基于公共母线电压的微电网孤网运行下垂控制策略

吴翔宇[1]，沈沉[1]，赵敏[1]，李凡[1]，马红伟[2]，吕斌[2]
（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）　北京　100084；2. 许继电气股份有限公司　北京　100085）

摘要　在微电网孤网运行系统中，传统下垂控制策略大多将频率引入控制中，但是在以纯逆变器为接口的微电网中，系统功率的不平衡量难以通过频率直接反映。根据微电网公共母线电压幅值（V），以及 d 轴与 q 轴电压的比值（rat）同微电网系统有功和无功不平衡量之间的关系，设计了 P-V、Q-rat 下垂控制策略。该控制策略能够使微电网在孤网运行时维持电压及频率稳定，并且使所有的分布式电源按照预先设定的下垂系数分配有功及无功功率。

关键词：孤网运行　逆变器　下垂控制　PQ 控制

中图分类号：TM761

A Droop Control Method Based on PCC Bus Voltage in Islanded Microgrid

Wu Xiangyu[1]，*Shen Chen*[1]，*Zhao Min*[1]，*Li Fan*[1]，*Ma Hongwei*[2]，*Lü Bin*[2]
（1. State Key Lab of Power Systems　Tsinghua University　Beijing　100084　China；2. Xuji Electric Co. Ltd　Beijing　100085　China）

Abstract　Frequency and voltage droop control is a general power control and load sharing strategy in islanded microgrids. However, when all distributed generation (DG) units are connected to the microgrid via power-electronic converters, it is difficult to reflect the power imbalance via the frequency deviation in microgrid. And the conventional droop control based on power-frequency relationship will not be functioning. This paper reveals that the PCC bus voltage magnitude (V) and the ratio (rat) of d-axis bus voltage to q-axis bus voltage are related to power imbalance in a power-electronic converter interfaced microgrid. A P-V and Q-rat droop control method is proposed. With this control, the islanded microgrid can maintain stable voltage and frequency, and all DG units can accurately share active and reactive loads according to preset ratios. Simulation results on an islanded microgrid in its steady-state and load-switching operation verify the proposed method.

Keywords：Islanded microgrid, converter, droop control, PQ control

0　引言

微电网是一种可将各种小型分布式电源组合起来为当地负荷提供电能的低压电网。它具有并网和孤网两种运行模式，能提高负荷侧的供电可靠性。微电网在并网运行时，各分布式电源发出指定的有功及无功功率，负荷的增减由大电网进行平衡，系统的电压和频率也由大电网来维持稳定。但是当微电网转入孤网运行后，由于失去了大电网的支撑，系统的电压和频率必须由微电网自身来调节。目前微电网孤网运行模式下主要的电压频率控制方法有

许继电气股份有限公司科技项目 “微电网仿真建模与稳定控制研 究”和国家自然科学基金创新研究群体科学基金（51321005）资助项目。
收稿日期　2014-05-05　改稿日期　2014-07-07

主从控制和对等控制两种。主从控制是指微电网在孤网运行时由其中一个分布式电源作为主控制源，采用恒压恒频控制，负责维持系统的电压和频率稳定，其他分布式电源发出指定的有功及无功功率，系统的负荷变化由这个主控制源来进行调节 [1]。但是这种控制方法对主控制源要求较高，其容量必须较大且可靠性较高，一旦主控制源出现故障整个微电网系统就会崩溃。在对等控制方式下，微电网中各个分布式电源的地位是平等的，没有主与从之分，共同实现微电网中的负荷分配。下垂控制属于对等控制。

在传统大电力系统的频率和电压调节中，由于同步发电机的一次调频特性，系统有功功率平衡情况和系统频率有下垂关系，同时无功功率平衡情况和系统电压也有下垂关系。微电网中的分布式电源大多是通过逆变器同大电网相连接，通过推导逆变器发出的有功、无功功率同逆变器输出电压及输出阻抗的关系，人们发现在以逆变器为接口的微电网系统中同样存在有功与频率、无功与电压的下垂关系，基于这种关系的下垂控制可以使微电网在孤网模式下稳定运行，完成负荷分配 [1-3]。下垂控制的本质是根据逆变器发出的有功和无功来得到频率和电压的参考值，而倒下垂方法将这个过程倒过来，根据检测到的频率和电压得到有功和无功的参考值，可以将逆变器控制成为一个具有下垂特性的功率源 [4,5]。由于微电网处于中低压配电网中，而低压线路的阻抗通常以电阻为主，此时有功 P 与电压 V、无功 Q 与频率 f 的耦合关系更强。文献 [6,7]设计了 P-V、Q-f 下垂控制，用于微电网孤网运行中。但是这种方法与传统同步发电机一次调频不兼容，而且当逆变器使用 LCL 滤波器或通过变压器接入公共母线时又有可能使逆变器的输出阻抗以感性为主。为了改变逆变器的输出阻抗特性，以便于统一使用 P-f、Q-V 下垂控制，文献 [8,9]使用了构造虚拟阻抗的方法，可以将逆变器的输出阻抗人为设计成为感性。由于线路阻抗的存在，线路上各点电压不一致，因此在利用 Q-V 下垂关系进行控制时，会造成无功分配存在误差，文献 [10,11]提出的补偿方法改善了无功负荷的分配效果。下垂控制的固有特点是属于有差调节，在稳态下存在电压和频率的偏差，文献 [12,13]引入了 PI 控制，通过上下平移下垂曲线可以实现频率和电压的无差调节。

在传统下垂控制中，系统频率 f 往往作为一个控制变量。在传统大电力系统中，由于同步发电机的存在，系统的频率 f 由发电机转子的转速决定，并且转子具有很大的惯性，系统负荷的变化在暂态过程中可以由转子上的能量进行平衡。但是当微电网中的分布式电源全部由逆变器接入电网时，由于逆变器直流母线电容上储存的能量有限，属于小惯性系统，而且系统的频率由控制器决定，因此分布式电源输出的功率是同系统频率解耦的，分布式电源不能像传统电力系统那样通过频率变化来反映功率的不平衡 [14,15]。而且当微电网中多台逆变器同时参与系统频率调节时，容易造成系统不稳定。

本文所研究的微电网特指所有分布式电源均通过逆变器并入电网，通过对逆变器系统进行公式推导，发现负荷母线电压的幅值影响有功功率平衡，而 d 轴与 q 轴电压的比值影响无功功率平衡。根据此关系，提出了一种基于电压的下垂控制方法，该方法将逆变器系统频率固定在 50Hz，根据电压幅值-有功下垂曲线以及电压比值 -无功下垂曲线得到有功以及无功的参考值，再通过 PQ 控制使得逆变器发出设定的功率，完成有功及无功负荷在各逆变器之间的合理分配。该下垂控制策略突破了传统下垂控制中必须将频率引入控制中的限制，通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件进行建模与仿真，验证了所提出控制策略的有效性。

1 电压与有功和无功之间的关系推导

图 1 为一个典型的带 LC 滤波器的孤网运行的逆变器，下面推导影响它的有功及无功功率的因素 [16]。

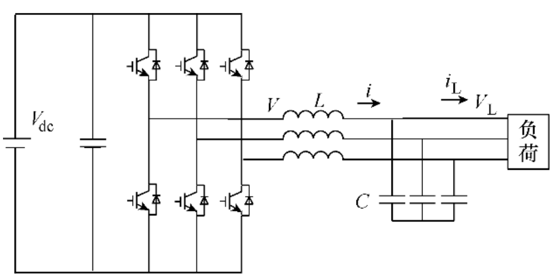

图 1 典型的孤网运行的逆变器

Fig.1 A typical protype system of one converter

对 LC 滤波器的电容 C 列写节点电流方程，再将 abc 坐标系变换到 dq 坐标系后，得到

[在此处键入]

$$C\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{Ld}}}{\mathrm{d}t}=i_{\mathrm{d}}-i_{\mathrm{Ld}}+\omega CV_{\mathrm{Lq}} \tag{1}$$

$$C\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{Lq}}}{\mathrm{d}t}=i_{\mathrm{q}}-i_{\mathrm{Lq}}-\omega CV_{\mathrm{Ld}} \tag{2}$$

式中，V_{Ld}为负荷电压的 d 轴分量；V_{Lq}为负荷电压的 q 轴分量；i_{Ld}为负荷电流的 d 轴分量；i_{Lq}为负荷电流的 q 轴分量；i_{d}为电感 L 上电流的 d 轴分量；i_{q}为电感 L 上电流的 q 轴分量；ω 为系统的角频率。

将式（1）乘以 V_{Ld}，式（2）乘以 V_{Lq}后两式相加，经过处理后得到

$$\frac{1}{2}C\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{Lm}}^2}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{vsc}}-P_{\mathrm{L}} \tag{3}$$

式中，P_{vsc}为逆变器发出的有功功率，令 $P_{\mathrm{vsc}}=V_{\mathrm{Ld}}i_{\mathrm{d}}+V_{\mathrm{Lq}}i_{\mathrm{q}}$；$P_{\mathrm{L}}$为负荷吸收的有功功率，令 $P_{\mathrm{L}}=V_{\mathrm{Ld}}i_{\mathrm{Ld}}+V_{\mathrm{Lq}}i_{\mathrm{Lq}}$；$V_{\mathrm{Lm}}^2$为负荷电压幅值的二次方，$V_{\mathrm{Lm}}^2=V_{\mathrm{Ld}}^2+V_{\mathrm{Lq}}^2$。

再将式（1）乘以 V_{Lq}，式（2）乘以 V_{Ld}，两式相减，经过处理后 得到

$$CV_{\mathrm{Lq}}^2\frac{\mathrm{d}\left(V_{\mathrm{Ld}}/V_{\mathrm{Lq}}\right)}{\mathrm{d}t}=(Q_{\mathrm{vsc}}+\omega CV_{\mathrm{Lm}}^2)-Q_{\mathrm{L}} \tag{4}$$

式中，$Q_{\mathrm{vsc}}+\omega CV_{\mathrm{Lm}}^2$表示逆变器发出的无功，且令 $Q_{\mathrm{vsc}}=V_{\mathrm{Lq}}i_{\mathrm{d}}-V_{\mathrm{Ld}}i_{\mathrm{q}}$；$Q_{\mathrm{L}}$为负荷吸收的无功功率，令 $Q_{\mathrm{L}}=V_{\mathrm{Lq}}i_{\mathrm{Ld}}-V_{\mathrm{Ld}}i_{\mathrm{Lq}}$；$V_{\mathrm{Lm}}^2=V_{\mathrm{Ld}}^2+V_{\mathrm{Lq}}^2$。

最后令 $P_{\mathrm{s}}=P_{\mathrm{vsc}}$，$Q_{\mathrm{s}}=Q_{\mathrm{vsc}}+\omega CV_{\mathrm{Lm}}^2$，则得到最终的表达式为

$$\frac{1}{2}C\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{Lm}}^2}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{s}}-P_{\mathrm{L}} \tag{5}$$

$$CV_{\mathrm{Lq}}^2\frac{\mathrm{d}\left(V_{\mathrm{Ld}}/V_{\mathrm{Lq}}\right)}{\mathrm{d}t}=Q_{\mathrm{s}}-Q_{\mathrm{L}} \tag{6}$$

由以上两式可以看出，在动态过程中，逆变器发出有功功率与负荷吸收的有功功率之间的偏差同负荷电压幅值的二次方 V_{Lm}^2有关，而无功功率的偏差同负荷电压 d 轴与 q 轴分量的比值 $V_{\mathrm{Ld}}/V_{\mathrm{Lq}}$有关。由微分方程可知，当 P_{L}增加时，负荷有功大于逆变器实际发出的有功，V_{Lm}^2降低；当 Q_{L}增加时，负荷无功大于逆变器实际发出的无功，$V_{\mathrm{Ld}}/V_{\mathrm{Lq}}$降低。据此，可以设计下垂特性得到逆变器需要发出的有功及无功设定值，实现系统的功率平衡。

2　基于电压的下垂曲线设计方法

一个孤立运行的含有多个分布式电源及负荷的微电网如图 2 所示。

图 2 中，所有 DG 连接到同一个母线上，该母线称之为公共母线。根据前一节的推导，有功功率的偏差同负荷电压幅值的二次方 V_{Lm}^2（下面用 V^2 表示）有关，而无功功率的偏差同 $V_{\mathrm{Ld}}/V_{\mathrm{Lq}}$有关，令比值 rat=$V_{\mathrm{Ld}}/V_{\mathrm{Lq}}$，据此可以设计 V 同有功的下垂公式以及 rat 同无功的下垂公式。设在微电网孤网系统中逆变器的数量为 N，则所设计的下垂公式为

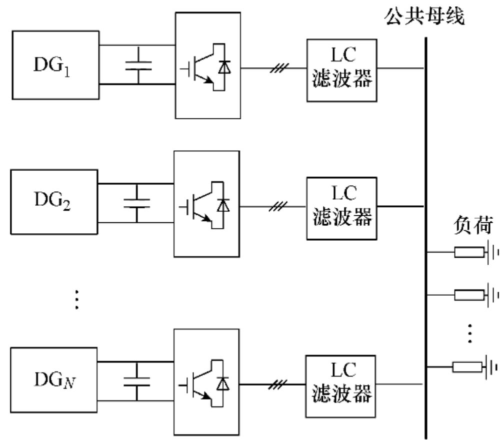

图 2　含 DGs 和负荷的微电网孤网运行系统

Fig.2　An islanded microgrid containing DGs and loads connected to a PCC bus

$$P_{\mathrm{ref}N}=P_{\mathrm{n}N}+k_{PN}(V_{\mathrm{n}}-V) \tag{7}$$

$$Q_{\mathrm{ref}N}=Q_{\mathrm{n}N}+k_{QN}(\mathrm{rat}_{\mathrm{n}}-\mathrm{rat}) \tag{8}$$

式中，V_{n}为负荷相电压幅值 V 的额定值；$\mathrm{rat}_{\mathrm{n}}$为 rat 的额定值；$P_{\mathrm{n}N}$、$Q_{\mathrm{n}N}$分别为逆变器 N 的额定有功和无功功率；$P_{\mathrm{ref}N}$、$Q_{\mathrm{ref}N}$为逆变器 N 的有功功率和无功功率参考值；k_{PN}为逆变器 N 的电压幅值-有功下垂曲线增益；k_{QN}为逆变器 N 的比值-无功下垂曲线增益。由于逆变器输出有功和无功的能力均有上限，因此需要对有功及无功进行限幅。逆变器有功出力的下限一般为 0，设 $P_{\max N}$、$Q_{\max N}$为逆变器 N 最大可发出的有功及无功功率；$Q_{\min N}$为逆变器 N 最小可发出的无功功率。对于实际的微电网系统，系统电压有下限要求，设 $V_{\min}$为系统电压所允许的

最小值；rat_{min} 表示比值所允许的最小值，那么所设计的下垂曲线斜率由式（9）和式（10）决定。

$$k_{PN}=\frac{\Delta P}{\Delta V}=\frac{P_{\max N}-P_{nN}}{V_n-V_{\min}} \tag{9}$$

$$k_{QN}=\frac{\Delta Q}{\Delta \mathrm{rat}}=\frac{Q_{\max N}}{\mathrm{rat}_n-\mathrm{rat}_{\min}} \tag{10}$$

可以看出，下垂曲线增益由逆变器的容量决定，容量大的逆变器下垂曲线增益较大，容量小的逆变器下垂曲线增益较小。

以两台逆变器为例，图 3、图 4 为所设计的下垂曲线。由所设计的下垂曲线可知，当系统负荷增加时，下垂增益大的逆变器承担的负荷较多，下垂增益小的逆变器承担的负荷较少，最终电压幅值和比值会稳定在一个新的平衡点。

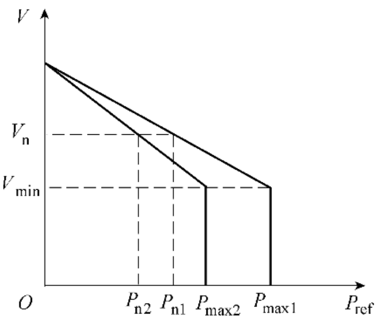

图 3 电压幅值-有功下垂曲线

Fig.3 P-V droop curve

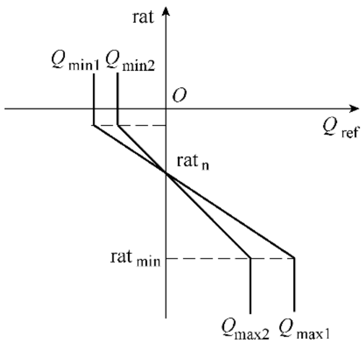

图 4 电压比值-无功下垂曲线

Fig.4 Q-rat droop curve

由下垂控制得到逆变器的有功及无功参考值后再对逆变器进行 PQ 控制，使逆变器实际发出有功及无功功率跟踪参考值，完成系统的功率平衡。在控制过程中系统频率始终由控制器自己生成的频率信号决定，没有将其作为一个控制变量，系统总体的控制结构如图 5 所示。

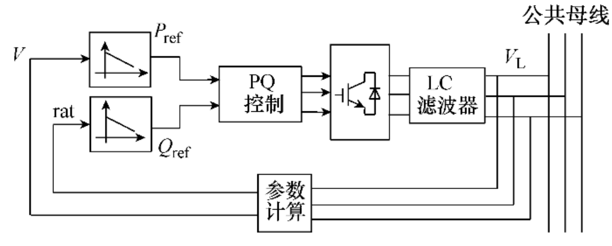

图 5 下垂控制总体结构

Fig.5 The overall control structure diagram of the proposed droop control method

所设计的基于电压的下垂控制策略可以使得系统有功负荷及无功负荷的分配按照下垂增益的比例来完成，从而实现了按逆变器的容量大小分配负荷的目的。在整个控制过程中，微电网系统中的每台逆变器都是检测自身的电气量，不需要与其他逆变器之间进行通信，实现了“即插即用”的目标。

3 仿真结果

为了验证所提出的下垂控制策略的有效性，针对 380V 的微电网孤网运行系统进行仿真，研究系统稳态及负荷投切时的功率分配情况。仿真使用 PSCAD/EMTDC 软件，系统的拓扑如图 2 所示。

系统含有两台逆变器，假设两个分布式电源均使用蓄电池，仿真中采用通用等效电路模型 [17]。两台逆变器的电压幅值-有功下垂曲线及电压比值-无功下垂曲线的设计参数见下表。逆变器 1 和逆变器 2 的容量之比为 3∶2，理论上两台逆变器应该按照这个比例承担系统的有功功率和无功功率。

表 下垂曲线的设计参数

Tab. Droop control parameters for two converters

参 数	数 值
V_n/V	311
V_{min}/V	295.5
P_{n1}/kW	30
P_{n2}/kW	20
P_{max1}/kW	50
P_{max2}/kW	33.3
k_{P1}	1.29
k_{P2}	0.86
rat_n	−2
rat_{min}	−3
Q_{max1}/kvar	20
Q_{max2}/kvar	13.3
Q_{min1}/kvar	−9

$Q_{\min2}$/kvar	−6
k_{Q1}	0.02
k_{Q2}	0.013 3

3.1 稳态运行

仿真中负荷采用恒阻抗模型，负荷功率均是在线电压有效值为 380V 下计算得到的结果。稳态运行时系统负荷为额定负荷 50kW，图 6～图 9 为稳态运行时的仿真结果。

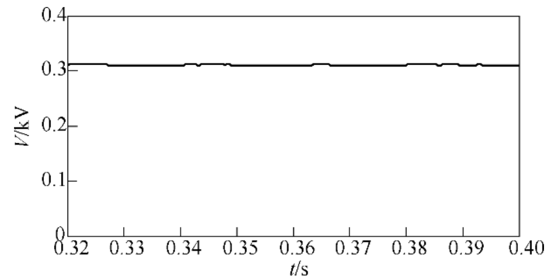

图 6　稳态运行时的公共母线相电压幅值波形

Fig.6　PCC bus voltage magnitude in steady-state operation

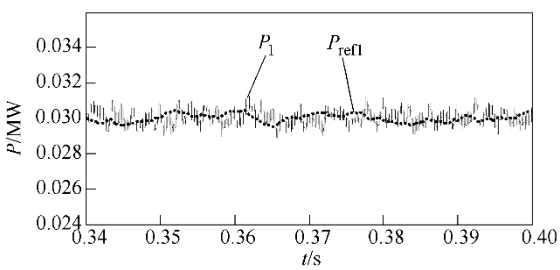

图 7　稳态运行时逆变器 1 的有功参考值及实际值

Fig.7　The active power reference and actual value of converter 1 in steady-state operation

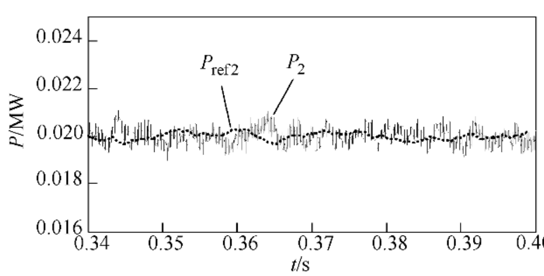

图 8　稳态运行时逆变器 2 的有功参考值及实际值

Fig.8　The active power reference and actual value of converter 2 in steady-state operation

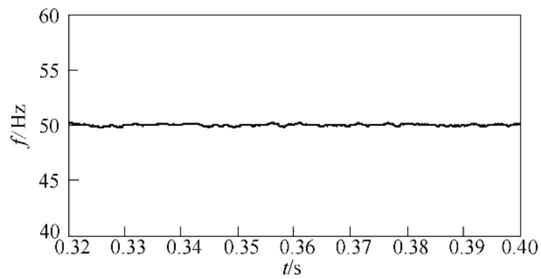

图 9　稳态运行时的系统频率

Fig.9　The system frequency in steady-state operation

由仿真结果可知，由于系统总负荷设定为额定负荷，因此系统电压一直保持在额定电压，两台逆变器发出的有功功率也为额定值，系统中没有无功负荷，因此发出的无功功率均为 0，系统频率始终保持在 50Hz 左右。可见，在稳态下两台逆变器按照容量之比来承担有功负荷，且能够保证系统的电压和频率恒定。

3.2 负荷投切

为了验证所提出的下垂控制策略在动态过程中的有效性，下面进行负荷投切的仿真分析。系统的初始总负荷为 50kW，0.3s 时投入 25kW 的有功负荷和 25kvar 的无功负荷，0.55s 时将该负荷切除，图 10～图 17 为负荷投切时的仿真结果。

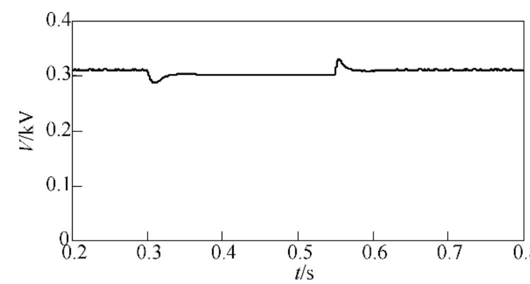

图 10　负荷投切时的负荷相电压幅值波形

Fig.10　PCC bus voltage magnitude in load switching

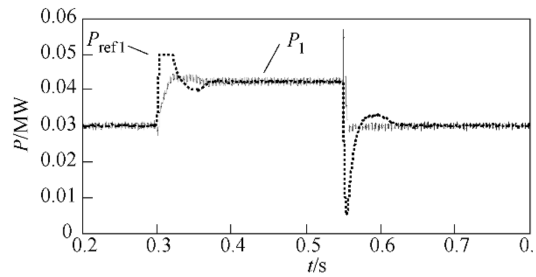

图 11　负荷投切时逆变器 1 的有功参考值及实际值

Fig.11　The active power reference and actual value of converter 1 in load switching

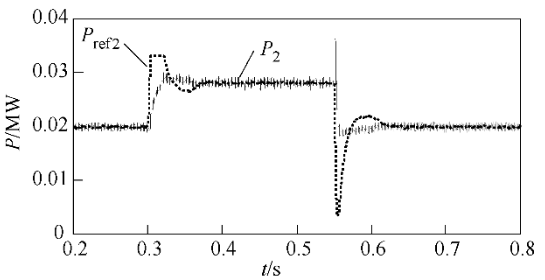

图 12 负荷投切时逆变器 2 的有功参考值及实际值
Fig.12 The active power reference and actual value of converter 2 in load switching

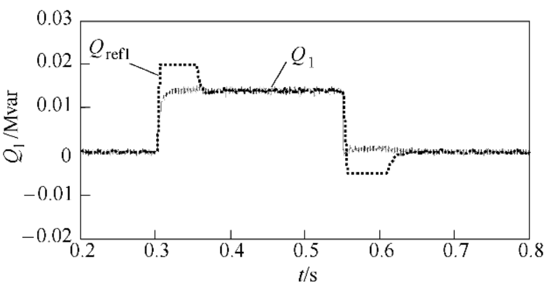

图 13 负荷投切时逆变器 1 的无功参考值及实际值
Fig.13 The reactive power reference and actual value of converter 1 in load switching

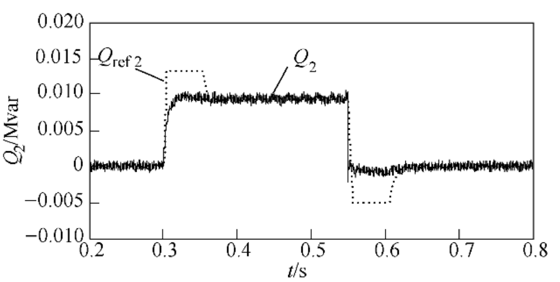

图 14 负荷投切时逆变器 2 的无功参考值及实际值
Fig.14 The reactive power reference and actual value of converter 2 in load switching

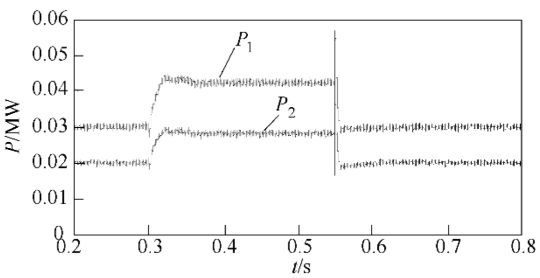

图 15 负荷投切时两台逆变器发出的有功功率
Fig.15 The active power actual value of converter 1 and 2 in load switching

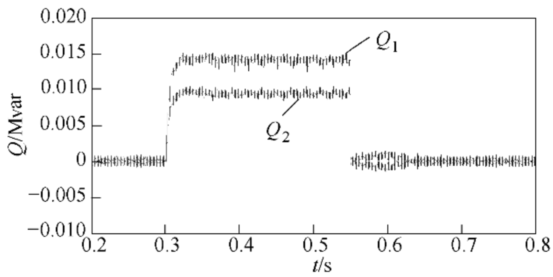

图 16 负荷投切时两台逆变器发出的无功功率
Fig.16 The reactive power actual value of converter 1 and 2 in load switching

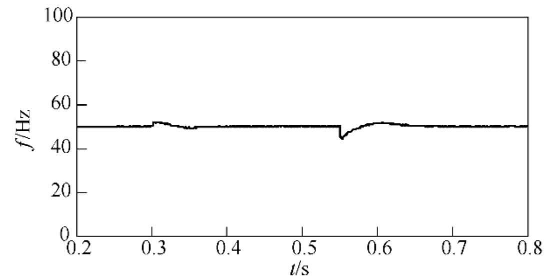

图 17 负荷投切时的系统频率
Fig.17 The microgrid frequency in load switching

根据图 10～图 17 可知，微电网孤网运行下在 0.3s 之前运行在额定状态，当负荷投入后，系统电压跌落至 301V，两台逆变器的有功功率分别增加至 42kW 和 28kW，两台逆变器的无功功率分别增加至 14.1kvar 和 9.5kvar。当负荷切除后，微电网又恢复到了额定运行状态。整个过程中系统的频率始终维持在 50Hz 左右。

由以上仿真结果可知，系统在发生负荷投切时电压和频率依然能够保持稳定，而且两台逆变器始终能够按照容量之比 3∶2 来分配系统的有功和无功负荷，很好地完成了下垂控制所要实现的控制目标。

4 结论

本文提出了一种基于公共母线电压的下垂控制策略。首先针对一个典型的带 LC 滤波器孤立运行的逆变器，推导出了负荷电压幅值反映有功功率平衡，负荷电压 d 轴、q 轴的比值反映无功功率平衡的结论；然后根据这一关系进行了微电网分布式电源下垂控制策略的设计。由下垂控制方程得到逆变器的有功、无功参考值后对逆变器进行 PQ 控制，使其发出的有功及无功跟踪参考值；最后以一个含两台逆变器的微电网系统为例进行了仿真，通过稳

态运行及负荷投切时的仿真结果验证了所提出控制策略的有效性。该下垂控制策略突破了传统下垂控制中必须将频率引入控制中的限制，能够保证微电网孤网运行时电压频率的稳定以及按照逆变器各自的容量大小来进行负荷的合理分配。

参考文献

[1] Lopes J A P, Moreira C L, Madureira A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.

[2] 王成山，肖朝霞，王守相．微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略 [J]．电工技术学报，2009, 24(2): 100-107.
Wang Chengshan, Xiao Zhaoxia, Wang Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107.

[3] Chandorkar M C, Divan D M, Adapa R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(1): 136-143.

[4] 纪明伟，张兴，杨淑英．基于电压源逆变器的微电网控制策略 [J]．合肥工业大学学报 (自然科学版), 2009, 32(11): 1678-1682.
Ji Mingwei, Zhang Xing, Yang Shuying. Study on the control strategies of voltage source inverter in micro- grid[J]. Journal of Hefei University of Technology (Science and Technology), 2009, 32(11): 1678-1682.

[5] Katiraei F, Iravani M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.

[6] Sao C K, Lehn P W. Control and power management of converter fed microgrids[J]. IEEE Transactions on Power System, 2008, 23(3): 1088-1098.

[7] 牟晓春，毕大强，任先文．低压微网综合控制策略设[J]．电力系统自动化 , 2010, 34(19): 91-96.
Mou Xiaochun, Bi Daqiang, Ren Xianwen. Study on control strategies of a low voltage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 91-96.

[8] Guerrero J M, Matas J, de Vicuna L G, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1461-1470.

[9] Matas J, Castilla M, de Vicu X F, et al. Virtual impedance loop for droop-controlled single-phase parallel inverters using a second-order general-integrator scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 2993-3002.

[10] He Jinwei, Li Yunwei. An enhanced microgrid load demand sharing strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3984-3995.

[11] Li Yunwei, Ching-Nan K. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.

[12] Li Yunwei, Vilathgamuwa D M, Poh C L. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.

[13] 徐诚，刘念，赵泓，等．基于电力系统二次调频原理的微电源频率控制策略 [J]．电力系统保护与控制 , 2013, 41(3): 14-20.
Xu Cheng, Liu Nian, Zhao Hong, et al. A novel frequency control strategy of micro-grid based on the secondary frequency regulation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 14-20.

[14] Reza M. Stability analysis of transmission systems with high penetration of distributed generation[D]. Delft: Delft University of Technology, 2006.

[15] Mullane A, O'Malley M. The inertial response of induction-machine-based wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1496-1503.

[16] 王阳．微电网分层运行控制系统研究 [D]．北京：清华大学 , 2012.

[17] Tremblay O, Dessaint L A, Dekkiche A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[C]. Proceedings of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007: 284-289.

作者简介：吴翔宇　男，1990 年生，博士，研究方向为微电网控制技术。沈　沉　男，1970 年生，教授，博士生导师，研究方向为电

力系统稳定分析与控制技术，分布式发电与微电网技术　等。

[在此处键入]