

DOI: 10.7667/PSPC170647

含多种分布式电源的直流微电网硬件在环 仿真系统设计与实现

王琛, 孟建辉, 王毅, 施凯伦

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 保定 071003)

摘要: 直流微电网具有高效、经济、适宜分布式电源接入和无同步问题等优点, 其运行和控制方法对直流微电网的安全稳定运行至关重要。为了满足对含多种分布式电源直流微电网运行和控制策略的测试需求, 提出一种针对直流微电网的多层次、多时间尺度硬件在环仿真(Hardware-in-the-loop Simulation, HILS)系统设计方案。该方案中, 根据不同的控制层级和控制时间尺度, 直流微电网的一次调压、二次调压和优化运行控制算法分别在不同的实时仿真机和控制器中实现, 且兼顾了本地重点单元及系统控制算法的验证。最后, 依据设计方案及不同处理器的运算能力和特性, 搭建了由实际控制器 DSP、RT-LAB 实时仿真机、cRIO 实时处理器及上位机等组成的 HILS 测试平台。并通过具体算例验证了所提 HILS 系统平台的可行性和灵活性。

关键词: 直流微电网; 运行与控制; 分布式电源; 硬件在环仿真; 策略验证

Design and implementation of hardware in-the-loop simulation system for DC microgrid with multiple DG units

WANG Chen, MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Kailun

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: DC microgrids are characterized by attractive features such as high efficiency, reduced cost, suitability for distributed generation connection, and needlessness for synchronization. The control and operation of the DC microgrid become significantly important for its stability. This paper proposes a multi-level and multi-time-scale Hardware in-the-loop Simulation (HILS) system as a new method to develop and test control algorithms and operation strategies for the DC microgrid. According to different control hierarchies and time scales, DC microgrid primary control, secondary control and optimal operation control algorithm are implemented in different real-time simulators and controllers. The key unit and system control methods can be both tested in the proposed design. Finally, according to the proposed design and different processors' computing ability and characteristics, the HILS platform including a DSP, a RT-LAB, a cRIO and a host computer is built. Detailed tests are carried out to show feasibility and flexibility of the proposed HILS platform.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050101).

Key words: DC microgrid; operation and control; distributed generation; hardware-in-the-loop simulation (HILS); strategy verification

0 引言

微电网作为一种实现分布式能源灵活消纳的重要方式, 对推进节能减排和能源利用的可持续发展具有显著意义^[1]。微电网系统中通常包含风电、光

伏等分布式电源, 储能、多类型负荷以及电力电子接口等, 其工作模式有并网和孤岛两种^[2]。随着直流形式分布式电源、负荷及储能占比的增加, 将它们以直流的方式组成直流微电网将成为未来供用电领域的一种重要形式。

直流微电网具有变换次数少、控制结构简单、不存在频率和无功相关问题等优点^[3], 近些年来受

基金项目: 国家 863 高技术基金项目资助 (2015AA050101)

到了广泛关注。文献[4]针对并网和孤岛两种模式下的直流微电网提出了一种协调控制策略,保证了多种工况下系统直流电压的稳定。文献[5]采用在阻性虚拟阻抗的基础上增加补偿虚拟阻抗的方法对传统下垂控制策略进行了改进,改善了直流微电网母线电压的动态特性。文献[6-7]对直流微电网的保护方法进行了研究,并提出了一些在电网电压故障情况下保持系统稳定运行的方法。此外,文献[8-10]分别针对直流微电网的能量管理、稳定性分析以及电能质量问题进行了研究。然而,受直流断路器与测试成本因素的影响,上述研究大多采用离线的纯数字仿真或极为简易的实验,在控制策略验证方法方面有待完善。

硬件在环仿真(Hardware-in-the-loop Simulation, HILS)作为一种安全、快速、可靠与经济的实时验证技术,已在电力电子、电动汽车、机器人及自动控制领域得到了广泛应用^[11-14]。文献[15]搭建了基于 RT-LAB 和 FPGA 的实时仿真平台,对高频链直流变压器的特性进行了实时仿真研究。文献[16]设计了一种功率硬件在环仿真接口放大装置,并提出了准比例谐振控制算法,减小了接口放大过程中引入的放大幅度误差。文献[17]建立了基于 RTDS 的并网逆变器控制器级 HILS 系统,并提出了一种基于改进离散傅里叶变换算法的延时补偿方法,提高了系统的稳定性及仿真精度。已搭建的 HILS 系统可分为功率级和信号级两类^[18],前一种通过功率放大器将实时仿真机与实际的测试装置相连,而后一种则将被测对象放在实时仿真机中并与其实际的控制器相连。功率级 HILS 系统侧重于硬件电路的测试,而信号级则侧重于控制器的验证,并具有良好的经济性。

目前,针对直流微电网 HILS 系统的研究成果鲜见报道。本文设计的 HILS 系统主要用于测试含多种分布式电源直流微电网的运行与控制策略,因此,首先对控制体系进行研究,并根据控制时间尺度划分控制层级。其次,基于 HILS 的系统框架与设计的要求,提出一种能够同时测试直流微电网本地关键单元控制算法及各个单元协同控制策略的 HILS 设计方案。最后,搭建基于 DSP、RT-LAB、cRIO 及上位机的 HILS 系统测试平台,并通过相关实验算例对搭建的平台进行验证。

1 直流微电网的运行控制

1.1 拓扑结构与运行模式

直流微电网的典型结构主要包含辐射型和环状

型两种,其中环状型结构具有更高的供电可靠性,如图 1 所示。该直流微电网主要包含风电、光伏、储能、交直流负荷以及联网换流器等,其中联网换流器 G-VSC 用来实现直流微电网与交流电网的互联,储能与直流微电网之间则通过双向 DC-DC 变换器 B-DC 连接。

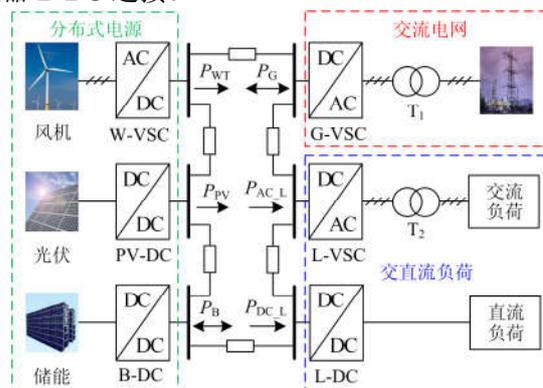


图 1 环状型直流微电网

Fig. 1 Ring structure of DC microgrid

根据与交流电网的功率交换形式,可将直流微电网的运行模式划分为联网自由模式、联网限流模式和孤岛模式^[19]。在联网自由模式下,直流微电网与交流电网相连,G-VSC 作为功率平衡节点保证系统的稳定。联网限流模式为 G-VSC 的功率输出受限,孤岛模式则为联网断路器断开,直流微电网脱离交流电网并作为一个独立的系统运行。在联网限流模式或孤岛模式下,储能是系统的功率平衡节点,当不平衡功率超过储能的功率或储能不足时,则需要新能源发电单元降功率运行或负荷减载。

1.2 控制体系

考虑到各单元的分布性和控制目标的复杂性,根据不同的控制时间尺度,可将直流微电网的控制体系划分为三个层次,即一次调压、二次调压和优化运行^[20]。其中,一次调压和二次调压是本文构建 HILS 系统的研究重点。

1) 一次调压

以下垂控制为基础,一次调压根据直流电压偏差将控制算法分成不同的区段,通过合理调节各个换流器的工作方式以使系统在多种工况下都能稳定运行,如图 2 所示。一次调压为分散控制,各变流器独立工作,无需相互通信,从而降低了控制的复杂程度,提高了控制的可靠性。本层控制响应时间一般为毫秒级。由图 2 可知,与联网自由模式对应的电压偏差满足 $|\Delta U_{dc}| < 0.02 \text{ p.u.}$,而与联网限流模式或孤岛模式对应的电压偏差 $|\Delta U_{dc}| \geq 0.02 \text{ p.u.}$ 。接下来对一次调压的分段情况进行详细介绍。

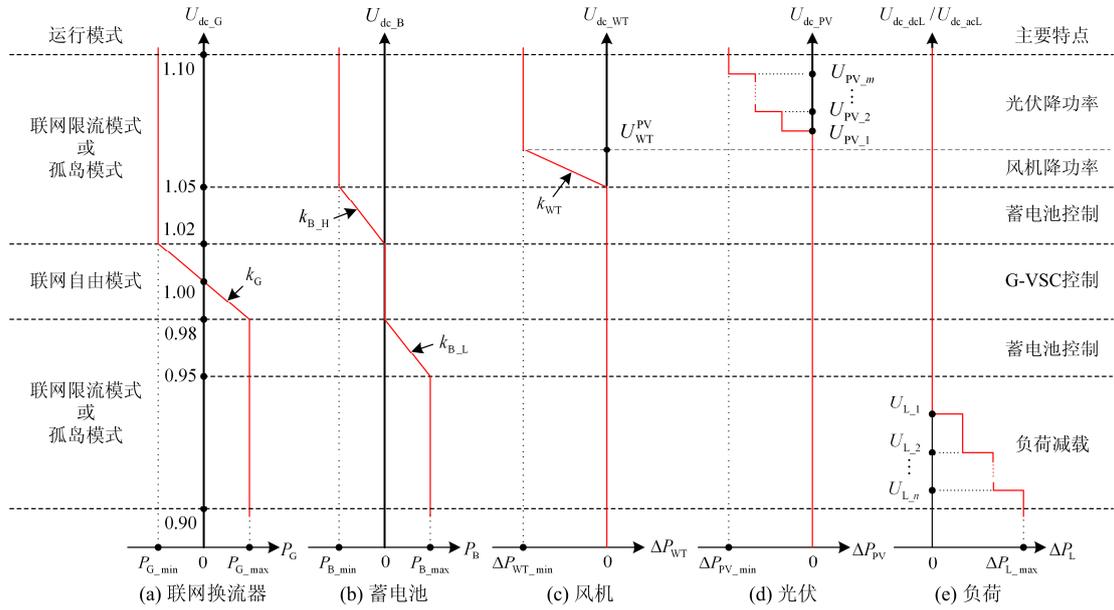


图 2 一次调压控制原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of primary control

(1) $|\Delta U_{dc}| < 0.02$ p.u.: G-VSC 控制直流电压, 储能处于备用(或充电)状态, 风机和光伏进行最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。图 2(a)中的 k_G 为 G-VSC 的下垂系数。

(2) 0.02 p.u. $\leq |\Delta U_{dc}| < 0.05$ p.u.: 联网断路器断开或 G-VSC 功率受限, 储能开始工作, B-DC 控制直流电压。这里选择蓄电池作为储能单元, 图 2(b)中的 k_{B_H} 和 k_{B_L} 分别为 B-DC 两段下垂曲线的下垂系数。

(3) 0.05 p.u. $\leq \Delta U_{dc} < 0.1$ p.u.: B-DC 吸收的功率达到最大值, 或蓄电池储能已满, 为保证系统功率平衡, 需要新能源发电单元降功率运行。当电压偏差超过 $(U_{WT}^{PV}-1)$ p.u. 时, 风机按图 2(c)中的下垂曲线降功率运行, k_{WT} 为下垂系数, ΔP_{WT_min} 为减发功率的最小值。当电压偏差超过 $(U_{WT}^{PV}-1)$ p.u. 时, m 组可切除的光伏电池板按照设定的阈值 U_{PV_1} 、 U_{PV_2} 等进行切除, 如图 2(d)所示。

(4) -0.1 p.u. $< \Delta U_{dc} \leq -0.05$ p.u.: B-DC 输出的功率达到最大值, 或蓄电池储能不足, 为保证系统功率平衡, 需要进行负荷减载操作。 n 个负荷单元根据重要性等级排序, 并按照设定的阈值 U_{L_1} 、 U_{L_2} 等进行切除(重要性等级低的负荷优先被切除), 如图 2(e)所示。

2) 二次调压

二次调压的主要作用是消除系统的直流电压偏差, 以使直流母线电压恢复至额定值。本文选择 G-VSC 作为二次调压单元, 通过改变其一次调压曲

线的截距来实现二次调压控制, 如图 3 所示。将直流母线电压额定值 U_n 与实际值 U_{dc_G} 的偏差送入比例-积分(PI)环节以得到修正量 ΔU , 利用 ΔU 对截距 $U_{dc_G}^*$ 进行修正就可以实现二次调压控制。

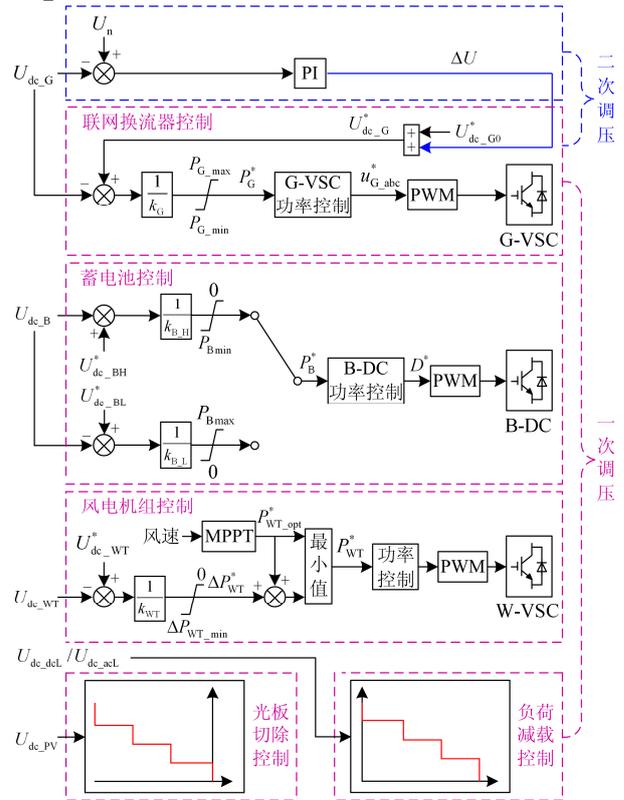


图 3 一次调压及二次调压控制框图

Fig. 3 Diagram of primary control and secondary control

此外, 一次调压实时信息和优化运行指令等均可通过二次调压层级作为中继来传递, 二次调压的控制响应时间尺度通常为秒级。

3) 优化运行

该控制层主要根据实时传递的各端信息实现直流微电网系统既定目标下的整体优化运行, 比如系统的直流电压优化、网损优化、潮流优化、能量管理及经济优化调度等均可在该控制层实现。与一次调压和二次调压相比, 优化运行的控制响应时间尺度最长, 通常为小时级。

2 HILS 系统框架及设计要求

2.1 HILS 系统框架

典型的 HILS 系统框架如图 4 所示, 主要包含通信接口、实时仿真机、功率接口及被测单元, 而被测单元又可分为硬件电路、单一控制器及系统控制器三部分。此结构中, 系统控制层级可包含如直流微电网系统中的能量管理器、优化控制器等, 其需要采集各个单元的实时运行数据来进行上层数据的分析及控制命令的下达, 因此需要合适的通用通信接口来连接各个部分。此外, 功率接口通常采用宽带大功率的功率放大器, 以实现实时仿真机和实际被测硬件电路之间的功率传输。

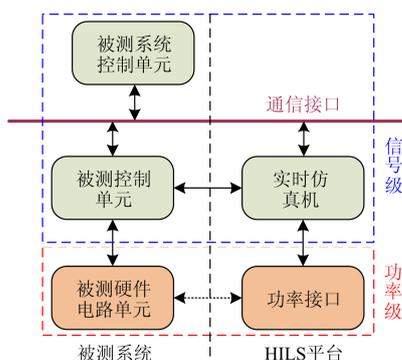


图 4 典型的 HILS 系统框图

Fig. 4 Diagram of typical HILS system

图 4 所示的 HILS 系统包含信号级和功率级两个层次, 采用该测试平台, 可以完成从单个装置控制器、硬件电路到系统级控制算法等一系列的测试, 具有广泛的适用性。但在实际应用中, 该测试平台成本较高, 根据不同的测试目标, 分别采用功率级或信号级的 HILS 测试平台, 下面通过两个具体的例子来说明, 如图 5 所示。

图 5(a)所示的功率级 HILS 平台重点考察的是真实的储能变换系统通过功率接口接入到虚拟的直

流微电网系统时的动态特性, 侧重于储能变换器的硬件电路测试; 图 5(b)所示的信号级 HILS 平台重点测试的是某一端或几端变换器的实际控制器性能, 侧重于控制算法验证。因此, 在对 HILS 系统平台进行设计时, 可根据不同的目标进行选择。本文设计的 HILS 系统主要是测试直流微电网的运行及控制策略, 宜采用信号级 HILS 平台。

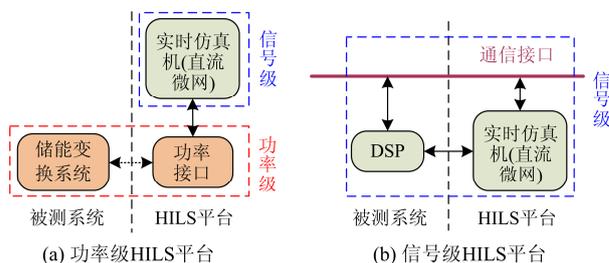


图 5 两种不同 HILS 结构示例

Fig. 5 Two different structure examples of HILS

2.2 设计要求

在设计直流微电网 HILS 系统时, 为保证系统的稳定、实时与灵活运行, 仿真模型、控制接口及通信接口等需要满足一定的设计要求, 具体如下。

1) 仿真模型: 本文设计的 HILS 系统重点针对直流微电网的控制算法进行验证, 因此各个端口的模型是放在实时仿真机中来模拟的, 模型的精确性必须要重点关注, 建模类型及仿真步长是影响模型精确性的两个重要因素。详细值模型可使更多的动态响应细节被观测到, 这对装置级别的测试尤为必要, 但详细值模型会占用实时仿真机大量的运算资源, 尤其是当换流器采用多电平级联结构时; 而平均值模型的资源占用率较小, 可仿真较大规模的系统, 宜进行系统级别的测试。仿真步长的设定同样需要考虑系统的测试目标, 如果要测试脉宽调制级别的响应特性, 则需要较小的步长, 如 $1\sim 5\ \mu\text{s}$, 而如果重点关注系统级的协调控制, 则可设定较大的步长, 如 $10\sim 50\ \mu\text{s}$ 。

2) 控制接口: 实时仿真机中运行的模型需要与外部的实际控制器进行信号传输, 彼此间的 A/D 转换需要较高的传输速率, 可采用实时的硬件连接方式, 即两者之间通过外部的 I/O 接口连接。

3) 通信接口: 系统级的控制器与实时仿真机之间需要采用通用的通信协议, 以方便各个设备之间的信息传递。在信息传输过程中, 通信延迟是必须要考虑的因素, 根据文献[21]的研究, 上层能量管理信息的传输频率通常可设置为 $2\sim 10\ \text{Hz}$, 即信息更新周期为 $100\sim 500\ \text{ms}$ 。

3 直流微电网 HILS 系统设计与实现

3.1 系统设计方案

直流微电网具备一个多层次、多时间尺度的控制体系,本文设计 HILS 系统的目标在于测试直流微电网的运行及控制策略。从以上分析可知,直流微电网的一次调压、二次调压及优化运行分别具有不同的控制时间尺度,因此可将它们分别部署到具备不同运算能力的处理器中。此外,为了能够测试重要的本地单元控制策略,本设计方案单独将其部署到实际的控制器中进行验证。

针对含多种分布式电源的直流微电网,本文设计的 HILS 系统方案如图 6 所示,其中主要包含一台 RT-LAB 实时仿真机(型号 OP5600)、一个被测单元的实际 DSP 控制器(型号 TMS320F28335)、一台 NI-cRIO 控制器(型号 9025)以及上位机等。此外,RT-LAB、cRIO 及上位机之间采用 TCP/IP 网络通信协议来彼此传递信息,实际控制器 DSP 与 RT-LAB 之间则通过 AD 与 DA 转换接口直接相连,以实现高速率的信息传输。

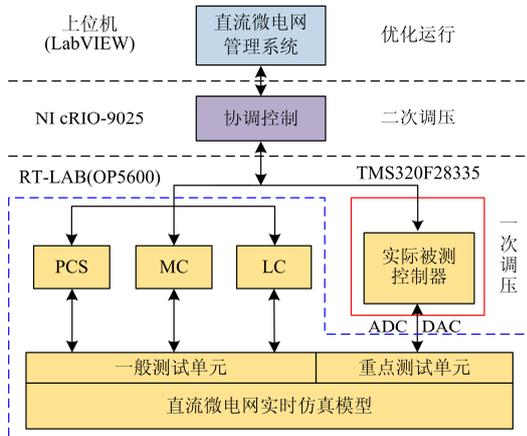


图 6 直流微电网 HILS 系统设计方案

Fig. 6 Design of DC microgrid HILS system

如图 6 所示,部署在 RT-LAB 中的直流微电网实时仿真模型包含一般测试单元与重点测试单元两部分。其中一般测试单元还包括功率转换系统(Power Conversion System, PCS)、微源控制器(Micro-source Controller, MC)及负荷控制器(Load Controller, LC),重点测试单元的控制策略则部署到实际的 DSP 控制器中。在该设计方案中,重点单元的控制策略可以在实际的控制器中得到测试,这在节省实际控制器资源与成本的同时,实现了关键微源本地控制算法的验证。基于下垂控制的一次调压部署在 RT-LAB 和 DSP 中,在满足直流电压在一定

范围内变化的前提下,实现了分布式电源及负荷的自治运行,该控制层的时间尺度设定在几微秒至几十微秒之间。考虑到协调控制的复杂程度以及 cRIO 控制器的运算能力,将定位于协调控制的二次调压部署在 cRIO 控制器中,该控制器需要采集 RT-LAB 仿真机传递的信息,进而根据直流电压偏差及相应算法来消除该偏差,从而使直流母线电压恢复至额定值,该控制层的时间尺度设定在几秒至几十秒之间。基于 LabVIEW 软件开发的直流微电网管理系统软件运行在上位机中,该软件主要负责完成直流微电网的优化运行及多端信息的显示与监控,其控制时间尺度与前两层相比要更长。

3.2 系统实现与平台配置

1) 测试平台

根据图 6 所示的设计方案搭建了直流微电网 HILS 实验测试平台,如图 7(a)所示,该测试平台所使用的设备与图 6 一致。相关实验波形可通过 RT-LAB 前面板的 min-BNC 接口连接到型号为 DL850 的示波记录仪上进行测量,也可以通过后面板的 I/O 模拟量输出直接进行测量。

2) 直流微电网管理系统

直流微电网管理系统软件作为一个集中控制器,主要用来控制和监视整个微电网的运行状态,如分布式电源的输出功率、负荷运行情况以及微电网的运行模式等,图 7(b)所示为本文开发的软件主界面图。该软件是基于 LabVIEW 软件开发的,具有良好的可操作性、插件可视化及高可靠性等优点。所设计软件主要包含系统简介、系统总览、控制框架、参数配置、实时监测以及波形记录六个部分,所有直流微电网中的测量数据及信息均可在相应的系统界面中显示,操作指令可通过参数配置界面进行下发。此外,根据上文所述的设计要求,设置本系统的数据更新频率为 10 Hz。

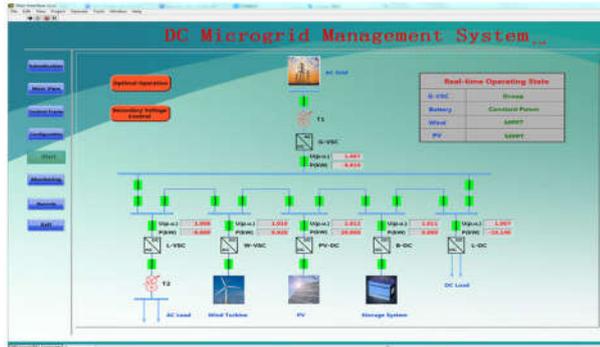
3) 本地控制器与系统通信接口

根据不同的控制时间尺度,本系统采用两种通信方式。首先,RT-LAB 与 DSP 之间采用 I/O 模拟量板卡相连,属于硬件连接方式,具有极高的传输速率,基本没有信号延迟,可以满足对实际控制器的测试要求。需要说明的是,本设计中 DSP 运算产生的 PWM 脉冲先经过光电隔离模块后再与 RT-LAB 的脉冲输入端口相连,如图 7(c)所示,这样做一方面可以将输入、输出信号进行隔离,提高电路的抗干扰能力,另一方面可将 DSP 输出的 3.3 V 电压抬升到 5 V,以增强 PWM 脉冲的驱动能力。其次,考虑到通信协议的通用性、标准化以及与实际系统的一致性,上位机、cRIO、RT-LAB 三者之

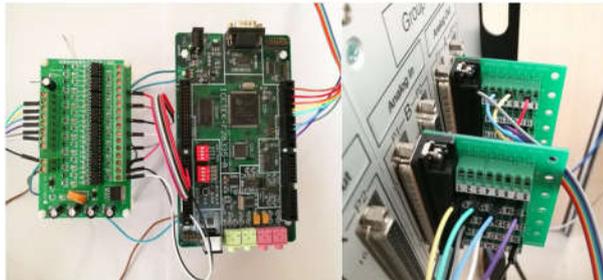
间采用基于 Modbus 的 TCP/IP 通信协议。



(a) 测试平台



(b) DC-MMS主界面



(c) DSP与RT-LAB接口

图 7 直流微电网 HILS 实验测试平台

Fig. 7 Experimental platform of the proposed HILS system for DC microgrid

4 实验结果与分析

4.1 测试系统概述

为了验证所设计直流微电网 HILS 系统平台的可行性与灵活性, 本文搭建了如图 7(a)所示的实验测试平台, 并根据图 1 搭建了基于 Matlab/Simulink 的六端环状直流微电网仿真模型, 其中交流负荷和直流负荷分别包含两个, 依次用 L_1 、 L_2 和 L_3 、 L_4 表示。仿真模型的详细参数如表 1 所示。

根据上文所述的设计方案, 将本地一次调压部署在 RT-LAB 实时仿真机中, 二次调压部署在 cRIO 控制器中, 上位机主要实现运行监控功能。此外, 需要说明的是, 为了重点验证蓄电池储能系统的控制算法, 将其部署到实际的 DSP 控制器中, 从而构

建出多层次、多时间尺度的 HILS 系统平台。

表 1 直流微电网模型参数

Table 1 Parameters of DC microgrid model

类别	参数描述
直流母线	额定电压 500 V
风机	1 台 20 kW 的 PMSG W-VSC 额定容量 20 kW
光伏	4 组 5 kW 的光伏电池板, 其中 2 组可切除 PV-DC 额定容量 20 kW
负荷	交流负荷 L_1 、 L_2 , 直流负荷 L_3 、 L_4 , 均为 10 kW L-VSC、L-DC 额定容量均为 20 kW
蓄电池	额定容量 400 A·h, B-DC 额定容量 10 kW
G-VSC	额定容量 30 kW
直流线路	电阻 $3 \times 10^{-2} \Omega/\text{km}$, 电感 $2.86 \times 10^{-4} \text{H}/\text{km}$ 各端之间的线路长度均为 1 km
控制参数	$U_n=1 \text{ p.u.}$, $U_{dc_G0}^*=1 \text{ p.u.}$, $k_G=0.02$, $U_{dc_BH}^*=1.02 \text{ p.u.}$, $k_{B_H}=0.03$, $U_{dc_BL}^*=0.98 \text{ p.u.}$, $k_{B_L}=0.03$, $U_{dc_WT}^*=1.05 \text{ p.u.}$, $k_{WT}=0.1$, $\Delta P_{WT_min}=-0.3 \text{ p.u.}$, $U_{WT}^*=1.08 \text{ p.u.}$, $U_{PV_1}=1.09 \text{ p.u.}$, $U_{PV_2}=1.1 \text{ p.u.}$

4.2 直流微电网 HILS 平台验证

针对本文搭建的多层次、多时间尺度的 HILS 系统平台, 下面从直流微电网的三种运行模式进行验证分析。测试结果中的直流电压均为标幺值, P_B 、 P_G 以流入直流微电网为正。

1) 联网自由模式及二次调压的测试结果

图 8 所示为直流微电网运行在联网自由模式及

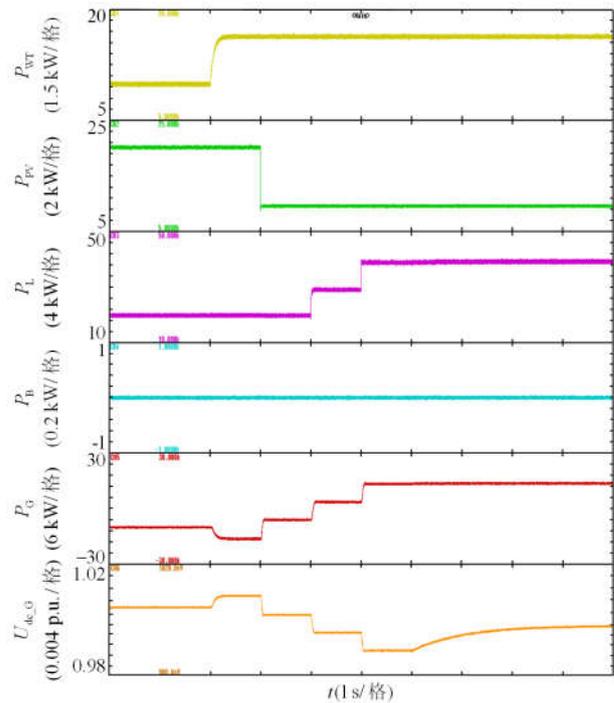


图 8 联网自由模式及二次调压测试波形

Fig. 8 Test waveforms under grid integration-free mode and the secondary voltage regulation

启动二次调压控制的实时测试波形。测试开始时,风机和光伏均处于 MPPT 状态,输出功率分别约为 10 kW 和 20 kW;交流负荷 L_1 和直流负荷 L_3 接入直流微电网,总功率约为 20 kW;蓄电池处于备用状态,输出功率为 0;G-VSC 的输出功率约为 -10 kW,交流电网端直流母线电压 U_{dc_G} 被 G-VSC 控制在 1.006 p.u.左右。

第 2 s 时,风速突增,风机功率升至约 16.5 kW, U_{dc_G} 被 G-VSC 控制在 1.011 p.u.左右。第 3 s 时,辐照度突减,光伏功率降至约 9.5 kW, U_{dc_G} 被 G-VSC 控制在 1.004 p.u.左右。第 4 s 时,交流负荷 L_2 接入直流微电网, G-VSC 的输出功率增至约 4 kW, U_{dc_G} 被 G-VSC 控制在 0.997 p.u.左右。第 5 s 时,直流负荷 L_4 接入微电网, G-VSC 的输出功率增至约 14 kW, U_{dc_G} 被 G-VSC 控制在 0.991 p.u.左右。第 6 s 时,通过上位机向 cRIO 控制器下达二次调压指令, G-VSC 增发功率对直流母线电容充电,从而使 U_{dc_G} 逐渐升至 1 p.u.,其响应调节时间大约为 3 s。

2) 联网限流模式及孤岛模式的测试结果

图 9 所示为直流微电网运行在联网限流模式及孤岛模式下的实时测试波形。光伏和蓄电池的初始状态与图 8 相同,风机在 MPPT 状态下输出约 13 kW 的功率, L_1 、 L_2 接入微电网,负荷总功率约为 20 kW。G-VSC 的输出功率约为 -13 kW, U_{dc_G} 被 G-VSC 控制在 1.009 p.u.左右。

第 2 s 时, G-VSC 的输出功率被限制在 -8 kW,直流微电网进行联网限流模式,蓄电池由备用状态转为输出功率约 -5 kW,蓄电池端直流母线电压 U_{dc_B} 被 B-DC 控制在 1.035 p.u.左右。第 3 s 时,联网断路器断开,直流微电网进入孤岛模式, B-DC 的输出功率达到限值 -10 kW,微网中功率过剩,风机端直流母线电压 U_{dc_WT} 升高并超过 1.05 p.u.,风机开始降功率运行,最终输出功率减少约 3 kW, U_{dc_WT} 被 W-VSC 控制在 1.065 p.u.左右。第 5 s 时, L_1 退出,微网中功率过剩,风机减发的功率达到限值 6 kW,光伏端直流母线电压 U_{dc_PV} 升至 1.09 p.u.,使得一组光伏板被切除,但微网中功率仍过剩, U_{dc_PV} 继续升高,当 U_{dc_PV} 升至 1.1 p.u.时,另一组光伏板被切除。此后直流母线电压下降,风机的输出功率开始回升,当风机功率升至约 10 kW 时,微网中的功率达到平衡, U_{dc_WT} 被 W-VSC 控制在 1.065 p.u.左右。第 7 s 时,直流微电网重新连入交流电网,且 G-VSC 的输出功率不再受限,直流母线电压下降,风机恢复至 MPPT 状态,蓄电池进入备用状态, U_{dc_G} 被 G-VSC 控制在 1.009 p.u.左右。

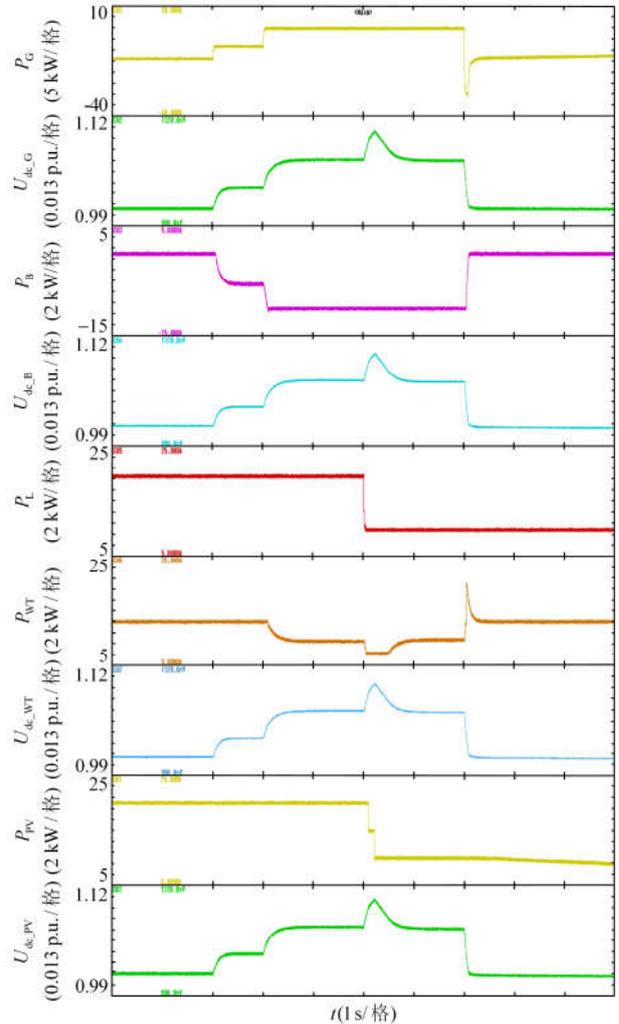


图 9 联网限流模式及孤岛模式测试波形

Fig. 9 Test waveforms under grid integration-current limiting mode and islanding mode

3) 联网与孤岛模式相互转换的测试结果

图 10 所示为直流微电网在联网自由模式与孤岛模式之间转换的实时测试波形。风机和蓄电池的初始状态与图 8 相同,光伏处于 MPPT 状态并输出约 10 kW 的功率, L_1 接入微电网。 U_{dc_G} 被 G-VSC 控制在 1.006 p.u.左右,此时直流微电网处于联网自由模式。

第 2 s 时,辐照度突减,光伏功率降至约 5 kW, U_{dc_G} 降至约 1.003 p.u.。第 4 s 时,联网断路器断开,直流微电网与交流电网失去联络,从而由联网自由模式进入孤岛模式。微网中能量过剩,直流母线电压升高, U_{dc_B} 超过 1.02 p.u.之后蓄电池开始工作,并输出约 -5 kW 的功率以保证网内功率平衡, U_{dc_B} 被 B-DC 控制在 1.035 p.u.左右。第 6 s 时, L_2 接入微电网,直流母线电压降低, U_{dc_B} 被 B-DC 控制在

0.965 p.u.左右。第 8 s 时, 联网断路器闭合, 直流微电网重新接入交流电网, 并由孤岛模式转入联网自由模式, G-VSC 输出功率增至 30 kW 从而以最大能力调节直流电压。最终, G-VSC 作为功率平衡节点输出约 5 kW 的功率, 蓄电池恢复至备用状态。

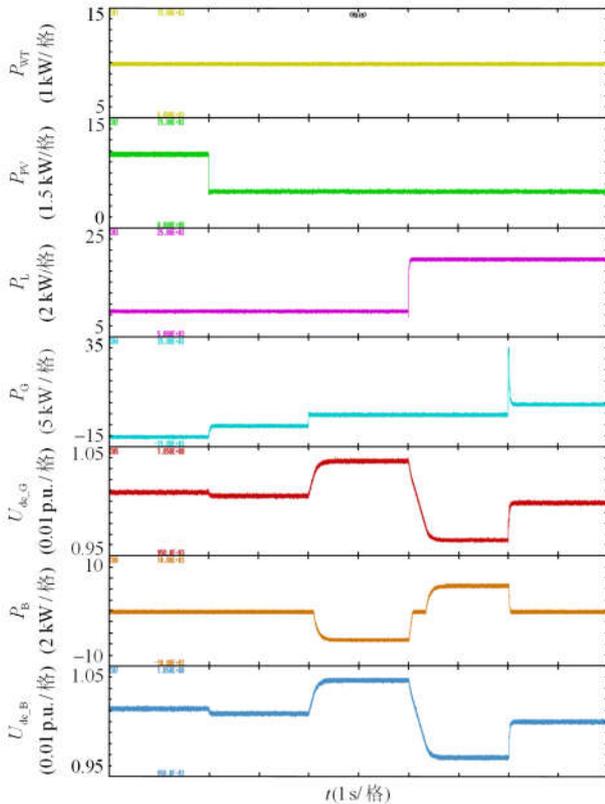


图 10 联网自由模式与孤岛模式相互转换的测试波形

Fig. 10 Test waveforms for the interconversion between grid integration-free mode and islanding mode

以上实验算例说明, 与直流微电网相关的运行与控制策略在本文所设计的 HILS 系统平台上得到了良好的测试。

5 结论

本文研究了直流微电网的运行模式与控制策略, 分析了 HILS 系统的框架结构和设计要求, 并提出了一种针对直流微电网的多层次、多时间尺度 HILS 系统设计方案。通过相关算例对搭建的 HILS 系统平台进行了验证, 得出如下结论:

1) 由 DSP、RT-LAB、cRIO 及上位机等构成的 HILS 系统平台具有不同的控制层级和控制时间尺度, 并与直流微电网的分层控制体系相对应, 兼顾了本地重点单元控制算法和系统控制策略的验证。

2) RT-LAB、cRIO 及上位机之间采用通用的

TCP/IP 协议通信, RT-LAB 与 DSP 之间采用 I/O 模拟量进行交互, 实现了不同传输需求下相关通信协议的选择设计。

3) 在基于所提设计方案而搭建的 HILS 系统平台上进行了算例测试, 验证了所设计平台的可行性与灵活性, 这对直流微电网运行与控制策略的验证具有良好的实用价值。

参考文献

- [1] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [2] 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.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [3] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微电网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106, 113.
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106, 113.
- [4] KUMAR M, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. Control strategies of a DC microgrid for grid connected and islanded operations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2015, 6(4): 1588-1601.
- [5] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.
- [6] RAKHRA P, NORMAN P J, FLETCHER S D A, et al. Evaluation of the impact of high-bandwidth energy-storage systems on DC protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 586-595.
- [7] JIA K, CHRISTOPHER E, THOMAS D, et al. Advanced DC zonal marine power system protection[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(2): 301-309.
- [8] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 248-254.

- ZHANG Li, SUN Kai, WU Tianjin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.
- [9] 支娜, 张辉, 肖曦, 等. 分布式控制的直流微电网系统级稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 368-378.
- ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi, et al. System-level stability analysis of DC microgrid with distributed control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 368-378.
- [10] NALLUSAMY S, VELAYUTHAM D, GOVINDARAJAN U, et al. Power quality improvement in a low-voltage DC ceiling grid powered system[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(10): 1902-1911.
- [11] MARTIN A, EMAMI M R. Dynamic load emulation in hardware-in-the-loop simulation of robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(7): 2980-2987.
- [12] 苏丽萍, 陈侃, 李国杰, 等. 基于 RTDS 的光伏并网系统实时仿真平台研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 110-115.
- SU Liping, CHEN Kan, LI Guojie, et al. Real-time simulation study of photovoltaic grid-connected system by RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 110-115.
- [13] CARPIUC S C, LAZAR C. Real-time multi-rate predictive cascade speed control of synchronous machines in automotive electrical traction drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 5133-5142.
- [14] 张宏俊, 吴越文, 陈卓, 等. 交直流配电网接纳分布式电源的实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 79-85.
- ZHANG Hongjun, WU Yuewen, CHEN Zhuo, et al. Real-time simulation of AC and DC distribution network to receive distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 79-85.
- [15] 孙谦浩, 宋强, 王裕, 等. 基于 RT-LAB 的高频链直流变压器实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 80-87.
- SUN Qianhao, SONG Qiang, WANG Yu, et al. Real-time simulation research of high frequency link DC solid state transform based on RT-LAB[J]. Power System Protection and Control, 2016, 45(5): 80-87.
- [16] 周瑜, 林今, 宋永华. 适于分布式发电装置接入测试的功率硬件在环接口装置及其控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 995-1001.
- ZHOU Yu, LIN Jin, SONG Yonghua. A power hardware in loop interface device and the control strategies for distributed energy resources integration testing[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 995-1001.
- [17] 尹晨旭, 孙建军, 刘邦, 等. 控制器硬件在环混合仿真系统延时及补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 151-155.
- YIN Chenxu, SUN Jianjun, LIU Bang, et al. Time-delay and compensation for CHIL simulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 151-155.
- [18] WANG J, SONG Y, LI W, et al. Development of a universal platform for hardware in-the-loop testing of microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2154-2165.
- [19] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 16-24.
- WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24.
- [20] 李武华, 顾云杰, 王宇翔, 等. 新能源直流微网的控制架构与层次划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 156-163.
- LI Wuhua, GU Yunjie, WANG Yuxiang, et al. Control architecture and hierarchy division for renewable energy DC microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 156-163.
- [21] MOHAMED Y A R I. New control algorithms for the distributed generation interface in grid-connected and micro-grid systems[D]. Ontario, Canada: University of Waterloo, 2008.

收稿日期: 2017-05-03; 修回日期: 2018-01-10

作者简介:

王琛(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与电力系统、直流微网控制技术; E-mail: 2424781444@qq.com

孟建辉(1987—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力电子技术、新能源发电与电力系统;

王毅(1977—), 男, 博士后, 教授, 研究方向为风力发电并网控制技术、电力电子技术在电力系统中的应用等。

(编辑 周金梅)