

# 基于滑模控制的电池模拟器仿真与研究\*

胡霞, 曹文章, 戴袁园

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232000)

**摘要:** 以电流可逆斩波电路为基础, 通过滑模控制方法构建了 Buck-Boost 变换器, 实现了一个拓扑结构电流双向流动的电池模拟器, 以此来模拟电池充放电过程。通过控电压的方式进行调节, 当电容电压大于电池电压时为电池充电形成 Buck 电路, 当电容电压小于电池电压时电池放电形成 Boost 电路。通过将滑模控制与传统的 PI 控制相比较, 验证了在负载波动时滑模控制的调节时间优于 PI 控制, 有着更好的鲁棒性、动态性能。在理论分析的基础上, 通过仿真软件得到了实验结果。

**关键词:** 电流可逆斩波电路; 滑模控制; 电池模拟器; Buck-Boost 变换器

中图分类号: TP17; TM461

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212212

中文引用格式: 胡霞, 曹文章, 戴袁园. 基于滑模控制的电池模拟器仿真与研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(5): 47-50.

英文引用格式: Hu Xia, Cao Wenzhang, Dai Yuanyuan. Simulation and research of battery simulator based on sliding mode control[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(5): 47-50.

## Simulation and research of battery simulator based on sliding mode control

Hu Xia, Cao Wenzhang, Dai Yuanyuan

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China)

**Abstract:** Based on the current reversible chopper circuit, the Buck-Boost converter is constructed by sliding mode control method, and a battery simulator with two-way current flow in topological structure is implemented to simulate the charging and discharging process of the battery. Buck circuit is formed when the capacitor voltage is higher than the battery voltage, and Boost circuit is formed when the capacitor voltage is lower than the battery voltage. Compared with the traditional Pi Control, the sliding mode control has better robustness and dynamic performance when the load fluctuates than the PI Control. On the basis of theoretical analysis, the experimental results are obtained by simulation software.

**Key words:** current reversible chopper circuit; sliding mode control; battery simulator; Buck-Boost converter

### 0 引言

电池模拟器是用来模拟电池充电、放电特性的设备, 储能技术是解决可再生能源并网难题的关键技术, 若使用储能电池原型进行研究, 一方面采购费用高, 另一方面研究时电池损坏研究成本也比较大, 所以有必要使用电池模拟器来代替储能电池原型进行研究与试验。目前电池模拟器的不足之处之一为拓扑不足, 在不控整流器+DC/DC 变流器的拓扑能量只能单向流动, 无法双向流动, 只能模拟电池的放电工况, 无法模拟电池其他工况, 故对可冲可放电池模拟无能为力<sup>[1-4]</sup>。本文采用电流可逆斩波电路, 它是将降压斩波电路与升压斩波电路组合在一起, 电流可正可负<sup>[5]</sup>可以模拟出电池充电放电过程。同时本文采用滑模变结构控制方法, 这种控制策略与其他控制的不同之处在于系统的“结构”并不固定, 而是可以在动态过程中根据系统当前的状态有目的地不

断变化, 迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动<sup>[6-7]</sup>。与传统的 PI 控制相比, 滑模控制的鲁棒性、动态性能更好, 通过仿真实验结果对比验证了滑模控制的优越性与电池模拟器电流可正可负的可行性。

### 1 电池模拟器主电路拓扑结构

电池模拟器电路如图 1 所示, 定义  $V_1$  为电网,  $V_2$  为电池,  $D_1$ 、 $D_2$  为二极管,  $L$  为电感,  $C$  为电容,  $r$  为负载电阻。通过控电容电压的方式实现电流双向流动模拟电池的充放电过程。

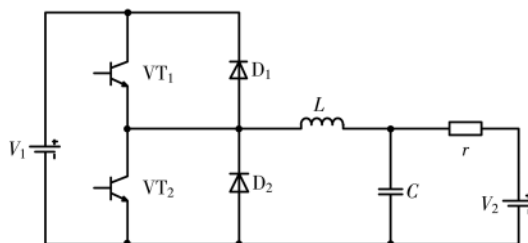


图 1 电池模拟器拓扑结构

\* 基金项目: 合肥科威尔电源系统股份有限公司基金(K-YFLX036)

当电容电压高于电池电压  $V_2$  时, 电网  $V_1$  向电池  $V_2$  充电, 从电路结构上看类似于 Buck 电路; 当设定  $V_2$  的电压高于电容电压时, 电池  $V_2$  开始放电, 从电路结构上看类似于 Boost 电路, 因此整个电路的电流正反向流动取决于电容电压与电池电压的大小, 在工业设计上更容易实现, 且整个系统为一套控制方法, 解决了工业设计上硬切换的问题, 真正实现了电流的正反向流动。

### 1.1 电池模拟器滑模设计

文献[8]提出的电池模拟器方案只能实现电流单向流动, 只能单一地模拟出电池放电或者充电, 无法满足测试电池的各种工况。图 2 所示为本文电池模拟器滑模设计结构示意图。

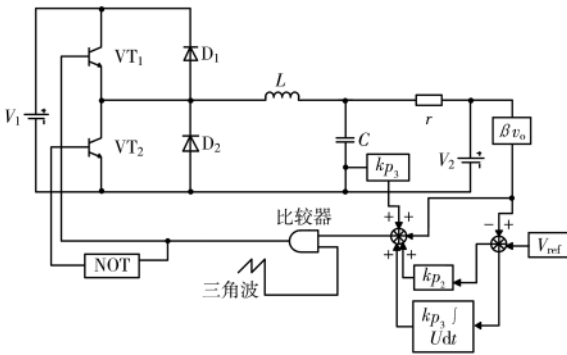


图 2 电池模拟器滑模设计结构示意图

从图 2 可以看出, 其控制方式与电流电压双闭环控制类似, 不同的是三角波信号为  $\beta v_1$ , 输出电压采集为  $\beta v_o$ , PWM 信号会根据三角波的幅值变化而变化, 系统的抗干扰能力增强、鲁棒性更好, 当电容电压大于电池电压时, 电网的能量流向电池, 模拟电池充电过程,  $VT_1$  与  $VT_2$  得到的信号取反, 不同时导通。当开关管  $VT_1$  导通时电流经过电源正极、 $VT_1$ 、电感、负载、电源负极; 当开关管  $VT_1$  关断时,  $VT_2$  导通电感续流, 电流方向不变。同理电容电压小于电池电压时, 电池的能量流向电网, 当  $VT_1$  开通时  $VT_2$  关断, 电池与电感的能量经过  $VT_1$ 、 $V_1$ 、 $V_2$  负极; 当  $VT_2$  开通,  $VT_1$  关断时,  $V_2$  为电感  $L$  充电, 电流经过负载电阻  $r$ 、电感  $L$ 、 $VT_2$ 、 $V_2$  负极, 模拟电池放电过程, 整个电路工作在连续导电模式。

### 1.2 电池模拟器滑模设计算法

文献[9]中提出设计出采用滞环调制的滑模控制, 其设计简单, 仿真方便, 但是对于实物实现较困难, 同时会使滤波器的设计也很困难。文献[10]提出了的滑模控制方法只引入了电压误差状态变量, 对于负载波动时无法做到调节稳定。本文采用定频滑模控制, 使得其工业实现简单, 因为开关管  $VT_2$  信号取反  $VT_1$ , 所以本次设计只针对  $VT_1$ 。由于开关管只有通与断, 因此控制率  $u$  为 1 或者 0, 第一步构造合适的滑模面, 本次设计采用比例积分微分滑模面, 如式(1)所示:

$$S = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \quad (1)$$

选择电压误差  $x_1$  与电压误差对时间的导数  $x_2$  和电压误差对时间的积分  $x_3$  为状态变量, 得到  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  表达式。

$$\begin{cases} x_1 = V_{ref} - \beta v_o \\ x_2 = \frac{dx_1}{dt} \\ x_3 = \int x_1 dt \end{cases} \quad (2)$$

进一步求得  $\dot{x}_2$  及  $\dot{x}_3$  为:

$$\dot{x}_2 = -\beta \frac{dv_o}{dt} = -\frac{\beta}{C} iC = -\frac{\beta}{C} \left( \int \frac{uv_i - v_o}{L} dt - \frac{v_o}{v_i} \right) \quad (3)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{rC} x_2 - \frac{\beta v_i}{LC} u + \frac{\beta v_o}{LC} \quad (4)$$

其中,  $u$  代表开关状态, 开关打开时  $u=1$ , 开关断开时  $u=0$ 。

所以得到了  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  对时间的导数。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{rC} x_2 - \frac{\beta v_i}{LC} u + \frac{\beta v_o}{LC} \\ \dot{x}_3 = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

根据上文提到的 3 种状态变量, 所以本次滑模控制的切换函数表达式为:

$$S = k_1 (V_{ref} - \beta v_o) + k_2 \left( -\beta \frac{dv_o}{dt} \right) + k_3 \int x_1 dt \quad (6)$$

其中,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为滑模系数。对式(6)求导可得  $\dot{S}$ , 令  $\dot{S}=0$  得:

$$-k_1 \frac{\beta}{C} iC + k_2 \frac{\beta}{rC^2} + k_3 (V_{ref} - \beta v_o) + k_2 \frac{\beta v_o}{LC} - k_2 \frac{\beta v_i}{LC} u = 0 \quad (7)$$

将  $u$  等效为连续值  $u_{eq}$ , 解式(7)可得:

$$u_{eq} = -\frac{L}{v_i} \left( \frac{k_1}{k_2} - \frac{1}{rC} \right) iC + \frac{k_3}{k_2} \frac{LC}{\beta v_i} (V_{ref} - \beta v_o) + \frac{v_o}{v_i} \quad (8)$$

根据 PWM 比较器  $d = \frac{v_c}{v_r}$ ,  $d$  为占空比,  $v_c$  为控制信号,  $v_r$  为锯齿波幅值。令  $u_{eq}=d$ , 同时简化式(7), 取  $v_r$  为  $\beta v_i$  可以得到最终控制信号:

$$v_c = k_{p1} iC + k_{p2} (V_{ref} - \beta v_o) + \beta v_o \quad (9)$$

根据系统处于临界阻尼的响应下来判断  $k_{p1}$  与  $k_{p2}$  的值, 得到如下结果:

$$\begin{cases} \frac{k_1}{k_2} = \frac{10}{T} \\ \frac{k_3}{k_2} = \frac{25}{T^2} \end{cases} \quad (10)$$

从式(10)可以看出,  $k_{p1}$  与  $k_{p2}$  的值与调节时间  $T$  有关, 常规选取调节时间为  $100 \mu s$ , 从式(9)已经得到滑模控制信号的形式, 但是此公式在实际仿真时, 当负载波动时出现恢复平衡后, 与预定值有偏差的现象, 所以加入误差积分, 以消除误差, 得到最终控制信号式(11):

$$v_c = k_{p1} iC + k_{p2} (V_{ref} - \beta v_o) + \beta v_o + k_{p3} \int (V_{ref} - \beta v_o) dt \quad (11)$$

## 2 仿真结果与实验

本文通过 MATLAB/Simulink 软件搭建了电池模拟器的滑模控制仿真和 PI 控制仿真,以此来对比出滑膜控制的优势,其中两个系统的参数设置相同,误差状态变量根据式(10)取电容电流  $I_c$ 、输出电压  $V_o$ 、电压误差  $V_o - V_{ref}$ ,电压误差积分  $\int (V_o - V_{ref})dt$ ,为了减小电压纹波系统,仿真模型图如图 3 所示。

模拟电池充电时,主要参数如下:仿真时间为 0.02 s,直流电源  $V_1=24$  V,电感值为  $0.16 \times 10^{-3}$  H,电容值为  $500 \times$

$10^{-6}$  F,频率为 10 kHz,负载值为  $20 \Omega$ , $k_1=-8$ , $k_2=200$ , $k_3=100$ , $k_3$  调节系统平衡时间, $k_3$  越大系统达到平衡的时间越快,但是若其值过大,系统会出现紊乱现象,当选取负载为  $20 \Omega$  时,给定输出电压为 10 V,电池电压  $V_2=5$  V 时,此时电网电能向电池  $V_2$  充电,得到 10 V 的电压波形与 0.25 A 的电流波形。相比较于 PI 控制,滑模控制到达平衡点的时间更短,当发生负载波动时,滑模控制的恢复时间更短,切电流电压超调量更低,仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,滑模控制下的电池模拟器到达平

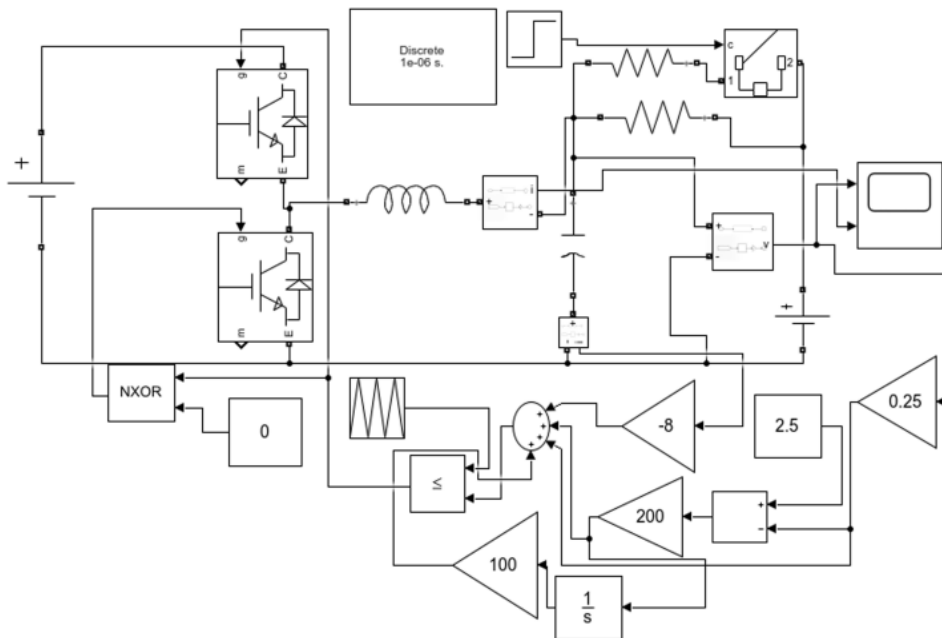
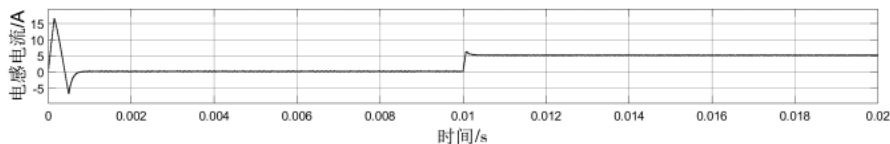
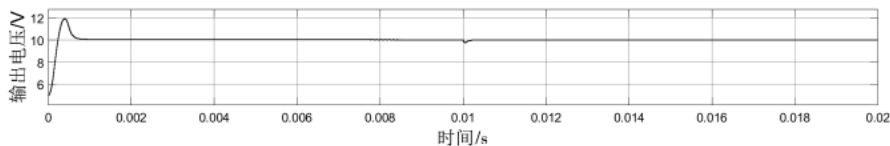
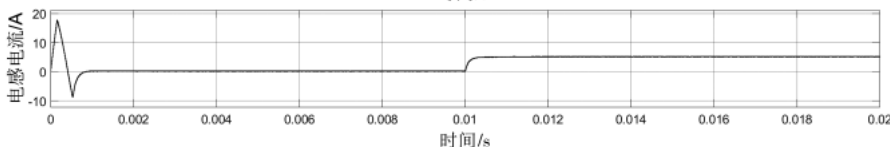
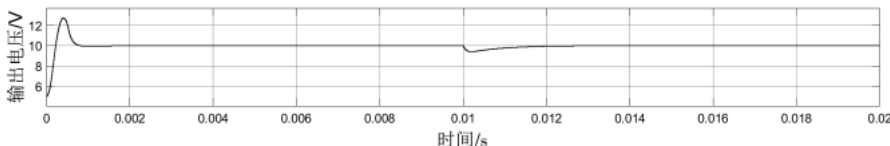


图 3 仿真模型图



(a)滑模控制输出波形



(b)PI 控制输出波形

图 4 电池充电仿真结果

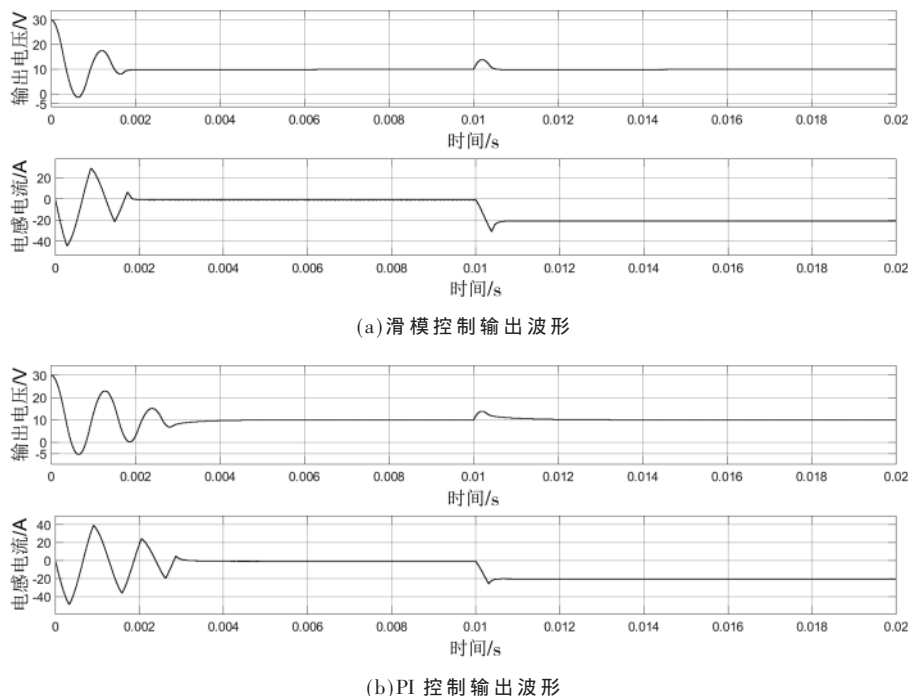


图5 电池放电仿真结果

衡比PI控制更快,且电压电流的超调量更低。同时,当发生负载波动时,滑模控制恢复到预定值的速度比PI控制更快,体现出滑模控制的鲁棒性和动态性能更好。

当选取负载为 $20\ \Omega$ 时,给定输出电压为 $10\ \text{V}$ ,电池电压 $V_2=30\ \text{V}$ 时,得到 $10\ \text{V}$ 的电压波形与 $1.5\ \text{A}$ 的电流波形。相比较于PI控制,滑模控制到达平衡点的时间更短,当发生负载波动时,滑模控制的恢复时间更短,切电流电压超调量更低,仿真结果如图5所示。

由图5可以看出,当模拟电池放电时,滑模控制的电池模拟器电压电流超调量比PI控制要小,当负载发生波动时滑模控制下的系统达到平衡的速度更快,相比于PI控制有着更好的鲁棒性与动态性能。

### 3 结论

本文分析了电池模拟器的整体结构,提出了新的拓扑结构,实现了单一电路电流可双向流动;同时在传统的PI控制的基础上,提出了一种滑模控制方法,详细地阐述了该控制方案的设计思路和实现方法,提高了系统的鲁棒性和动态性能;并且在仿真软件MATLAB/Simulink上建立模型对比验证了滑模控制达到平衡的时间、电压电流超调量、动态性能都要优于PI控制,具有一定实用与研究价值。

### 参考文献

- [1] 谢俊文. 电池模拟器及其应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [2] ADAMSKY A. Battery simulators check out chargers over-discharged batteries[J]. Eleconic Design, 2009, 57(17): 44.
- [3] DUNG L R, YUAN H F, YEN J H, et al. A lithium-ion

battery simulator based on a diffusion and switching overpotential hybrid model for dynamic discharging behavior and runtime predictions[J]. Energies, 2016, 9(1): 1-2.

- [4] 傅祎颢, 李锐华, 胡波, 等. 一种参数化电池模拟器模型及参数辨别方法[J]. 电气技术, 2020, 21(11): 7.
- [5] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 第5版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [6] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真基础理论与设计方法[M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [7] 穆效江, 陈阳舟. 滑模变结构控制理论研究综述[J]. 控制工程, 2007, 14(s2): 1-2.
- [8] 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): 297-298.
- [9] 张传伟. 开关变换器滑模控制技术的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [10] 周雪松, 李康, 马幼捷. DC-DC 变换器滑模变结构控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 11-13.

(收稿日期: 2021-10-08)

### 作者简介:

胡霞(1962-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 电力传动控制技术、自动化系统及控制工程、电力电子技术及其应用、智能控制技术等。

曹文章(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力电子技术及其应用、控制理论。

戴袁园(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 机械学习、智能算法。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所