数字式通用型电池模拟器的设计与实现

谢俊文,陆继明,毛承雄,王　丹

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:设计了一种基于DSP和电力电子技术的大功率大容量数字式通用型电池模拟器。模拟器的硬件采用三相电压型PWM变换器作为主拓扑,可模拟铅酸蓄电池、锂电池、燃料电池、液流电池、光伏电池等多种新型电池外特性;模拟器的软件设计基于电池3阶动态模型的模拟算法和双闭环控制算法,保证模拟器具有极高的模拟精度和快速的跟踪能力,并给出了软件设计流程;仿真和实验结果表明,所设计的电池模拟器电压控制偏差为±0.2 V,模拟精度高,电压纹波小,跟踪速度快,控制效果理想。

关键词:电池;模拟器;外特性;动态模型;控制;电压型PWM变换器

中图分类号:TM 91　　**文献标识码**:B　　DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.027

0　引言

近年来,随着石油资源日益匮乏和环境问题日趋严峻,可再生能源发电技术得到了极大的发展。但是,可再生能源(如风能、太阳能等)本身固有的间歇随机和不可控的特点,决定了可再生能源发出的电力难以与电网的电力需求相平衡。目前,加快开发和推广大容量储能技术是实现大规模开发利用可再生能源的重要措施。在电力系统中配置大容量储能电池,有利于平抑功率波动、改善电网的稳定性、提高供电质量、发挥电力调峰作用等[1-4]。根据当前研究情况,适用于电力系统的储能技术有电化学储能电池(燃料、液流、钠硫、锂电池等)、超级电容器、光伏电池等,种类繁多,各种电池都有各自的优势,并且新型储能电池不断涌现出来[5]。

然而在很多电力系统应用场合,往往并不关心储能体内部机理及化学反应,只关心其外特性,因而出现了各种电池模拟器。电池模拟器是一种专门用于模拟电池原型真实外特性的装置,具有成本低、安全可靠、参数变更灵活等特点。目前已经研制出光伏电池、燃料电池、铅酸蓄电池模拟器等。从研究成果来看,存在模拟式和数字式2种类型的电池模拟器。其中数字式电池模拟器结合了电力电子技术和实时控制技术,具有功能强、功率大、容量大等特点,是模拟器的发展方向。文献[6]提出一种燃料电池模拟器的设计方案,文献[7-12]均研究了光伏电池模拟器的设计方案。

收稿日期:2012-04-19;**修回日期**:2013-04-02

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB227206,2009CB219702);国家自然科学基金重点资助项目(50837003)

Project supported by a Grant from the Major State Basic Research Development Program of China(973 Program)(2010-CB227206,2009CB219702) and Key Program of the National Natural Science Foundation of China(50837003)

已有的电池模拟器大部分是以不控整流器+Buck变换器或者直流稳压电源+Buck变换器作为模拟器的主拓扑[6-12]。这些模拟器存在以下几个问题:模拟对象单一,只能模拟一种特定的电池,如光伏电池模拟器只能模拟光伏电池外特性,无法模拟其他种类的电池;拓扑存在不足,在不控整流器+Buck变换器的拓扑下能量只能单向流动,无法双向流动,只能模拟电池放电工况,故无法模拟可充可放电池;电池种类过少,缺乏新型电池(如液流电池、锂电池和钠硫电池等)的模拟器,给新型大规模储能电池的研究带来困难。同时,如果使用新型电池原型进行研究和试验,会带来成本高、参数变更不灵活、存在损坏电池的危险等问题,因此很有必要研究一种通用的电池模拟器。

本文提出一种基于新拓扑的大功率大容量通用型电池模拟器的设计方案,该电池模拟器的提出可以有效解决上述几点不足,可模拟铅酸蓄电池、锂电池、燃料电池、液流电池、光伏电池等多种新型电池外特性。随后本文具体给出了模拟器的软、硬件设计方案、模拟算法和控制算法等,最后仿真和实验结果验证了设计的可行性。

1　模拟器硬件设计

1.1　模拟器工作原理

电池模拟器的实质为一输出电压受控的直流稳压电源,其输出电压动态变化,且变化规律与所要模拟的电池外特性一致。在本文中,要实现模拟电池原型的功能,此模拟器应该具有极高的模拟精度和较小的控制误差,否则将失去取代电池原型的意义;其次其在阶跃、充/放电转换等暂态过程中应该具有快速响应能力,并且重新稳定和收敛于新的工作点。综合上述要求本文选取三相电压型PWM变换器(VSC)作为电池模拟器的主拓扑。VSC有2个最显

著的拓扑特征[13]:一是四象限运行,能量可以双向流动;二是直流侧采用电容进行直流储能,从而使 VSC 直流侧呈低阻抗的电压源特性。因此 VSC 相当于一个受控电压源,可以通过对功率开关器件的开断控制使其按一定的特性输出所需电压。如果能够获得电池准确的外特性数据,并且采取适当的控制策略,则最终可以达到良好的模拟效果,最大限度地模拟电池原型。

该通用型电池模拟器具有以下几个优点:模拟对象多样化,可以任意设定不同种类电池的不同外特性并进行模拟,基本能够模拟大部分电池;应用电力电子技术,可使模拟器的功率和容量很大,满足对大规模大功率储能电池的研究需求;采用调压器+VSC 的电路结构,能量可以双向流动,电压输出范围广,既可模拟充电也可模拟放电工况(当模拟器模拟充电工况时,装置处于逆变状态,能量从直流侧流向交流侧;当模拟放电工况时,装置处于整流状态,能量从交流侧流向直流侧);装置简单可靠,使用范围广,信号处理能力强,模拟精度高,参数更改灵活,具有很高的实用性和工程应用价值。

1.2　总体设计

图 1 给出了通用型电池模拟器的总体设计方案图。图中端点 P 和 N 为模拟器的最终输出接口,分别模拟电池的阳极和阴极。A、B、C 连接到市电 380 V,从而可以模拟大容量储能电池,方便实现长时间的连续模拟试验。根据各组成部分功能的不同,该设计电路可分为调压器、隔离变压器、交流接触器、功率电路 VSC 及其驱动电路、电压/电流传感器、测量/保护电路、DSP 控制器、操作/显示面板和上位机等几个部分。

调压器 TU 的作用是调节 VSC 的输入电压,由于 VSC 是升压型整流电路,其输出直流电压可以从交流电压峰值附近调高,如要调低就会使电路性能恶化[11],故 TU 主要用于保持 VSC 的直流输出电压 U_{dc} 与交流输入电压 U_{ac} 的比例关系,同时拓宽直流电压的模拟范围。隔离变压器 TM 用于隔离模拟器和电网,以保证设备和人身安全。交流接触器 KM 用于控制装置的启停和并网,可通过控制器实施合闸、跳闸的操作。交流和直流侧均设置有快速熔断器 FUSE,用于在发生短路故障时切断回路,保护装置安全。测量/保护电路将电压、电流传感器的输出信号进行调理、滤波后变成 AD 芯片能够处理的模拟信号,AD 芯片对此模拟信号进行 AD 转换得到数字信号后送到 DSP 控制器进行处理,同时该电路具备过压过流保护和闭锁脉冲功能。控制器的 CPU 选择 TI 公司的 TMS320F28335 芯片,数据处理能力强,满足模拟器的各种复杂运算与数据处理要求。操作/显示面板集成按键、显示和指示灯单元,用于实现参数管理、设置和查询。上位机处理软件为实验数据分析、绘制、录波等后期处理工作提供工具。本文主要介绍 VSC 的设计方法。

1.3　VSC 设计

VSC 是电池模拟器的核心部分,如图 2 所示。拓扑中有 6 个 IGBT 功率开关管、3 个交流滤波电容 C_{ac}、3 个直流电解电容 C_{dc} 和 3 个交流滤波电感 L。图中,U_{ac} 为交流输入电压,U_{dc} 为直流输出电压,I_{dc} 为直流侧输出电流。3 个星形连接在交流侧的交流滤波电容 C_{ac} 主要用于在 VSC 工作在并网逆变状态时滤除谐波,减少对电网的污染。

L 为交流滤波电感,主要用以滤除网侧电流谐波,设计原则主要有[13-15]:隔离电网电动势与 VSC 交流侧电压;电感上的压降尽可能小,一般不大于交流电压的 30%;在 1 个开关周期内交流电流的最大超调量尽可能小,一般应小于交流额定电流的 10%;交流电流谐波失真(THD)尽可能小,本文中 THD 上限为交流侧额定电流的 5%。L 的实际取值应适当满足上述条件的交集。

直流电解电容 C_{dc} 的主要作用是缓冲 VSC 交流侧与直流负载间的能量交换,稳定 VSC 直流侧电压,同时抑制直流侧谐波电压。设计时电容应该尽可能

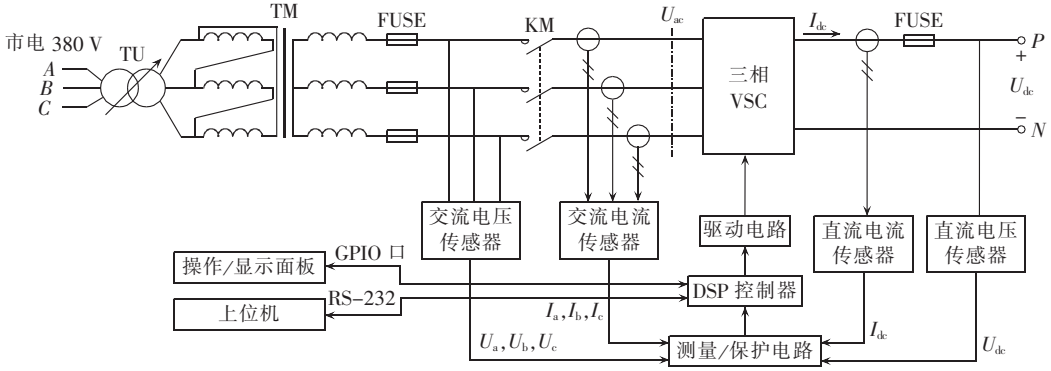

图 1　总体设计方案

Fig.1　Overall design scheme

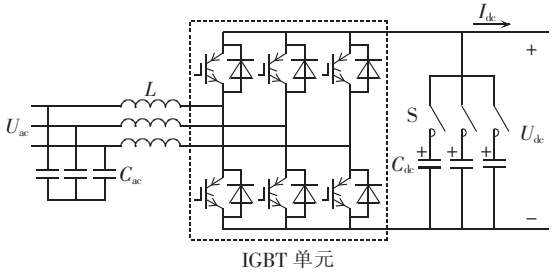

图 2 VSC 拓扑结构

Fig.2 VSC topology

大,以使直流电压稳态性能好、电压电流纹波小;同时又不能过大,否则影响直流电压的动态响应性能。文献[15]以电容电压波动为出发点提出了一种设计方法,在本文中 C_{dc} 的取值将略小于理论计算值,保证模拟器在突加、突甩负载时仍然具有较快的阶跃响应速度。

上文从理论上分析了 VSC 的设计原理。但是在本文的应用中,模拟的电池参数可任意整定,即 U_{dc} 的变化范围从几十伏特到几百伏特不等,I_{dc} 的变化范围从几安培到几十安培不等,根据上述原则计算的 L、C_{dc} 取值在各种工况下也各不相同。为了体现模拟器的通用性,电感设计为带多个抽头形式,同时多个电容分别与切换片连接后并联于直流侧。将电感和电容设计成可调形式,可以方便在实际调试过程中进行选择和优化,确保得到一个实现效果最优的取值。L 的最终取值为 6 mH,并且有 3 个中间抽头(1 mH、3 mH 和 5 mH);3 个直流电解电容 C_{dc} 的取值分别为 1 000 μF、2 200 μF 和 4 700 μF;交流滤波电容 C_{ac} 根据经验取值为 4.7 μF。IGBT 单元采用富士公司的智能功率模块(IPM),最大耐压和耐流分别可达 1 200 V 和 300 A,满足大功率大容量的需求,与其配套的驱动电路采用光耦芯片 HCPL4504 进行光电隔离。

2 模拟器软件设计

2.1 模拟算法

基于数字式的模拟器,模拟算法主要有查表法和折线法[9]。查表法利用查表、插值的方法来获得外特性,精度比较高但是数据量过大,扩展性差,尤其不适用于本文所针对的通用型电池模拟器。折线法利用分段折线来拟合非线性曲线,计算简单但是模拟精度低,且不同电池的拟合结果难以统一。因而上述 2 种方法都具有局限性,难以推广到通用型电池模拟器的应用场合。本文提出一种模型法,该方法基于 3 阶电池动态模型,适用于多种电池的建模[16-17]。传统电池模型为一个理想电压源与一个电阻串联,只适用于线性模拟场合,相比于传统模型,3 阶电池动态模型具有更高的精度和更广的通用性。图 3 所示为本文采用的非线性 3 阶电池动态模型。

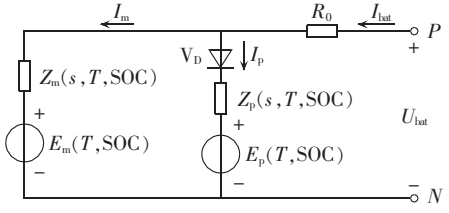

图 3 3 阶电池动态模型

Fig.3 3-order dynamic model of battery

图 3 中,U_{bat} 为电池电压,I_{bat} 为电池电流;SOC 为荷电状态,T 为电池温度;s 为拉普拉斯算子,反映阻容特性。该模型的特点是将等效电路分为主反应支路、寄生支路和固定损耗 R_0。主反应支路包括电压源 E_m 和 RC 网络 Z_m;寄生支路包括电压源 E_p、RC 网络 Z_p 和二极管 V_D。电压源的取值与温度 T 和 SOC 相关,RC 网络的阻容特性取决于拉普拉斯算子 s、温度 T 和 SOC,故此模型为高度非线性模型。事实证明,3 阶电池动态模型考虑了电池电压、电流和荷电状态三者的动态关系,具有极高的精度,其建模结果与实际电池充放电特性吻合程度高,非常适合用于工程应用场合。

将 3 阶电池动态模拟器的理论研究成果应用于通用型电池模拟器的设计与实现,关键在于模型中参数的确定方法。模型参数的确定主要有 2 个途径:一是通过已有的文献,不少关于电池的研究文献以及报告均采用 3 阶动态模型对电池进行建模,同时也提供了 3 阶动态模型的参数和数据;二是通过已有的电池特性数据推导出模型中的参数值,即非线性函数拟合过程。本文采用模型法作为模拟算法,控制器根据 3 阶电池动态模型中的参数,计算得到所需模拟的电池外特性方程;在工作过程中根据模拟器外部工况,推算出电池稳定工作点,得到直流电压给定值,并且通过电力电子技术和数字控制技术使得 VSC 输出所需的工作点电压。

2.2 控制策略

实现电池模拟器关键在于直流电压的精确控制,既要保证直流电压 U_{dc} 对直流电压给定值 U_{ref} 的响应跟踪速度,也要兼顾直流电压稳定时的静态误差和纹波。为达到上述要求,本文采用电压外环、电流内环的双闭环 PI 控制策略[13]。电压外环的作用主要是控制 VSC 直流侧电压,而电流内环的作用主要是按电压外环输出的电流指令进行电流控制,如实现单位功率因数正弦波电流控制。控制框图如图 4 所示。

在电压外环,U_{dc} 与 U_{ref} 相比较,产生的误差信号 e 作为外环 PI 控制器的输入,输出为内环电流的有功分量指令值 i_d^*,无功分量指令值 i_q^* 则设置为 0,即保持电池模拟器工作在单位功率因数状态。在电流内环,利用状态反馈解耦控制对有功(d 轴)和无功(q 轴)进行前馈解耦,三相交流电流解耦为 i_d 和 i_q,

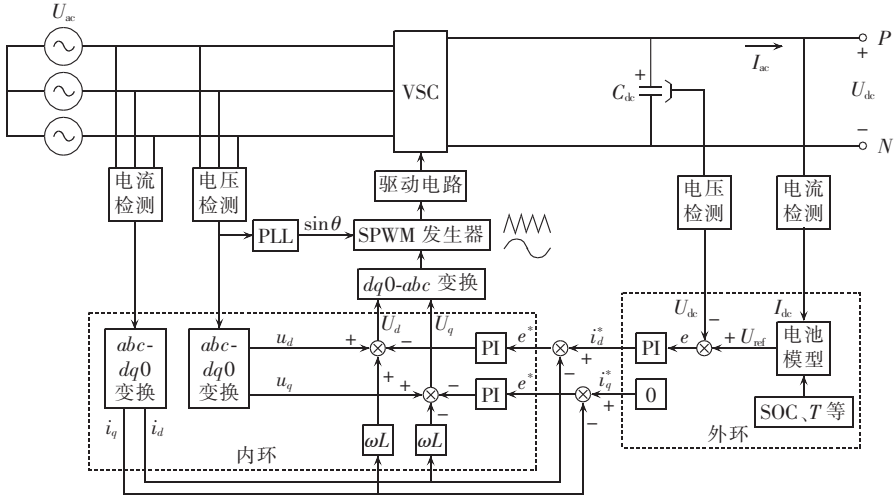

图 4 双闭环控制策略示意图

Fig.4 Schematic diagram of double-loop control strategy

(q 轴)进行前馈解耦,三相交流电流解耦为 i_d 和 i_q,三相交流电压解耦为 u_d 和 u_q,有利于控制器的设计。给定值 i_d^*、i_q^* 与解耦得到的 i_d、i_q 比较后将偏差 e^* 输入到内环 PI 控制器,其输出取反后分别加上前馈量 u_d、$i_q\omega L$ 和前馈量 u_q、$i_d\omega L$,结果经过反变换后便可得到所需的正弦调制波,调制波与三角载波相比较就可以得到 SPWM 脉冲信号。此外,锁相环(PLL)由同步信号电路构成,通过检测电网频率,实时调整载波周期,保证调制波的频率动态跟踪电网频率微调。由于 PI 调节器能够实现无静差,所以可以保证 U_{dc} 与 U_{ref} 之间的偏差几乎为 0;同时由于引入了电流闭环控制,直接对电流进行控制,保证电池模拟器直流侧具有良好的动态响应性能,采用此控制策略可充分保证 U_{dc} 对 U_{ref} 的逼近与跟踪。内环和外环 PI 控制参数可按文献[13]介绍的方法进行设计。

2.3　软件流程设计

模拟器工作时输入端直接与市电 380 V 相连,输出端 P 和 N 之间可根据需要接入负载(电阻、充电器或者变流器等)。电池模拟器的实现需要首先设置两部分参数:一是 3 阶电池动态模型的参数,即图 3 模型中的 E_m、Z_m、E_p、Z_p 和 R_0;二是设置电池工作参数,包括串联级数、温度 T、容量、初始 SOC 等。此外对于不同的电池工作参数也不同,如模拟光伏电池还需设置光照强度信息等。

具体的程序设计可按图 5 所示的流程图进行编写,主程序采用无限循环体结构,测控循环周期由定时中断来精确控制。同时采用结构化程序设计,主程序由完成特定功能的子程序组合而成。中断子程序有定时中断、CAP 中断、PWM 中断,分别用于控制程序循环周期、测频和产生 SPWM 脉冲信号。在一个测控循环中,程序先后完成了如下操作:根据电池信息和电池电流计算 U_{ref};将偏差 e 输入到双环控制器;经过 PI 调节后,控制器输出控制信号;根据相应的控制信号产生 SPWM 脉冲信号;更新电池状态参数(如 SOC、温度、光照等);检测模拟器的异常工作情况及报警;最后和上位机通过 RS-232 进行通信。

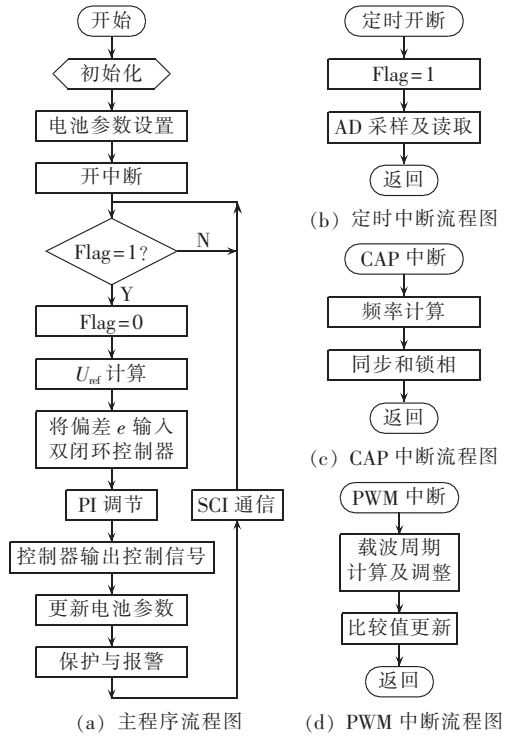

图 5 软件设计流程图

Fig.5 Flowchart of software design

3　模拟器仿真和实验

3.1　仿真和实验参数

搭建电池模拟器实验柜,为了全面验证设计的可行性,分别对铅酸蓄电池、锂电池和液流电池的充/放电外特性进行了仿真和实验。实验接线如图 6 所示,电路参数的选择如下:调压器和隔离变压器的变比分别为 380:30 和 1:1;交流侧电感 $L=1$ mH,交流

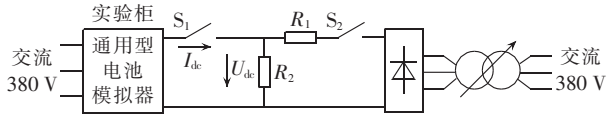

图6 电池模拟器实验接线

Fig.6 Experimental wiring of battery simulator

侧滤波电容 $C_{ac}=4.7\ \mu F$,直流侧电容 $C_{dc}=2\,200\ \mu F$,IGBT 开关模块的开关频率为 5 kHz;充电电阻 $R_1=2\ \Omega$,额定功率为 500 W;放电电阻 $R_2=6\ \Omega$,额定功率为 2 kW。同时利用上位机软件对实验结果进行记录和绘图。一般电池的正常 SOC 工作区间为 5%~95%,为防止电池的过充和深放,在越限的情况下装置会自动报警并对 U_{ref} 进行限幅处理。

此外,还在 MATLAB/Simulink 仿真软件中,按照电池模拟器的主电路拓扑和控制策略搭建仿真模型进行仿真[18],仿真参数和控制参数的设置与实验基本一致。

3.2 仿真和实验结果及分析

铅酸蓄电池采用文献[19]介绍的等效电路模型,本文模拟 5 节 12 V 铅酸蓄电池串联的工作外特性,电池容量设置为 41.67 W·h,初始 SOC 设置为 50%,并且调节图 6 中的调压器使得不控整流模块的输出直流电压为 90 V 左右。在实验过程中,首先闭合 S_2、断开 S_1,装置处于空载状态;接着将 S_1 闭合,不控整流模块对装置进行充电,此时模拟电池充电工况,装置处于逆变状态;SOC 从 50%上升到接近上限 95%时,断开 S_2,模拟电池放电工况直至 SOC 放电至下限 5%。仿真和实验结果如图 7 所示。图 7(a)中,U_{ref} 为直流电压参考值,U_{dc} 为实验波形,U_{bat} 为仿真波形;图 7(b)中,I_{dc} 为实验波形,I_{bat} 为仿真波形;图 7(c)中,SOC_1 为实验波形,SOC_2 为仿真波形;后同。

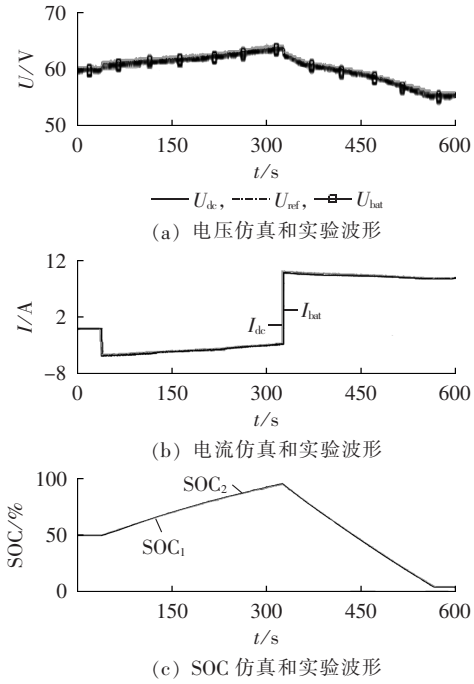

图7 铅酸蓄电池充/放电外特性仿真和实验波形

Fig.7 Simulative and experimental waveforms of charge/discharge exterior characteristics for lead-acid battery

从图 7 可看出,仿真波形和实验波形基本吻合。0~40 s 时间内,电池为空载,U_{ref} 为恒值,SOC 保持为 50%;在 40 s 时,模拟器突加充电电流,U_{ref} 瞬间发生阶跃变化;40~330 s 时间内,模拟器处于充电工况,即工作在逆变状态,SOC 从 50%上升到 94%,U_{ref}、U_{dc} 也逐渐上升,符合电池的实际情况;在 330 s 时,直流侧从电源负载切换为电阻负载,U_{ref} 再次发生阶跃变化;330~560 s 时间内,模拟器处于放电工况,即工作在整流状态,SOC 从 94%下降到下限 5%,U_{ref}、U_{dc} 也逐渐下降。此后模拟器发出越限报警信号,并且 SOC 和 U_{ref} 均被限幅。值得注意的是,在 330 s 时,电池从充电状态切换到放电状态,装置也自动从逆变状态迅速切换到整流状态,动态响应速度快,满足设计要求。

锂电池采用文献[20]介绍的等效电路模型,本文模拟 14 个锂电池单体串联的工作外特性,电池容量设置为 33.33 W·h,初始 SOC 设置为 50%,并且调节图 6 中的调压器使得不控整流模块的输出直流电压为 80 V 左右。实验步骤与铅酸蓄电池基本一致,仿真和实验结果如图 8 所示。

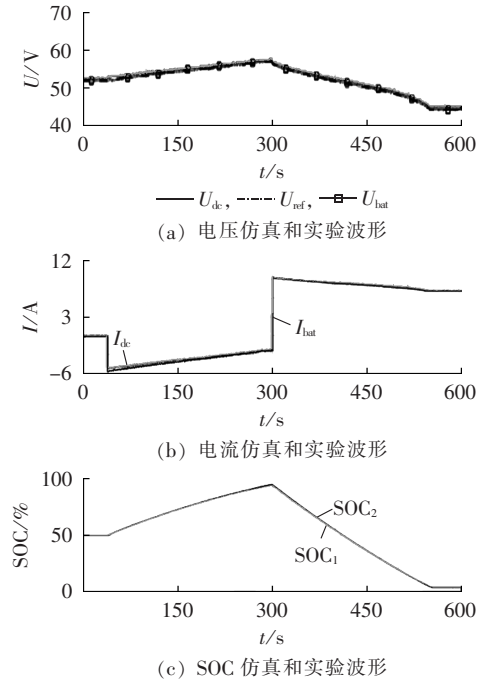

图8 锂电池充/放电外特性仿真和实验波形

Fig.8 Simulative and experimental waveforms of charge/discharge exterior characteristics for lithium battery

从图 8 可看出,仿真波形和实验波形基本吻合。0~40 s 时间内,电池为空载,U_{ref} 为恒值,SOC 保持为 50%;在 40 s 时,模拟器突加充电电流,U_{ref} 瞬间发生阶跃变化;40~300 s 时间内,模拟器处于充电工况,

SOC 从 50%上升到 94%;在 300 s 时,直流侧从电源负载切换为电阻负载,U_{ref} 再次发生阶跃变化;300~550 s 时间内,模拟器处于放电工况,SOC 从 94% 下降到下限 5%。此后模拟器越限报警,并且 SOC 和 U_{ref} 均被限幅。在 300 s 时电池从充电状态切换到放电状态,装置也从逆变状态迅速切换到整流状态。

液流电池采用文献[20]介绍的等效电路模型,本文模拟串联级数为 39 的液流电池的工作外特性,电池容量设置为 33.33 W·h, 初始 SOC 设置为 50%,并且调节图 6 中的调压器使得不控整流模块的输出直流电压为 80 V 左右。实验步骤与铅酸蓄电池基本一致,仿真和实验结果如图 9 所示。

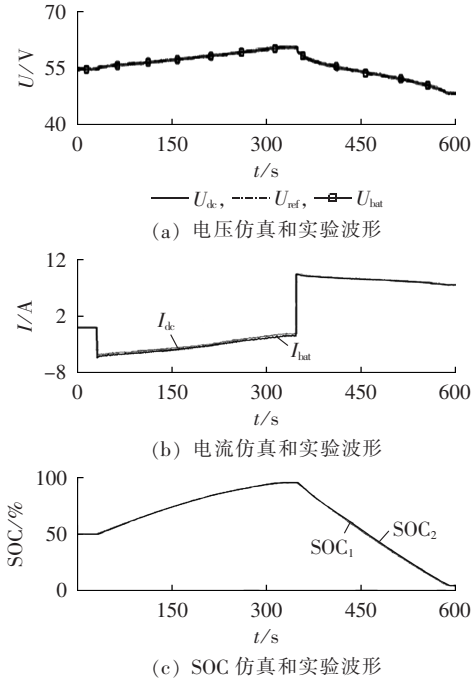

图 9 液流电池充/放电外特性仿真和实验波形

Fig.9 Simulative and experimental waveforms of charge/discharge exterior characteristics for Vanadium redox flow battery

从图 9 可以看出,仿真波形和实验波形基本吻合。0~40 s 时间内,电池为空载,U_{ref} 为一恒值,SOC 保持为 50%;在 40 s 时,模拟器突加充电电流,U_{ref} 瞬间发生阶跃变化;40~350 s 时间内,模拟器处于充电工况,SOC 从 50%上升到 95%;在 350 s 时,直流侧从电源负载切换为电阻负载,U_{ref} 再次发生阶跃变化;350~585 s 时间内,模拟器处于放电工况,SOC 从 95% 下降到下限 5%。此后模拟器越限报警,并且 SOC 和 U_{ref} 均被限幅。350 s 时刻为状态切换点。

3.3　结果分析

从图 7—9 的波形可知,在分别模拟 3 种不同的电池的情况下,仿真波形和实验波形基本重合,但可看出有一些微小的偏差。存在微小偏差的原因主要是在仿真中电阻阻值和不控整流模块的输出是理想的,而在实际实验过程中电阻受到温度影响因而阻值有偏差,同时不控整流模块的实际输出和带载能力都与仿真有区别。但是仿真和实验波形仍比较吻合,足以反映出电池模拟器设计的可行性。此外,衡量模拟器实现效果的一个重要指标是直流电压的模拟精度,图 7(a)、8(a)和 9(a)反映出实验波形 U_{dc}、直流电压给定值波形 U_{ref} 和仿真波形 U_{bat} 高度重合,表明模拟器具有极高的模拟和逼近精度。

同时图 10 分别记录了 3 次实验下的电压控制偏差 e($e=U_{ref}-U_{dc}$)波形。e 越小控制效果越好,实际的 $U-I$ 特性与所要模拟电池的 $U-I$ 特性越接近。从实验结果可知,e 的波动范围为在 ±0.2 V 以内,模拟精度约为 0.4%(即 0.2/50×100%),模拟精度高,同时电压纹波小,控制效果理想。

图 11 给出了在电池电压给定值 U_{ref} 发生阶跃变化情况下的实际电压 U_{dc} 的动态响应示波器波形,由图可知响应时间控制在 20 ms 左右。该模拟器的设计基本满足设计的技术指标,直流电压 U_{dc} 对给定值 U_{ref} 的跟踪速度快、误差小,能够很好地模拟所设定的电池外特性。

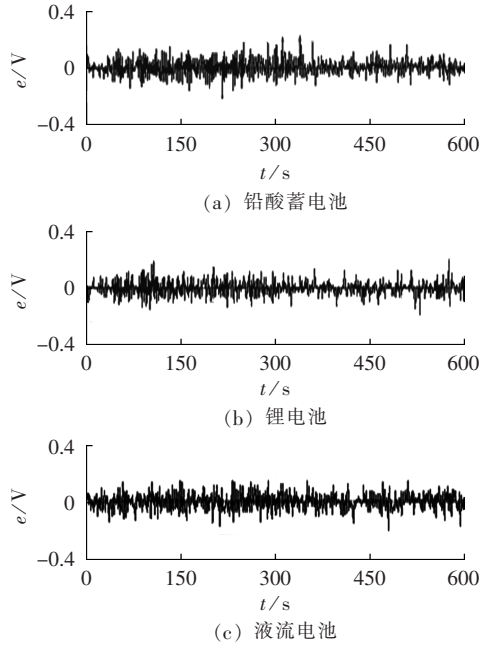

图 10 电压控制偏差 e 实验波形

Fig.10 Experimental curves of e

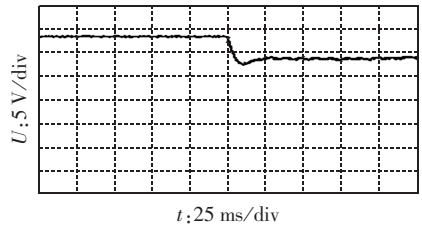

图 11 电池模拟器动态响应波形

Fig.11 Dynamic response curve of battery simulator

4 结论

为了满足电力系统试验与研究中对不同储能电池的研究需要,本文设计了一种基于电力电子技术和DSP的大功率大容量数字式通用型电池模拟器,通过物理的方法来模拟和获取电池外特性。该模拟器采用VSC作为主拓扑,以3阶电池动态模型为模拟算法生成电压控制指令,通过电压外环、电流内环的双闭环控制算法产生SPWM波,驱动VSC输出和跟踪电压参考值。对3种不同电池的外特性模拟仿真和实验结果验证了设计的可行性和效果的良好。该装置简单可靠,避免了使用电池原型带来的不便和代价,能够方便地模拟不同种类、不同参数的电池,并且可以扩展到电动汽车、智能电网等应用领域。

参考文献:

[1] 程时杰,文劲宇,孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用[J]. 电气应用,2005,24(4):1-6.
CHENG Shijie,WEN Jinyu,SUN Haishun. Application of power energy storage techniques in the modern power system[J]. Electrotechnical Application,2005,24(4):1-6.

[2] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2008,32(7):1-9.
ZHANG Wenliang,QIU Ming,LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology,2008,32(7):1-9.

[3] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术,2006,30(15):54-58.
ZHANG Buhan,ZENG Jie,MAO Chengxiong,et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system[J]. Power System Technology,2006,30(15):54-58.

[4] PAATERO J V,LUND P D. Effect of energy storage on variations in wind power[J]. Wind Energy,2005,8(4):421-441.

[5] 陈伟,石晶,任丽,等. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):112-115.
CHEN Wei,SHI Jing,REN Li,et al. Composite usage of mutitype energy storage technologies in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):112-115.

[6] 刘珺,王丽芳,王立业,等. 燃料电池模拟器的研究[J]. 电源技术,2011,35(3):297-299.
LIU Jun,WANG Lifang,WANG Liye,et al. Research of fuel cell power electronic simulator[J]. Chinese Journal of Power Sources,2011,35(3):297-299.

[7] 张厚升,赵艳雷. 多项式拟合的光伏电池阵列模拟器研究与设计[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):109-113.
ZHANG Housheng,ZHAO Yanlei. Research and design of photovoltaic cells simulator by polynomial fitting[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):109-113.

[8] WU Bingbing,Yin Zhongdong,Xiao Xiangning. Design of simulation model of PV cells based on VSR PWM rectifier circuit[C]//2009 International Conference on Energy and Environment Technology. [S.l.]:IEEE,2009:127-129.

[9] 杜柯. 基于DSP的光伏电池数字模拟系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
DU Ke. Research on a digital photovoltaic simulator based on DSP[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2006.

[10] 张熙霖. 基于DSP2407的光伏方阵仿真电源的设计与研究[D]. 北京:中国科学院电工研究所,2004.
ZHANG Xilin. Design and research on a photovoltaic simulator based on DSP2407[D]. Beijing:Institute of Electrieal Engineering,Chinese Academy of Seiences,2004.

[11] 孙孝金. 太阳能电池阵列模拟器的研究与设计[D]. 济南:山东大学,2009.
SUN Xiaojin. Study and design on PV array emulator[D]. Ji'nan:Shandong University,2009.

[12] ANDREAS T,WOLFGAND M,DOMINIK B,et al. Design and investigation of a modular battery simulator system[C]//2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. [S.l.]:IEEE,2009:1525-1528.

[13] 张崇巍,张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003:62-148.

[14] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008:166-167.

[15] 朱鹏程. 基于UPFC的串、并联双变流器控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
ZHU Pengcheng. Study on the control strategy of the series-parallel double conversion system for UPFC[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2005.

[16] STEFANO B,MASSIMO C. Dynamical models of lead-acid batteries:implementation issues[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2002,17(1):16-23.

[17] MASSIMO C. New dynamical models of lead-acid batteries[J]. IEEE Trans on Power Systems,2000,15(4):1184-1190.

[18] 李维波. MATLAB在电气工程中的应用[M]. 北京:中国电力出版社,2007:389-405.

[19] 李槟,陈全世. 混合动力电动汽车中电池特性的研究[J]. 汽车技术,1999(10):11-14.
LI Bin,CHEN Quanshi. Research on the battery characteristics of hybrid powered electrical motor vehicle[J]. Automobile Technology,1999(10):11-14.

[20] CHAHWAN J A,ENG B. Vanadium-redox flow and lithiumion battery modeling and performance in wind energy application[M]. [S.l.]:Library and Archives Canada,2007:17-23.

作者简介:

谢俊文

谢俊文(1987-),男,广东茂名人,硕士研究生,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、风电与储能(**E-mail**:xjwhyhp@126.com);

陆继明(1956-),男,江苏南通人,教授,研究方向为电力系统运行与控制、电力电子在电力系统中的应用;

毛承雄(1964-),男,湖北武穴人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电力系统运行与控制、大型同步发电机励磁控制;

王 丹(1977-),男,江西瑞昌人,副教授,研究方向为电力系统运行与控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用。

智能变电站网络分析与故障录波一体化设计与实现

付国新,戴超金
(国电南京自动化股份有限公司,江苏 南京 210003)

摘要：设计了网络分析与故障录波一体化系统。系统由 5 个模块组成:报文采集、解析模块通过以太网嗅探技术捕获数据包,并从中提取录波模拟量和开关量发送给故障录波模块;报文监测、记录模块对网络报文进行在线实时监测和无损记录,对变电站网络通信状态进行在线实时监测和评估;故障录波模块完成录波启动和波形记录;高精度时钟模块为各模块提供精准的绝对时标;分析站模块负责装置建模、各个模块的配置与管理、故障和报文分析以及对外通信。报文采集解析、故障启动录波、报文监测记录均采用独立 CPU 进行处理,保证了网络报文记录和故障录波在硬件上的独立性;报文采集和录波数据的同步处理采用同一网口的数据源,使用同一时标,在关联分析中可以通过同一时刻点对录波数据与报文数据进行分析。

关键词：变电站；故障录波；通信；监测；以太网；IEC61850
中图分类号：TM 73　　**文献标识码**：B　　DOI：10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.028

0 引言

自 2008 年数字化变电站试点到目前智能变电站逐步大面积推广的整个过程中,故障录波装置和网络分析装置[1]都作为独立的 2 个装置进行设计、组屏,这 2 种装置都要对全站报文进行采集,需要分配较多的交换机端口[2]。当网络故障或报文异常引起继电保护装置动作时,很难将网络报文数据和故障录波数据进行关联、综合分析,智能变电站网络分析与故障录波系统将这 2 个装置的功能进行整合设计[3],很好地满足了 Q/GDW383—2009《智能变电站技术导则》和 Q/GDW441—2010《智能变电站继电保护技术规范》提出的“故障录波装置采用网络方式接受 SV 报文和 GOOSE 报文时,故障录波功能和网络记录分析功能可采用一体化设计”[4]的要求。

收稿日期:2011-11-09;**修回日期**:2013-01-11

1 系统结构

网络分析和故障录波一体化设计有 3 个关键问题需要克服:

a. 大容量数据采集与存储,通常 1 个变电站有几十个合并单元(MU),1 个 MU 的每个采样点平均采样字节数为 255 Byte, 按 4 kHz 的采样频率,1 个 MU 每秒有近 1 MByte 的数据量,这就要求系统具有很强的数据吞吐和处理能力,数据采集实时可靠,能通过高速通道把数据共享给故障录波和网络报文监测记录[5];

b. 故障录波与报文记录硬件上能独立,2 个模块互不影响,1 个出现故障时另外 1 个能正常运行;

c. 故障录波数据和报文记录数据能关联分析,2 种数据能相互印证[6]。

智能变电站网络分析与故障录波系统采用模块化设计,系统结构如图 1 所示。系统主要由 5 个模

Design and implementation of digital battery simulator

XIE Junwen, LU Jiming, MAO Chengxiong, WANG Dan
(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology(AEET),
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A digital battery simulator based on power electronic technology and DSP is designed, which takes the three-phase VSC (Voltage Source PWM Converter) as the main topology of its hardware, being capable of simulating the exterior characteristics of various battery types, such as lead-acid battery, lithium battery, fuel cell, Vanadium redox flow battery, PV cell, and applies the 3-order dynamic battery model and the double-loop control strategy to guarantee its high accuracy and fast response. The flowchart of software design is given. The simulative and experimental results show that, the voltage control error of the designed battery simulator is within ±0.2 V, its simulation accuracy is high, its voltage ripple is small, its tracking speed is fast and its control effect is ideal.

Key words: electric batteries; simulator; exterior characteristics; dynamic models; control; voltage source PWM converter