

基于 NI-PXI 微电网多模式数模混合仿真平台的设计与实现

李光辉¹, 何国庆¹, 郝木凯¹, 孙艳霞¹, 闫博²

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 浙江嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 完成了一种微电网数字物理混合仿真平台的设计与实现。平台结构采用 NI-PXI 数字平台与 DC/AC 换流器物理平台分层设计方法, 控制方式采用底层归一化控制与上层并行控制方法, 利用 NI VeriStand 完成微电网 Matlab/Simulink 控制模型的实时仿真。结合实验平台物理结构与控制方式设计, 提出了微电网主从模式无缝切换、对等模式的黑启动以及分层模式的频率二级调整对应的控制策略。在国家能源大型风电并网系统研发(实验)中心完成平台搭建, 开展微电网多控制模式数模混合仿真实验, 实验结果验证了控制策略的有效性及其试验平台设计方案的科学性。

关键词: 微电网; 分布式发电; 数模混合仿真; 实验平台; NI-PXI

Design and implement of multi-mode digital/physical hybrid simulation platform based on NI-PXI for micro-grid

LI Guanghui¹, HE Guoqing¹, HAO Mukai¹, SUN Yanxia¹, YAN Bo²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Zhejiang Jiaying Power Supply Company, Jiaying 314000, China)

Abstract: A digital/physical hybrid simulation platform for micro-grid is designed and implemented. The platform is composed of NI-PXI digital platform and DC/AC physical platform, the control mode is composed of bottom normalized control and upper layer parallel control, and the Matlab/Simulink control mode of micro-grid is converted to the real-time simulation mode by the NI VeriStand. The micro-grid control mode includes master slave control, peer-to-peer control and hierarchical control modes. The control strategy of key operation mode corresponding to the three kinds of control mode is proposed based on the structure and control mode of the platform. The simulation platform is established in National Wind Power Grid Integration R & D (Testing) Center and the control strategy of micro-grid is verified on the platform. Experimental results demonstrate the effectiveness of the control strategy and the scientificity of the design scheme.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA052003).

Key words: micro-grid; distributed generation; digital/physical hybrid simulation; experimental platform; NI-PXI

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)20-0107-07

0 引言

微电网作为发挥分布式电源能效的一种有效方式, 近年来引起了社会和学术界的广泛关注^[1-4]。协调控制技术是实现微电网安全稳定运行的关键问题, 实验平台作为各种控制策略验证的有效手段。目前, 欧盟、美国、日本等国家从自身的国情出发, 依据不同的发展目的, 建立了一批微电网实验室和示范工程^[5-7]。目前, 我国一些技术领先的高校和科

研单位也相继建成了一批实验室和示范工程^[8-10]。

文献[6]介绍的实验室以单电源组网构成的微电网, 其主要目的是对主从控制^[11]进行研究。文献[7]介绍的实验室以多电压源型微源组网构成的微电网, 其主要目的是对下垂对等控制^[12]进行研究。文献[8]介绍的实验室由中日双方共同实施的“先进稳定并网光伏发电微电网系统”, 主要目的是对微电网电能质量控制技术研究。综上所述, 国内外建成的实验室一方面针对微电网某种控制模式研究; 另一方面对控制策略建模仿真与物理平台有效衔接有待进一步深入研究。实验平台需要能够对微电网多

种控制模式，每种控制模式下的多种运行状态进行模拟，以便对分布式电源与微电网的控制策略、系统运行模式及运行性能进行研究、测试和评估。

目前，研究微电网控制理论建模仿真技术大都采用 Matlab/Simulink 和 PSCAD/EMTDC 等离线仿真水平，其仿真结果与物理系统的实际特性存在一定差距，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^[13]和硬件在环(Hardware in the Loop, HiL)仿真^[14]两种形式。文献[13]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[14]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。

本文提出一种基于 NI-PXI(PCI Extensions for Instrumentation, PXI, 面向仪器系统的 PCI 扩展)的微电网数字物理混合仿真平台设计方案。该平台可兼容微电网主从控制、对等控制以及分层控制三种控制模式数模仿真实验，同时可开展微电网联网运行、孤岛运行、联网/孤岛之间无缝切换以及黑启动多种运行模式数模仿真实验。为验证实验平台设计的合理性，本文最后开展了多控制模式下微电网多运行模式实验，实验结果验证设计方案的科学有效性。

1 实验系统结构

本文提出的实验系统原理图如图 1 所示，系统为三相，电压 380 V，频率 50 Hz。由光伏发电系统、风力发电系统、微型燃气轮机系统、锂电池储能系统、负荷模拟系统以及实时仿真平台构成。

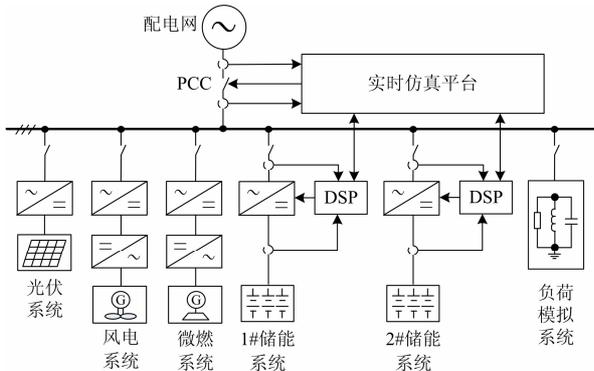


图 1 实验平台结构

Fig. 1 Configuration of experimental platform

在微电网各控制模式以及各运行模式的实现过

程中，组网单元的控制策略起到决定作用。因此，本文介绍的实验平台主要围绕储能组网单元控制策略数模混合仿真问题，而微电网其他能量管理策略以及分布式电源控制策略在此不详细介绍。

2 数模仿真平台的设计

2.1 基于 NI VeriStand 实时建模仿真

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^[15]。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 2 所示。

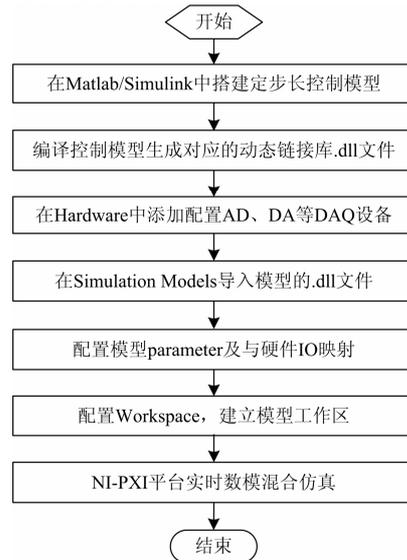


图 2 基于 NI VeriStand 实时建模仿真流程
Fig. 2 Flow diagram of real-time modeling and simulation based on NI VeriStand

2.2 平台结构设计

本文提出的储能系统数模仿真平台结构如图 3 所示，主电路采用 DC/AC 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。由图可见储能系统的控制部分采用分层设计，通用的 P/Q 与 V/f 归一化控制模型固化在底层 DSP 控制器中，在建模仿真过程中大大降低了控制模型复杂程度，同时

DSP 与 IGBT 功率变换模块就近连接触发, 有效提高系统抗干扰能力; 上层控制主要包括 V/f 给定模式、P/Q 给定模式、自同步模式与下垂模式, 四种模式均在开放的 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, 实现储能系统的数字/物理混合仿真。

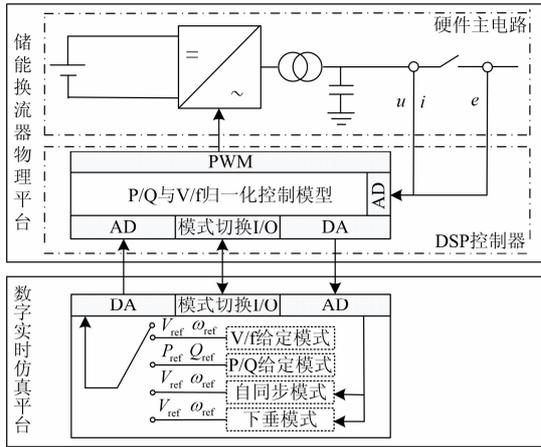


图 3 储能系统数模仿真平台结构

Fig. 3 Configuration of energy storage system digital/physical simulation platform

2.3 平台控制模式设计

2.3.1 底层控制设计

储能系统运行于 P/Q 模式时, 输入给定信号为有功功率 P_{ref} 和无功功率 Q_{ref} , 采用功率外环和电流内环的双闭环控制模型; 储能系统运行于 V/f 模式时, 输入给定信号为电压幅值 V_{ref} 和频率 f_{ref} (或角频率 ω_{ref} , 本文采用角频率), 采用电压外环和电流内环的双闭环控制模型。为实现储能系统双模式的平滑切换, 本文对控制模型进行归一化处理, 归一化模型外环采用功率外环电压外环并行结构, 内环采用共用电流环的结构, P/Q 与 V/f 归一化控制模型如图 4 所示。

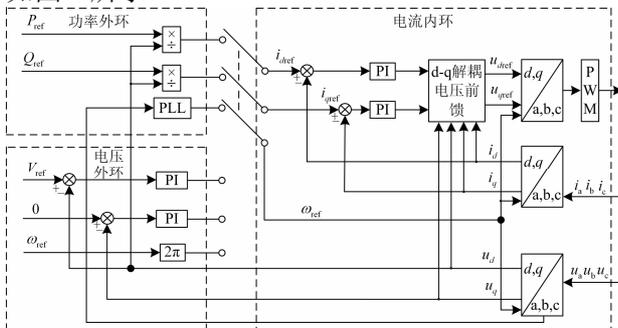


图 4 P/Q 与 V/f 归一化控制模型

Fig. 4 Normalized control model of P/Q and V/f

2.3.2 上层控制设计

为实现微电网多控制模式以及对应的多运行模式对应控制策略的数模混合仿真, 储能系统需要具备多种控制模式, 且为保证平台运行品质, 要求模式之间切换产生尽量小的功率冲击。为此, 本文提出在 NI-PXI 实时仿真平台上设计多控制模式并行结构, 包括: V/f 给定模式、P/Q 给定模式、自同步模式、下垂模式。

模式一: V/f 给定模式, NI-PXI 仿真平台直接下达储能系统运行的电压幅值 V_{ref} 和频率 ω_{ref} 参考值, 储能系统按照给定值运行, 输出稳定的电压和频率, 不随系统负荷波动而改变。

模式二: P/Q 给定模式, NI-PXI 仿真平台直接下达储能系统运行的有功功率 P_{ref} 和无功功率 Q_{ref} 参考值, 储能系统按照给定值运行, 输出稳定的有功功率和无功功率, 不随系统电压幅值和频率而改变。

模式三: 自同步模式, 其控制框图如图 5 所示, NI-PXI 仿真平台采集储能系统出口网侧电压信号, 通过锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)获取电网电压的幅值 V 和频率 ω , 同时考虑储能系统联接变压器的变比 k 和相角偏移量 $\Delta\theta$ 校正, 得到储能系统运行电压幅值 V_{ref} 和频率 ω_{ref} 参考值, 储能系统按照给定值以 V/f 模式同期并网。

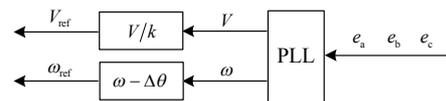


图 5 自同步模式控制框图

Fig. 5 Block diagram of self-synchronization model

模式四: 下垂模式, 其控制框图如图 6 所示, NI-PXI 仿真平台采集储能系统输出实时的有功功率 P 与无功功率 Q , 根据储能系统下垂参数^[16-21] ω_0^* 、 $\Delta\omega^*$ 、 m 、 V_0^* 、 ΔV^* 、 n 的设置, 计算出电压幅值 V_{ref} 和频率 ω_{ref} 作为参考值下达给储能系统, 储能系统以下垂模式运行。

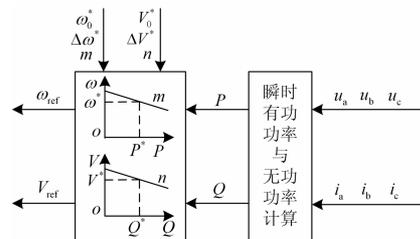


图 6 下垂模式控制框图

Fig. 6 Block diagram of droop model

3 实验平台运行控制

微电网在各种控制模式中的核心问题, 均是如

何维持微电网在稳态和暂态条件下的电压和频率稳定，而电压和频率稳定是通过保证微电网功率平衡来实现的。本文对微电网每种控制模式均介绍一个其对应的关键控制策略。

3.1 主从控制模式

联网/孤岛之间无缝切换是微电网主从控制模式中的难点和关键点之一，本文依托数模混合仿真平台对其控制策略开展研究。1#储能系统作为系统组网单元，2#储能系统退出运行，平台形成风、光、燃、储微电网。联网/孤岛之间的无缝切换主要涉及到大电网状态快速准确识别、储能系统 P/Q 与 V/f 双模式平滑切换、微电网与大电网平稳同期并网等关键步骤，具体控制流程如图 7 所示。

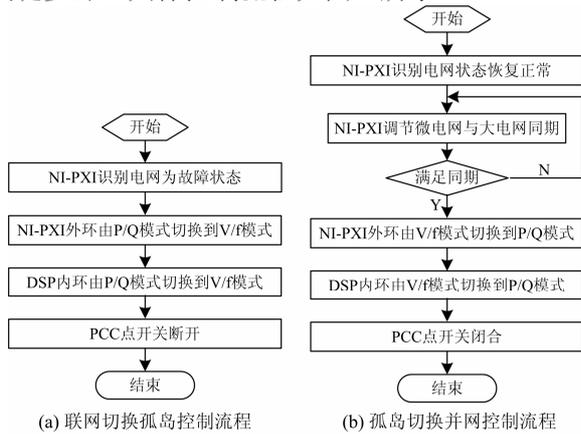


图 7 联网/孤岛切换控制流程

Fig. 7 Flow diagram of transition between grid-connected and island mode

3.2 对等控制模式

多电压源型储能系统组网的微电网黑启动是对等控制模式中难点和关键点之一，现以两台储能系统组网为例介绍黑启动控制策略。1#储能系统以 V/f 模式启动，为部分负荷供电；系统稳定后 1#储能系统由 V/f 模式切换到下垂模式。2#储能系统以自同步模式启动并完成并网，2#储能系统由自同步模式切换到下垂模式，投入系统其余负荷，即完成系统黑启动，具体控制流程如图 8 所示。

3.3 分层控制模式

针对微电网分层控制模式，通过二级电压和频率控制是改善微电网供电质量的有效手段，也是微电网分层控制模式的难点和关键点之一，在此以频率二级控制为例介绍其控制策略。

数字实时仿真平台定时监测微电网频率，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，则修正所有储能系统下垂曲线，其中储能系统 i 如图 9 中(a)所示将由 B 点

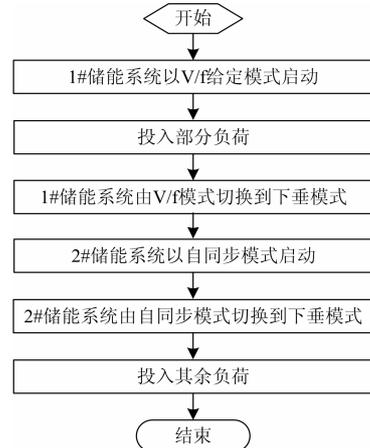
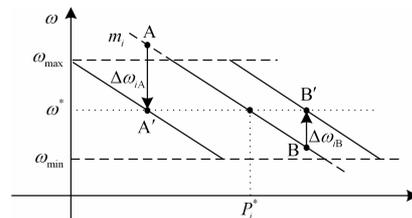


图 8 黑启动控制流程

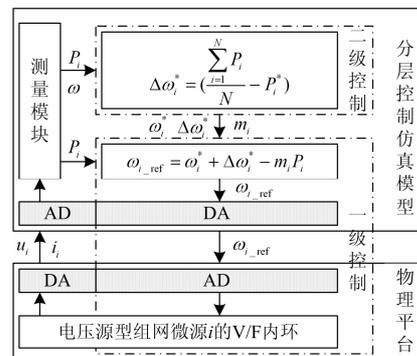
Fig. 8 Flow diagram of black start

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，修正所有储能系统下垂曲线，其中储能系统 i 如图 9 中(a)所示将由 A 点过渡到点 A'。

图 9(b)中详细介绍了微电网频率二级控制的数模混合仿真控制框图，由图可知，在 Matlab/Simulink 环境中搭建微电网频率分级控制模型，首先根据频率二级控制获取各微源下垂曲线偏移量，进而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，最终完成微电网频率二级控制数模混合仿真。



(a) 频率二级控制原理



(b) 频率二级控制建模框图

图 9 频率二级控制原理与框图

Fig. 9 Schematic diagram of secondary frequency control

4 实验验证

为进一步验证本文提出实验平台及运行控制的合理有效性,在国家能源大型风电并网系统研发(实验)中心完成平台搭建,实验平台组成原理如图 1 所示,各单元的额定装机容量如表 1 所示。

表 1 设备额定容量

Table 1 Rated capacity of equipment

序号	电源名称	额定容量/kVA
1	光伏发电系统	80
2	风力发电系统	10
3	微型燃气轮机系统	30
4	1#储能系统	100
5	2#储能系统	30
6	负荷模拟系统	100

4.1 主从模式联网/孤岛切换实验

实验平台初始状态联网运行,模拟电网故障,系统由联网状态切换到孤岛状态,然后模拟电网恢复正常,系统由孤岛状态切换到联网状态,实验结果如图 10 所示。

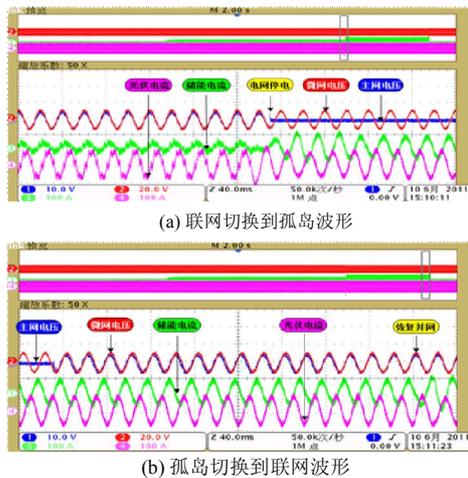


图 10 联网/孤岛切换实验结果

Fig. 10 Experiment results of transition between grid-connected and island mode

由图 10(a)中微电网电压波形可见,微电网由联网到孤岛实现了无缝切换,同时切换过程对光伏等其他并网运行的分布式电源冲击较小。由图 10(b)中微电网电压波形可见,电网电压恢复正常后微电网经过一个同期调节过程完成并网,实现孤岛到联网的无缝切换,实验结果验证控制策略与实验平台的有效性。

4.2 对等模式功率分配实验

将图 1 中 PCC 点开关断开,实验平台构成独立型微电网。开展两台储能系统组网的对等控制实验,

两台储能系统运行参数如表 2 所示。

表 2 储能系统运行参数

Table 2 Operation parameters of energy storage system

	1#储能系统	2#储能系统
有功功率范围/kW	-30~30	-15~15
频率变化范围/Hz	49.5~50.5	49.5~50.5
无功功率范围/kvar	-30~30	-15~15
电压变化范围/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

在实验过程中,系统的无功负荷为 0 kvar 保持不变,有功负荷从 7.5 kW 突变到 15 kW。实验结果如图 11 所示。

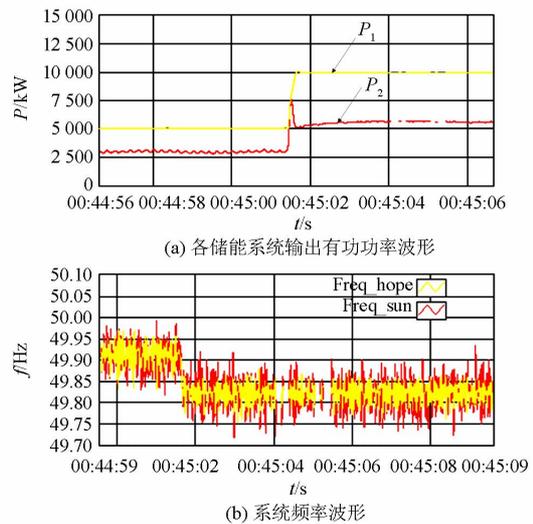


图 11 对等控制实验结果

Fig. 11 Experiment results of peer-to-peer control

由图 11 可以看出,系统有功负荷突增,两储能系统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,验证了微电网对等控制策略的有效性。

4.3 分层模式二级频率控制实验

将图 1 中 PCC 点开关断开,实验平台构成独立型微电网,开展分层控制模式中二级频率控制实验,两台储能系统运行参数如表 2 所示。

实验过程中,系统的有功负荷为 15 kW,无功负荷为 9 kvar 保持不变,两储能系统 P-f 下垂特性曲线的空载频率由 50 Hz 突变到 50.2 Hz。实验结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出,微电网频率二级控制通过调整 P-f 下垂特性曲线的空载频率,对下垂特性曲线进行平移,系统频率随之改变,两储能系统的有功出力均不变,系统供电质量得到了有效改善,验证了微电网频率二级控制策略的有效性。

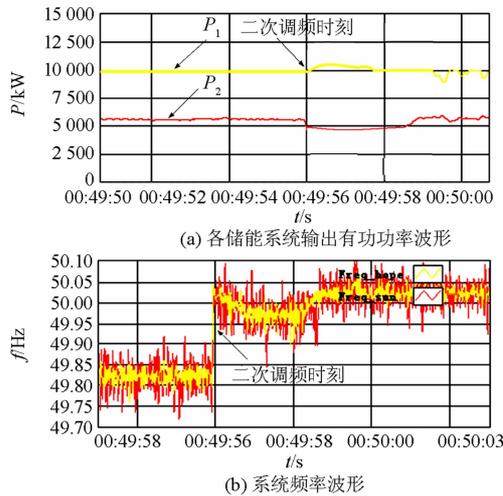


图 12 频率二级控制实验结果

Fig. 12 Experiment results of secondary frequency control

5 结论

1) 本文提出了一种基于 NI-PXI 的微电网数模混合仿真实验平台设计方案, 物理结构采用分层设计, 实现了上层数字模型与底层物理模型无缝对接; 底层归一化控制模型与上层并行控制模型设计, 为微电网多控制模式及多运行模式实证性研究提供了开放的平台。

2) 本文依托国家能源大型风电并网系统研发(实验)中心的微电网数模混合仿真平台, 根据本文提出各控制模式下典型控制策略, 利用高效的 NI VeriStand 实时建模方法, 开展微电网各控制模式的数模混合仿真实验, 实验结果验证了控制策略的有效性 & 实验平台的科学性。

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.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 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.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 25-34.

[3] 苏玲, 张建华, 王利. 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.
SU Ling, ZHANG Jianhua, WANG Li. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 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还反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
WANG Chengshan, XIAO Chaoxia, WANG Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the microsource in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107.

[5] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. An overview of ongoing research, development, and demonstration projects[J]. IEEE Power & Energy Magazine, August, 2007: 78-94.

[6] GEORGAKIS D, PAPATHANASSIOU S, HATZIARGYRIOU N. Operation of a prototype microgrid system based on micro-sources[C] // Power Electronics Specialists Conference, 2004: 2521-2526.

[7] LASSETER R H, ETO J H, SCHENKMAN B, et al. CERTS microgrid laboratory test bed[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 325-332.

[8] 杨秀, 杨菲, 王瑞霄. 微电网实验与示范工程发展概述[J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1599-1603.
YANG Xiu, YANG Fei, WANG Ruixiao. Development overview of microgrid laboratories and demonstration projects[J]. East China Electric Power, 2011, 39(10): 1599-1603.

[9] MAO Meiqin, DING Ming, SU Jianhui, et al. Testbed for microgrid with multi-energy generators[C] // 2008 Electrical and Computer Engineering, May, 2008.

[10] 郭力, 许东, 王成山. 冷电联供分布式供能系统能量管理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 96-100.
GUO Li, XU Dong, WANG Chengshan. Energy optimization and management of combined cooling and power distributed energy supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 96-100.

[11] PEI Y Q, JIANG G B, YANG X, 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.

[12] CHANDOPKAR 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.

[13] 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.
- FU Chao, WANG Dan, WANG Yi, et al. Digital/physical hybrid simulation system based on NI-PXI for distributed generation[J]. Power Electronics, 2012, 46(2): 57-59.
- [14] 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.
- WANG Dan, SHI Xinchun, SUN Yuwei, et al. Hardware in loop simulation of controllable power source in wind power[J]. Electrical Automation, 2013, 35(2): 32-34.
- [15] 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.
- CHEN Zhaoyu, ZHANG Jianwen, CAI Xu. A full-scale wind power converter monitor system based on PXI technology[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(11): 77-81.
- [16] 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.
- BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. Hierarchical control of microgrid to improve power sharing and power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 106-114.
- [17] 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.
- BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. Synchronous voltage source based design of hierarchical control strategy for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 20-25.
- [18] 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.
- YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Voltage control strategies for microgrid with multiple inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 7-13.
- [19] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.
- YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168.
- [20] 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.
- GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 122-129.
- [21] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 独立型微电网中基于虚拟阻抗的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 7-13.
- BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. An improved droop control strategy based on virtual impedance in islanded micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 7-13.

收稿日期: 2014-12-10; 修回日期: 2015-09-28

作者简介:

李光辉(1984-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为光伏发电并网技术、微电网关键技术; E-mail: liguanghui@epri.sgcc.com.cn

何国庆(1981-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为光伏发电并网技术、微电网关键技术;

郝木凯(1986-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为光伏发电并网技术、微电网关键技术。

(编辑 周金梅)