

多端直流微电网硬件在环系统设计与实现

王彦贞,贾亚雷,甄力

(河北软件职业技术学院 智能工程系,保定 河北 071000)

摘要: 为了满足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,研究了一种针对直流微电网的多层次、多时间尺度硬件在环仿真(HILS)系统。所设计方案中,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控制算法的验证。最后,搭建了由控制器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,并通过算例验证了HILS系统平台的灵活性和可靠性。

关键词: 直流微电网;运行与控制;分布式电源;硬件在环仿真

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed18973

Design and Implementation of Hardware In-the-loop Simulation System for DC Microgrid with Multiple Units

WANG Yanzhen, JIA Yalei, ZHEN Li

(Department of Intelligent Engineering, Hebei Software Institute, Baoding 071003, Hebei, China)

Abstract: A multi-level and multi-time-scale hardware in-the-loop simulation(HILS) system as a new method was proposed to develop and test the control algorithms and operation strategies for the DC microgrid. Primary control, secondary control and tertiary control were implemented in different simulators and controllers. The key unit and system control methods could be both tested in the proposed design. Finally, the proposed HILS platform including a RT-LAB for real-time simulation, an actual controller under test, a cRIO for coordination control and the host computer was built according to the proposed design and different processors computing ability and characteristics. Detailed tests were carried out to show flexibility and reliability of the proposed HILS platform.

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

近几年,直流微电网受到广泛关注,其优点是^[1]:1)变换次数少;2)控制结构简单;3)不存在频率和无功相关问题等。许多学者对其控制、保护、能量管理及电能质量等方面进行了研究^[2-7]。

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,在电力电子、电动汽车、机器人及自动控制领域逐渐得到了广泛应用。文献[8]搭建了基于PXI和PC的实时仿真平台,对风储海水淡化微电网的运行与控制进行了研究。文献[9]设计了一种基于功率硬件在环测试接口装置,并对放大幅值误差进行了研究。文献[10]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。针对已经搭建的HILS系统,可将其分为功率级和信号级2类^[11],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运行。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,并具有较好的经济性。

为了满足多端直流微电网控制策略及运行特性的研究,本文设计了针对该系统的HILS平台。首先,根据不同的控制时间尺度,将多端直流系统划分在不同的控制层级。其次,研究和设计了一种能够满足多端系统协调控制及关键单元控制算法验证的HILS系统方案。最后,搭建基于DSP,RT-LAB,cRIO及上位机的HILS系统

基金项目: 教育厅重点研发项目(ZD2018020)

作者简介: 王彦贞(1969-),男,硕士,讲师,Email: 1393129950@126.com

测试平台,并通过相关实验算例验证了所设计和搭建的平台。

1 多端直流微电网拓扑与控制

1.1 拓扑结构

含多种分布式能源的直流微电网典型拓扑结构如图1所示,主要分为:辐射型和环状型2种拓扑结构。图1中, $P_w, P_{pv}, P_b, P_g, P_{ac,l}, P_{dc,l}$ 分别为各端输出或吸收的功率。该多端直流微电网系统包含风电、光伏、储能、交流电网及交、直流负荷,双向DC-AC变换器用以直流微电网与交流网之间的互联,双向DC-DC变换器用以储能系统与直流微电网之间的连接,且在交流主网功率输出受限下维持多端微电网的稳定运行。

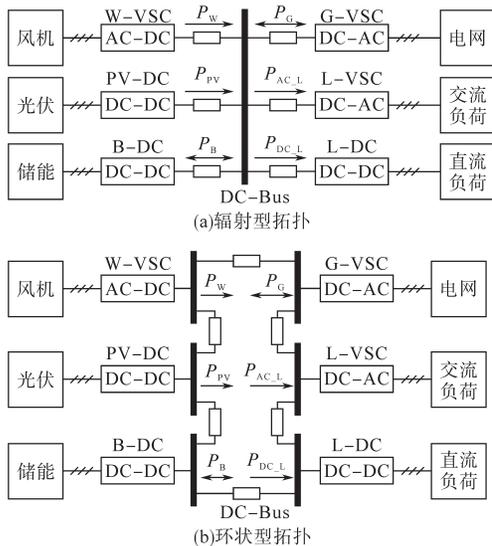


图1 2种典型直流微电网拓扑结构

Fig.1 Two typical DC microgrid topology structures

如图1所示,辐射型直流微电网具备如下特点:1)各端换流器经直流线路连接至直流母线;2)任一线路发生故障,相应换流站会退出运行;3)直流母线故障下会致整个系统崩溃。而环状型直流微电网通过“手拉手”的方式连接各端,即使其中一端发生故障下,功率依然可以通过其它路径进行传输,大大提高了供电的可靠性,因此本文研究的是环状型直流微电网。

1.2 运行模式

根据直流微电网与交流主网间的功率交换方式,将直流微电网的运行模式分为^[16]联网自由模式、联网限流模式和孤岛模式。

1)联网自由模式。直流微电网通过联网变流器G-VSC并入交流主网,G-VSC作为功率平

衡点稳定直流电压,确保直流微电网系统的功率平衡。此模式下,风电和光伏运行在最大功率跟踪状态,蓄电池如未充满则处于充电状态,以确保G-VSC进入限流模式时系统的功率平衡。

2)联网限流模式。此模式下,G-VSC工作在限流模式,无法稳定直流电压。如果蓄电池储能充足,则直流电压可控。若因风速、辐照度和负荷变化较大或蓄电池储能不足,则需要调节风电光伏发电功率或进行负荷减载,以维持直流电压的稳定。

3)孤岛模式。此模式下,联网断路器断开,直流微电网独立运行,直流母线电压稳定由蓄电池来控制,即通过对蓄电池的充放电实现多端直流微电网的功率平衡。考虑到蓄电池自身的调节能力,通常需要其它微源或负荷投切的配合来实现直流微电网系统电压的稳定。

1.3 控制体系

根据不同的控制时间尺度,可将直流微电网控制结构划分为3个层次^[16]为:一次调压、二次调压和优化运行。如图2所示,本文设计HILS系统时重点考虑一次和二次调压控制。

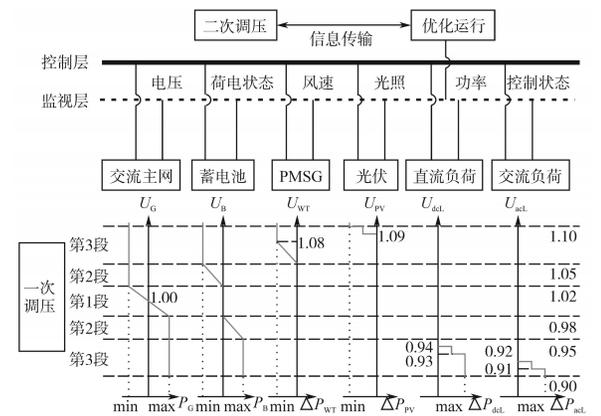


图2 直流微电网电压控制结构

Fig.2 DC microgrid voltage control structure

1)一次调压。一次调压可通过分段下垂的方法保证直流微电网的稳定运行。通过直流电压的变化量将控制算法划分在不同的控制段,调节变流器的工作方式使得系统在不同工况下均能稳定运行。控制中各变流器独立工作,无需相互通信,从而简化了控制系统的复杂程度,提高了控制的实时性。

图2中,分段下垂控制中直流电压的设定范围分别为:① $|DU_{dc}| < 0.02$ (标幺值),对应联网自由模式;② $0.02(\text{标幺值}) \leq |DU_{dc}| \leq 0.05$ (标幺值),对

应联网限流模式下G-VSC失去调节直流电压能力,以及孤岛模式的情况;③ $|\Delta U_{dc}| \geq 0.05$ (标么值),此段控制分2种情形,当 $\Delta U_{dc} \geq 0.05$ (标么值)对应联网限流模式和孤岛模式下蓄电池的充电功率超过B-DC最大功率的情况,当 $\Delta U_{dc} \geq 0.05$ (标么值)对应联网限流模式和孤岛模式下蓄电池的放电功率超出B-DC最大功率的情况。

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,使得直流电压运行在额定值。如图2所示,交流主网和蓄电池二者均具备二次调压的能力。此外,一次调压层级的实时信息和优化运行指令等均可通过二次调压控制器作为中继来传递。

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。

2 多端直流微电网 HILS 系统设计与实现

2.1 设计方案

直流微电网的控制是一个多层次、多时间尺度的控制系统,本文设计HILS系统的目的在于测试多端直流微电网的运行及控制策略。从上面的分析中可知,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,设计时可将其部署到不同运算能力的处理器中。此外,为了能够测试重要单元的控制策略,本设计方案中单独将其控制策略部署到实际的控制器中进行验证。

本文针对含多种分布式电源的直流微电网所设计的HILS系统方案如图3所示,其中主要包含一台型号为OP5600的RT-LAB实时仿真机、DSP控制器(TMS320F28335)、型号为9025的NI-cRIO控制器及上位机等。RT-LAB,cRIO及上位机之间采用TCP/IP通信协议,DSP与RT-LAB之间通过AD与DA转换接口相连来实现高速率的信息传输。

图3中,部署在RT-LAB中的多端微电网实时仿真模型包含一般测试单元及重点测试单元2部分,其中,一般测试单元包括功率转换系统(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方法部署到实际的DSP控制器中。该设计方案下,需要测试的重点单元的控制策略可以在实际的控制器中得以验证,节省了实际控制器资源及花费,同时解决了关键微电源的本地控制算法验证问题。

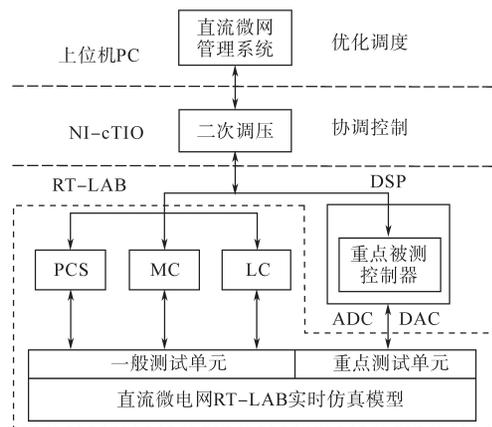


图3 直流微电网HILS系统设计方案

Fig.3 DC microgrid HILS system design scheme

2.2 平台实现及配置

1)测试平台。根据图3的设计方案搭建了多端直流微电网的HILS测试平台,主要包括上位机、cRIO控制器、RT-LAB仿真机及DSP控制器。相关试验波形的测量通过RT-LAB前面板的mini-BNC接口连接到DL850录波仪上进行,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(direct current microgrid management system, DC-MMS)作为一个集中控制器,主要用来控制和监控整个微电网的运行状态,如分布式电源的输出功率、负荷运行情况及微电网的运行模式等。该系统是基于LabVIEW软件设计的,具有较好的可操作性、插件可视化及高可靠性等优点。

3)本地控制器与系统通信接口。根据不同的控制时间要求,本系统采用2种通信方式。首先,针对RT-LAB与DSP之间的连接采用I/O模拟量板卡相连,属于硬件连接方式,具有较高的传输速率,基本没有信号延迟,可以满足对实际控制器的测试要求。此外,本设计中DSP经过运算产生的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,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,在上位机、cRIO与RT-LAB三者间通信协议的选择

上通用性和标准化是重点考虑的因素,且与实际运行系统保持一致,因此采用基于 Modbus 的 TCP/IP通信协议。

3 试验结果与分析

3.1 测试系统概述

为了验证所设计多端直流微电网HILS平台的灵活性与可靠性,搭建了相关的试验测试平台,并采用6端环状型拓扑进行测试验证,其中,交流负荷和直流负荷分别包含2个,依次用 L_1, L_2 和 L_3, L_4 表示,6端微电网模型的具体参数为:PMSG额定功率20 kW,PMSG额定风速12 m/s,光伏额定功率20 kW,G-VSC额定功率30 kW,额定辐射强度 $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^2$,蓄电池额定容量400 A·h,光板个数4组,直流母线电压500 V,L-DC额定容量20 kW,L-VSC额定容量20 kW, $L_1 \sim L_4$ 各自功率10 kW,B-DC额定功率10 kW。

根据上面的设计方案,将系统的本地一次调压控制部署在RT-LAB实时仿真机中,二次调压控制部署在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控制器中运行,从而构建多层次、多时间尺度的HILS系统平台。测试中采用DL850录波仪进行记录,各个变量的信号转换为电压信号进行测量。

3.2 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,从上述直流微电网的3种运行模式进行验证分析,需要说明的是,下述算例中直流电压以标么值的形式显示,吸收功率用负值表示。

图4为直流微电网运行在联网自由模式及启动二次调压控制下的实时测试波形。

仿真开始时,风速为9 m/s,风电机组在MPPT状态下运行,输出功率约为10 kW;太阳辐射强度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,光伏发电系统进行最大功率跟踪,输出功率约为20 kW;交流负荷 L_1 和直流负荷 L_3 接入直流微网,负荷总功率约为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,直流母线电压 $U_{dc,G}$ 被G-VSC控制在1.005(标么值)左右。

第3 s时,辐照度突减至 $500\ \text{W}/\text{m}^2$,光伏发电系统的输出功率约为9.5 kW,G-VSC的输出功率约为0.5 kW, $U_{dc,G}$ 被G-VSC控制在0.992(标么

值)左右。第6 s时,交流负荷 L_2 接入微网,G-VSC的输出功率约为10.5 kW, $U_{dc,G}$ 被G-VSC控制在0.993(标么值)左右。第9 s时,直流负荷 L_4 接入微网,G-VSC的输出功率约为20.5 kW, $U_{dc,G}$ 被G-VSC控制在0.986(标么值)左右。第13 s时,启动二次调压,G-VSC增发的功率被直流母线电容吸收, $U_{dc,G}$ 逐渐升至1(标么值)。

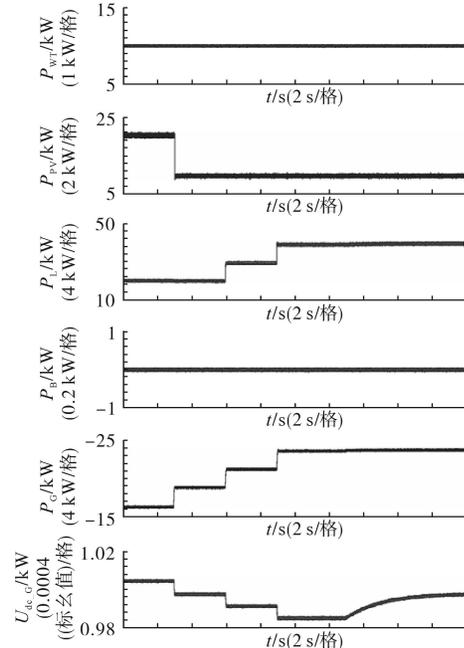


图4 联网自由模式及二次调压下的测试波形

Fig.4 Test waveforms under the grid integration-free mode and the secondary voltage regulation operation

上述实时测试算例验证了本文所设计的HILS平台能够很好地测验多端直流微电网相关的运行及控制策略。

4 结论

本文在研究多端直流微电网运行模式与控制方法的基础上,提出了一种针对多端直流微电网的多层次、多时间尺度HILS系统设计方案。基于该平台对多端直流微电网的控制算例进行了实时运行测试,验证了所设计平台的灵活性与可靠性,对于多端直流微电网的运行与控制策略验证具有较好的实用价值。

参考文献

- [1] 吴卫民,何远彬,耿攀,等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报,2012,27(1):98-106,113.
- [2] 陈景文,张东,党宏社. 基于下垂控制的直流微网多储能系统研究[J]. 电气传动,2018,48(1):42-46.

(下转第81页)