

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201812001



# 采用模型设计的不间断电源整机 控制系统开发与设计

陈启勇, 王荣坤, 满飞

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对传统不间断电源(UPS)整机控制策略存在切换条件覆盖面不足、难以追溯问题根源,以及传统的开发方法开发周期长、效率低等问题,采用分层设计方法设计不间断电源控制系统结构。首先,将整机控制策略的制定化分为各层次子功能模块策略的制定。然后,采用基于模型设计的开发方法,在 MATLAB/Simulink 仿真工具上完成从模型搭建、代码自动生成到软件在环测试的开发过程。最后,将自动生成的代码下载到实验样机上进行集成整机测试。实验结果表明:基于模型设计方法开发的整机控制器可以准确实现 UPS 切换供电功能;采用分层设计的方法简化控制系统的设计,有助于软件的移植、升级和查找问题;基于模型设计自动生成的代码完全可以替代人工的编码,缩短开发周期。

**关键词:** 不间断电源; 基于模型的设计; 分层设计; 代码自动生成; 软件在环测试

**中图分类号:** TM 727      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)05-0593-07

## Development of Uninterruptible Power Supply Control System Using Model Design

CHEN Qiyong, WANG Rongkun, MAN Fei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Aiming at the disadvantages of the traditional uninterruptible power supply (UPS) control strategy, such as insufficient coverage for switching conditions, difficulty in tracing the root causes of problems, long development cycle and low efficiency, a hierarchical design method was adopted to design the structure of the UPS control system. Firstly, the formulation of the whole control strategy was divided into formulations of sub-function module strategies for each level. Then the development method based on model design was used to complete the development process from model building, code auto-generation to software in loop test using MATLAB/Simulink simulation. Finally, the auto-generated code was downloaded to the experimental prototype to conduct the integrated whole system test. Simulation and experimental results show that the machine controller based on the model design method can realize the function of accurate switching the power supply of the UPS. The layered structure design simplifies the design of the control system and facilitates software migration, upgrading, and problem locating. The automatically generated code based on the model design can completely replace the manual coding, which can shorten the development cycle.

**收稿日期:** 2018-12-03

**通信作者:** 王荣坤(1986-),男,讲师,博士,主要从事电力、电子与电气传动的研究。E-mail: wangrongkun@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51707068, 51477058); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(17014082002)

**Keywords:** uninterruptible power supply; model based design; hierarchical design; code automatic generation; software in loop test

随着信息技术的发展,现代不间断电源(UPS)采用数字化控制方案实现控制方案、整机逻辑. UPS 的整机逻辑控制涉及的信号量多,信号之间易存在耦合,传统的整机控制策略设计不易覆盖全部切换条件,且出现问题后难以溯源. 相比硬件的设计、测试和检修,UPS 的整机控制缺少一张包含所有信号流向、逻辑关系与判定条件的整机信号图纸. UPS 整机控制器的传统开发方式是开发人员在计算机上通过手工编写 C 代码,将代码刷写到控制器中,再将控制器装到整机上进行调试. 但是,这种开发方式容易引入人工编程代码错误,需要花费大量精力进行修改代码和调试. 台架测试需要全硬件搭建,存在设计周期长、开发效率低、算法无法得到实时验证等缺点<sup>[1-3]</sup>. 基于模型设计(MBD)的开发流程可以让开发人员从繁琐的手工编码工作中解脱出来,集中精力搭建控制算法模型,缩短从仿真到编程调试的开发周期,近年来在多种领域得到应用,并取得了不错的结果<sup>[4-8]</sup>. 目前,将这种开发流程用于 UPS 领域的研究相对较少. 本文对 UPS 整机控制系统进行分层设计,采用基于模型设计的开发方法,完成控制模型的代码自动生成,验证代码的可行性,然后,将生成的 C 代码移植到实验样机中进行整机试验.

1 UPS 整机控制系统分层设计

采用分层设计的理念,将 UPS 整机控制系统划分为输入层、内部控制层、可供电逻辑判断层和输出层. 层与层之间信号传递为单向,且无交叉耦合,便于溯源. 系统判别为组合逻辑,易于实现,内外部界限清晰,移植性较强. UPS 整机逻辑控制分层设计流程,如图 1 所示. 图 1 中:A,B,C 分别表示 3 种不同分类的故障;BYP,INV,ECO 和 NONE 分别表示旁路供电、逆变供电、经济供电和无供电模式;SCR 为可控硅开关.

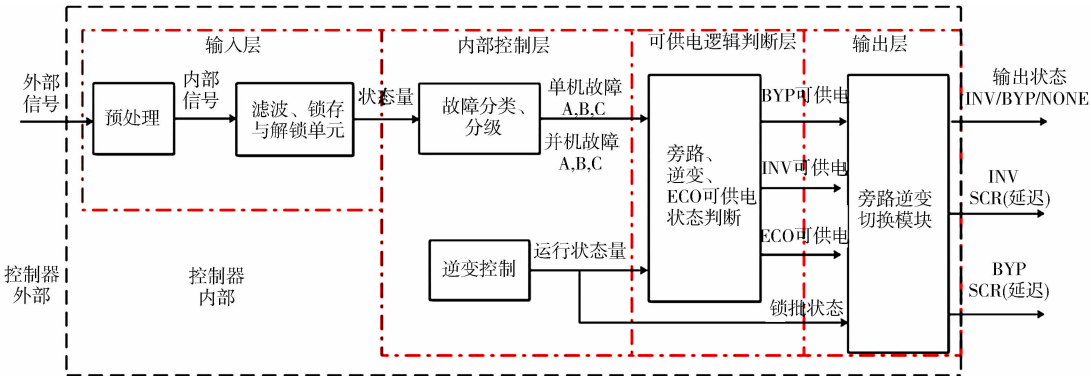


图 1 UPS 整机逻辑控制分层设计流程

Fig. 1 Hierarchical design process for logical control of UPS

各分层主要有如下功能. 1) 输入层:将系统硬件上的 IO 信号、采样模块 ADC 采样信号、通信总线上解析的输入量等与 UPS 整机控制模块的软件端口进行映射,使最终设计的控制模块具有很强的移植性. 同时,输入层也指明对输入信号所采取的处理方式,比如,对 IO 信号的滤波时间及锁存方式,对 ADC 采样量计算方法等. 该层输出为系统状态量. 2) 内部控制层:对来自输入层的状态量按照单、并机系统进行分类和分级,得到不同分类和等级的判断条件(主要以故障判断为主),这些判断条件被输入至下一层,可供电逻辑层与其他判断条件进行逻辑组合,共同参与逻辑判断. 同时,该层还对逆变控制进行运行状态监控,实时提取当前的运行状态. 3) 可供电逻辑判断层:结合 UPS 类型与单并机模式,对上层输出的判断条件和运行状态量进行逻辑组合,判断出当前可用的输出源. 4) 输出层:通过当前的锁相状态和 3 个输出源的可供电状态,输出层最终确定 UPS 应该选择的供电方式,并产生相应的开关信号,实现开关的切换动作.

考虑 UPS 有在线式、后备式及在线互动式,工作台数有单机和并机方式,每台 UPS 的输入信号量又有个体差异,因此,按照分层设计方法,对 UPS 的整机控制系统进行最大化设计,如图 2 所示. 图 2

中:PLL 表示锁相环;ADC 为采样模块;IO 为输入输出模块;SPI 为串行外设接口模块;CAN 为增强控制器局域网网络模块;EPO 为紧急关断开关.由图 2 可知:并机方式有主从方案;若无相应信号,设计 UPS 时,只需对其输入固定量赋值.

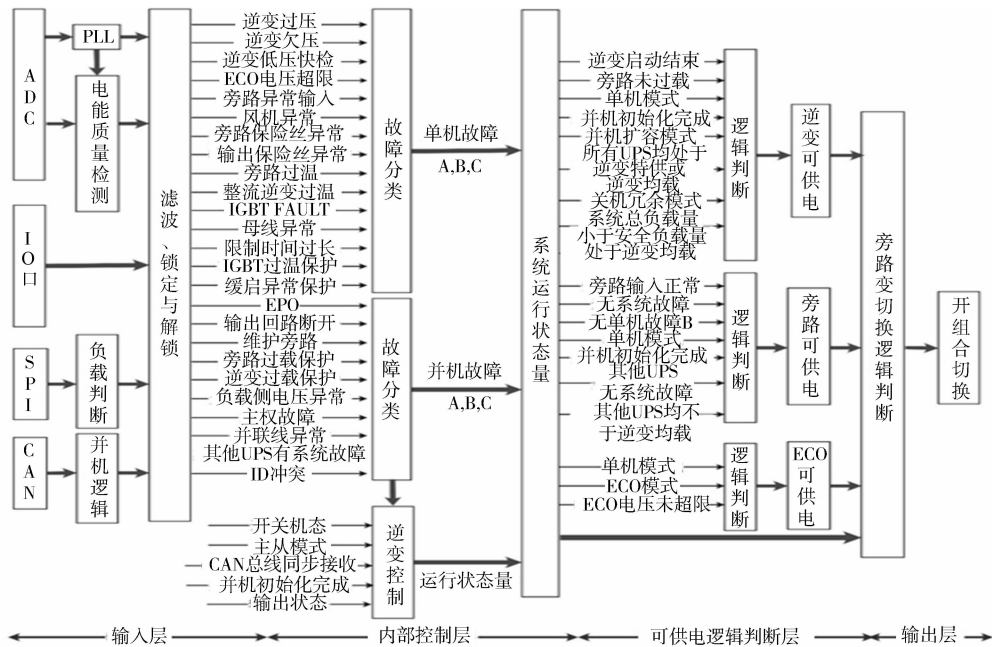


图 2 UPS 的整机控制系统  
Fig. 2 Control system of UPS

## 2 UPS 整机控制策略的制定

### 2.1 UPS 开关机控制策略

通过触摸屏或者面板按键给 UPS 发出开、关机指令,系统经过一个开关机延时时间后,执行开、关机动作,这个开关机延时时间是供系统完成初始化或自检工作的. UPS 系统工作过程中如果出现故障,系统将被锁定,待故障恢复后,执行解锁操作才能解锁,所以开关机指令除了使系统执行开关机动作外,还具有解锁功能,即系统由于发生故障而被锁定时,可以通过下电和重启的方式进行解锁.

### 2.2 锁相环控制策略

考虑到 UPS 的并联,设计 UPS 的锁相为两级锁相环结构,以提高锁相精度和可靠性. 其中,一级锁相环用来跟踪市电相位和频率,并进行相互间的相位同步控制,即实现 UPS 与市电的同步;二级锁相环用来跟踪一级锁相环的输出,使各逆变器的输出电压相位跟踪共同的一级锁相环输出,即实现各台 UPS 之间的同步. 两级锁相环都采用了 PI 调节器,但设置一级锁相环的 PI 调节器速度较慢,使其确保旁路和逆变器之间的平滑切换;二级锁相环要确保跟踪一级锁相环输出的快速性,故设置 PI 调节器速度较快,并设置较高的精度,使其确保 UPS 之间的并联环流达到最小.

### 2.3 控制环策略

UPS 的三环控制策略,如图 3 所示.

由图 3 可知:最外环是有效值环,以负载端电压有效值和参考值之差为控制目标,调节基准正弦信号的幅值,保证输出电压幅值的稳定,输出的基准正弦波作为参考值被输入到瞬时值环中,为抑制 UPS 输出电压的直流偏置分量,瞬时值环中引入了直流偏置环,直流偏置环得到的直流电压反馈量叠加到基准正弦波上,共同参与调节;最内环为电流环,电流环以滤波电感电流作为电流环反馈,负载电流处于电感电流内环环路之外,导致电流环对负载扰动毫无抑制作用. 因此,将负载电流作为电流前馈加入电流环中,以改善系统的抗负载扰动能力.

### 2.4 旁路逆变切换控制策略

UPS 工作模式的切换实质上是旁路输出和逆变输出之间的切换,对于在线式 UPS,其 ECO 其实也

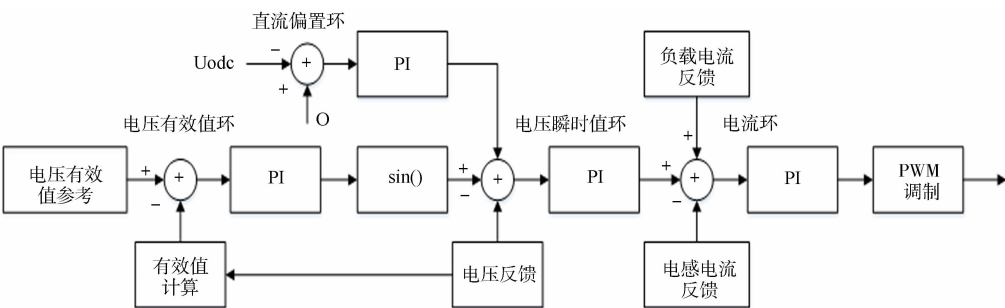


图 3 UPS 的三环控制策略

Fig. 3 Three-loop control strategy of UPS

为旁路输出. 具体的旁路逆变切换控制策略, 如图 4 所示.

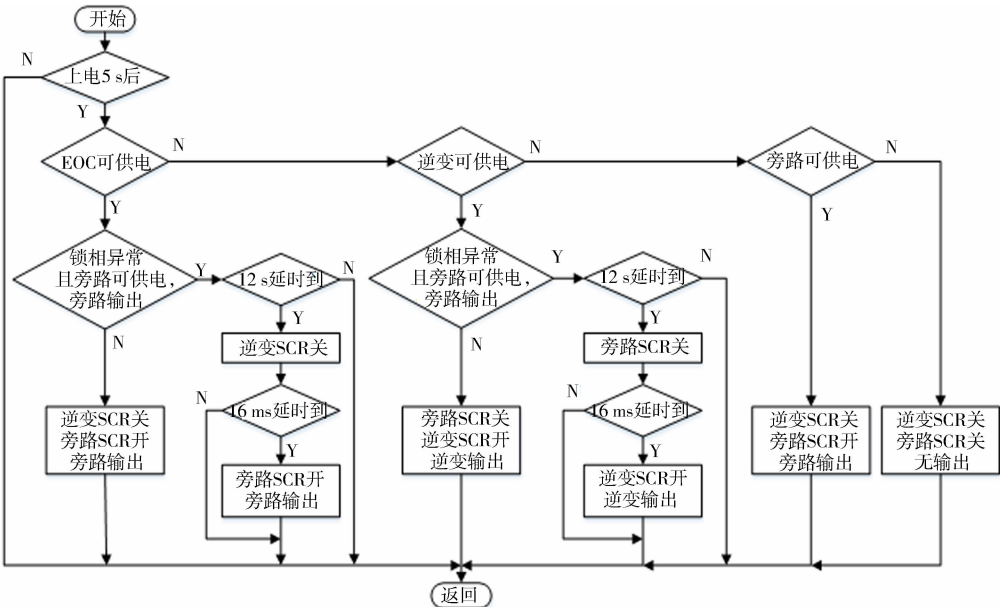


图 4 旁路逆变切换控制策略

Fig. 4 Bypass and inverter switching control strategy

由图 4 可知: 为节约能源, UPS 将优先判断 ECO 供电模式. 若满足 ECO 模式供电条件, 且无锁相异常、逆变无输出, 则整机控制器无延时地控制逆变开关关闭, 旁路开关打开, 电能从旁路输出; 若在满足 ECO 模式供电条件的同时, 发生锁相异常, 逆变可供电条件成立且逆变输出, 则经过不同的延时间后, 将逆变开关和旁路开关先后分别执行关闭和打开动作, 电能从旁路输出; 若无法满足 ECO 模式供电条件时, 则考虑 UPS 是否满足逆变可供电条件, 此环节的开关切换条件同 ECO 工作模式下的切换条件相似. UPS 逆变器输出给负载供电, 当满足旁路可供电条件, 则逆变开关关闭, 旁路开关打开, 电能由旁路提供. 若 3 种可供电条件都不满足, 则逆变开关和旁路开关都关闭, UPS 无电能输出.

3 模型的建立及自动代码的生成

3.1 搭建整机控制模型

根据各个子功能模块控制策略, 在 MATLAB/Simulink 中建立 UPS 整机控制仿真模型, 仿真结构如图 5 所示. 图 5 中: 整机控制仿真模型集成开关机控制、锁相环控制、控制环

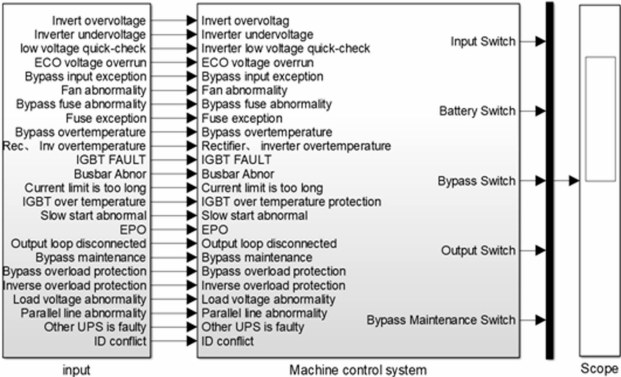


图 5 UPS 整机控制仿真结构图

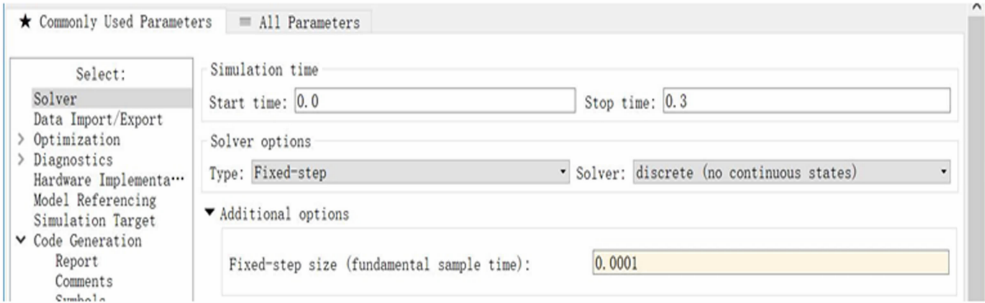
Fig. 5 Simulation structure of UPS control system

控制和旁路逆变切换控制模块,以及完成电能质量检测、故障分类和报警等其他辅助功能模块.在真实工作环境中,还有很多未被上述功能模块包含的外围信号,因此,在仿真中添加外围信号的模拟源(根据作业工况模拟出相应的信号)作为 UPS 的输入,共同参加整机控制.

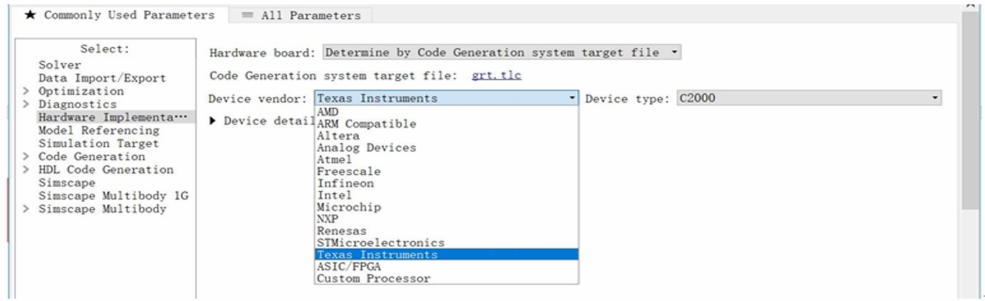
建立模型后进行仿真,仿真显示 UPS 系统的输入开关、电池开关、旁路开关、旁路维修开关和输出开关等闭合或断开状态. UPS 各种工作模式之间的切换是由这些开关联合动作实现的,所以,通过这些开关的开关状态的组合方式,便可以知道 UPS 处于何种工作模式下,从而判断整机控制算法是否正确.

3.2 自动代码生成

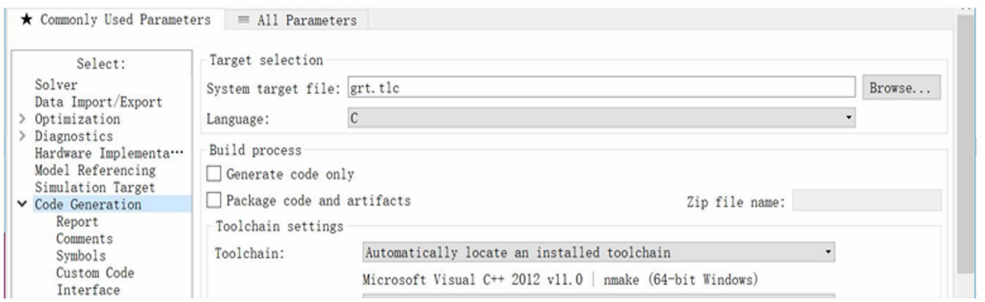
自动代码生成是基于模型设计的一个重要环节,不但可以免去人工编写代码的繁琐工作,而且可以避免人工编写代码时引入的错误,这在很大程度上缩短了产品的开发周期<sup>[9-12]</sup>. 仿真结果验证了 UPS 整机控制模型的正确性后,在 MATLAB/Simulink 里进行代码自动生成操作. 代码生成配置设置,如图 6 所示.



(a) 解算器设置



(b) 处理器选型



(c) 系统目标文件设置

图 6 代码生成配置系列设置

Fig. 6 Serial settings of code generation configuration

为便于代码检查和调试,可以在 Report 子标签中设置代码生成报告选项,模型生成代码完毕后,自动弹出代码生成报告. 完成以上配置后,点击 Build Model 即可生成代码.

4 软件在环测试

软件在环测试(SIL)是一种等效性测试,提供控制模型和 SIL 测试模型相同的输入,如果两者的输



出一致,则说明生成的 C 代码与控制模型在功能上是一致的. 由于 SIL 测试是纯仿真测试,在 PC 上即可实现,无需真实整机系统,能够更早地发现问题、提高调试效率、节约开发成本和周期,因此,是一种理想的功能测试工具<sup>[13-15]</sup>.

首先,将求解器设置为离散,固定步长,系统的目标文件设置为 ert.tlc;接着,在 SIL and PIL Verification 选项卡中将 create block 设置为 SIL;随后,点击 Build Model 生成基于 C 代码的 S-function 模块.此时,给整机控制器仿真模型和生成代码的 S-function 模块加载相同的输入,代码等效性验证波形,如图 7 所示.图 7 中:1 为开;0 为关; $t$  为仿真实验时间.由图 7 可知:两者的输出是一致的,这说明整机控制器模型生成的 C 代码和原控制器仿真模型具有等效性.

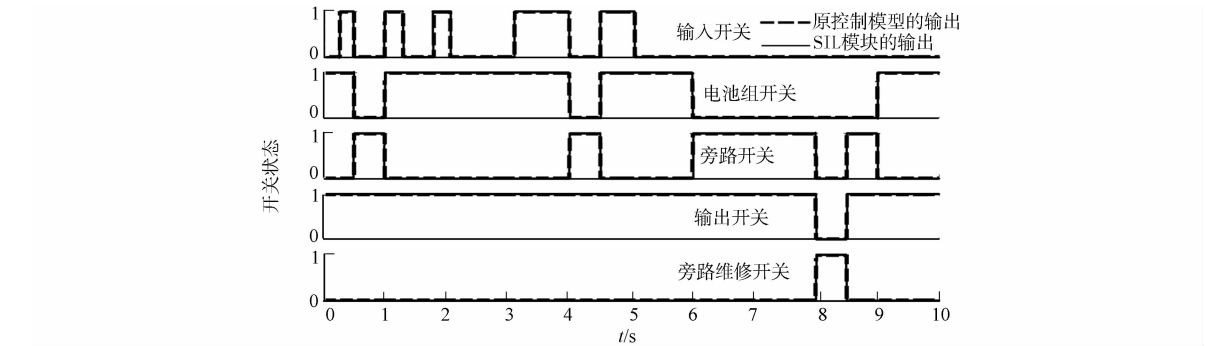


图 7 代码等效性验证波形  
Fig. 7 Code equivalence verification waveform

5 整机集成测试

通过 SIL 测试验证 C 代码的正确性之后,需要将 C 代码移植到 UPS 的整机控制器中,并在真实的运行环境中,与电网采样电路、整流器、逆变器及保护电路等各个子系统连接构成完整闭环,进行整机集成测试,以便在开发早期完成系统级的测试和验证.

在一台 2 kW 的后备式 UPS 实验样机上进行旁路逆变切换测试,UPS 系统由旁路供电切换至逆变供电的实验结果,如图 8 所示.由图 8 可知:UPS 初始时,处于旁路供电工作模式;在 a 时刻,旁路掉电,整机控制器判断为逆变可供电;在 b 时刻,成功切换至逆变供电.由于 UPS 实验样机的旁路与逆变之间是由继电器动作实现的,所以,切换时间有 4 ms 延时,此延时符合国际标准.

逆变切旁路实验结果,如图 9 所示.由图 9 可知:UPS 初始时处于逆变供电工作模式,在 c 时刻,市电恢复正常,整机逻辑控制判断为旁路可供电;在 d 时刻,成功切换至旁路供电.

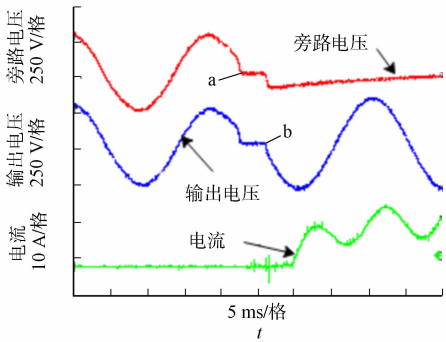


图 8 UPS 旁路切逆变实验  
Fig. 8 Experiment of UPS from bypass power supply to inverter power supply

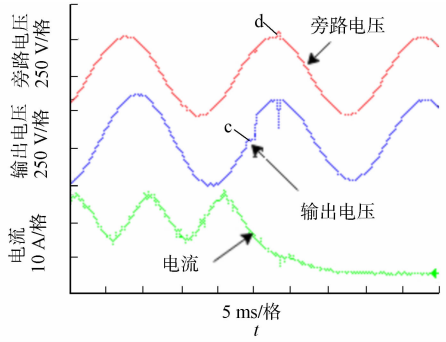


图 9 UPS 逆变切旁路实验  
Fig. 9 Experiment of UPS from inverter power supply to bypass power supply

UPS 整机集成测试实验结果验证了 UPS 整机控制策略的正确性,同时,也验证基于模式设计的方法开发的整机控制系统能够正确地实现 UPS 控制功能.

## 6 结束语

UPS 控制系统分层设计的方法有利于整机控制系统的简化设计,设计的整机控制图纸结构清晰、信号无耦合且易溯源,具有较好的指导性,同时,基于分层设计的控制软件具有很好的移植性,易于追溯问题根源。相比于传统开发方式,采用基于模型设计的方法开发整机控制策略,具有早期验证的优势,自动代码生成技术避免了人工编码,软化在环测试可以提前验证代码的正确性,整机集成测试表明设计的控制系统满足控制需求,该开发方法简便、有效,极大缩短 UPS 控制系统从仿真到调试的开发周期,提高开发效率。

### 参考文献:

- [1] ZOU Zhixiang, WANG Zheng, CHENG Ming. Design and analysis of operating strategies for a generalised voltage-source power supply based on internal model principle[J]. *Iet Power Electronics*, 2014, 7(2): 330-339. DOI: 10.1049/iet-pel. 2013. 0159.
- [2] KAYABASI A, AKKAYA R. The design and implementation of a microcontroller-based single phase on-line uninterruptured power supply with power factor correction[C]// *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*. Bursa: IEEE Press, 2009: 442-446. DOI: 10.1109/ELECO. 2009. 5355274.
- [3] 宋慧延, 刘强, 牛大伟. 一种挖掘机电控系统性能测试平台的设计[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(3): 250-252. DOI: 10.11830/ISSN. 1000-5013. 2014. 03. 0250.
- [4] 来鑫, 姜淳, 金昌, 等. 基于模型设计的 4WIS-4WID 车辆教学实验平台[J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(6): 56-59, 67. DOI: 10.3696/j. issn. 1006. 7167. 2018. 06. 014.
- [5] 余超. 基于模型设计的电动汽车永磁同步电机无速度传感器控制策略的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [6] HARNETT C K, TEMPLETON J, DUNPHY-GUZMAN K A, *et al.* Model based design of a microfluidic mixer driven by induced charge electroosmosis[J]. *Lab on a Chip*, 2008, 8(4): 565-572. DOI: 10.1039/b717416k.
- [7] 刘雪梅, 郭改平. 基于模型设计的飞机装配检测技术分析[J]. *中国工程机械学报*, 2017, 15(6): 547-551. DOI: 10.15999/j. cnki. 311926. 2017. 06. 014.
- [8] 田韶鹏, 阙同亮. 基于模型设计的电动车整车控制器开发研究[J]. *自动化与仪表*, 2017, 32(9): 60-64. DOI: 10.19557/j. cnki. 1001-9944. 2017. 09. 015.
- [9] 王博舒, 新峰, 王小银, 等. 自动代码生成技术的发展现状与趋势[J]. *西安邮电大学学报*, 2018, 23(3): 1-12. DOI: 10.13682/j. issn. 2095-6533. 2018. 03. 001.
- [10] 陈攀. 电动汽车控制器自动代码生成及标定系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [11] KRIZANJ, ERTL L, BRADAC M, *et al.* Automatic code generation from Matlab/Simulink for critical applications [C]// *27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. Toronto: IEEE Press, 2014: 1-6. DOI: 10.1109/CCECE. 2014. 6901058.
- [12] 樊启永, 顾立志, 宋金玲. Pro/E 和 VERICUT 虚拟机床建模与仿真[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(2): 126-131. DOI: 10.11830/issn. 1000-5013. 2010. 02. 0216.
- [13] 刘振华. SIL 平台在功能测试方面的应用[C]// *2014 中国汽车工程学会年会*. 北京: 机械工业出版社, 2014: 633-637.
- [14] 宋大风, 李幼德, 李静, 等. 汽车牵引力控制软件在环仿真研究[J]. *农业机械学报*, 2005(8): 27-29. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-1298. 2005. 08. 008.
- [15] VANDI G, CAVINA N, CORTI E, *et al.* Development of a software in the loop environment for automotive power-train systems[J]. *Energy Procedia*, 2014, 45: 789-798. DOI: 10.1016/j. egyp. 2014. 01. 084.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 崔长彩)