

基于孤岛模式的微电网多逆变器并联运行控制技术

李红^{1,2,3,4} 韩杨^{1,2,3,4} 沈攀^{1,2,3,4}

1. 电子科技大学机电学院电力电子系, 四川 成都 611731;
2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;
3. 电力电子节能技术与装备四川省重点实验室, 四川 成都 610039;
4. 人工智能四川省重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘要: 分布式电源会对电网电压和电能质量等方面带来许多问题, 成分布式电源和负荷的微电网技术提供了很好的解决途径。研究了微电网在孤岛运行模式下, 如何平衡微电网内各分布式电源和储能系统的功率输出。建立逆变器并联系统的控制模型, 提出一种适合微电网的 LCL 型逆变器并联的控制策略, 并实现了孤岛模式下微电网的稳定运行。其中分布式电源采用无互联线“功率-电压-电流”三环下垂控制器来实现并联系统间的功率均分。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真验证了并联逆变器在孤岛模式稳定运行的可行性。

关键词: 微电网; 并联逆变器; 下垂控制; 孤岛模式; 三环控制

Abstract: The distributed generation (DG) brings many problems, such as grid voltage and power quality in distribution network. Microgrid, which is the integration of distributed generation and loads, is regarded as a potential solution to the problems mentioned above. The method of balancing power output of the distributed power and energy storage system in the microgrid is studied. The system control models based on parallel-connected inverters are established. The stable operation in islanded microgrid is achieved, and a control strategy for the parallel-connected inverters for microgrid is proposed. The voltage-current-droop three-loop controller is used in distributed generation units to share the loads among the parallel-connected inverters. Finally, the simulation results show that the proposed control strategy is feasible.

Key words: microgrid; parallel inverters; droop control; islanding mode; three-loop control

中图分类号: TM315 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)05-0011-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.05.003

0 引言

分布式发电以其能就地消化电力、节省输变电投资和运行费用、减少集中输电的线路损耗、与大电网供电互为补充、减少电网容量、改善电网峰谷性能、提高供电可靠性、能减少对环境的污染等优点受到了广泛关注^[1-3]。但由于分布式电源的不可控性及随机波动性, 其渗透率的提高对电力系统稳定性造成了负面影响。当电力系统发生故障时, 分布式电源须立刻退出运行, 这使得分布式电源的效益没能得到充分地发挥^[4-6]。由此, 不少学者提出了微电网的概念, 微电网可以并网运行和脱离主电网孤

立运行。其中, 孤岛模式运行的能力是微电网重要的特点, 孤岛模式的安全稳定运行能给系统提供更高的供电可靠性^[7]。

研究微电网在孤岛模式的稳定运行颇为重要, 此时逆变器的控制性能将直接影响到负载的供电质量。其常见的控制方法一般可分为 2 类, 第 1 类是有互联线方法, 包括集中控制、主从控制、平均负载分配法等^[8-9]。这些方法可以达到很好的均流效果, 并减小输出电压总谐波畸变率, 但互联线的存在会限制系统的灵活性和冗余性, 而且会降低微电网系统的可靠性^[10-11]。第 2 类是无互联线方法, 一般分为谐波注入法和下垂法, 此类方法只依赖于各模块自身的控制量, 具有冗余性和灵活性等特点。谐波注入法由于谐波分量的引入, 使输出电压畸变增大且控制较为复杂。下垂法采用交流电机中的控制思想, 利用有功功率、无功功率和电压的频率、幅值

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307015); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室基金(2007DA10512713405); 电力电子节能技术与装备四川省重点实验室开放课题资助(szj2015-067); 人工智能四川省重点实验室开放基金资助(2015RZJ02); 电子科技大学教育教学改革研究项目资助(2013XJYEL024)

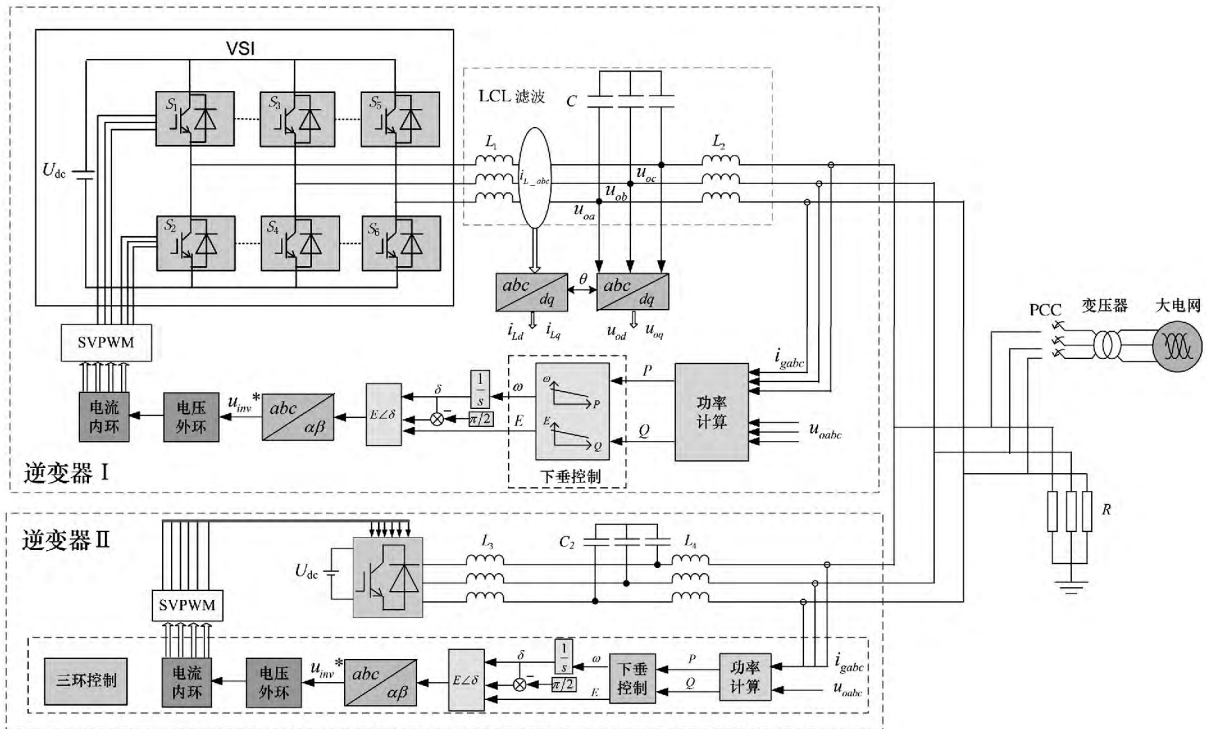


图 1 逆变器并联控制原理

之间的对应关系来调节逆变器输出电压参考值,是真正的高冗余、无互联控制法^[11-13]。

通过分析孤岛模式下单个分布式电源的控制方法。进一步采用 PQ 下垂控制、电压外环、电流内环的“功率-电压-电流”三环控制来实现孤岛模式下微电网并联的稳定运行。最后,仿真结果验证了以上控制策略的正确性。

1 逆变器并联控制

在微电网中,大多数的分布式电源由逆变器并入电网,因此,当微网中有多个逆变器并联时,如何使它们协调运行,成为了微网能否稳定运行的关键所在。以两台逆变器为例,采用下垂特性控制方式实现各并联逆变器之间无互联通信线,可以灵活地热插拔^[14]。

如图 1 所示为微电网中两台逆变器并联电路控制原理图。为实现微网中逆变器并联的稳定运行,其中分布式电源采用无互联线“功率-电压-电流”三环下垂控制器来实现并联系统间的功率均分,即各台逆变器在 $P-V$ 和 $Q-f$ 下垂控制下,将输出电压和相位的信息送到各逆变器的电压外环控制中,经过 PI 调节后输出的电流信号作为电流内环

的参考电流,最后将输出的调制信号通过 SVPWM 调制后送到各台分布式电源的门级信号中,使得微网逆变器能达到稳定状态。其中功率计算单元为

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0) \quad (1)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: P 和 Q 分别为有功功率和无功功率; v_d 、 v_q 、 v_0 、 i_d 、 i_q 、 i_0 分别为电容电压、输出电流在 $dq0$ 坐标系下的分量。

$$m = \frac{\omega_0 - \omega_{\min}}{P_{\max} - P_0} \quad (3)$$

$$n = \frac{V_0 - V_{\min}}{Q_{\max} - Q_0} \quad (4)$$

下垂控制系数 m 、 n 由式(3)和式(4)可以得到,式中: ω_0 和 V_0 分别为电网额定角频率和电压幅值; P_0 和 Q_0 为微网逆变器在额定电网电压频率和幅值情况下对应的有功功率和无功功率输出; P_{\max} 为微网逆变器在频率下降时输出的最大有功功率; ω_{\min} 为微网逆变器输出最大有功功率时允许的最小角频率; Q_{\max} 为微网逆变器达到电压下降最大允许值时输出的无功功率; V_{\min} 为微网逆变器输出最大无功功率时允许的最小电压幅值。

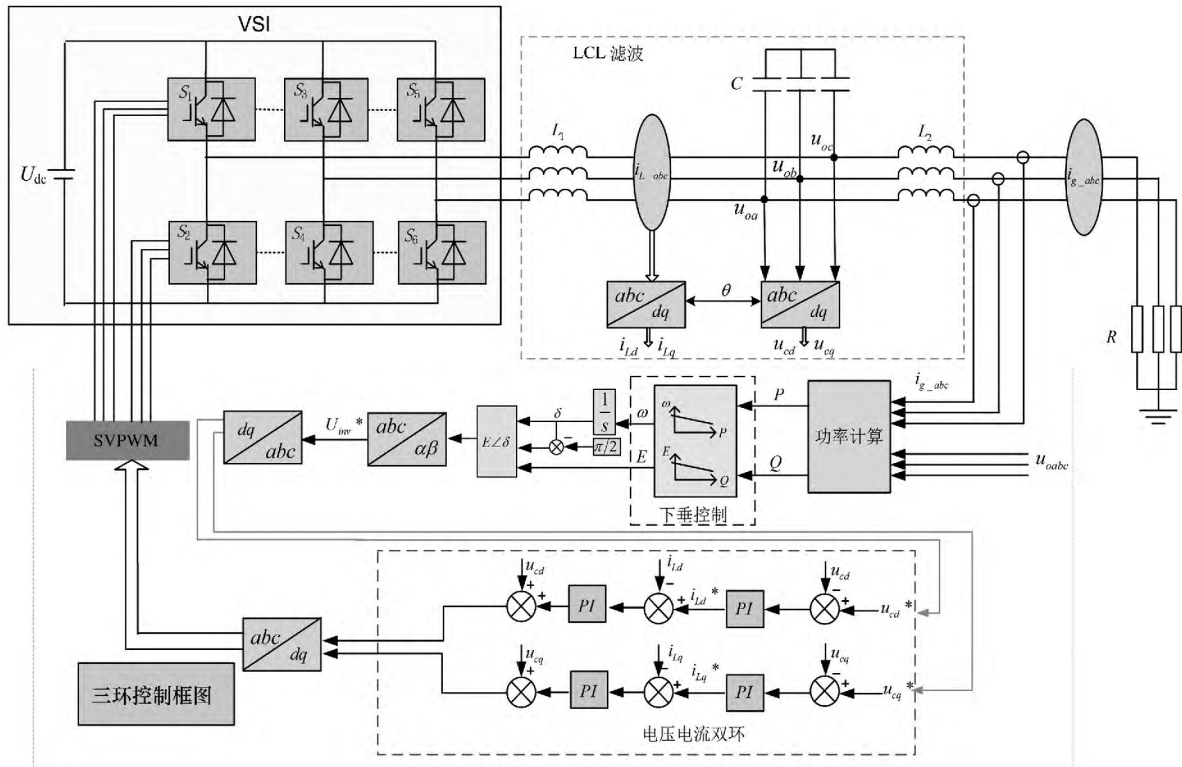


图 2 微电网在孤岛模式下的控制原理

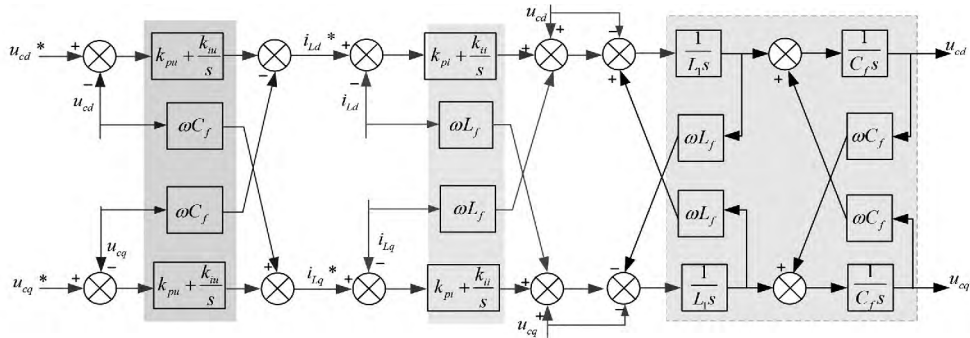


图 3 带解耦的电压电流双环控制系统方框图

2 孤岛模式

在大电网发生故障或者出现较大扰动时,静态开关将敏感性负荷所在馈线与大电网断开,使其在孤岛模式下运行。在孤岛运行模式中,微电网需运行在稳定的电压和频率下,继续向网内负荷供电。此时要求微电网的各电源之间相互配合,孤岛运行时微电网的控制策略直接影响供电的可靠性^[9-11]。

图 2 为微电网孤岛模式控制原理图,从图 2 整体的框图可以看到,通过对电容电压、输出电流进行功率计算,算出的参考电流作为下垂控制的输入信号,通过下垂控制生成的参考电压信号进入电压电流双环控制,最后经过 SVPWM 调制给 IGBT 门极以

驱动信号。微电网在孤岛模式下,不单只脱离电网运行,还会由于负载突变等故障状态出现,仿真中将会对该系列情况进行分析。

3 电压电流双环控制策略分析

在多个逆变器并联时,需要将每个逆变器等效为电压源,采用电压外环电流内环控制才能实现逆变器并联稳态运行^[6-10]。根据图 2 所示的控制框图,对电压电流双环进行进一步分析。

图 3 的控制中,电压选取输出电压、电流选择逆变器侧电流^[8]。 k_{pu} 、 k_{iu} 分别为电压外环 PI 控制器的比例和积分系数; k_{pi} 、 k_{ii} 为电流内环 PI 控制器的比例和积分系数。 u_{cd}^* 、 u_{cq}^* 分别为电压环 d 轴和 q

轴参考电压。

由于 d 轴和 q 轴存在耦合,电压电流双环中需要进行解耦,在控制端加入对称相反的耦合量^[16]。即为图 3 中的 ωC_f 和 ωL_f 。

$$G_{open} = \frac{G_1 G_2 L_2 s}{L_1 L_2 C s^3 + G_{pL2} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s + G_{pL2}} \quad (5)$$

$$G_1 = k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \quad (6)$$

$$G_2 = k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \quad (7)$$

式(5)为图 3 所示控制方框图得到系统的开环传递函数。

表 1 电压电流双环控制参数

参数	数值	参数	数值
U_{dc} / V	650	k_{pu}	0.257 5
L_1 / mH	1.8	k_{iu}	200
L_2 / mH	1.8	k_{pi}	11
$C / \mu F$	25	k_{ii}	900

通过表 1 所示参数与式(5)所示传递函数,得到图 6 所示波特图。

图 6 表明在电压电流双环控制下,系统的幅值裕度(GM) > 0 dB,相角裕度(PM) > 20 deg。根据自动控制理论,该系统具有很好的稳定性。

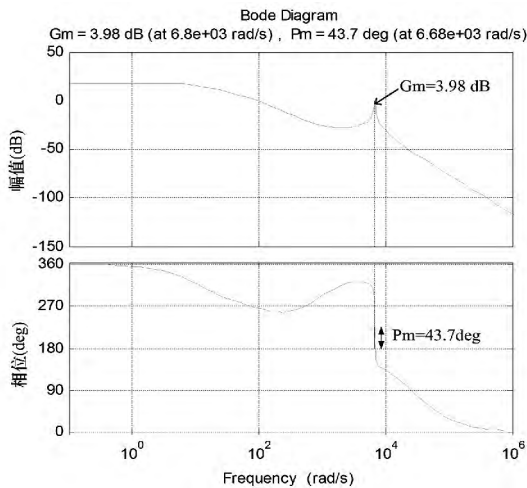


图 4 系统开环波特图

4 仿真验证

为了验证所提的控制方法的有效性,在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建两台逆变器并联仿真模型。

4.1 单个逆变器在孤岛模式下的仿真

表 2 下垂控制参数

参数	数值	参数	数值
R / Ω	230	m	$5e-3$
r / Ω	0.1	n	$3e-4$

通过表 1 和表 2 所示参数,得到如图 5 所示的单个分布式电源的仿真波形,其中 R 为负载电阻, r 为电容串联的电阻阻值, m 、 n 为下垂控制系数。

由图 5 可见,输出电压与电容电压相位保持同步,网侧电流波形与输出电压也始终同步。

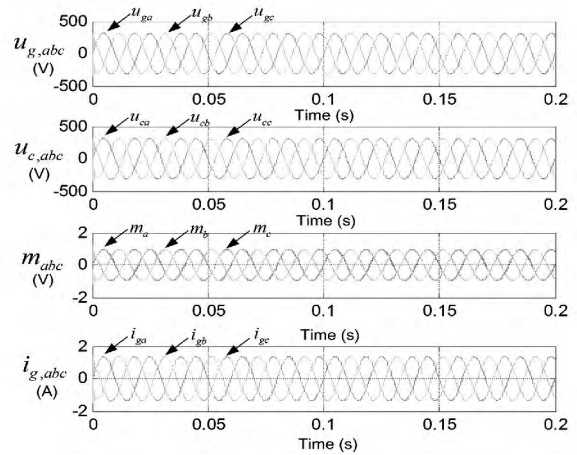


图 5 输出电压、电容电压、调制电压、网侧电流波形

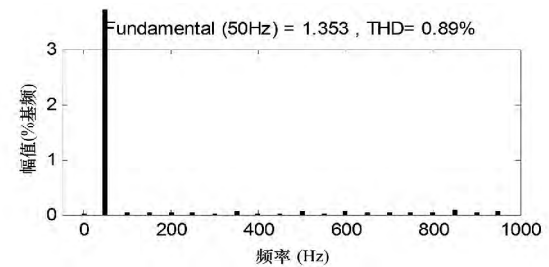


图 6 网侧 A 相电流的 THD

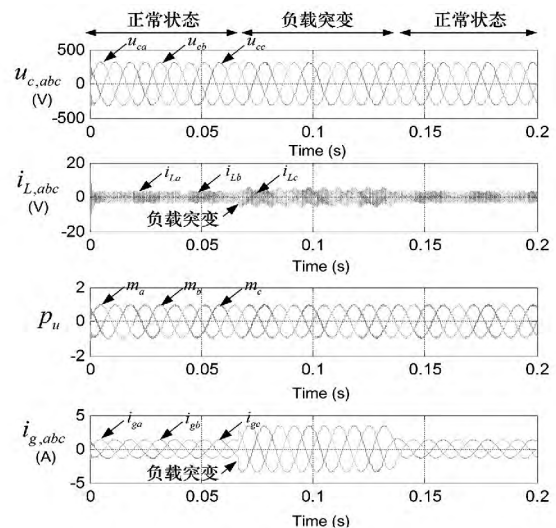


图 7 电容电压、逆变器侧电流、调制电压、网侧电流

从图 6 可知网侧 A 相电流 THD = 0.89% < 5% ,完全符合 IEEE Std. 929 - 2000 电能质量基本要求。

从图 7 可以看出 ,逆变器侧电流纹波比较大 ,但经过 LCL 滤波之后 ,网侧电流(输出电流)纹波很小。对于整个系统 ,在 $t < 0.065$ s 时 ,网侧电压波形稳定;在 $t = 0.065$ s 时 ,对负载进行切换 ,系统能在 0.005 s 内稳定 ,在 $t = 0.135$ s 后系统恢复正常。

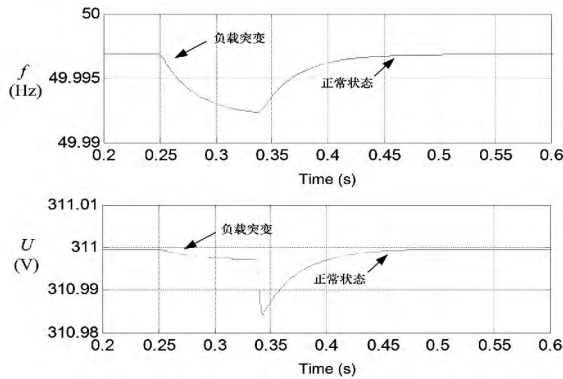


图 8 下垂控制电压调整

图 8 表明在 $t = 0.25$ s 时 ,下垂控制使系统的相位和频率已达稳定 ,但由于此时负载突然加重 ,下垂控制重新调整相位和频率 ,在 $t = 0.33$ s 时电压先达到稳定状态 ,此时将负载恢复正常状态 ,相位和电压逐渐恢复稳定。当 $t = 0.45$ s 时 ,两者又完全恢复到初始稳定值。

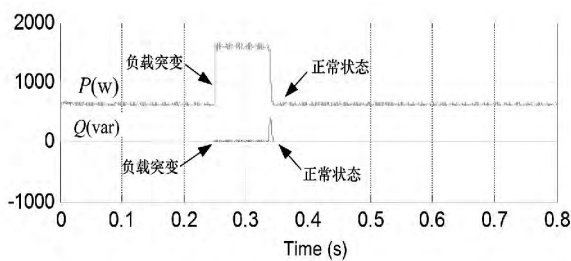


图 9 下垂控制功率调整

图 9 表明下垂控制使得输出的有功功率稳定在 650 W 左右 ,无功功率接近于 0 Var; 在负载加重时 ,有功功率瞬间跳变并能快速稳定 ,无功功率仍然保持 0 Var; 当负载恢复时 ,由于有功功率的迅速跌落 ,无功功率虽出现短暂的跳变 ,但无功功率和有功功率均能很快稳定在初始状态。

图 5 ~ 图 9 表明微电网在孤岛模式下 ,下垂控制能保证频率和相位的稳定 ,最后再通过电压电流双闭环控制即可实现整个系统的稳定。此外 ,由于下垂控制的无互联性 ,就能顺利实现微电网中多个

分布式电源的并联。

4.2 逆变器并联仿真

表 3 逆变器 2 的控制系统参数

参数	数值	参数	数值
U_{dc2} / V	650	k_{pu2}	0.257 5
L_3 / mH	1.8	k_{iu2}	200
L_4 / mH	1.8	k_{pi2}	11
$C_2 / \mu F$	25	k_{ii2}	900
m_2	$5e-3$	n_2	$3e-4$

逆变器 1 选择表 1 和表 2 所示参数 ,逆变器 2 参数即为表 3 所示 ,对两台并联逆变器仿真得到如图 10 和图 11 所示的电流波形。此时单台逆变器的输出电流为总输出电流的一半 ,并且逆变器 1 与逆变器 2 的输出电流相位能时刻保持同步 ,表明系统能维持良好的均流效果。

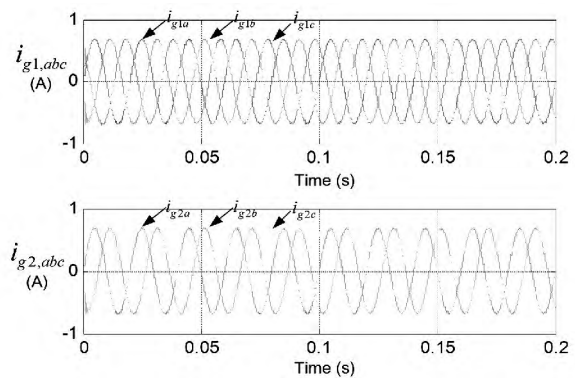


图 10 逆变器 1 电流与逆变器 2 电流波形

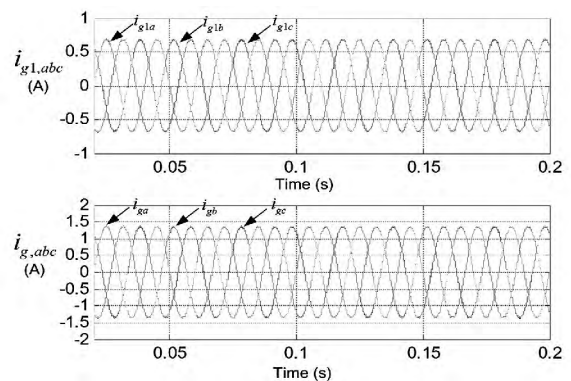


图 11 逆变器 1 电流与总输出电流波形

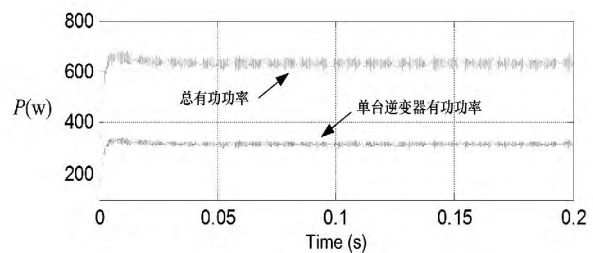


图 12 单个逆变器有功功率与并联逆变器总的有功功率

由图 11 可见,单个逆变器的有功功率为总的有功功率的一半,表明了下垂控制使得微电网中各分布式电源功率得到了均分。从图 10 ~ 图 12 可知,下垂控制可实现各台逆变器良好的并联运行。

5 结 论

首先提出微电网中各分布式电源并联的控制方法,接着分析微电网如何保证在孤岛模式下稳定运行。在仿真验证中,对单个分布式电源采用了电压电流双环控制;针对微电网中的孤岛模式,在双环控制下加上 PQ 下垂控制,实现了孤岛模式稳定运行;由于下垂控制的无互联与高冗余性,基于孤岛模式控制下顺利的实现了各分布式电源并联的稳定运行。

参考文献

[1] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报,2014,29(2): 1-8.

[2] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等. 含分布式发电系统的微电网技术研究综述[J]. 电网技术,2009,33(9): 14-18.

[3] Guerrero J M, de Vicuna L G, Matas J, et al. A Wireless Controller to Enhance Dynamic Performance of Parallel Inverters in Distributed Generation System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1205-1213.

[4] Lasseter R H. The Role of Distributed Energy Resources in Future Electric Power Systems [C]. Energy Systems Seminar, University of Wisconsin, 2006.

[5] Begović M, Pregelj A, Rohatgi A, et al. Impact of Renewable Distributed Generation on Power Systems [C]. Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2001.

[6] 丁明,张颖媛,茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术,2009,33(11): 6-10.

[7] 赵宏伟,吴涛涛. 基于分布式电源的微网技术[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(1): 121-125.

[8] Guerrero J M, Hang L, Uceda J. Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 2845-

2859.

[9] Holtz J, Lotzkat W, Werner KH. A High-power Multi-transistor-inverter Uninterruptible Power Supply System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 3(3): 278-285.

[10] Sun X, Lee Y S, Xu D. Modeling, Analysis, and Implementation of Parallel Multi-inverter System with Instantaneous Average-current-sharing Scheme [J]. IEEE Trans. Power Electron, 2003, 18(3): 844-856.

[11] 关雅娟, 郭伟扬, 郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 52-55.

[12] Li Y W, Kao C. 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.

[13] 张庆海, 彭楚武, 陈燕东, 等. 一种微电网多逆变器并联运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 126-132.

[14] 霍弘宇, 陈伟琪. 基于双电流环控制的并网逆变器设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(13): 131-134.

[15] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于PI调节器和电容电流反馈有源阻尼的LCL型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142.

[16] Quanwei Liu, Yong Tao, Xunhao liu, et al. Voltage Unbalance and Harmonics Compensation for Islanded Microgrid Inverters [J]. IET Power Electronics, 2013, 7(5): 1055-1063.

作者简介:

李红(1993) 硕士研究生,研究方向为柔性直流并网技术、逆变器并网及微电网控制技术、电能质量分析与控制等;

韩杨(1982) 博士,副教授,研究方向为新能源与分布式发电、微电网、无功补偿与谐波治理等;

沈攀(1991) 硕士研究生,研究方向为有源滤波器、电力电子技术在电力系统中的应用、电能质量分析与控制等。

(收稿日期:2015-07-14)