

# 基于电池储能的有轨电车的 新型供电系统研究

张文波

(南京工业职业技术大学, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 在现代有轨电车供电方案中, 为了降低能耗, 减少运营成本, 采用储能方式是其重点研究的一个技术和热点方向。储能技术在大功率应用中有较好的技术经济性, 非常适用于有轨电车储能。针对有轨电车传统供电方式存在的一些问题, 提出了一种有轨电车新型供电方案。利用铅酸电池储能技术, 给出了系统供电结构图及主电路原理拓扑图并分析工作原理, 研究了系统控制策略并设计软硬件电路, 搭建了一套系统实验平台, 其理论研究及实验模拟结果均表明, 该供电系统可以为列车运行提供持续牵引动力, 具有极高的推广应用价值。

**关键词:** 储能; 有轨电车; 铅酸电池; 供电系统

## Research on a new power supply system for trams based on battery energy storage

ZHANG Wenbo

(Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In the power supply scheme of modern trams, in order to reduce energy consumption and operating costs, the use of energy storage is a key technology and hotspot of its research. Energy storage technology has good technical and economic efficiency in high-power applications and is suitable for tram energy storage. In view of some of the problems existing in the traditional power supply methods of trams a new power supply scheme for trams is proposed. Using lead-acid battery energy storage technology, the system power supply structure diagram and the main circuit principle topology diagram are given and the working principle is analyzed, the system control strategy and the software and hardware circuits are studied, and a set of system experiment platform is built. The proposed results all show that the power supply system can provide continuous traction power for train operation, and has extremely high application value.

**Key words:** energy storage; trams; lead-acid battery; power supply system

## 0 引言

城市轨道交通列车具备低能耗、速度快等优点, 是解决城市交通拥挤的有效手段。目前, 为了降低能耗、减少运营成本, 将储能技术应用于轨道交通领域已经成为国内外众多学

者研究的一个热门方向。在现有技术中, 轨道交通供电系统的通用方法是采用主变电站或若干牵引/降压变电所, 以及传统架空接触网或地面第三轨供电系统为全线列车提供动力, 均是以城市电网为直接供电电源。在现代有轨电车牵引供电方案中, 采用电池储能作为动力,

将是一种新的供电方向。目前,有轨电车供电系统主要采用多相整流,此方案存在输入电流谐波含量高、输出电压纹波大等缺点,谐波容易污染电网<sup>[1-4]</sup>。为提高其效率,减小对市电容量的配置和冲击,降低成本,对供电方案进行优化研究<sup>[5-8]</sup>。

在此,本文提出了有轨电车的一种新供电方案,即采用铅酸电池储能系统。首先将电网中的能量通过转换储存在电池内,然后再经双向变换器对电池中的能量变换进行传输,通过对其智能控制为列车运行提供持续动力。该供电系统可以在夜间波谷时段为地面储能网充电,并可回收列车电制动时产生的制动能量,对再生能源实现二次利用<sup>[9-10]</sup>。

## 1 新型供电系统主电路

新型供电系统架构如图1所示。系统主要包括整流变压器、AC/DC充电装置、地面储能电池组、双向DC/DC稳压源、正极柜、受流轨、斩波器和制动电阻等,整流变压的输入端从电网AC 380 V三相交流,电压经过整流变压器整流升压后,二次侧为AC/DC充电装置提供能量,经过整流变换降压后为地面储能电池充电,能量储存在电池里面;储能电池组输出端连接双向DC/DC稳压源,能量经过其斩波变换后,持续为有轨电车提供稳定的供电电压,双向DC/DC稳压源输出端连接的正极柜起到继电保护作用,斩波器连接在受流轨正极和负极之间,负极与大地相接,制动电阻作为斩波器的制动负载,起到将多余的能量消耗释放作用。

图2为AC/DC充电装置工作原理图,其输入电压为整流变压器二次电压AC 1 150 V,经二极管三相整流桥整流为直流电压,然后再通过Buck模块降压,经LC滤波后输出为稳定的直流电压DC 1 200 V,可以为储能电池恒流恒压充电。

图3为双向DC/DC稳压源原理图,由地

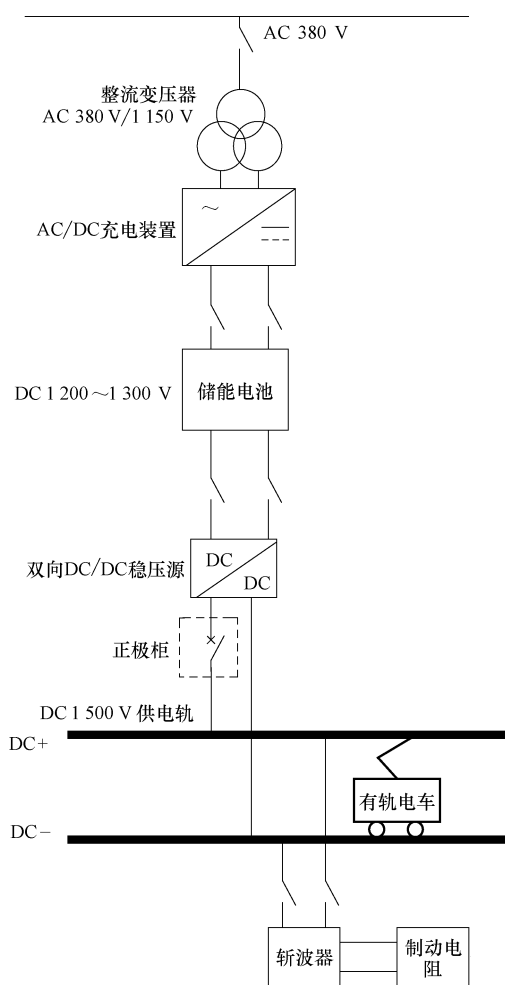


图1 新型供电系统架构图

Fig. 1 New power supply system architecture

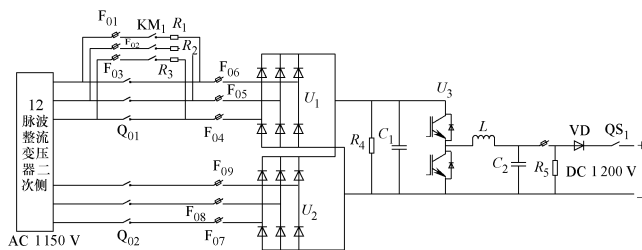


图2 AC/DC充电装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of AC/DC charging device

面储能电池提供输入电压DC 1 200 V,经预充电回路后,闭合输入接触器 $KM_2$ ,经过Boost斩波升压后,通过恒压控制输出稳定的DC 1 500 V,为有轨电车持续提供牵引动力。当列车制动时,产生的制动能量又可以经过双向

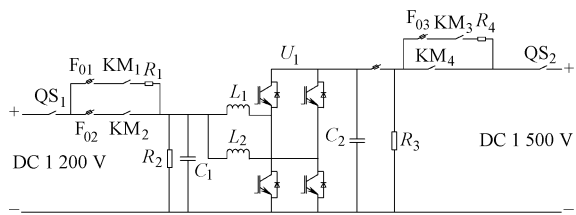


图 3 双向 DC/DC 稳压源原理图

**Fig. 3 Schematic diagram of bidirectional DC/DC voltage regulator**

DC/DC 反向为地面储能电池充电。

图4为斩波器原理图,当智能监控系统检测到列车制动电压大于DC 1 650 V时,则斩波器启动工作,发脉冲,将多余的能量经制动电阻 $R_b$ 消耗释放。

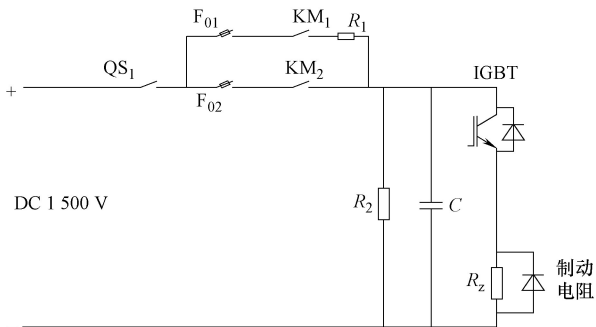


图 4 斩波器原理图

**Fig. 4 Schematic diagram of chopper**

## 2 新型供电系统控制策略

### 2.1 AC/DC 充电装置控制策略

AC/DC 充电装置采用恒流充电控制方式, 其外环 PI 控制采集的是直流电流控制, 目的是使充电电流保持稳定不变。储能电池允许的电流作为充电电流给定值, 直流母线电流通过测量元件直接测得后作为电流实际值。电流内环的有功电流给定值是通过直流电流外环调节, 然后经过限幅后的输出量得到的。恒流充电控制框图如图 5 所示。

利用直流电压 PI 调节作为恒压充电控制外环,其目的是保持储能电池电压的稳定不变。储能电池允许的电压值作为给定值,直流母线电压通过测量元件测得后作为电压实际

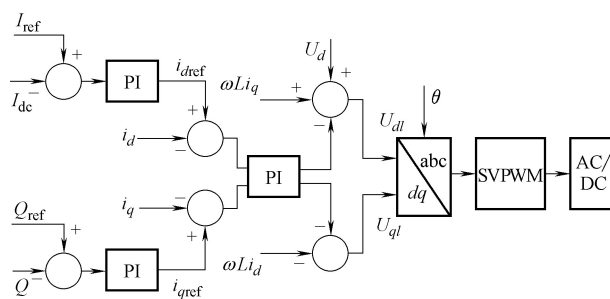


图 5 恒流充电控制框图

**Fig. 5 Constant current charging control  
block diagram**

值。电流内环的有功电流给定值是通过直流电压外环调节, 然后经过限幅后的输出量得到的。恒压充电控制框图如图 6 所示。

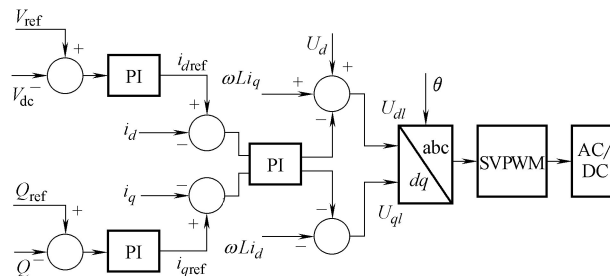


图 6 恒压充电控制框图

**Fig. 6 Constant voltage charge control  
block diagram**

## 2.2 双向 DC/DC 稳压源控制策略

双向 DC/DC 控制模式分为模式 1（恒流限压方式）和模式 2（恒压限流方式）。恒流充放电利用直流电流 PI 控制方式，其目的是保持充放电电流稳定。储能电池允许充放电电流作为电流给定值，通过测量元件直接得到的充放电电流作为电流反馈值。

恒压充放电利用电压 PI 调节方式,其目的是保持储能电池电压的稳定。储能介质允许的电压值作为电压给定值,通过测量元件直接测得储能介质的电压作为电压反馈值。当双向 DC/DC 工作在 Boost 状态下,装置采用模式 2 (恒压限流)控制方式;反之,工作在 Buck 状态下,装置采用模式 1 和模式 2 两种控制方式。双向 DC/DC 控制图如图 7 所示。

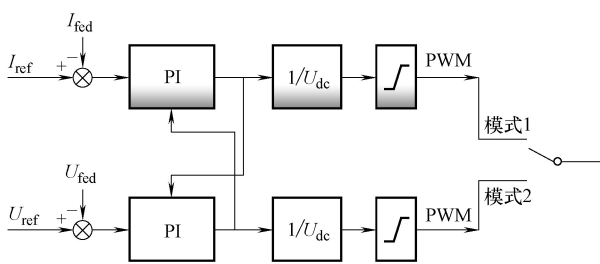


图 7 DC/DC 控制框图

Fig. 7 DC/DC charging control block diagram

### 3 新型供电系统软硬件设计

#### 3.1 系统软件架构

新型供电系统控制系统的软件设计主要分为通信数据处理和控制部分，其中控制部分软件流程图如图 8 所示。

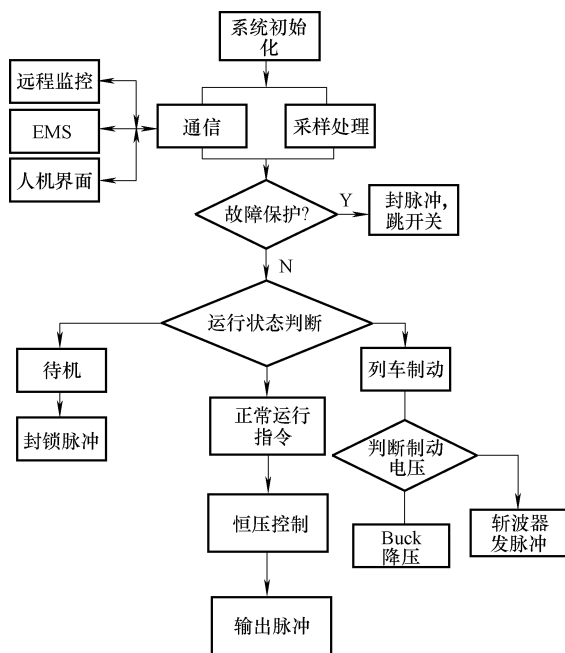


图 8 系统软件架构

Fig. 8 System software architecture

#### 3.2 控制电路设计

新型供电系统控制系统主要由数字信号处理器、开入/开出信号控制、脉冲宽度调制、通信接口电路及故障信号组成。该系统采用两个功能先进的 TMS320C28346 作为控制核心，主频 300 MHz，具有强大的 PWM 事件管理及实时控制能力。DSP1 主要作用为处理通信数

据，DSP2 主要作用为 PWM 脉冲生成、开入/开出控制算法处理及保护功能。上位机为以太网通信，EMS 为 CAN 通信，人机界面为 RS 485 通信。硬件系统控制框图如图 9 所示。

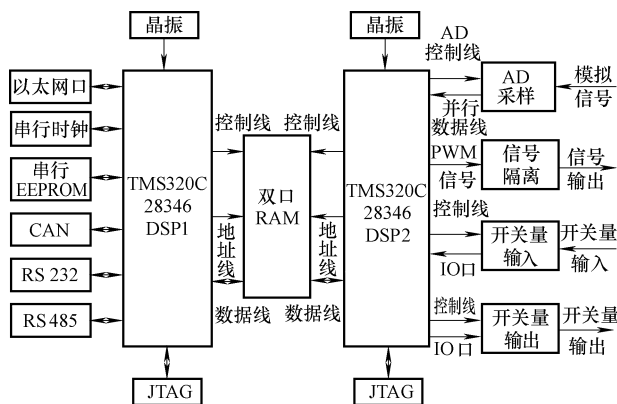


图 9 硬件系统控制框图

Fig. 9 Hardware system control diagram

### 4 实验验证

基于以上研究，搭建了一套 50 kW 供电实验系统，系统负载为电阻，阻值为 14 Ω，储能电池为铅酸电池。系统主要参数如下：AC/DC 输入电压为 380 V；额定功率为 50 kW；频率为 50 Hz；直流电压范围为 DC 300~600 V；双向 DC/DC 输入电压为 DC 300~600 V，额定输出电压为 DC 800 V，额定输出电流为 60 A。

对铅酸电池进行充电实验，AC/DC 充电装置给电池充电时的输出直流电压、电流及网侧电压波形如图 10 所示。

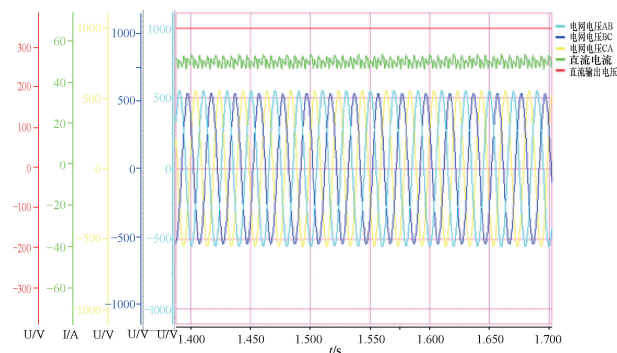


图 10 AC/DC 输出直流电压、电流及网侧电压

Fig. 10 AC/DC output DC voltage, current and grid side voltage

双向 DC/DC 稳压源对电阻负载供电时, 输出直流电压、电流波形如图 11 所示。直流输出电压经 0.5 s 后稳定在一定值, 能够为有轨电车持续提供牵引供电能量。

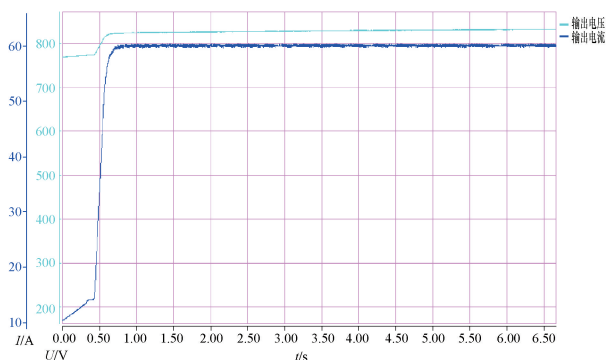


图 11 双向 DC/DC 输出直流电压、电流

Fig. 11 Bi-directional DC/DC output DC voltage and current

## 5 结束语

本文针对有轨电车传统供电方式存在的一些问题, 提出了一种有轨电车新型供电方案。理论研究及实验结果均表明, 该供电系统可以先将电网中的能量通过转换储存在电池内, 然后再经双向变换器对电池中的能量变换进行传输, 通过对其智能控制能够为列车运行提供持续牵引动力, 具有极高的推广应用价值。

## 参考文献

- [1] 张国驹, 唐西胜, 周龙齐, 等. 基于互补 PWM 控制的 Buck-Boost 双向变换器在电池器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 15-21.
- [2] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动, 2008, 32(7): 98-103.
- [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.

- [4] YAO W M, C, YUAN CHUAN L, SHIH CHIEH H, et al. Multi-input inverter for grid-connected hybrid PV/wind power system[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2007, 22(3): 1070-1077.
- [5] 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.
- [6] 杨锐, 陈德胜, 张剑涛. 现代有轨电车储能式供电能耗与配套供电[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(6): 148-151.
- [7] 周庆瑞, 施翔. 新型有轨电车及其创新的供电制式[J]. 都市轨道交通, 2008, 21(6): 95-97.
- [8] HIRAI J, TAE W K. Study on intelligent battery charging using inductive transmission of power an information[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(2): 335-345.
- [9] 蔡波, 李鲲鹏. 现代有轨电车无接触网牵引供方式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(1): 72-77.
- [10] MAHARJAN L, INOUE S, AKAGI H, et al. A transformerless battery energy storage system based on a multilevel cascade PWM converter [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 4798-4804.

## 作者简介



张文波

张文波 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为储能、大功率充电技术。

(收稿日期: 2020-12-22)