

基于RTDS的微电网协调控制器仿真测试研究

罗飞¹,王晨清¹,郑明忠¹,杨毅¹,许佳佳²,易文飞¹,
卜强生¹,高磊¹,袁宇波¹

(1. 国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院,南京 211103;

2. 国网江苏省电力有限公司 无锡供电分公司,江苏 无锡 214000)

Research on simulation test of micro grid coordination controller based on RTDS

LUO Fei¹, WANG Chenqing¹, ZHENG Mingzhong¹, YANG Yi¹, XU Jiajia², YI Wenfei¹,
BU Qiangsheng¹, GAO Lei¹, YUAN Yubo¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. Wuxi Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

摘要:微电网是能源互联网的重要环节,而协调控制器作为微电网的大脑,承担着控制指挥的枢纽作用。为验证微电网协调控制器的性能,首先,介绍了微电网电气部分的典型要素和组网方案;其次,基于实时数字仿真系统实时仿真平台搭建了包含各要素的微电网电气仿真系统;然后,设计了协调控制器与实时数字仿真系统之间的实时通信交互组网方案,构成闭环测试系统;最后,依托于该闭环测试系统,对微电网协调控制器的一键式启停、一次调频、后备电源等功能进行了仿真测试,仿真结果验证了协调控制器的各项功能,能够为后续协调控制器在工程现场的调试与应用提供坚实的保障。

关键词:实时数字仿真系统;微电网;建模;通信组网方案;仿真测试

Abstract: Micro grid is an important puzzle of the energy Internet. As the brain of the integrated energy station, the coordination controller assumes the pivotal role of control and command. Firstly, in order to verify the performance of the coordinated controller of the micro grid, the typical elements and networking schemes of the micro grid are firstly introduced. Secondly, micro grid simulation system containing all elements is built based on the RTDS real-time simulation platform. Next, the communication networking scheme between the coordinated controller and the RTDS is designed. Finally, simulation tests are carried out based on the closed loop test system, including one-button start-stop test, frequency modulation test, and backup power supply test. The simulation results verify the functions of the coordinated controller, and can provide a solid guarantee for the subsequent application of the coordinated controller on the project site.

Key words: RTDS; micro grid; modeling; communication networking scheme; simulation test

0 引言

协调控制器是微电网的指挥中枢,有着灵活控制电力血液流动的功能^[1]。目前,微电网协调控制器还处在实验室开发研究阶段,尚未实现大规模工程应用^[2],关于微电网协调控制器的研究较少。文献[3]为完善储能协调控制器的测试方法和手段,搭建了储能协调控制器检测平台,但该平台仅能实现信号对点和模拟量采集功能,不能对储能系统进行详细仿真。文献[4]为研究大规模储能电站的拓扑、参数及控制策略,基于Simulink搭建了储能电站模型,但该模型不能实

现实时仿真,无法与外部实际设备进行连接,仿真仅停留在纯理论层面,无法结合实际装置做进一步研究。文献[5]为简化变电站日常维护工作,设计并实现了变电站自动化仿真测试系统,但该系统仅能从通信层面上解决信号对点问题,对于设备的性能、逻辑、及设备之间的配合测试则无法实现。综上,目前关于微电网协调控制器的研究相对较少,且对于类似微电网协调控制器等设备的检测方法或停留在软件模拟对点阶段,或直接进行真型试验场测试,前者无法对其功能、内部逻辑、响应时间、运行可靠性等性能进行实验室测试,后者测试方法复杂、周期长、成本高,需要耗费大量资源。

为加快协调控制器的开发进程、服务协调控制器的工程应用、提高微电网的建设效率,本文在实时数字仿真系统(real time digital simulation system,

收稿日期:2021-03-15;修回日期:2021-05-28

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51807027)

RTDS)^[6]环境下搭建了包含全要素的微电网电气部分仿真测试平台,设计了协调控制器与RTDS之间的实时通信交互组网方案,并在此基础上,对协调控制器的核心功能进行了实时闭环仿真测试。本文搭建的全要素综合能源电气仿真系统及设计的协调控制器与RTDS之间的实时通信交互组网方案对于未来微电网的仿真测试具有重要借鉴意义。

1 微电网电气部分典型拓扑架构

1.1 典型拓扑架构

微电网具有多能互补、多站融合的特点,不仅可以为现有电网提供电压和频率支撑,更能够促进社会资源和资本进入电力系统,共同参与电力市场,提高资源利用效率,提升用电综合能效。微电网的典型元素主要包括电源和负荷2大类,电源包括分布式光伏和储能,负荷包括5G基站、数据中心和充换电站等新型高可靠性负荷。

为适应分布式光伏和储能以及5G基站、数据中心和充换电站的接入,微电网电气部分可以采用交流组网和交直流混合组网2种方式。

交流组网方式凭借其在经济性方面的优势成为目前大部分已建成的微电网电气部分和综合能源系统广泛采用的组网方式,但由于光伏、储能等直流电源及直流充电桩等直流负荷自身的输出和输入特性,往往需要给每台设备都配置小容量AC/DC转换模块,该方式使得微电网内逆变器数量众多,设备内部控制复杂,微网间能量流动损耗大。

交直流混合组网方式是近年来逐渐兴起的新型组网方式,其采用集中统一的大容量AC/DC变换器构建一直流母线,微电网中的光伏、储能和充电桩等都可以直接通过该直流母线并网,节省了大量的小容量AC/DC转换模块,减小了微网间能量流动的损耗,提高了微电网的运行效率。受限于目前交直流混合组网方式产品较少、普遍采用定制化的方式,虽成本较高,但随着未来半导体技术的发展以及直流配电网技术的不断成熟,交直流混合组网方式的微电网将成为未来微电网的发展方向。本文将交直流混合组网方式的微电网作为研究对象,建立了交直流混合组网方式的微电网电气部分仿真测试模型。

1.2 关键设备

微电网电气部分包含10 kV交流系统、380 V交流系统及 ± 375 V直流系统,关键设备包括微电网协调控制器、AC/DC变换器^[7-8]、DC/DC变换器、

储能电池^[9]、光伏^[10]、充电桩、数据中心和5G基站。为充分模拟交直流混合组网方式下的微电网,本文基于RTDS实时仿真平台建立了拓扑的全要素微电网电气模型,如图1所示。

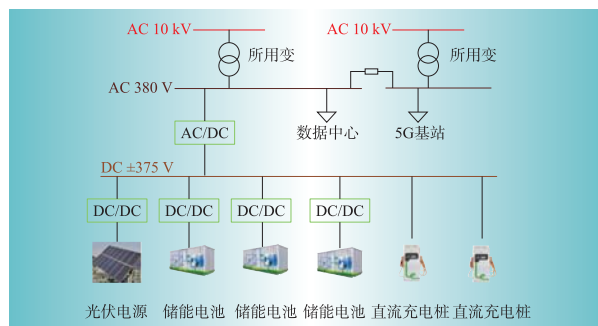


图1 全要素微电网电气部分拓扑

Fig. 1 Electrical topology of all-element micro grid

1.2.1 变换器

AC/DC变换器采用两电平电压源换流器,控制方式采用内外环双环控制,运行模式包括定电压控制模式、定有功功率控制模式和交流孤岛控制模式3种。

DC/DC变换器采用非隔离型BUCK-BOOST原理,运行模式包括定电压控制模式和定功率控制模式。

1.2.2 储能电池、光伏及负荷

储能电池采用RTDS中的锂离子电池模型,光伏采用受控电流源模型等效,数据中心、5G基站等交流负荷采用恒功率负载等效,充电桩用电阻等效。

2 协调控制器

协调控制器使用自主研发的微电网协调控制装置,如图2所示。其具有一键式启停、一次调频及备用电源等功能。



图2 协调控制器

Fig. 2 Coordination controller

2.1 一键式启停

图1所示拓扑结构中,包含AC/DC变换器和多个DC/DC变换器,传统方式下,需要先选定换流器的控制模式,然后再执行启停机操作,且在启停机过程中需要注意先启定电压换流器和先停定功率

换流器,否则系统无法维持稳定。但本文的协调控制器在执行换流器启停机操作时,无需选择换流器控制模式,直接执行启停机,协调控制器会根据当前系统的运行状态,自动设定换流器的控制模式,并可以实现换流器的模式在线自动切换。一键启停的流程如图3所示,图中所有流程均为装置自动流程,无需手动选择。

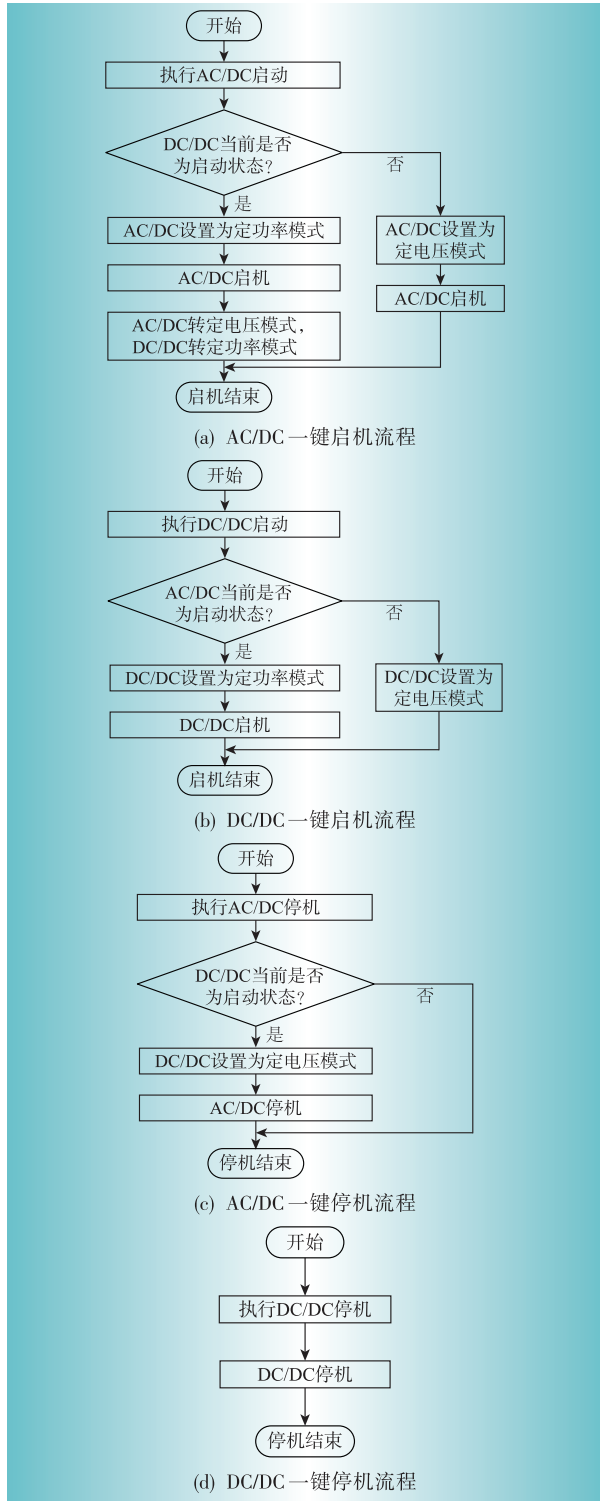


图3 一键式启停流程

Fig. 3 One-key startup and shutdown process

2.2 一次调频

分布式综合能源站协调控制器各自根据自己并网点的频率,按照图4所示综合能源站一次调频曲线,调整储能的充放电功率,进而改变综合能源站并网点的接口功率,实现分布式综合能源站一次调频功能,功率调节量 ΔP 与频率 f 之间的关系如式(1)所示。当分布式综合能源站的数量和规模足够大时,能够对大电网频率起到支撑作用。

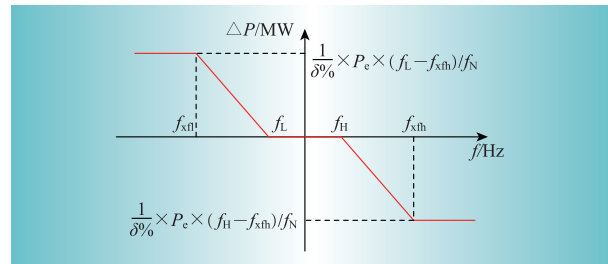


图4 功率调节量与频率关系

Fig. 4 Relationship of power adjustment and frequency

$$\Delta P = \begin{cases} \frac{1}{\delta\%} \times P_e \times (f_l - f_{slh})/f_N, & f \leq f_{sl} \\ \frac{1}{\delta\%} \times P_e \times (f_l - f)/f_N, & f_{sl} < f \leq f_l \\ 0, & f_l \leq f \leq f_h \\ \frac{1}{\delta\%} \times P_e \times (f_h - f)/f_N, & f_h < f < f_{slh} \\ \frac{1}{\delta\%} \times P_e \times (f_h - f_{slh})/f_N, & f \geq f_{slh} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f_l = 50 - f_d$, $f_h = 50 + f_d$ 。 f_d 为一次调频死区; f_N 为系统额定频率; P_e 为一次调频控制对象额定容量; $\delta\%$ 为新能源一次调频调差系数; P_0 为一次调频控制对象有功功率初始值; f_{sl} 为频率调节下限; f_{slh} 为频率调节上限。

2.3 备用电源

如图1所示,正常运行时,AC/DC处于定电压状态,储能DC/DC处于定功率状态,当失去交流380V电源时,AC/DC失去电源,无法继续维持直流电压,此时协调控制器会进入备用电源模式,将储能DC/DC自动切换为定电压模式,AC/DC切换为孤岛控制模式,实现对数据中心等重要负荷的不间断供电。

协调控制器的一键式启停、一次调频及备用电源3大功能相互独立,互不影响。一键式启停功能方便了现场设备的运维;一次调频提高了综合能源站对电网的频率支撑;备用电源功能实现了综合能源站对重要负荷的高可靠性供电。

3 通信组网方案

本文利用RTDS模拟交直流混合组网方式下的

微电网与协调控制器搭建闭环仿真系统,具体通信组网方案如图5所示。模型中,交流10 kV与交流380 V电压电流从RTDS的GTAO板卡输出,经功率放大器输入到协调控制器;直流±375 V电压从RTDS的GTAO板卡输出,经小电流转换装置转变为4~20 mA小电流信号输入到协调控制器;所有开关状态通过RTDS的GTDO板卡输出到协调控制器;开关控制信号由协调控制器输出,经GTFPI板卡输入到RTDS;储能换流器通过接口装置采用GOOSE协议与协调控制器通信;光伏及充电桩通过RTDS的GTNET板卡采用Modbus协议与协调控制器通信。

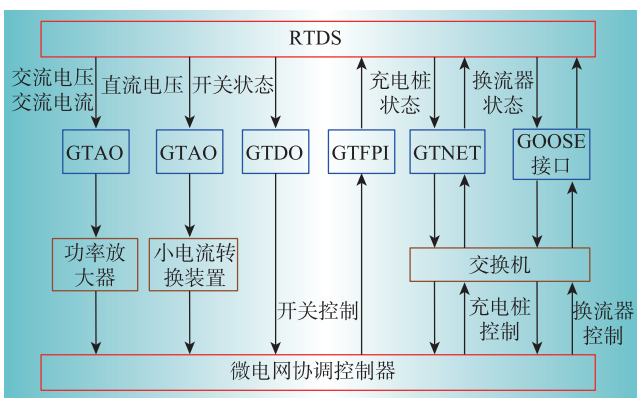


图5 通信组网方案

Fig. 5 Communication networking scheme

4 仿真测试

为测试综合能源协调控制器的控制性能,基于前文搭建的协调控制器与RTDS实时仿真交互系统,对协调控制器的一键式启停、一次调频及备用电源功能进行仿真验证,仿真系统中的参数设置及仿真测试结果如表1所示。

表1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of simulation system

项目	参数	项目	参数
额定交流电压	10 kV、380 V	额定直流电压	±375 V
系统容量/MVA	1	变压器变比	10 kV/380 V
AC/DC模式	定电压、定功率、孤岛	DC/DC模式	定电压、定功率
光伏容量/kW	100	储能容量/kW	300
数据中心功率/kW	100	5G基站功率/kW	100
充电桩功率/kW	300	系统频率/kHz	50
AC/DC内环PI参数	5 100	AC/DC外环PI参数	0.11
DC/DC内环PI参数	0.25	DC/DC外环PI参数	0.25

4.1 一键式启停

通过协调控制器分别给AC/DC和储能DC/DC发送启停机指令,模拟AC/DC单独启停机和储能DC/DC单独启停机,以及双方在对方已经启机成功并建立直流电压后启停机,确认AC/DC和DC/DC能够按照协调控制器的控制逻辑,根据当前系统的运行状态自动切换AC/DC和DC/DC的控制模式。不同工况下的启停机过程如表2所示。

表2 不同工况下的启停机过程

Table 2 Start and stop process under different working conditions

工况	AC/DC状态	DC/DC状态
DC/DC 停机状态, 执行 AC/DC 启机	停机转定电压	停机
AC/DC 停机状态, 执行 DC/DC 启机	停机	停机转定电压
DC/DC 启机状态, 执行 AC/DC 启机	定功率转定电压	定电压转定功率
AC/DC 启机状态, 执行 DC/DC 启机	定电压	停机转定功率
AC/DC 与 DC/DC 均启机状态, 执行 AC/DC 停机	定电压转定功率 转停机	定功率转定电压
AC/DC 与 DC/DC 均启机状态, 执行 DC/DC 停机	定电压	定功率转停机
DC/DC 停机状态, 执行 AC/DC 停机	定电压转停机	停机
AC/DC 停机状态, 执行 DC/DC 停机	停机	定电压转停机

由表2可知,AC/DC和储能DC/DC均启机后,前者处于定电压状态,后者处于定功率状态,以该模式为例,图6展示了该运行模式下,直流电压电流及交流电压电流的波形。

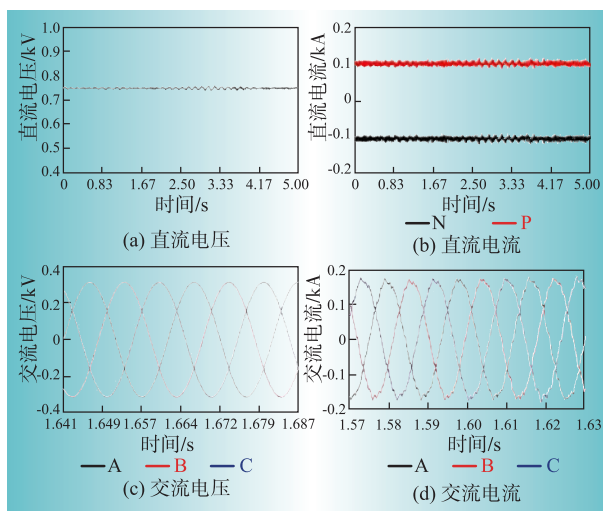


图6 微电网正常运行时电流电压

Fig. 6 Current and voltage during normal operation of micro grid

4.2 一次调频

为验证协调控制器的一次调频功能,通过改变交流380 V母线上的交流负荷模拟功率突变,电源会瞬间补充由负荷功率突变所引发的功率缺额,进而导致系统频率的降低,此时协调控制器检测到频率变化,根据一次调频曲线,计算出新的功率指令值,改变储能DC/DC的功率,实现微电网的一次调频,仿真结果如图7所示。

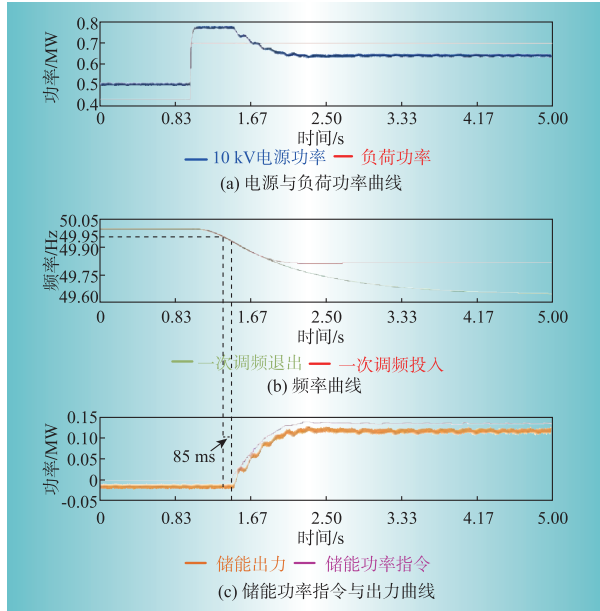


图7 一次调频仿真结果

Fig. 7 Simulation results of primary frequency modulation

从图7可以看出,系统频率在越死区(49.95 Hz)后85 ms左右,储能DC/DC的功率指令开始变化,响应时间符合相关标准要求。另外,通过与协调控制器一次调频功能退出的工况进行对比可以发现,协调控制器在系统发生负荷突变时,能够降低频率波动幅度,有利于维持系统稳定,提高系统运行可靠性。

4.3 备用电源

当交流10 kV母线发生故障且交流380 V母线的母联开关备投功能失效时,协调控制器通过判断交流380 V母线的带电状态和母联开关的状态,自动将储能DC/DC转换为定电压控制模式,将AC/DC转换为孤岛控制模式,维持交流380 V母线电压,保证交流380 V母线上的数据中心、5G基站等高可靠性负荷的不间断供电。仿真开始时,AC/DC运行于定电压模式,储能DC/DC运行于定功率模式,交流380 V母联开关备投功能退出状态,数据中心、5G基站等负荷由交流系统供电,然后断开10 kV进线开关,储能DC/DC与AC/DC在协调控制器的作用下,分别自动切换为定电压控制模式和交流孤岛控制模式,该状态下,数据中心、5G基站等负荷由直流系统供电,直流侧电压电流和交流侧电压电流波形如图8所示。

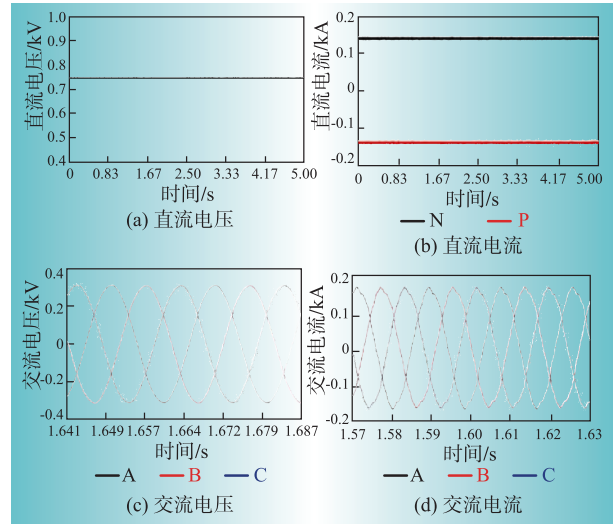


图8 备用电源方式下系统电流电压

Fig. 8 System current and voltage in backup power mode

5 结束语

协调控制器作为微电网的“大脑”,承担着一键式启停、一次调频、备用电源等功能。为充分验证协调控制器的性能,本文基于RTDS实时仿真平台,搭建了包含AC/DC、DC/DC、储能、光伏、充电桩、数据中心等元素的微电网电气仿真系统,并通过GOOSE、Modbus等协议实现RTDS与协调控制器的通信,构成闭环实时仿真系统。通过仿真,验证了协调控制器的一键式启停、一次调频、备用电源等功能,为协调控制器在工程现场的应用奠定了基础。同时,本文搭建的微电网电气仿真系统以及综合能源电气仿真系统与协调控制器之间的通信组网方案对于未来微电网仿真测试具有借鉴意义。

另外,本文关于微电网协调控制器的研究也存在诸多不足。例如:本文的建模只包含电气部分,未充分考虑冷热气等元素,协调控制器对于冷热等元素的控制功能在仿真模型中不能够得到闭环验证;对于多并网点的综合能源系统,本文的协调控制器一次调频功能难以适用;当微电网拓扑发生变化时,协调控制器的控制逻辑需要相应的变化,普适性不足等。未来,将针对以上问题,进一步优化协调控制器的功能逻辑,增强其对于多并网点微电网和多种不同拓扑微电网的适应性,在实验室引入冷热气等元素的实时仿真装置和设备,完善微电网模型。D

参考文献:

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1 893-1 904,2 205.

(下转第66页)