

基于 NI-PXI 的微电网分级控制数模混合仿真方法

李光辉, 何国庆, 孙艳霞, 郝木凯

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

Digital/Physical Hybrid Simulation Method Based on NI-PXI for Hierarchical Control Strategy of Micro-grid

LI Guanghui, HE Guoqing, SUN Yanxia, HAO Mukai

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

摘要: 针对多电压源型微源组网的独立型微电网, 首先提出了基于微源下垂控制的系统分级控制策略: 利用微源一级下垂控制, 实现组网微源间功率自动分配; 利用 MGEMS 二级控制修正下垂曲线空载频率和电压, 提高系统供电质量; 利用 MGEMS 三级控制确定下垂曲线基点功率及斜率, 实现系统经济运行。其次设计了基于 NI-PXI 的微源分层控制数模混合仿真平台, 实现了基于 NI VeriStand 的实时建模仿真技术。最后提出了基于 NI-PXI 的微电网分级控制数模混合仿真平台整体方案, 并在国家能源大型风电并网系统研发(实验)中心完成系统搭建, 开展微电网的分级控制数模混合仿真实验, 结果验证了控制策略的有效性。

关键词: 微电网; 分级控制; NI-PXI; 数模混合仿真; 下垂控制

Abstract: As to the islanded micro-grid composed of multi-voltage source type micro-sources, a hierarchical control strategy based on the droop control of micro-sources is proposed. On the primary control level, the power of the isolated system is automatically allocated between micro-sources. On secondary control level, the no-load frequency and voltage of droop curve characteristics are adjusted by micro-grid energy management system (MGEMS) to improve power quality. On tertiary control level, the power and droop gain of droop characteristics at rated set point are coordinated by MGEMS to achieve economic operation of micro-grid. A digital/physical hybrid simulation scheme based on NI-PXI (PCI Extensions for Instrumentation, PXI) of micro-sources is proposed, and a real-time modeling and simulation method based on NI VeriStand is realized in this paper. In the end, a digital/physical hybrid simulation platform for hierarchical control based on NI-PXI is built in National Wind Power

Grid Integration R&D(Testing)Center, and the validity of hierarchical control strategy is verified based on the digital/physical hybrid simulation experiment for hierarchical control of micro-grid.

Keywords: micro-grid; hierarchical control; NI-PXI; digital/physical hybrid simulation; droop control

0 引言

近年来, 为解决大电网没有覆盖的偏远农牧地区以及海岛地区供电问题, 采用光伏、风电、水电、柴油发电机、储能等分布式微源组成的独立型微电网供电技术引起了社会和学术界的广泛关注^[1-4]。

本文将建立微电网电压和频率的微源定义为组网单元, 目前, 根据微电网组网单元构成方式的不同, 微电网的运行控制分为主从控制^[5-8]、对等控制^[9-10]及分层控制^[11-15] 3 种。主从控制受组网单元单机容量限制, 制约了微电网的供电规模。对等控制根据有无互联通信线分为有互联通信线的集中对等控制和无互联通信线的分散对等控制, 集中控制受通信速度的限制, 不适用于地理分布较为分散的多微源组网系统。分散控制采用微源下垂控制技术, 对供电系统电压和频率实现的是一种有差控制, 在系统功率偏差波动较大时, 无法保障系统的供电质量, 同时无法兼顾系统内多个储能单元荷电状态(stage of charge, SOC)的安全协调运行。

文献 [11] 提出了基于下垂控制微电网的分级控制策略, 但是其三级控制思想是根据换流器的控制目标划分的, 没有考虑整个微电网的协调控制。文献 [14-15] 只具体介绍系统电压和频率的一级控制和二级控制, 并未详细介绍基于电压源型微源

基金项目: 国家 863 课题(2011AA05A106)

下垂特性如何实现供电系统经济调度。

目前，研究微电网分级控制理论仍停留在 Matlab/Simulink 和 PSCAD/EMTDC 等离线仿真水平，其仿真精度与实际物理系统的暂稳态特性相比存在一定差距。有待提出一种数字物理相结合的数模混合仿真技术对控制策略进一步加以验证。

目前，分布式发电与微电网技术领域的数模混合仿真主要分为快速控制原型(rapid control prototype, RCP)仿真^[16]和硬件在环(hardware in the loop, HiL)仿真^[17]两种形式。文献 [16] 中的数模仿真将控制模型完全建立在仿真器中，在增大建模复杂程度的同时降低了系统抗干扰能力；文献 [17] 中的数模仿真主要用于测试控制器性能指标，无法实现对控制策略的开放式灵活修改。

本文针对多电压型微源组网的独立型微电网，首先提出了基于微源下垂控制的微电网分级控制框架，通过微电网一级、二级、三级控制，实现微电网安全、稳定、经济运行。其次设计了基于 NI-PXI(PCI Extensions for Instrumentation, PXI, 面向仪器系统的 PCI 扩展)的微源分层控制数模混合仿真平台；利用 NI VeriStand 软件在 NI-PXI 平台上进行 Simulink 实时建模仿真。最后设计并完成了基于 NI-PXI 的微电网分级控制数模混合仿真平台搭建，并依托该开放式的实验平台，对微电网的分级控制技术进行了验证。

1 基于微源下垂特性的微电网分级控制

1.1 微电网分级控制架构

本文研究的微电网是以 N 台电压源型微源组网的独立型供电系统，且提到的微源均指组网微源。提出的微电网分级控制框图如图 1 所示。一级控制针对系统内秒级功率偏差，通过微源的下垂控制实现就地平衡，同时微源间功率按比例自动分配。二级控制针对系统内分钟级功率偏差，利用微电网能量管理系统(micro-grid energy management system, MGEMS)修正微源下垂曲线的空载频率和电压，将供电系统的频率和电压维持在允许范围内。三级控制针对系统内小时级功率与能量偏差，基于系统优化调度功率指令，利用 MGEMS 修正微源下垂曲线的基点功率及下垂系数，实现系统经济运行。

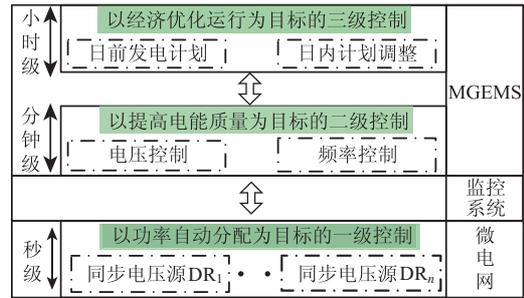


图 1 微电网分级控制框图

微源的下垂控制是指其有功-频率($P-f$)和无功-电压($Q-V$)输出特性，由于二者存在对偶特性，因此本文涉及的一、二、三级控制均只介绍 $P-f$ 控制。

1.2 一级控制

供电系统中各微源采用电压源控制技术，微电网的一级控制是指通过微源输出电压相角的控制，实现微源 $P-f$ 输出特性，使各微源共同承担系统内有功偏差，实现对系统频率控制， $P-f$ 下垂特性曲线如图 2 所示。

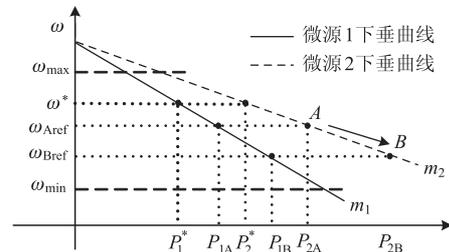


图 2 各微源参与微电网频率一级控制原理图

设 (P_{i*}, ω_i^*) 为微源 i 在 $P-f$ 曲线上的额定点， P_{i*} 为微源 i 的基点功率， ω_i^* 为系统的额定频率； m_i 为微源 i 的 $P-f$ 曲线的下垂系数，设 $m_i > 0$ ，则微源 i 的电压源控制方程可写为

$$\omega_{i_ref} = \omega_i^* + m_i(P_{i*} - P_i) \quad (1)$$

式中： ω_{i_ref} 为微源 i 输出电压频率的参考值； P_i 为微源 i 实时输出有功功率。

由图 2 可知，系统初始运行状态为 A，系统频率为 ω_{A_ref} ，各微源的有功输出为 P_{iA} 。系统有功偏差突增后，运行状态过度为 B，系统频率为 ω_{B_ref} ，各微源的有功输出为 P_{iB} 。通过微源就地下垂一级控制，可实现微源间有功功率按比例自动分配，完成系统功率实时就地平衡。

1.3 二级控制

由上述分析可知一级控制为有差控制，当系统

内功率偏差使微源运行点偏离基点功率点较远时,系统频率将超出规定的上下限范围。因此,为提高微电网的供电质量,需要对微电网进行二级控制,将系统的频率维持在正常范围。

二级调整依托 MGEMS,通过修正微源下垂曲线的空载频率实现。经过二级控制后,微源 i 输出电压频率的参考值 ω'_{i_ref} 为

$$\omega'_{i_ref} = \omega_0^* + \Delta\omega_i^* - m_i P_i \quad (2)$$

式中:下垂曲线空载频率平移量 $\Delta\omega_i^*$ 根据式(3)计算得到:

$$\Delta\omega_i^* = m_i \left[\frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} - P_i^* \right] \quad (3)$$

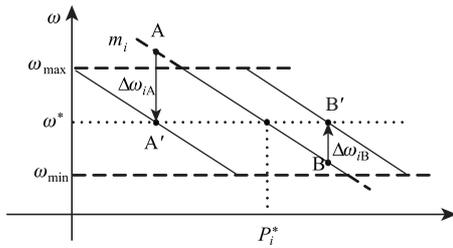


图3 各微源参与微电网频率二级控制原理图

由图3可知, MGEMS通过监控系统定时监测供电系统频率,分两种情况加以说明。情况1:在达到下一个监测周期时,系统频率运行于B点,则通过MGEMS频率二级控制修正所有微源下垂曲线,其中微源*i*如图3所示将由B点过渡到B'点;情况2:在未达到下一监测周期时,系统大幅度功率偏差导致频率运行于A点超过规定范围,监控系统向MGEMS上传频率二级控制中断请求, MGEMS频率二级控制修正所有微源下垂曲线,其中微源*i*如图3所示将由A点过渡到点A'。

1.4 三级控制

根据独立型微电网经济运行优化调度模型, MGEMS可得到各微源日前启停机计划和日内有功功率调度计划^[18]。微电网三级控制是指MGEMS将功率调度计划转换成各微源的下垂曲线方程,确定各微源在一级控制过程中承担的功率比例,最终实现微电网经济运行。

为保证供电系统内功率偏差在微源间按其基点功率正比分配,可得

$$m_1 P_1^* = m_2 P_2^* = \dots = m_N P_N^* = k \quad (4)$$

根据MGEMS优化调度功率指令,可得微源*i*的基点功率 P_i^* ,进而可得下垂系数为

$$m_i = \frac{k}{P_i^*} \quad (5)$$

由图2可知各微源基点功率运行下频率相同,本文规定取50Hz,上述分析可得到一级控制中的下垂曲线方程。

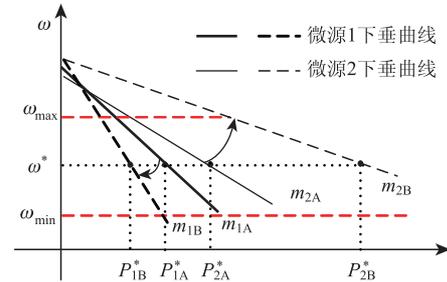


图4 各微源参与微电网频率三级控制原理图

由图4可知,系统运行初始状态为A,两微源的基点功率分别为 P_{1A}^* 和 P_{2A}^* ,对应的下垂系数分别为 m_{1A} 和 m_{2A} 。MGEMS优化调度下一周期基点功率分别为 P_{1B}^* 和 P_{2B}^* ,对应的下垂系数分别为 m_{1B} 和 m_{2B} ,此时MGEMS通过将B状态对应各微源下垂曲线达到微源,供电系统将过渡到状态B。

综上所述,对于由多台电压源型微源组网的微电网,依托MGEMS的二、三级控制,结合微源自身的一级控制,可以实现独立型微电网的安全、稳定、经济运行。

2 数模仿真平台设计与实现

2.1 基于NI VeriStand实时建模仿真

以NI-PXI作为面向仪器系统的PCI扩展,是一种由美国国家仪器公司NI生产发布的基于PC技术的测量和自动化平台^[19]。NI-PXI平台支持实时(real-time, RT)操作系统,可作为实时仿真平台目标机。NI VeriStand是一种配置实时仿真应用程序的软件环境,能够从Matlab/Simulink环境中导入控制算法和仿真模型。本文首先在Simulink环境中搭建微电网分级控制策略仿真模型,然后通过Windows主系统配置NI VeriStand引擎架构,完成数字仿真模型与外部物理接口在NI-PXI上的部署,完成仿真模型对应控制代码自动生成,进而完成基于NI-PXI平台的实时建模仿真,基于NI VeriStand的数模物理混合仿真建模流程如图5所示。

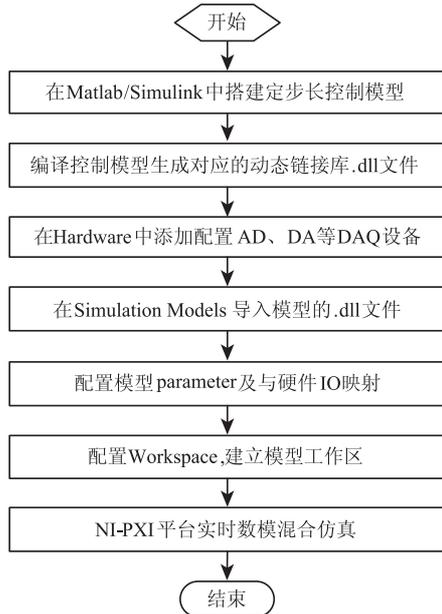


图 5 基于 NI VeriStand 实时建模仿真流程

2.2 微源数模仿真平台设计与实现

本文提出的微源数模仿真平台架构如图 6 所示，电压源型微源采用 DC/AC 换流器拓扑结构。物理平台主要包括 DC/AC 主电路以及底层 DSP 控制器；数字平台依托 NI-PXI 1045 仿真器实现。

由图可见微源的控制部分采用分层设计，内环通用的 V/F 控制部分固化在底层 DSP 控制器，在微电网分级控制建模仿真过程中降低了控制模型复杂程度，同时 DSP 与功率变换模块就近连接触发，有效提高系统抗干扰能力；外环控制在开放的 NI-PXI 实时平台上建模实现，有效提高系统灵活性与开放性。上层数字平台与底层物理平台通过 AD 板卡 PXI-6143 和 DA 板卡 PXI-6713 标准接口无缝对接，实现平台的数字/物理混合仿真。

2.3 微电网分级控制数模仿真平台设计与实现

基于上述介绍的微源数模混合仿真平台设计方案，本文提出了一种基于 NI-PXI 的微电网分级控制数字物理混合仿真平台设计方案，如图 7 所示，并在国家能源大型风电并网系统研发(实验)中心完成该实验系统的搭建。

该实验平台主要由两台电压源型微源、线路阻抗模拟装置、系统负荷模拟装置、NI-PXI 纯数字实时仿真装置和电网等几部分组成。

由图 7 可知，本数模仿真平台有数字仿真部分和物理仿真部分，数字仿真部分通过 NI-PXI 实时仿真平台，搭建微电网分级控制策略模型，物理部

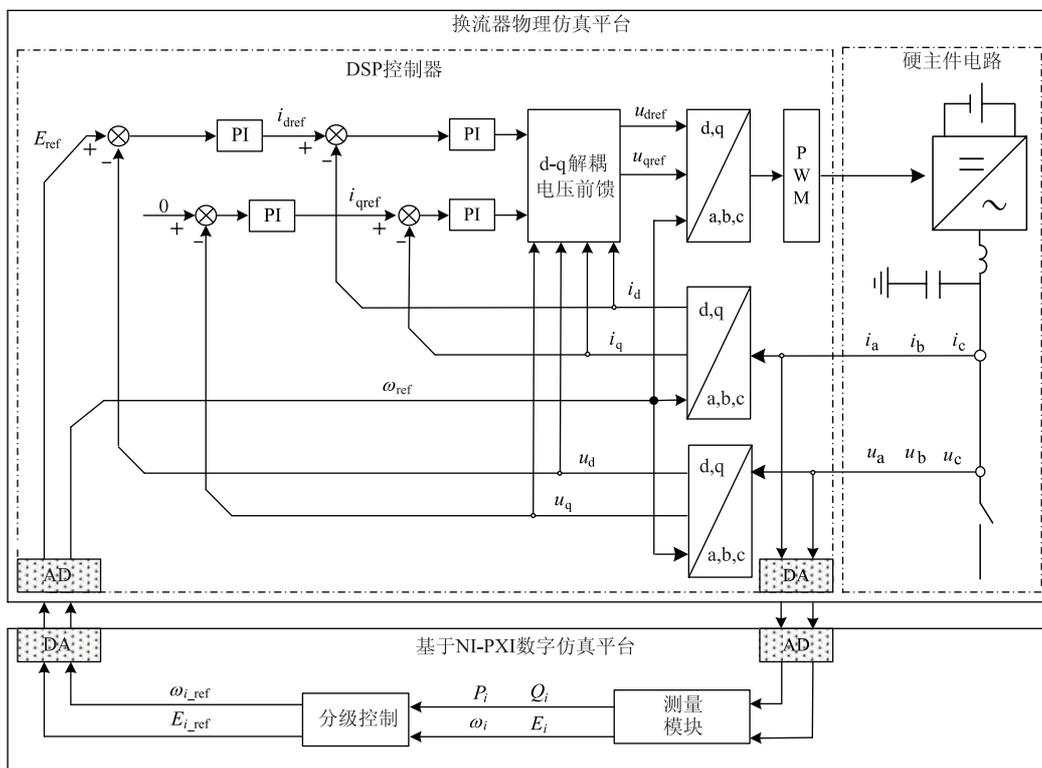


图 6 基于 NI-PXI 微源数模仿真平台控制框图

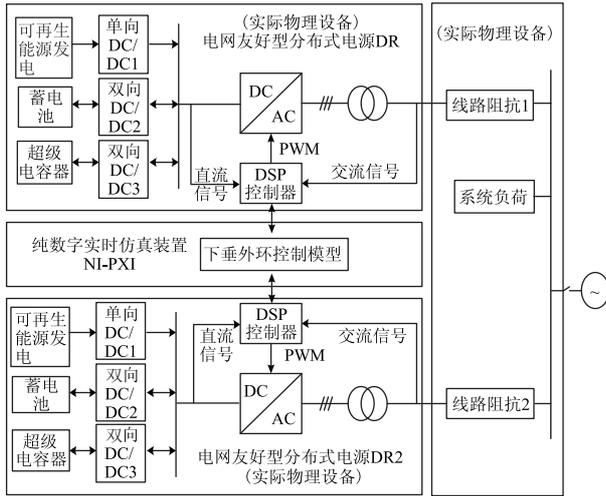


图7 基于NI-PXI的微电网数模仿真平台系统图

分主要完成独立供电系统电源与负荷的暂稳态特性实验。图8详细介绍了微电网频率分级控制的数模仿真控制框图，由图可知，在Matlab/Simulink环境搭建微电网频率分级控制模型，首先根据频率三级控制获取各微源基点功率及下垂斜率；根据频率二级控制获取各微源下垂曲线偏移量；由上述两级控制即可得到各微源下垂曲线方程。该控制模型生成动态链接库后，由NI VeriStand完成系统资源配置及实时引擎部署，完成Matlab/Simulink控制模型对应控制代码的自动生成与实时运行，实现与外部物理平台有效互动，最终完成微电网分级控制数模混合仿真。

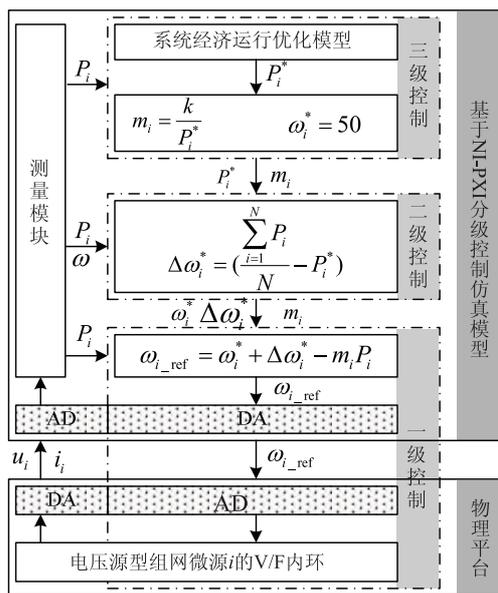


图8 微电网频率分级控制建模框图

3 实验验证

为验证本文提出的微电网分级控制策略有效性，依托该数模混合仿真实验平台对独立型微电网分级控制策略进行实验验证。系统中的微源1和微源2分别采用100kW和30kW的双向换流器。两换流器的运行参数如表1所示。

表1 两台微源运行参数

参数	微源1	微源2
有功功率/kW	-30~30	-15~15
频率变化/Hz	49.5~50.5	49.5~50.5
无功功率/kvar	-30~30	-15~15
电压变化/V	360~400	360~400
频率下垂系数/(Hz/kW)	0.017	0.033
电压下垂系数/(V/kvar)	0.667	1.333

3.1 一级控制实验

在实验过程中，系统的无功负荷为3kvar保持不变，有功负荷从7.5kW突变到15kW。系统有功和频率达到稳定后，有功功率保持15kW不变，无功负荷从3kvar突变到9kvar，实验结果如图9所示。

由图9可以看出，系统有功负荷突增，两微源输出的有功功率按照下垂系数的反比同时上升，系统频率同步下降。系统无功负荷突增，两微源输出的无功功率按照下垂系数的反比同时上升，两微源输出端口电压同步下降，验证了微电网一级控制策略的有效性。需要说明的是，由于微源2存在较小的电压开路控制偏差，导致图(c)中初始阶段的无功功率分配比例存在偏差，随着系统无功负荷增加，该控制偏差可忽略不计。

3.2 二级控制实验

实验过程中，系统的有功负荷为15kW，无功负荷为9kvar保持不变，两微源P-f下垂特性曲线的空载频率由50Hz突变到50.2Hz。系统的无功和电压达到稳定后，两微源Q-V下垂特性曲线的空载电压由380V突变到390V，实验结果如图10所示。

由图10可以看出，微电网频率二级控制通过调整P-f下垂特性曲线的频率基准值，对下垂特性曲线进行平移，系统频率随之改变，两微源的有功出力均不变。微电网电压二级控制通过调整Q-V下垂特性曲线的电压基准值，对下垂特性曲线进行平移，系统电压随之改变，两微源的无功出力均

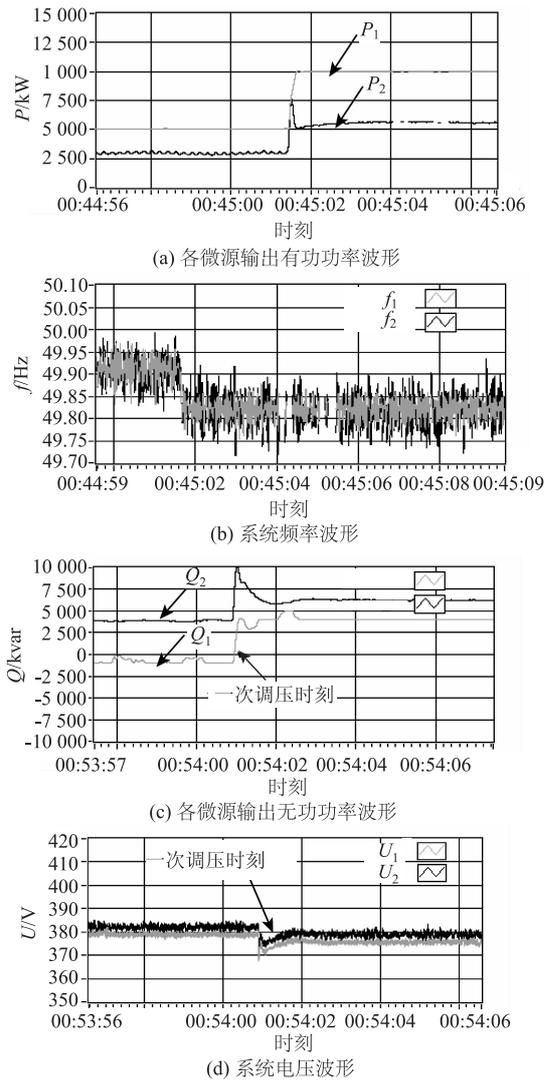


图 9 微电网一级控制实验结果

不变，系统供电质量得到了有效改善，验证了微电网二级控制策略的有效性。

3.3 三级控制实验

实验过程中，系统有功负荷为 15kW，无功负荷为 9kvar 保持不变，频率基准值为 50Hz，微源 1 的 $P-f$ 下垂系数减小，微源 2 的 $P-f$ 下垂系数保持不变，实验结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出，微电网频率三级控制，改变微源 1 的 $P-f$ 下垂系数，系统的有功分配会改变，系统频率随 $P-f$ 下垂曲线及有功功率的分配而改变，上述实验波形与系统频率三级控制理论完全对应。

4 结论

① 本文针对多电压源型微源组网独立型微电网提出的分级控制策略，通过微源的一级就地控

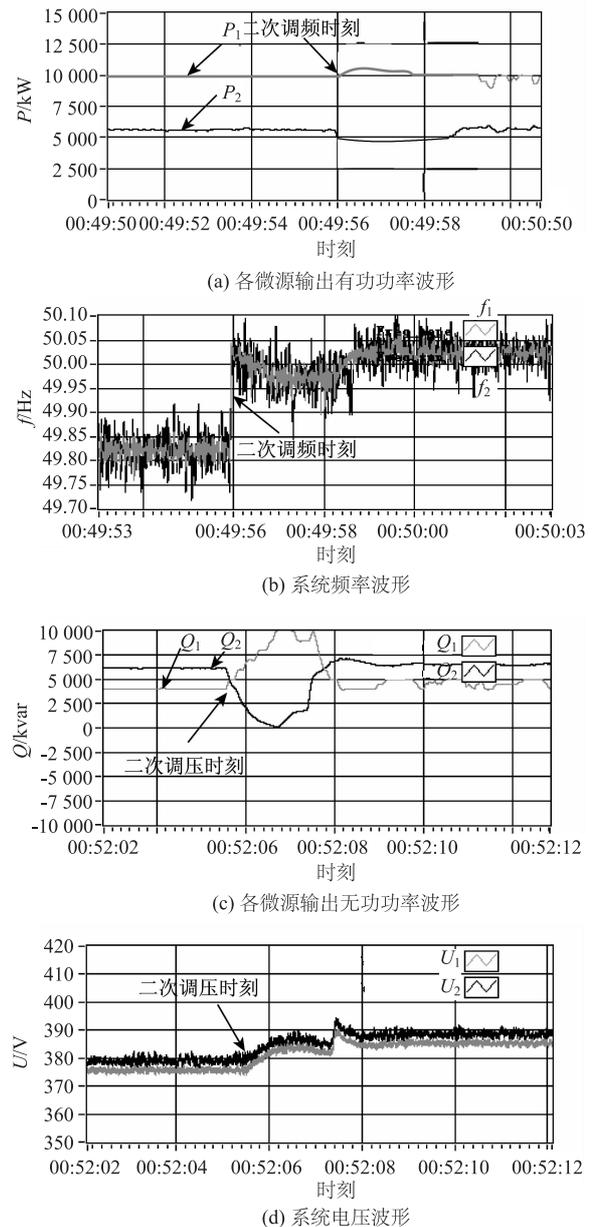


图 10 微电网二级控制实验结果

制，实现了多微源间功率自动按比例分配，通过 MGEMS 的二级控制，有效改善了供电系统的供电质量，通过 MGEMS 的三级控制，实现了供电系统经济运行。

② 本文提出了基于 NI-PXI 的电压型微源数模混合仿真系统方案，基于 NI VeriStand 的实时建模仿真技术有效提高控制策略实现的开发效率，基于 NI-PXI 的微源分层控制设计有效提高了数模仿真系统的可靠性和灵活性。

③ 本文依托国家能源大型风电并网系统研发(实验)中心的基于 NI-PXI 微电网分级控制数模

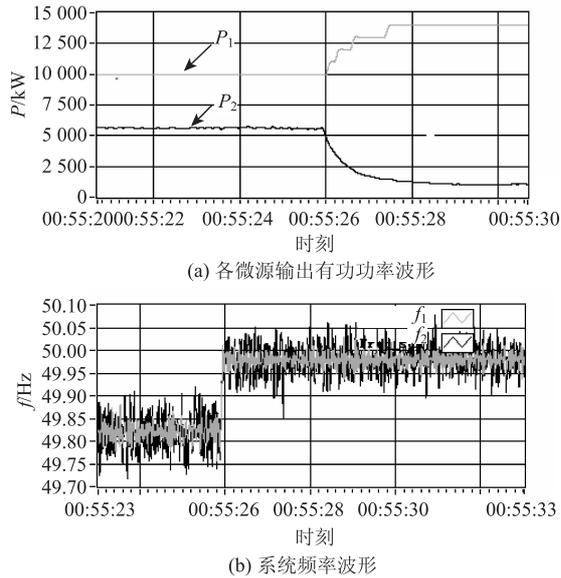


图 11 微电网三级控制实验结果

仿真平台,开展多电压型微源组网微电网的分级控制实验,实验结果验证了控制策略的有效性。

参 考 文 献

- [1] 刘文,杨慧霞,祝斌.微电网关键技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2012,40(14):152-155.
- [2] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):25-34.
- [3] 苏玲,张建华,王利,等.微电网相关问题及技术研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):235-239.
- [4] 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.
- [5] Blaabjerg F, Chen Z. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2004, 19(5): 1084-1094.
- [6] Yunqing P, Guibin J, Xu Y, et al. Auto-master-slave control technique of parallel inverters in distributed AC power systems and UPS [C] //Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, 2004.
- [7] Yeong J C, Sng E K K. A novel communication strategy for decentralized control of paralleled multi-inverter systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 148-156.
- [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] Oshima H, Miyazaya Y, Hirata A. Parallel redundant UPS with instantaneous PWM control [C] // 13th International Telecommunications Energy Conference. INTELEC '91, 1991.
- [10] Duan S, Meng Y, Xiong J, et al. Parallel operation control technique of voltage source inverters in UPS [C] // Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1999.
- [11] 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.
- [12] Josep M G, Mukul C, Tzunglin L, et al. Advanced control architectures for intelligent micro-grid-part I: decentralized and hierarchical control [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2013, 60(4): 1254-1262.
- [13] 杨向真,苏建徽,丁明,等.面向多逆变器的微电网电压控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(7):7-13.
- [14] 鲍薇,胡学浩,李光辉,等.提高负荷功率均分和电能质量的微电网分层控制[J].中国电机工程学报,2013,33(34):106-114.
- [15] 鲍薇,胡学浩,李光辉,等.基于同步电压源的微电网分层控制策略设计[J].电力系统自动化,2013,37(23):20-25.
- [16] 付超,王丹,王毅,等.基于NI-PXI的分布式发电数模混合仿真系统[J].电力电子技术,2012,46(2):57-59.
- [17] 王丹,石新春,孙玉巍,等.风力发电的可控功率源硬件在环仿真[J].电气自动化,2013,35(2):32-34.
- [18] 郭思琪,袁越,张新松,等.多时间尺度协调控制的独立微电网能量管理策略[J].电工技术学报,2014,29(2):122-129.
- [19] 陈昭宇,张建文,蔡旭.基于PXI技术的全功率风电变流器监测系统[J].电网与清洁能源,2012,28(11):77-81.

收稿日期:2014-07-23

作者简介:李光辉(1984—),男,硕士,工程师,主要研究方向为分布式电源和微电网关键技术,E-mail:liguanghui@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑:杨秋霞)