

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.018

基于 Buck 变换器的 UPS 充电器设计^{*}

张 涛

(易事特集团股份有限公司,广东 东莞 523808)

摘要:针对某公司 20KVA 在线式 UPS 样机用充电器的需求,进行了基于正负 Buck 变换器拓扑结构的充电器控制系统设计的研究。在详细介绍了充电器拓扑和控制架构的基础上建立了 Buck 变换器在 CCM 状态下的小信号数学模型,并基于该数学模型推导了变换器电流内环和电压外环回路增益传递函数,给出了各控制参数的详细设计过程。根据理论研究的结果研制了一台基于 TMS320F28335 DSP 的充电器实验样机,并搭建了充电器实验平台,分别在稳态和动态条件下对整个控制系统进行了实验,观察了充电器的控制效果。研究结果表明,该系统能够稳定可靠地运行,较好地满足了充电器的设计要求,进一步验证了充电器控制环路参数设计的有效性及其可行性。

关键词:UPS;充电器;Buck 变换器

中图分类号:TM461

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0092-04

Charger for battery in UPS based on buck converter

ZHANG Tao

(EAST Group Co., Ltd., DongGuan 523808, China)

Abstract: Aiming at the demand of charger applied in UPS, a scheme design of charger for control system based on dual buck converter was proposed. The small signal mathematics model in CCM mode was built after introducing the topology and control architecture of charger in detail, and the control parameters was given with the transfer function deducing of current inner loop and voltage outer loop. A prototype based on TMS320F28335 DSP was designed for experiment under different condition. The results indicate that the system is stable and better satisfy the demand of charger, further validates the effectiveness and feasibility of control loop parameter design of charger.

Key words: uninterruptible power supply (UPS); charger; buck converter

0 引 言

UPS 具有稳压、稳频、抗干扰、防止浪涌等功能,更为重要的是当电网停止供电时,UPS 可以对负载进行短时供电,以保证用电,设备正常工作,因此 UPS 日益成为重要负载设备必不可少的配套设施^[1-3],随着近年来对高质量、高可靠性电源系统的需求发展,UPS 正越来越广泛地被选用,具有良好的市场前景^[4-6]。

UPS 主要由整流器(AC/DC)、逆变器(DC/AC)和充电器(DC/DC)3 部分组成。在市电正常情况下,市电经滤波整流后,转变为直流电,一部分直流电由充电器向蓄电池充电,使蓄电池保持能量,另一部分直流电

通过逆变器变换为交流电给负载供电,这种交流电较市电来说,其电压的波形、频率和电压的稳定度都得到了明显改善,且动态特性也有显著提高;在市电异常情况下或中断时,负载的供电完全由蓄电池存储的能量通过逆变器转变为交流电输出,从而真正地达到了外电异常时,负载供电不间断的效果^[7]。

对蓄电池的充电控制通常采用先恒流、再恒压的方式,其输入和输出一般要求在较宽范围内可以调整^[8]。

因此结合上述需要,本研究针对某公司在线式 UPS 充电器主要指标要求,直流输入电压范围 310 V ~ 410 V,最大充电电流 8 A,最大输出功率 4.4 kW,进行基于正、负 Buck 变换器的充电器控制系统的设计,在

收稿日期:2015-08-27

基金项目:广东省引进创新科研团队计划资助项目(2011N015)

作者简介:张 涛(1982-),男,甘肃天水人,硕士,工程师,主要从事 UPS 及逆变器并联方面的研究。E-mail:zhangtao9612@163.com

CCM 状态下建立变换器小信号数学建模,给出变换器电流内环和电压外环主要参数的详细设计过程,最后研制一台充电器实验样机,对理论分析结果进行验证。

1 充电器拓扑结构介绍

充电器拓扑结构如图 1 所示。

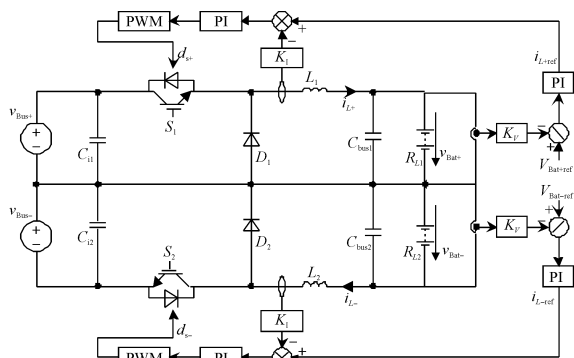


图 1 充电器拓扑结构

v_{Bus+} , v_{Bus-} — UPS 正、负直流母线电压

整个充电器电路由 2 个参数完全一致的正负 Buck 变换器电路组成。其中,正 Buck 变换器包括电感 L_1 、开关管 S_1 、二极管 D_1 和输出电容 C_{bus1} 在正直流母线周期工作;负 Buck 变换器包括电感 L_2 、开关管 S_2 、二极管 D_2 和输出电容 C_{bus2} 在负直流母线周期工作。此外, C_{11} 和 C_{12} 是输入端滤波电容, R_{L1} 和 R_{L2} 分别为正、负 Buck 变换器输出供电的两组蓄电池负载。

Buck 电路应用广泛,控制简单^[9],本研究提出的充电器的控制分别由 2 个正负电流内环和 2 个正负电压外环组成。其中,电压外环控制输出侧正、负充电电压,其输出值 i_{L+ref} 和 i_{L-ref} 为电流内环瞬时电流参考值。正、负电压/电流环路各自独立工作,整个 Buck 变换器的控制架构设计包括电流内环设计和电压外环设计两部分。

2 Buck 变换器控制架构设计

2.1 电流内环设计

由于正、负 Buck 电路电流内环相互独立且参数一致,本研究以正 Buck 电路电流内环设计为例进行说明。

正 Buck 电路电流内环控制框图如图 2 所示。

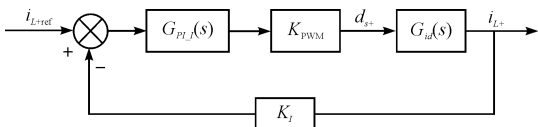


图 2 Buck 变换器电流内环控制框图

i_{L+ref} — 正 Buck 电路输入电流参考值; $G_{pl}(s)$ — PI 环节传递函数; K_{pwm} — PWM 调制器增益; $G_{id}(s)$ — 正 Buck 电路占空比 d_{s+} 到输入电感电流 i_{L+} 的传递函数; K_f — 输入电流反馈系数

各项表达式分别为:

PWM 调制器传递函数:

$$K_{PWM} = 1/V_M \quad (1)$$

在 CCM 状态下占空比 d_{s+} 到输入电感电流 i_{L+} 的传递函数为^[10]:

$$G_{id}(s) = \frac{V_{Bus+} (R_{L1} C_{bus1} \cdot s + 1)}{L_1 R_{L1} C_{bus1} \cdot s^2 + L_1 s + R_{L1}} \quad (2)$$

其中:直流侧正母线电压 $V_{Bus+} = 360$ V,负载 $R_{L1} = 25 \Omega$,输入电感 $L_1 = 400 \mu\text{H}$,直流侧输出电容 $C_{bus1} = 100 \mu\text{F}$,三角波最大值 $V_M = 1950$ 。

由公式(1,2)可得到补偿前电流内环原始回路增益传递函数:

$$G_{O-I}(s) = K_{PWM} \cdot G_{id}(s) \cdot K_f = \frac{V_{Bus+} (R_{L1} C_{bus1} \cdot s + 1)}{L_1 R_{L1} C_{bus1} \cdot s^2 + L_1 s + R_{L1}} \cdot \frac{1}{V_M} \cdot K_f \quad (3)$$

将相关数据代入式(3),可得到补偿前电流内环原始回路增益传递函数波特图,如图 3 所示。

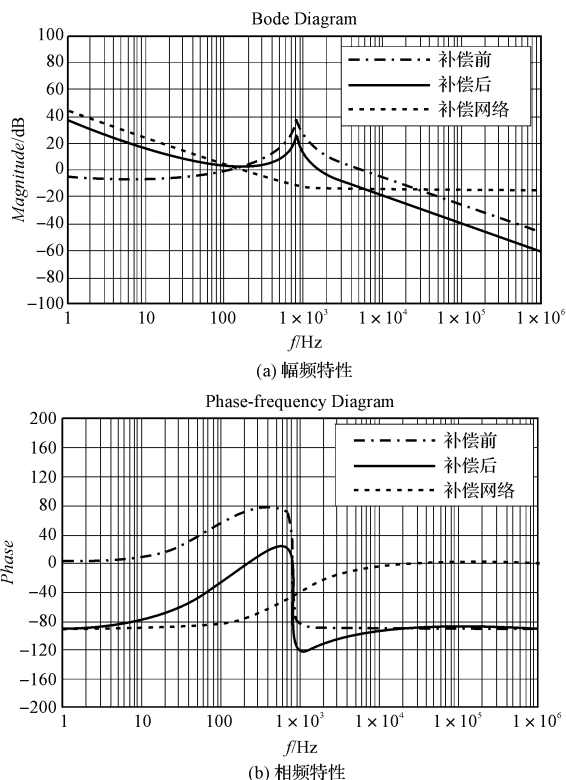


图 3 电流内环补偿前和补偿后回路增益传递函数波特图

由图 3 可知,补偿前电流内环穿越频率 20 kHz,由于穿越频率过高,考虑模拟控制器离散化引入的延时,将会导致系统不稳定^[11],必须加入补偿网络进行改善。

电流内环补 PI 环节传递函数为:

$$G_{pl-I}(s) = K_{pl-I} + K_{LI}/s \quad (4)$$

由公式(1~4)可推导出补偿后电流内环回路增益传递函数:

$$G_{C-I}(s) = G_{PI-I}(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_{id}(s) \cdot K_I = \left(K_{P-I} + \frac{K_{I-I}}{s} \right) \cdot \frac{V_{Bus+} (R_{L1} C_{bus1} \cdot s + 1)}{L_1 R_{L1} C_{bus1} \cdot s^2 + L_1 s + R_{L1}} \cdot \frac{1}{V_M} \cdot K_I \quad (5)$$

对(5)式中的 PI 参数进行设计,设计目标为:PI 控制器零点取 600 Hz,补偿后电流内环穿越频率为 1.5 kHz,采用以下方程求解 PI 控制器参数:

$$\begin{cases} \frac{K_{I-I}}{2\pi K_{P-I}} = 600 \\ |G_{C-I}(s)|_{s=j2\pi \times 1500} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

代入数值,得 $K_{I-I} = 238$, $K_{P-I} = 0.047$ 。补偿后电流内环回路增益传递函数波特图如图 3 中实线所示,补偿后电流内环穿越频率 1.5 kHz,相位裕度 63° ,满足系统稳定性要求。

2.2 电压外环设计

正 Buck 电路电压外环控制框图如图 4 所示。

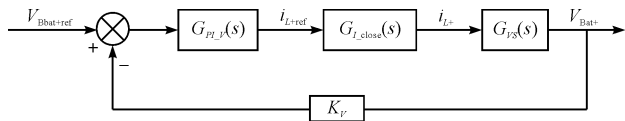


图 4 Buck 变换器电压外环控制框图

K_V —电压采样反馈系数; $G_{PI-V}(s)$ —电压外环 PI 传递函数; $G_{I-close}(s)$ —电流内环闭环传递函数

由于电压外环的带宽远低于电流内环带宽,可认为在低频段电流内环闭环传递函数是常量,其值 $G_{I-close}(s) = 1/K_I$; $G_{VS}(s)$ 表示输入电感电流 i_{L+} 到输出侧充电电压 v_{Bat+} 的传递函数,其传递函数为:

$$G_{VS}(s) = \frac{R_{L1}}{R_{L1} C_{bus1} \cdot s + 1} \quad (7)$$

故可得补偿前电压外环原始回路增益传递函数:

$$G_{O-V}(s) = G_{I-close}(s) \cdot G_{VS}(s) \cdot K_V = \frac{R_{L1}}{R_{L1} C_{bus1} \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{K_I} \cdot K_V \quad (8)$$

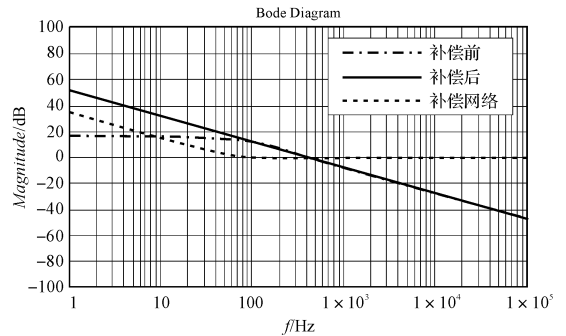
将相关数据代入公式(8),可得到补偿前电压外环原始回路增益传递函数波特图,如图 5 中的虚线所示。

由图 5 可知,补偿前电压外环直流增益低,静态误差会比较大,因此,需要加入补偿网络提高低频段增益,电压外环补偿网络 PI 环节传递函数:

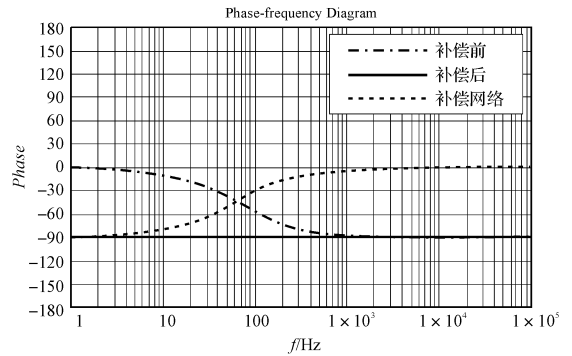
$$G_{PI-V}(s) = K_{P-V} + K_{I-V}/s \quad (9)$$

设补偿后电压外环穿越频率设计目标值为 400 Hz,PI 控制器零点取 100 Hz,可计算得到电压环 PI 参数值为: $K_{P-V} = 0.94$, $K_{I-V} = 355$,其补偿后的电压外环回路增益传递函数为:

$$G_{C-V}(s) = G_{PI-V}(s) \cdot G_{O-V}(s) = \left(K_{P-V} + \frac{K_{I-V}}{s} \right) \cdot \frac{R_{L1}}{R_{L1} C_{bus1} \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{K_I} \cdot K_V \quad (10)$$



(a) 幅频特性



(b) 相频特性

图 5 电压外环补偿前和补偿后回路增益传递函数波特图

根据式(10),补偿后的电压外环回路增益传递函数的波特图如图 5 中实线所示,即补偿后的公共电压外环穿越频率 400 Hz,相位裕度 90° ,满足稳定性要求。

3 实验及结果分析

充电器实验装置照片如图 6 所示。其中,Buck 变换器实验结构图如图 1 所示。

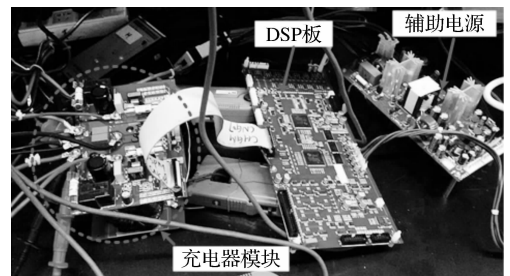


图 6 实验装置照片

相关实验参数分别为:变换器直流侧输入电压 v_{Bus+} , v_{Bus-} 为 360 V,输入电感 $L_1 = L_2 = 400 \mu\text{H}$,输出电容 $C_{bus1} = C_{bus2} = 100 \mu\text{F}$,开关频率 19.2 kHz。主控制芯片采用 TI 公司的 TMS320F28335,DSP 主频 150 MHz。

Buck 变换器开机软启动波形如图 7 所示。由图 7 可知,输入电压为 360 V,控制环路开始工作,将输出侧充电电压参考值缓慢上升,最终上升到蓄电池初始充电电压值 250 V。

正、负 Buck 变换器稳态时电感电流和充电电流波形如图 8 所示。由图 8 可知,当充电电流为 8 A 时电

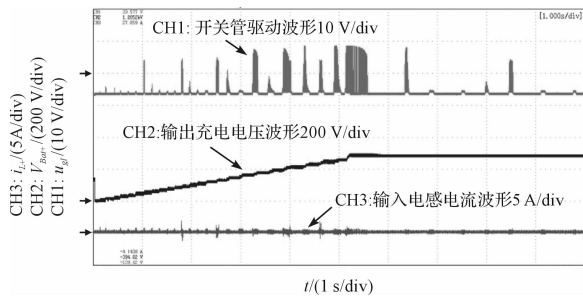


图7 Buck 变换器软启动实验波形

CH1—开关管驱动波形;CH2—输出充电电压波形;CH3—输入电感电流波形

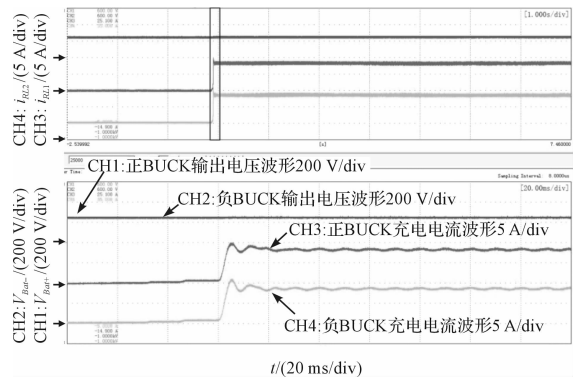
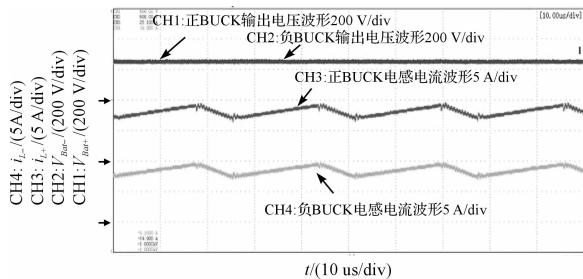
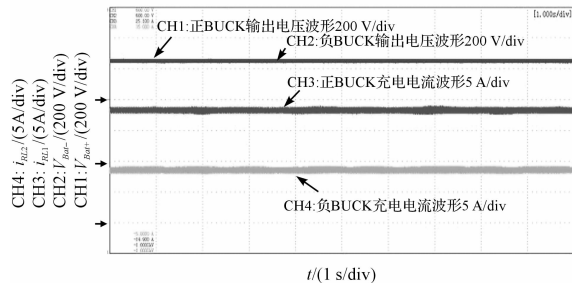


图9 充电指令从 0 到 8 A 时的动态实验波形

感电流和充电电流波形稳定,纹波很小。



(a) 稳态时电感电流波形



(b) 稳态时充电电流波形

图8 正、负 Buck 变换器稳态时电感电流和充电电流波形

充电指令从 0 突变到 8 A 时的动态实验波形如图 9 所示。其中,图 9 中的下图是动态突变过程的放大波形。由图可知,充电电流从 0 突增到 8 A 时,系统控制稳定,恢复时间小于 10 ms,具有良好的动态特性。

4 结束语

本研究详细论述了一种基于正、负 Buck 变换器拓扑结构的充电器控制系统设计思路和实现方法,其主要结论是:

(1)对 Buck 变换器进行了在 CCM 状态下的小信号数学建模,并在该数学模型基础上设计了变换器电

流内环和电压外环控制系统参数。

(2)本研究研制了一台基于 TMS320F28335 DSP 的充电器实验样机,搭建了充电器实验平台,在稳态和动态条件下进行了实验。

(3)本研究基于充电器开机软起实验、稳态充电实验、空载到满载动态突变实验观察了充电器的控制效果,实验结果表明,变换器控制系统稳定,较好地满足了充电器设计的需求。

参考文献 (References):

- [1] 袁义生. 可共用电池不间断电源的研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(4): 43-45.
- [2] 梁 量, 和军平, 郭 堃, 等. 新型 UPS 用无损软开关 Buck-Boost 变换器研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(1): 77-79.
- [3] 丁习兵, 和军平, 延汇文. 一种新型无源无损软开关 UPS 充电拓扑研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(1): 60-67.
- [4] 于 玮. UPS 并联系统若干关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2009.
- [5] 杨成林. 三相逆变器 DSP 控制技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2004.
- [6] 王义平, 黄春伟. 三种高压变频器 UPS 回路设计特点和改进[J]. 机电工程技术, 2013(11): 89-92.
- [7] 候世英, 陈剑飞, 孙 韬, 等. 新型在线式 UPS 拓扑[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(11): 65-70.
- [8] 祁 丰, 许 飞, 唐剑青, 等. 用于 UPS 的两极式蓄电池充电器的设计[J]. 电力电子技术, 2007, 41(8): 57-59.
- [9] 黄 成, 黄 亮, 卢 叶, 等. 燃料电池 Buck 变换器的动态演化控制仿真[J]. 机电工程, 2014, 31(11): 1490-1512.
- [10] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] 冯柳鑫. 5 kW 混合动力汽车双向 DC/DC 变换器设计[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2014.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

张 涛. 基于 Buck 变换器的 UPS 充电器设计[J]. 机电工程, 2016, 33(1): 92-95.

ZHANG Tao. Charger for battery in UPS based on buck converter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(1): 92-95.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>