx \phi$  和  $\cos \phi \approx 1$  的近似。因此, 式(1)可简化为式(2)。

$$\begin{cases} P_i \approx \frac{V_{PCC}}{Z_i} (V_i - V_{PCC}) \\ Q_i \approx -\frac{V_i V_{PCC}}{Z_i} \phi \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)的关系可知, 微源可通过调节电压幅值  $V_i$  来调节有功功率  $P_i$ , 通过调节电压相角  $\phi$  来调节无功功率  $Q_i$ , 从而实现功率的解耦控制。这种解耦控制方式与传统的 P- $\phi$ /Q-V 下垂控制恰好相反, 所以称为反下垂控制。另外, 由于相角  $\phi$  不易于测量与控制, 通常使用频率  $f$  来调节无功功率(因为  $f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$ )。因此, 反下垂控制方程可表示为式(3),

其中  $f_i^*$ 、 $V_i^*$ 、 $P_i^*$ 、 $Q_i^*$  分别为微源的额定频率、额定电压幅值、额定有功和无功功率;  $k_{pi}$  和  $k_{qi}$  分别为有功-幅值下垂系数和无功-频率下垂系数。

$$\begin{cases} f_i - f_i^* = k_{qi} \cdot (Q_i - Q_i^*) \\ V_i - V_i^* = -k_{pi} \cdot (P_i - P_i^*) \end{cases} \quad (3)$$

对于反下垂控制方程式(3), 当每个微源设定相同的  $f_i^*$ 、 $V_i^*$ 、 $k_{qi} \cdot Q_i^*$  值和  $k_{pi} \cdot P_i^*$  值时, 由于系统稳定后各逆变器工作频率  $f_i$  一致, 所以有

$k_{qi} \cdot Q_i = c$  (常数), 于是可实现式(4), 即实现无功功率的按容量分配。

$$\frac{Q_1}{Q_1^*} = \frac{Q_2}{Q_2^*} = \dots = \frac{Q_i}{Q_i^*} \quad (4)$$

但是由于微源到 PCC 的线路距离各不相同, 即线路阻抗(用  $R_{li} + jX_{li}$  表示)所产生的电压降  $\Delta V$  不平衡, 所以系统稳定后各逆变器的输出电压  $V_i$  不尽相同, 导致有功功率无法实现精准的按容分配。为了解决这一问题, 需要对反下垂控制进行改进, 添加母线电压幅值的反馈补偿环节。

### 1.2 反下垂控制器结构

改进后的反下垂控制框图如图 2 所示。就地采集各微源的输出电压、电流信号( $u_{out,abc}$  和  $i_{out,abc}$ ), 计算得到实际输出功率  $P_i$  和  $Q_i$ , 代入到反下垂控制方程式(3)中, 并引入母线电压幅值的反馈补偿项得到电压和频率的参考值, 转变为对输出电压和工作频率的控制。所以反下垂控制在本质上也算是一种 V/f 控制。而实现 V/f 控制的系统结构框图如图 3 所示。V/f 控制也是根据就地采集信号进行控制, 使得输出电压和频率跟随参考值。

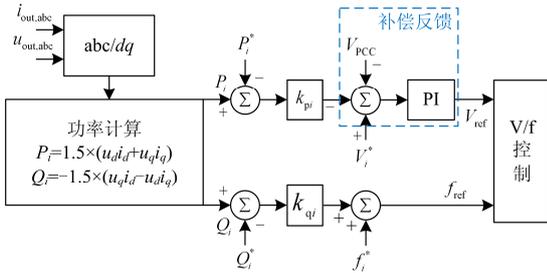


图 2 添加补偿反馈的反下垂控制框图

Fig. 2 Block diagram of improved P-V/Q-f droop control

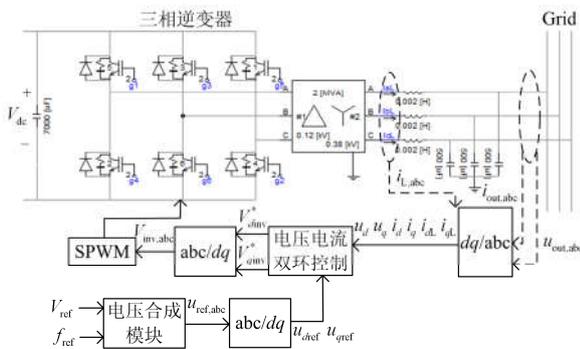


图 3 V/f 控制的系统结构框图

Fig. 3 Structure of V/f control

传统的虚拟阻抗方法采用的是线电流乘以虚拟阻抗值作为反馈项, 而此处采用的是母线电压幅值的补偿反馈项。在补偿反馈环节中, 通过 PI 控制

器调节可得式(5), 从而实现有功功率的按容分配, 解决了线路阻抗不平衡带来的有功功率分配问题。

$$k_{pi} \cdot P_i = V_i^* + k_{pi} \cdot P_i^* - V_{PCC} = c \text{ (常数)} \quad (5)$$

式中,  $V_{PCC}$  并非就地可采集信号, 为了避免使用互联线和通信设备, 可通过  $V_{PCC} = V_i - \Delta V$  求得。  $\Delta V$  为线路阻抗所产生的电压降, 忽略其纵分量  $\frac{P_i X_{li} - Q_i R_{li}}{V_i^*}$  (其值通常很小), 可用其横分量表示:

$$\Delta V \approx \frac{P_i R_{li} + Q_i X_{li}}{V_i^*} \quad (6)$$

## 2 多微源微电网系统结构及参数

对于微电网控制策略的仿真研究, 一般会用两个逆变电源等效具体的微源, 且逆变电源的容量通常选取相同值。这样的仿真系统过于理想简单化, 与实际不太相符。在实际的应用中, 微电网系统包含多个种类不同、容量各异的微源, 微源之间的控制需要相互协调才能使系统整体运行稳定。所以本文搭建了一个如图 4 所示的含六个微源且容量各异的低压微电网系统。系统中的各项参数见表 1。

表 1 微电网系统模型参数

Table 1 Model parameters of microgrid system

交流	额定线电压为 380 V, 相电压为 220 V
母线	额定工作频率为 50 Hz
光伏微源	PV1: 容量 4 kW PV2: 容量 5 kW PV3: 容量 6 kW
蓄电池微源	BT1: 容量 7 kWh(120 V 58.4 Ah) BT2: 容量 8 kWh(120 V 66.7 Ah) BT3: 容量 9 kWh(120 V 75.0 Ah)
线路阻抗	380 V: $R_l=0.642 \Omega/\text{km}$ , $X_l=0.083 \Omega/\text{km}$ 10 kV: $R_l=0.06 \Omega/\text{km}$ , $X_l=0.191 \Omega/\text{km}$
负荷	LOAD1: $P=10 \text{ kW}$ , $\cos \phi = 0.90$ (感性) LOAD2: $P=10 \text{ kW}$ , $\cos \phi = 0.85$ (感性) LOAD3: $P=10 \text{ kW}$ , $\cos \phi = 0.92$ (感性)

本文选取了具有能源间歇性的光伏发电装置和能源较为稳定的蓄电池作为微源。各微源均采用双级式并网方式, 光伏电池连接的 DC/DC 变换器采用 MPPT 控制方法, 蓄电池连接的 DC/DC 变换器采用恒压控制方法。又因为我们要研究的是对等控制策略, 所以全部微源的 DC/AC 逆变器在孤岛/并网运行模式下均采用所提的反下垂控制方法。反下垂控制所需设定的具体参数见表 2。为了验证所提控制方法能够解决线路阻抗不平衡带来的功率分配问题, 各微源与 PCC 之间的线长取不同值。

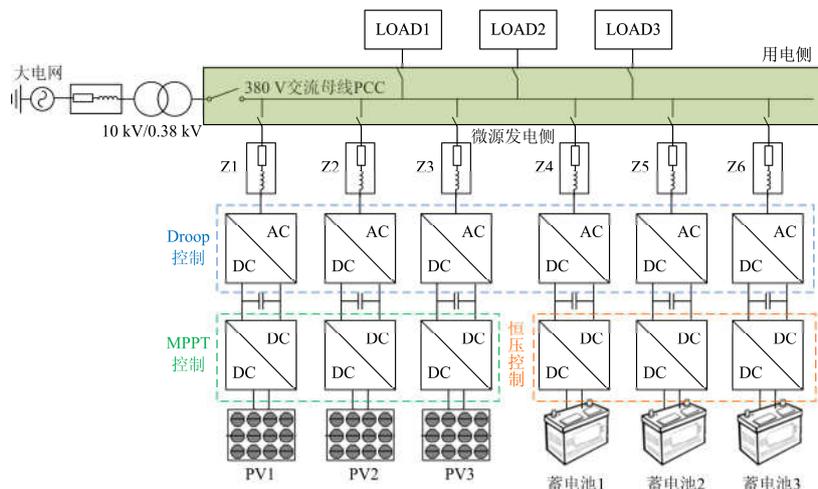


图4 多微源微电网系统结构

Fig. 4 System structure of microgrid with multiple micro sources

表2 各个微源的 Droop 控制设定参数

Table 2 Droop control parameters of each DG

微源	容量比例	$P_i^*$ / kW	$k_{p_i}$ / (kV/kW)	$Q_i^*$ / kvar	$k_{q_i}$ / (Hz/kvar)	线路长度 / km
PV1	4	2.051	0.0024	1.132	0.006	0.6
PV2	5	2.564	0.001 92	1.415	0.0048	2.0
PV3	6	3.077	0.0016	1.698	0.004	1.2
BT1	7	3.590	0.001 37	1.982	0.003 43	0.8
BT2	8	4.103	0.0012	2.265	0.003	1.6
BT3	9	4.615	0.001 067	2.548	0.002 67	1.0
额定功率总额	$P=20$ kW, $Q=11.04$ kvar (即为 LOAD1 和 LOAD2 总和)					
$V_i^*$ 和 $f_i^*$	380 V、50 Hz					

### 3 仿真与分析

在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建如图 4 所示的多微源低压微电网系统, 通过在多种工况下的仿真分析, 验证所提反下垂控制方法的有效性。

其中仿真步长为  $20 \mu\text{s}$ 。需要说明的是, 每种工况/条件下光伏微源所需承担的负荷功率均未超过其最大输出功率。

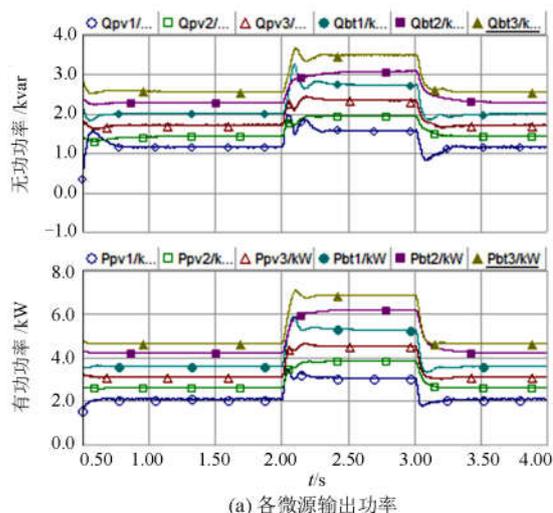
#### 3.1 孤岛模式下负荷变化的仿真与对比

孤岛模式下微电网从大电网中断离, 微电网独立运行, 需要由微源跟踪负荷的变化自动参与输出功率的按容量分配, 提供电压和频率的支撑。

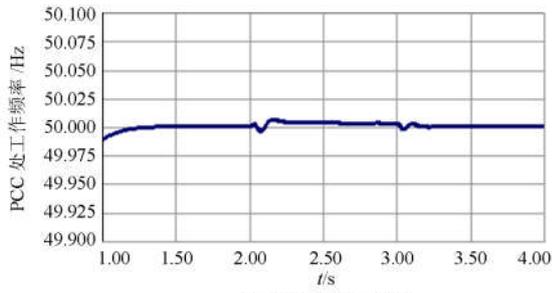
分别采用本文中的改进反下垂控制方法和文献[16]中的传统虚拟阻抗方法进行仿真对比。仿真过程如下: 0~2 s 内只有负荷 LOAD1 和 LOAD2 投入运行, 2 s 时添加负荷 LOAD3, 3 s 时切除负荷

LOAD3, 总仿真时长为 4 s。

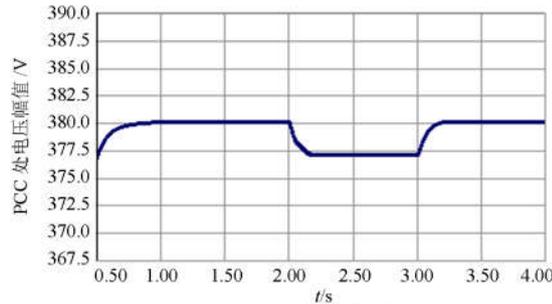
两种方法下的仿真结果如图 5 和图 6 所示。对比两图可以发现: 1) 采用改进反下垂控制方法时, 微源共同承担负荷的变化, 其有功功率和无功功率均能按所设定的容量比例 4:5:6:7:8:9 输出, 不受线路长度不平衡的影响。而采用传统虚拟阻抗方法时, 无功基本能按容量比例输出, 但有功的输出比例不符合容量比例。2) 两种方法下频率、电压幅值与负荷功率之间的变化规律都符合反下垂控制方程(式(3)), 负荷功率增加时频率有所上升而电压幅值有所下降, 负荷减少时情况相反。3) 采用传统虚拟阻抗方法时的工作频率比改进反下垂控制的波动大, 二者均在合理的变化范围内。4) 由于虚拟阻抗带来的额外压降, PCC 处电压幅值远小于额定值, 需要通过修正下垂特性曲线来抬升电压。而改进反下垂控制下电压幅值能满足电能质量的要求。



(a) 各微源输出功率



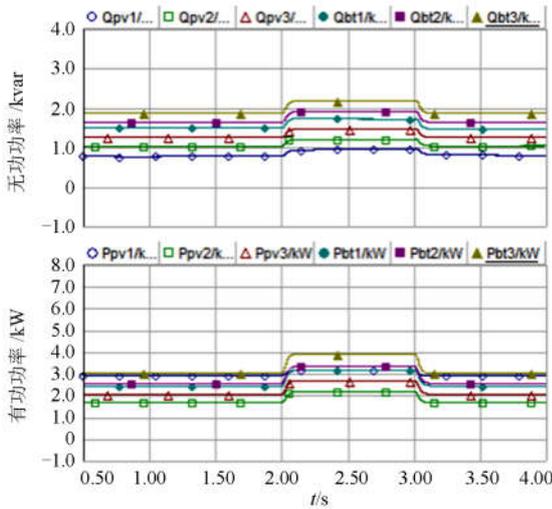
(b)PCC 处工作频率



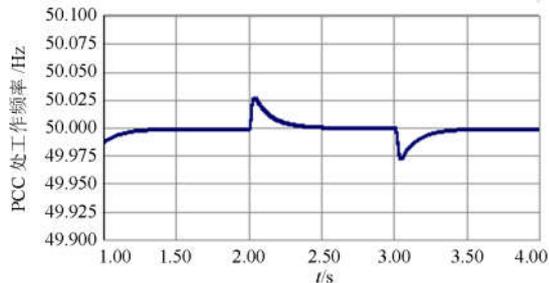
(c) PCC 处电压幅值

图 5 孤岛模式下负荷变化的仿真结果(采用改进反下垂)

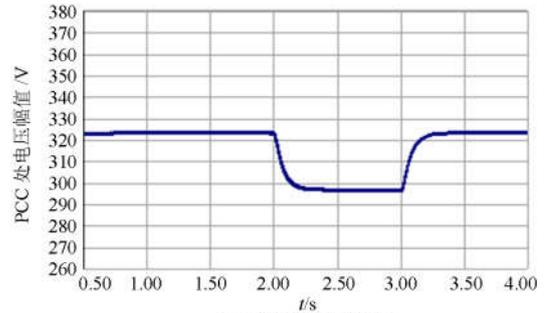
Fig. 5 Simulation results of loads changes in the islanding mode (under improved droop control method)



(a) 各微源输出功率



(b)PCC 处工作频率



(c) PCC 处电压幅值

图 6 孤岛模式下负荷变化的仿真结果(采用传统虚拟阻抗)  
Fig. 6 Simulation results of loads changes in the islanding mode (under traditional virtual impedance method)

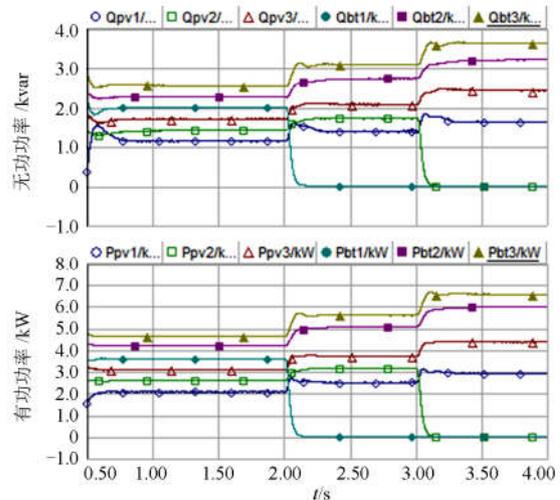
仿真结果表明改进反下垂控制方法在负荷变化条件下的有效性。较传统的虚拟阻抗方法而言,改进的控制方法能在线路阻抗不平衡的情况下实现负荷功率按容量比例分配,同时保证一定的电能质量和频率稳定。

### 3.2 孤岛模式下微源退出的仿真

当光伏微源受到外界因素影响无法正常工作时和蓄电池放电完全后,都需要从微电网中退出以防影响整体运行。研究该工况下改进反下垂控制的运行情况即为以下仿真内容。

仿真过程如下:0~2 s 内六个微源全部投入运行,2 s 时蓄电池 BT1 微源退出,3 s 时光伏电池 PV2 微源退出,总仿真时长为 4 s。

仿真结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,当有微源退出时,它本该承担的功率部分会分摊到剩余微源上,剩余微源按原设定容量比例重新分配输出功率。由图 7(b)、图 7(c)可知,频率、电压幅值与负荷功率之间的变化规律仍符合反下垂控制方程,频率和电压幅值的变化范围仍满足电能质量的要求。



(a) 各微源输出功率

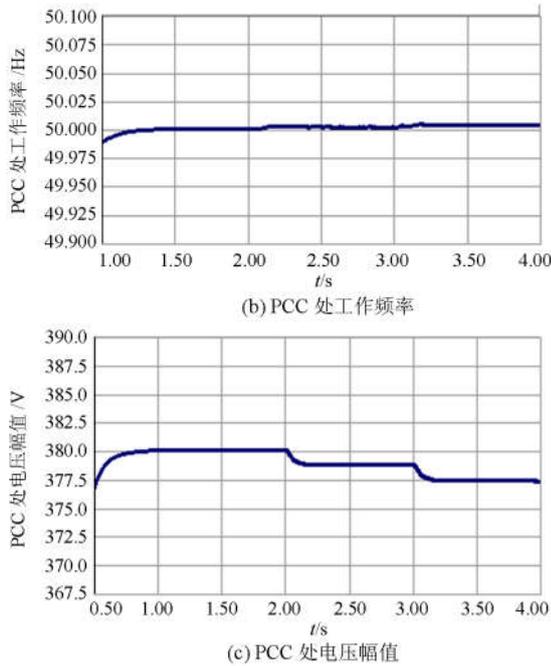


图 7 孤岛模式下切除微源的仿真结果(采用改进反下垂)  
Fig. 7 Simulation results of DGs excision in the islanding mode (under improved droop control method)

仿真结果表明, 改进反下垂控制方法允许微源的中途退出而不影响整体的正常运行。反映了对等控制策略具有“即插即用”的功能。

### 3.3 并网模式下的仿真

并网模式下大电网提供电压和频率的支撑, 承担系统的功率变化; 微电网作为辅助单元, 通过协调控制所辖微源满足一定的供电需求。

为了方便研究, 此处将负荷变化、微源退出和光强变化放在同一并网仿真过程中: 0~1 s 为并网前的预处理, 1 s 时并网; 0~2.5 s 内光照强度为 1000 W/m<sup>2</sup>、负荷 LOAD1 和 LOAD2 投入运行, 2.5 s 时光照强度降低为 800 W/m<sup>2</sup>; 3 s 时添加负荷 LOAD3; 4 s 时切除负荷 LOAD3; 4.5 s 时切除蓄电池 BT1 和光伏电池 PV2。总仿真时长为 5.5 s。

仿真结果如图 8 所示。图 8(a)结果表明, 除了退出的微源输出功率降为零外, 其他微源在并网运行模式下均工作在额定功率附近, 不受光照强度和负荷变化的影响。图 8(b)结果表明, 当微电网输出功率满足负荷需求时大电网输出功率为零, 而负荷变化和微源退出引起的功率波动均由大电网承担。

仿真结果表明改进反下垂控制方法在并网模式下的有效性, 能保证各微源的输出功率按给定运行计划(设定的额定功率)进行, 分担一定的功率输出, 超出计划的部分才由大电网承担, 减轻了大电网的功率负担。

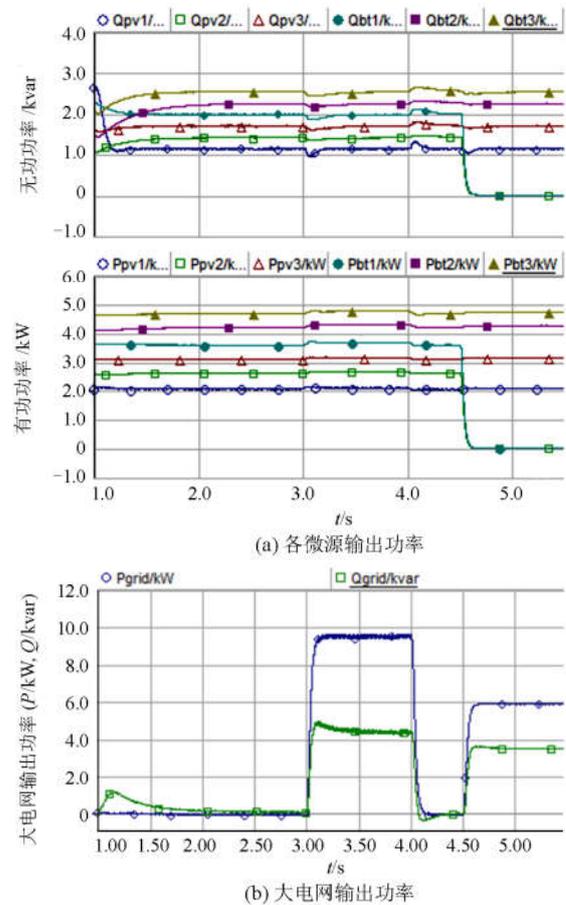


图 8 并网模式下改进反下垂控制的仿真结果  
Fig. 8 Simulation results from the grid-connected mode under improved droop control method

## 4 结论与展望

针对含有多个不同额定容量微源的低压微电网系统, 本文提出了一种引入虚拟阻抗的新型反下垂控制方法。在反下垂控制的基础上引入了母线电压幅值反馈补偿项, 解决了因线路阻抗不平衡而造成的有功功率按比例分配问题, 同时保证电压和频率的稳定控制。仿真分析验证了本文提出的控制策略在孤岛模式(负荷变化、微源退出)和并网模式下均具有一定的可靠性。

但反下垂控制本质上是一种有差控制方法, 仍需要二次及以上调压调频来实现电压和频率的稳定, 这是进一步的研究任务。

### 参考文献

[1] 赵波. 微电网优化配置关键技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
[2] 薛媛媛. 微电网的综合控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.  
XUE Yuanyuan. The research of microgrid comprehensive

- control strategy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [3] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, (1): 56-62. DOI 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [4] 苏剑. 分布式电源与微电网并网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [5] 李浩然, 杨旭红, 冯成臣. 多逆变器并联下的输出阻抗分析和改进下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 29-35.
- LI Haoran, YANG Xuhong, FENG Chengchen. Control strategy research of output impedance analysis and improved droop control based on multiple-inverters parallel[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 29-35.
- [6] SU J, ZHENG J, CUI D, et al. An integrated control strategy adopting droop control with virtual inductance in microgrid[J]. Engineering, 2013, 5(1): 44-49.
- [7] 王林川, 魏建, 孙志龙. 基于虚拟阻抗的微网下垂解耦改进控制策略研究[J]. 电气开关, 2017(1): 41-44.
- WANG Linchuan, WEI Jian, SUN Zhilong. Research on droop decoupling control strategy of microgrid based on virtual impedance[J]. Electric Switchgear, 2017(1): 41-44.
- [8] JIN L, HE Z, ZHANG Y, et al. A new virtual impedance method for parallel inverters with droop control[C] // Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016 IEEE: IEEE, 2016: 1-4.
- [9] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.
- YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.
- [10] 朱一听, 卓放, 王丰, 等. 用于微电网无功均衡控制的虚拟阻抗优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4552-4563.
- ZHU Yixin, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. Virtual impedance optimization method for microgrid reactive power sharing control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4552-4563.
- [11] 徐玉琴, 马焕均. 基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 103-107.
- XU Yuqin, MA Huanjun. Parallel operation technology of inverters based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 103-107.
- [12] LAAKSONEN H, SAARI P, KOMULAINEN R. Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid[C] // Future Power Systems, 2005 International Conference on: IEEE, 2005: 6.
- [13] LAAKSONEN H, SAARI P, KOMULAINEN R. Control of voltage and frequency in inverter and synchronous generator based urban LV microgrid[C] // Proceedings the Sixth IASTED International Conference on European Power and Energy Systems, 2006: 26-28.
- [14] 史苏苏. 低压微电网中下垂控制的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- SHI Susu. The study of droop control in low voltage microgrid[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.
- [15] HOU X, SUN Y, YUAN W, et al. Conventional P- $\omega$ /QV droop control in highly resistive line of low-voltage converter-based AC microgrid[J]. Energies, 2016, 9(11): 943.
- [16] 林焱, 蔡振才, 吴丹岳, 等. 微电网孤岛模式下基于虚拟阻抗的负荷分配控制策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(9): 67-73.
- LIN Yan, CAI Zhencai, WU Danyue, et al. A control strategy of load distribution based on virtual impedance in an islanded mode micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(9): 67-73.
- [17] GREGOIRE J M, LOBOVSKY M B, HEINZ M F, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 54(2): 994-1004.

收稿日期: 2016-12-12; 修回日期: 2017-04-12

作者简介:

麦倩屏(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网系统及其关键技术; E-mail: maiqp@foxmail.com

陈鸣(1960—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为光伏系统理论和太阳能光伏并网、特种电源等。E-mail: chenming@mail.sysu.edu.cn

(编辑 魏小丽)