

提高多逆变器并网运行稳定性的控制方法

谢文浩, 王建贇, 纪延超

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对微电网中多逆变器并列运行时功率分配不当导致分布式电源并网困难,特别是功率动态分配的情况下系统可靠性更加恶化的问题进行研究。首先建立了多机下垂控制模型,推导下垂系数与分布式电源容量的匹配方程,并分析系统的静态稳定性。其次,提出了一种下垂控制与虚拟同步发电机控技术相结合的功率控制策略。通过增大逆变器的惯性和阻尼系数,抑制了微电网的频率波动,从而在输出功率静态稳定的同时,削弱了分布式电源并网产生的冲击,提高微电网运行的稳定性。最后,通过 Matlab/Simulink 仿真验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 微电网; 逆变器并联; 下垂控制; 虚拟同步发电机; 稳定性

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.01.013

中图分类号: TM464 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2018)01-0070-05

Research on Control Strategy for a Multiple Grid-connected-inverter System

XIE Wen-hao, WANG Jian-ze, JI Yan-chao

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The power share among multiple grid-connected inverters in microgrids is investigated to strengthen the system robust, especially when power flow varies frequently. Firstly, a model of droop control based multiple grid-connected inverters is established to deduce proper droop coefficients and analyze statistic stabilities. Then, a control strategy which combines with droop control and virtual synchronous generator is proposed to improve system stability. The proposed control scheme is utilized to increase the inertia and damping for inverters to suppress the fluctuation of frequency, which provides a perfect static stability and minimize shocks. Finally, simulation experiments are conducted to verify the effectiveness and validity of the proposed strategy.

Keywords: microgrid; inverter parallel; droop control; virtual synchronous generator; stability

0 引言

随着全球能源危机和环境问题的日益突出,分布式电源的并网技术引起了广泛的重视^[1]。虽然,

新能源发电比传统发电机的装机容量小,但仍然不能轻视分布式电源给电网安全稳定运行带来的挑战^[2-3]。因此,并网逆变器作为分布式电源与微电网的接口,其控制性能逐渐成为影响微电网稳定运行的重要因素。

收稿日期: 2016-04-04

基金项目: 高校强省计划(AUOQ2153000710)。

作者简介: 谢文浩(1993—),男,博士研究生;

纪延超(1962—),男,博士,教授。

通信作者: 王建贇(1972—),男,博士,研究员,E-mail: jianzewang@sina.com。

本文讨论的多逆变器并列运行方式为对等控制模式,即微电网中各分布式电源在控制权上具有同等的地位^[4-6],每个并网逆变器都只根据接入系统点的电压频率和幅值信息进行控制,具有即插即用的特点。所以对等控制模式下的并网逆变器和主控制器之间不存在通信,减轻了上层控制器的压力。

多逆变器并列运行的微电网系统中,最常用的自主控制策略是下垂控制。逆变器采用类似传统发电机的下垂特性曲线作为控制依据,将系统功率动态分配给各分布式电源,保证微电网内部的功率平衡^[7-9],具有控制简单,静态稳定性好的优点。然而,常规下垂控制策略导致并网逆变器惯性小、难以参与微电网的频率调节^[10-12]。负荷发生变化时,逆变器无法为的微电网提供必要的阻尼作用,微电网频率波动较大,严重影响系统的稳定性。因此有必要对逆变器控制策略的动态稳定性展开深入研究。值得一提的是虚拟同步发电机控制策略能有效增大逆变器的惯性^[13-20]。本文提出将功率下垂控制与虚拟同步发电机技术相结合的控制策略,保留下垂控制良好的静态稳定性,同时提高微电网的动态稳定性。

1 多逆变器并网模型

并网逆变器依据工作方式可分为电压控制模式和电流控制模式。考虑到逆变器工作在孤岛情况下,需要为微电网提供电压支撑,同时为了避免在双模切换时的冲击电流,因此本文所提的控制策略均属电压控制模式。图 1 表示两台并网逆变器并列运行的结构图,PCC(point of common coupling)为两台逆变器并网的公共耦合点。此时逆变器的功率外环产生电压参考值,再经过电压电流双闭环控制获得 PWM 调制信号。

2 下垂控制策略

逆变器经过连接电抗与电网连接,其注入交流网络的功率如式(1)所示。

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{U_0 U_s \sin \delta}{X} \\ Q &= \frac{U_0 U_s \cos \delta - U_s^2}{X} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, X 代表逆变器与交流网络之间的电抗, U_s 代表交流网络侧电压幅值, U_0 代表逆变器输出电压的幅

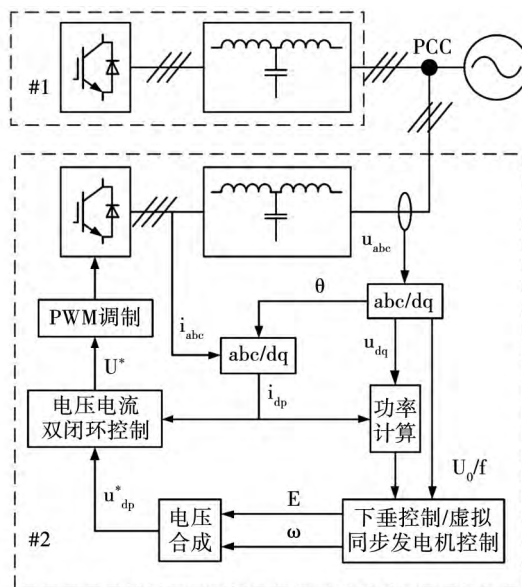


图 1 两台并网逆变器并列运行图

值; δ 代表逆变器输出电压与电网耦合点电压的功角。正常运行时, δ 较小,所以可以认为注入电网的有功功率和逆变器输出电压的功角呈线性关系,无功功率和输出电压幅值成线性关系,实现了有功功率和无功功率的解耦控制。

下垂控制正是模拟传统发电机组“功频静特性”的方法,其控制原理如图 2 所示。当系统有功负荷突然增大时,电网电压的频率下降。下垂控制模拟发电机调速器增大机组输出的有功功率,最终使得频率稳定在低于初始值的新稳态。同样,当系统无功负荷突然增大时,电网电压的幅值下降。下垂控制模拟发电机的励磁控制器控制机组输出端电压,增大发出的无功功率,最终使得电压幅值稳定在新的稳态。

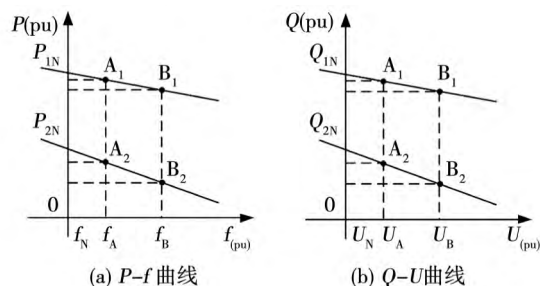


图 2 下垂控制原理

从图 2 的功率控制图中可以发现,常规下垂控制方法的基本思想是通过检测公共耦合点的电压频率和电压幅值,利用下垂特性式(2)和(3)确定逆变器输出的有功功率和无功功率的参考值。实现各并联的逆变器之间的负荷自动分配。

制的内电势增量及下垂系数。

4 实验验证

为检验多逆变器并列运行时下垂控制的功率自动分配效果,在 Matlab/Simulink 中搭建两台不同容量和下垂系数的逆变器,各逆变器参数如表 1 所示。

表 1 逆变器参数

逆变器	S/kVA	$m/10^{-5}$	$n/10^{-3}$
#1	20	5	5
#2	10	10	10

微电网功率平衡的仿真结果如图 4 所示。在 0.25 s 时,负载的有功功率从 30 kW 突加到 34.5 kW,相应地,#1 逆变器分配的有功功率从 20 kW 增大到 23 kW,而#2 逆变器分配的有功功率从 10 kW 增大到 11.5 kW。负载的功率变化依据微电源容量自动分配给两台逆变器,证明下垂控制在两机并列运行的系统中具有较好的静态稳定性。

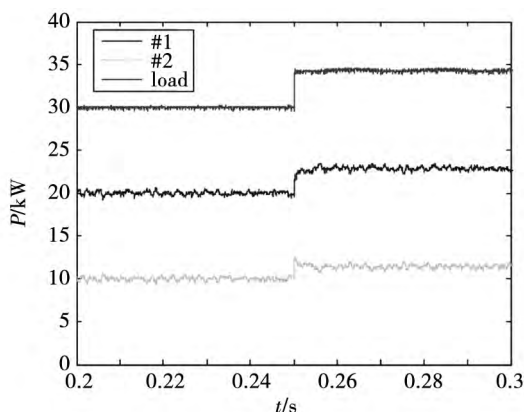


图 4 两台常规下垂控制的逆变器功率分配波形

然后,为测试常规下垂控制的动态性能,对并网逆变器做了空载启动、50% 额定功率运行和 100% 额定功率(20 kW)运行的实验,结果如图 5 和图 6 所示。在 0~0.03 s 内,逆变器工作在预同步模式,并网后的 0.03 s~0.07 s 中逆变器的输出功率保持在 1 kW 以内,并快速减小,说明逆变器已经成功并网。随后进行了两次加载实验,可以看出逆变器加载的动态过渡过程为 0.03 s,并且功率的稳态误差较小。

图 6 为基于下垂控制的逆变器参考电压的角频率变化过程,逆变器加载时参考角频率波动超过 4 rad/s。

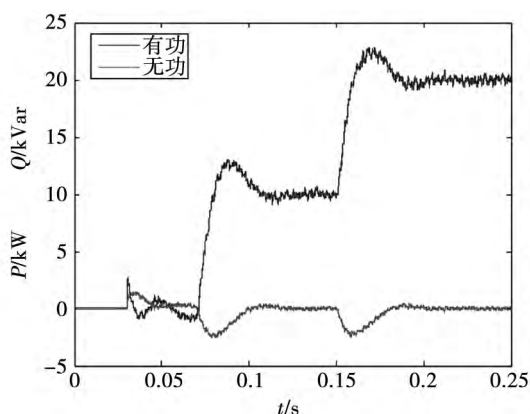


图 5 常规下垂控制的逆变器输出功率波形

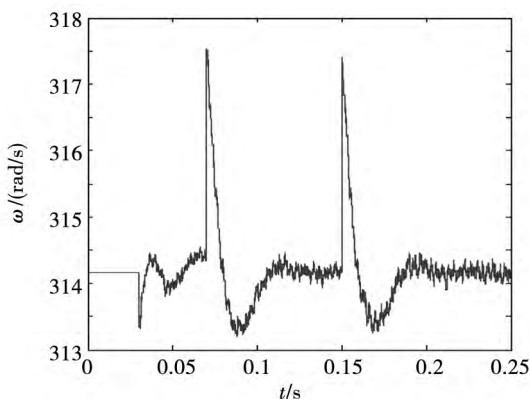


图 6 常规下垂控制的参考电压频率波形

为了验证虚拟同步发电机的惯性和阻尼特性,搭建了本文提出的虚拟同步发电机的控制模型,结果如图 7~图 9 所示。0.07 s 时逆变器的功率参考值从 0 突加到 10 kW,而逆变器的并网有功功率经过 1.1 s 的动态过程才缓慢达到功率给定值。在逆变器稳定工作后,再次增大功率参考值到 100% 额定功率,观察到相同的动态过程。

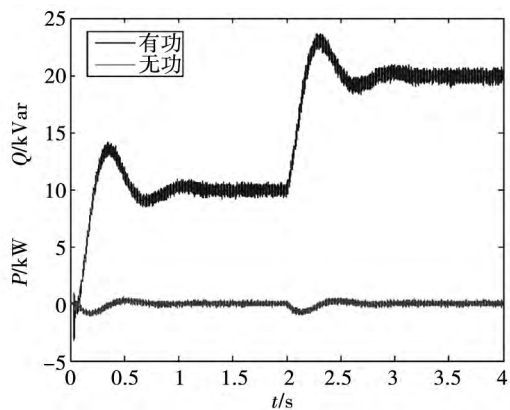


图 7 改进策略的逆变器输出功率波形

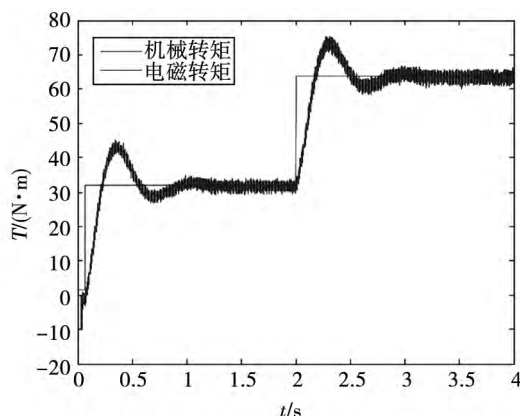


图8 改进策略的虚拟转矩波形

比较两种控制策略的动态仿真结果,可以看出改进虚拟同步发电机控制将逆变器的加载过程从0.03 s增大到1.1 s,表现出较大的惯性和阻尼作用。

图9为改进虚拟同步发电机控制的逆变器参考电压的角频率变化过程,逆变器加载时参考角频率的波动始终小于0.1 rad/s,从而避免了电网频率的波动,显著削弱了分布式电源并网对微电网的冲击。

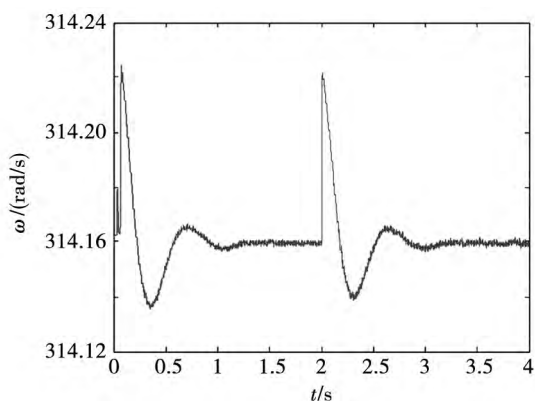


图9 改进策略的参考电压频率波形

5 结论

本文研究了多逆变器并列运行下微电网的动静态稳定性。常规下垂控制策略模拟传统发电机的功频静特性,对有功功率和无功功率解耦控制,使各逆变器依据容量自动分配微电网中的负荷变化,具有良好的静态稳定性。随后,针对下垂控制策略惯性和阻尼较小的不足,提出了一种将功率下垂控制与虚拟同步发电机控制技术相结合的控制策略,模拟传统同步发电机的机械和电气特性,控制逆变器的虚拟转矩和机端电压的缓慢变化,抑制了微电网的频率波动。最后,通过仿真验证了本文所提的控制方法使并网逆变器具有了良好的动静态稳定性,削弱了分布式电源并网对微电网的冲击,有利于微电网

的安全运行。

参考文献:

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
- [2] LASSETER R H. Microgrids and Distributed Generation [J]. Journal of Energy Engineering, 2007, 133(3):144-149.
- [3] 曾正,赵荣祥,汤胜清,等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(24):1-12.
- [4] 冯建奎. 基于下垂控制策略的逆变器并联系统的设计与仿真研究 [D]. 天津:天津大学,2013:14-19.
- [5] 杨向真. 微网逆变器及其协调控制策略研究 [D]. 合肥:合肥工业大学,2011:17-61.
- [6] 易桂平,刘悦,胡仁杰. 分布式电源并联运行控制新方法 [J]. 电机与控制学报,2016,20(3):109-118.
- [7] 吕志鹏,盛万兴,蒋雯倩,等. 具备电压稳定和环流抑制能力的分频下垂控制器 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):1-9.
- [8] 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):126-131.
- [9] 钟诚. 微电网中并网逆变器控制策略研究 [D]. 湖北:湖北工业大学,2011:28-29.
- [10] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
- [11] 张建华,苏玲,刘若溪,等. 逆变型分布式电源微网并网小信号稳定性分析 [J]. 电力系统自动化,2011,35(6):76-80.
- [12] HE J, LI Y W, Bosnjak D, et al. Investigation and Active Damping of Multiple Resonances in a Parallel-inverter-based Microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2013, 28(1):234-246.
- [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):26-31.
- [14] 侍乔明,王刚,付立军,等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法 [J]. 电网技术,2015,39(3):783-790.
- [15] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
- [16] JABER Alipoor, YUSHI Miura, TOSHIFUMI Ise. Power System Stabilization Using Virtual Synchronous Generator With Alternating Moment of Inertia [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2):451-458.
- [17] 邵克存,毕大强,戴瑜兴. 基于虚拟同步发电机的船舶岸电源控制策略 [J]. 电机与控制学报,2015,19(2):45-52.
- [18] 罗锐鑫. 微型电网运行控制策略的仿真分析 [D]. 成都:西南交通大学,2013:25-40.
- [19] 刘志昌. 基于虚拟同步发电机的光伏并网无缝切换技术研究 [D]. 长沙:中南大学,2014:27-51.
- [20] 杨亮,王聪,吕志鹏,等. 模拟同步发电机特性的同步逆变器研制 [J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(11):12-16.
- [21] LIU J, MIURA Y, ISE T. Comparison of Dynamic Characteristics Between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5):3600-3611.

(编辑:关毅)