

有轨电车超级电容的充电方式转换技术研究

田 炜¹, 常鹏飞¹, 潘文霞²

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211106)

摘要:针对现代有轨电车的充电需求和超级电容的充电特性,采用先恒流限压输出再恒压输出的充电方式,根据该充电方式提出在有轨电车充电装置的AC/DC侧采用PWM整流技术,在充电装置DC/DC侧采用赋积分初值的控制策略,详细分析其实现方案,说明实现原理,给出仿真结果并实验验证。实验结果表明,文中提出的控制策略极大地减弱了充电装置对电网的影响,在充电方式恒流充电转恒压充电瞬间,输出电压、输出电流的尖峰值较小,无明显波动,在推动现代有轨电车在各大城市的推广具有很好的应用价值。

关键词:有轨电车; 超级电容; 控制策略; 充电方式

中图分类号:U482.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)03-0102-05

0 引言

近年来,城市交通拥堵、环境污染、能源短缺等问题日益突出,采用超级电容储能作为动力的有轨电车作为一种使用绿色清洁能源的新型交通工具,对于应对能源危机和解决环境污染问题有很大的帮助,大力发展这种清洁、高效、智能的交通工具是21世纪的必然选择^[1-3]。因此,如何在满足其特性要求的情况下对超级电容进行快速充电成为了一个亟待解决的重要问题。

目前,有轨电车充电装置主要采用的是传统多脉波整流技术,由于其固有特性,使得整流器存在交流侧输入电压畸变,电流谐波含量高,输出电压纹波大等问题,对电网造成了谐波污染^[4-6]。

采用恒流限压充电方式对超级电容进行充电^[7-8]时,在大电流情况下恒流充电至额定电压状态时,采用传统多脉波整流技术的充电装置会出现充电功率不足的情况,在充电至额定电压附近由恒流充电方式切换至恒压充电方式时,切换过程也不够快速平稳^[9]。文献[10]提出充电装置采用脉冲宽度调制(pulse-width modulation, PWM)整流方式,电压-电流双闭环与电压前馈相结合的控制策略。文献[11]提出为解决单相Buck功率不足的问题,采用四相交错并联的拓扑结构。文献[12]提出采用PWM整流器加两级级联型三相三重斩波电路构成的充电装置拓扑结构。上述关于现代有轨电车充电装置的文献均未提及针对超级电容充电特性设计的充电方式转换技术。

文中所提控制方法可使得超级电容充电控制稳定,提高整流器的响应速度,快速稳定直流母线电压,且能够控制网侧功率因数,使整流器在单位功率因数下运行,实现网侧电流的正弦化,并降低整流器的输入电流谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)含量,有效抑制整流器对电网的谐波污染。同时还通过控制实现对超级电容短时大功率的恒流限压充电,保证恒流充电方式至恒压充电方式的无缝切换。

1 充电装置控制原理

图1为有轨电车充电装置主回路,可知:有轨电车超级电容的充电装置包括LCL滤波电容模块、PWM整流模块、斩波器模块及隔离开关柜等。图中 U_{fed} , I_{fed} 分别为充电装置输出电流与输出电压; U_{dc} 为整流模块输出电压。

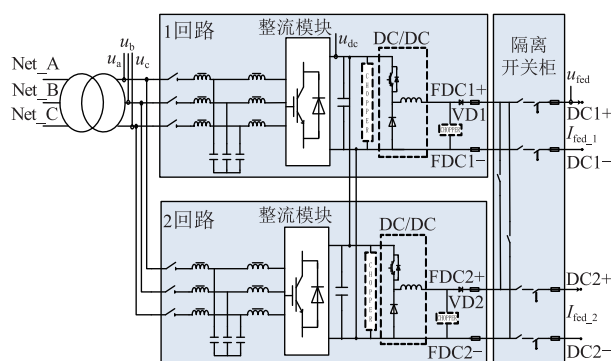


图1 有轨电车充电装置的主电路

Fig.1 The main circuit of the charging-device

1.1 PWM 整流模块控制

目前三相电压源型PWM整流器(voltage source rectifier, VSR)最常用的控制策略是基于坐标变换的

收稿日期:2017-12-23;修回日期:2018-02-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377047)

双闭环控制,将静止三相坐标系中的交流量转换为同步旋转坐标系中的直流量,对直流量采用经典 PI 控制,可以实现无差跟踪^[13-16]。根据坐标变换理论,可以得到三相 VSR 在两相同步旋转 dq 坐标系下的数学模型,如图 2 所示。

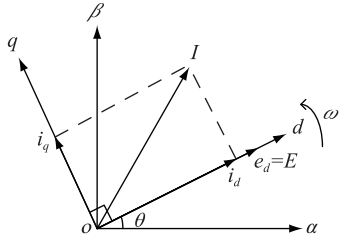


图 2 dq 坐标系下的网侧矢量图

Fig.2 The net side vector in dq co-ordinate

输出控制量 v_d, v_q 的表达式为:

$$\begin{cases} v_d = -Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q + u_d \\ v_q = -Ri_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (1)$$

式(1)为同步旋转坐标系下整流器的数学模型,其中 u_d, u_q 分别为同步旋转坐标系下的 dq 分量; i_d, i_q 分别为同步旋转坐标系下的 dq 分量; R, L 分别为整流模块交流侧滤波电阻和滤波电感。系统采用电压外环电流内环与电压前馈相结合的控制策略^[17],其控制框图如图 3 所示。图中带 * 注的物理量均为指令值,其余为实测值。

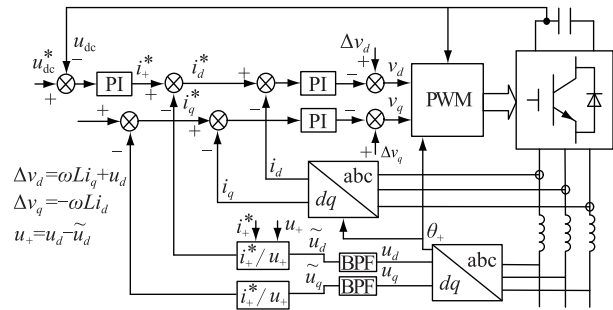


图 3 三相整流器控制框图

Fig.3 Control diagram of three-phase rectifier

1.2 斩波器模块控制

文中采用固定频率 PWM 控制。根据储能装置超级电容的特性,充电装置的控制策略分为电压型 PWM 控制策略和电流型 PWM 控制策略。

1.2.1 电压型 PWM 控制策略

固定频率电压型 PWM 控制器的控制框图如图 4 所示。输出电压 U_{out} 与固定参考电压 U_{ref} 比较,得到一个误差电压 U_e ,该误差电压经过积分放大器后,与一固定频率的三角波相比,当误差电压高于三角波信号时,输出为高电平,当误差电压低于三

角波信号时,输出为低电平。此高低电平即为 PWM 信号^[18]。



图 4 电压型 PWM 控制框图

Fig.4 Diagram of voltage PWM controller

1.2.2 电流型 PWM 控制策略

固定频率电流型 PWM 控制器既可采用电压外环和电流内环的双环控制,亦可采用单电流环控制。根据负载超级电容的特性,文中采用单电流环控制,其原理图与电压型 PWM 控制策略相类似,如图 5 所示。



图 5 电流型 PWM 控制框图

Fig.5 Diagram of current PWM controller

2 充电装置恒流限压充电与恒压充电之间的转换

恒压控制中,2 个模块采样同一个输出电压值,输出两路 PWM 波控制 2 个模块。由输出电压值控制恒流充电模式与恒压充电模式的切换,当检测到输出电压达到限定值时,由恒流充电模式切换至恒压充电模式^[19],如图 6 所示。

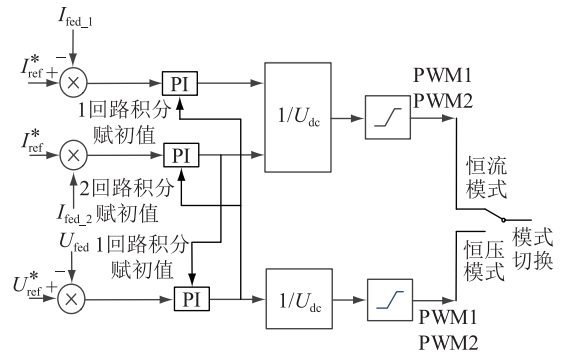


图 6 充电模式切换框图

Fig.6 Diagram of charging-mode switching

充电装置负载为超级电容,在切换瞬间,若输出电压因控制模式的变换而产生一定差异,会使得输出电流瞬时增大,对负载及充电装置产生不良影响。因此为避免因控制模式的切换导致输出电流、电压波动过大,将切换前电流 PI 调节器的输出值作为切换后电压 PI 调节器的积分初始值,将电压 PI 调节器的输出值作为切换后电流 PI 调节器的积分初始值,这样在切换过程瞬间,控制模块给出的指令能无缝对接上一时间段的控制输出量,而后按照

切换后的控制模式输出,从而实现无缝切换。

此外,通过设置进出站标志位及充电等待标志位,能够实现上下行列车充电的各种工况,包括单行列车进站充电工况、上下行列车同时进站充电工况、越站工况等。上下行列车同时进站充电工况是指上(下)行列车正在充电过程中,下(上)行列车进站,此时,下(上)行列车处于等待状态,当上(下)行列车充电完成后,下(上)行列车再开始充电。越站工况,即列车进站后未做停留,直接出站。列车进站,启动充电装置,当充电装置检测到列车出站信号时,立即停止充电,有效抑制了拉弧现象的发生。

3 参数设计及仿真实验结果

3.1 斩波器模块控制

根据实际需求,设计为系统整流模块满功率恒流充电时,交流侧输入充电电压为 AC 690 V;直流母线电压为 DC 1100 V;斩波器输出充电电压为 DC 0~900 V 可调;输出电流为 0~1800 A 可调。

3.2 仿真结果及分析

仿真中,整流模块将网侧 690 V 的交流电压变换为 1100 V 的直流电压,直流斩波模块将 1100 V 的直流电压转变为超级电容需要的电压。图 7 为充电装置运行过程中网侧输入电压、输入电流及直流母线电压波形。

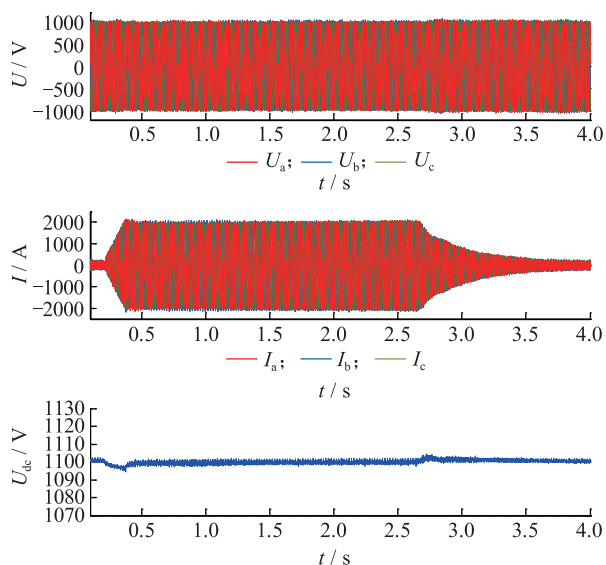


图7 网侧输入电压和电流及直流母线电压波形

Fig.7 Waveforms of the input voltage and input current of the net, and the DC bus voltage

由图 7 可知:充电装置刚开始爬坡向超级电容充电时,直流侧母线电压由于功率的瞬时增大而被拉低;当完成爬坡,充电装置工作在恒流限压充电模式时,直流侧母线电压一直稳定在 1100 V 左右;

但超级电容的电压达到设定值时,充电装置由恒流限压工作模式转换为恒压工作模式,此时,直流侧母线电压由于能量惯性有一个小的起伏。整个充电过程中,网侧输入电压稳定在 690 V 左右,体现了 PWM 控制策略的有效性。

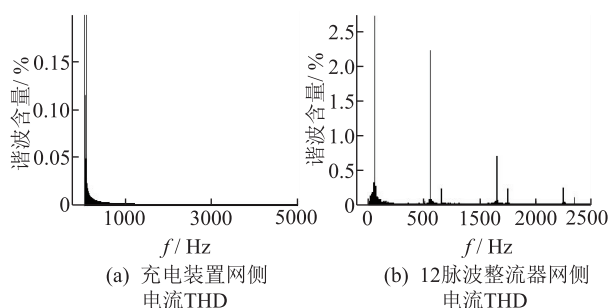


图8 该整流器与 12 脉波整流器网侧电流 THD

Fig.8 The curengt THD of VSR and 12 pulse rectifier

图 8 (a) 为该充电装置的网侧电流 THD,图 8 (b) 为相同网侧电压与负载情况下,12 脉波整流器的网侧电流 THD。可看出文中设计的充电装置运行产生的谐波污染为 0.59%,低于轨道交通中常用的 12 脉波整流器所产生的谐波污染 2.48%,因此考虑到有轨电车运行对电网其他负荷的影响,采用该套充电装置的设计方案更为合适。

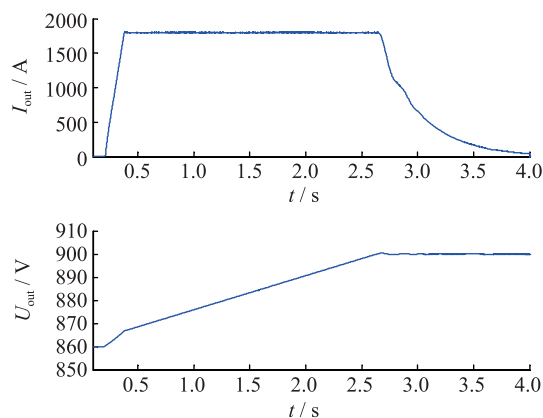


图9 充电装置输出电压及输出电流波形

Fig.9 Waveforms of the output voltage and output current

图 9 为装置的输出电压及输出电流波形,可知:充电装置刚开始爬坡向超级电容充电时,输出电压以一定的斜率缓慢增长;当完成爬坡,充电装置工作在恒流限压充电模式时,输出电压以另一个斜率缓慢增长;当超级电容的电压达到设定值时,充电装置由恒流限压工作模式转换为恒压工作模式,此时,输出电压稳定在设定值,输出电流减小,直至为 0。在由恒流限压工作模式转换为恒压工作模式的瞬间,输出电压及输出电流未出现大的尖峰,实现了 2 种充电模式的无缝切换。

3.3 实验结果及分析

实验中,采用与仿真数据相同,即整流模块将网侧 690 V 的交流电压变换为 1100 V 的直流电压,直流斩波模块将 1100 V 的直流电压转变为超级电容需要的电压。图 10 为装置的输出电压/输出电流及输出能量的波形。

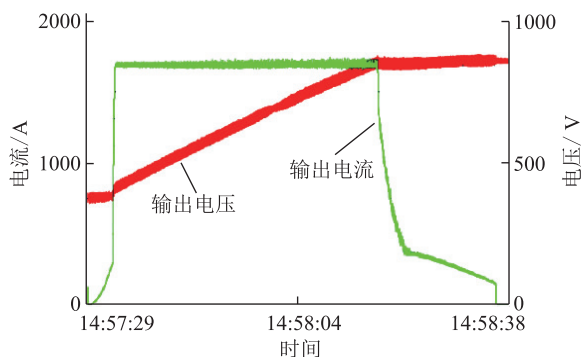


图 10 充电装置输出电压及输出电流波形

Fig.10 Waveforms of output voltage, current and energy

由图 10 可知:实验波形与理论分析相吻合,与仿真波形相一致,即充电装置刚开始爬坡向超级电容充电时,输出电压以一定的斜率缓慢增长;当完成爬坡,充电装置工作在恒流限压充电模式时,输出电压以另一个斜率缓慢增长;当超级电容的电压达到设定值时,充电装置由恒流限压工作模式转换为恒压工作模式,控制模式(恒流限压充电方式及恒压充电方式)转换瞬间输出电压、输出电流未出现较大的尖峰值。此时,输出电压稳定在设定值,输出电流减小,直至为 0。

4 结语

文中针对有轨电车超级电容充电装置采用传统的多脉波整流技术存在的种种问题,提出了整流模块采用 PWM 控制策略,直流斩波模块通过改变其积分器的初始给定值,使得充电装置能够在恒流限压充电模式与恒压充电模式之间实现无缝切换。仿真结果与理论分析相吻合,实验波形与仿真结果相一致,并且此控制方案已成功应用于广州有轨电车充电装置系统中,运行稳定,对推动现代有轨电车在各大城市的推广建设具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 周翊民. 现代有轨电车的快速发展是社会发展的必然需要[J]. 城市轨道交通研究, 2013(8):1-4.
ZHOU Yimin. Social progress needs rapid development of modern tram[J]. Urban Mass Transit, 2013(8):1-4.
- [2] 覃 裔,戴子文,陈振武. 现代有轨电车线路规划初探[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(2):42-45.
QIN Yu, DAI Ziwen, CHEN Zhenwu. Study on modern tramcar route planning[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(2):42-45.
- [3] 曾海波,过秀成,杨 洁. 现代有轨电车应用模式及地区适用性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(2):46-49.
ZI Haibo, GUO Xiucheng, YANG Jie. On the application and adaptability of modern tramcar[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(2):46-49.
- [4] 聂晶鑫,郭育华,夏 猛. 超级电容储能装置在城市轨道交通中的应用[J]. 电气化铁道, 2011, 22(2):48-50.
NIE Jinxin, GUO Yuhua, XIA Meng. Application of supercapacitor energy storage device in urban rail transit[J]. Electric Railway, 2011, 22(2):48-50.
- [5] 竺庆茸,黄文杰,徐修华,等. 分布式能源对主动配电网谐波特性影响的研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5):93-97, 108.
ZHU Qingrong, HUANG Wenjie, XU Xiuhua, et al. The impact of distributed energy on harmonic characteristics in active distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5):93-97, 108.
- [6] 赵 亮,刘 炜,李群湛. 城市轨道交通超级电容储能系统的 EMR 建模与仿真[J]. 电源技术, 2016, 40(1):124-127, 165.
ZHAO Liang, LIU Wei, LI Qunzhan. Study of supercapacitor energy storage system for urban railway transit using energetic macroscopic representation [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(1):124-127, 165.
- [7] 孟彦京,张商州,陈景文,等. 充电方式对超级电容能量效率的影响[J]. 电子器件, 2014, 37(1):13-16.
MENG Yanjing, ZHANG Shangzhou, CHEN Jingwen, et al. The impact of charging mode pairs of super-capacitor energy efficiency[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(1):13-16.
- [8] 易桂平,胡人杰,刘千杰. 独立光伏系统中超级电容储能充电技术的研究[J]. 电工电气, 2014(7):13-19.
YI Guiping, HU Renjie, LIU Qianjie. Study on charging technology of supercapacitor energy storage in stand-alone photovoltaic system[J]. Electrotechnics Electric, 2014(7):13-19.
- [9] 张晓峰,吕征宇. 混合动力车用全数字电流控制型双向 DC/DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8):84-89.
ZHANG Xiaofeng, LYU Zhengyu. Digital current controlled bi-directional DC/DC converter in the hybrid electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8):84-89.
- [10] 苏秀娥,朱 玲,田 炜,等. 基于超级电容有轨电车的充电装置控制研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(4):60-62.
SU Xiue, ZHU Ling, TIAN Wei, et al. Research on control for tram charging device based on super-capacitor [J]. Power Electronics, 2016, 50(4):60-62.
- [11] 戎 琳,田 炜,孙祖勇,等. 超级电容有轨电车充电装置系统研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(10):71-73.
RONG Lin, TIAN Wei, SUN Zuyong, et al. Research on the

- charging device system for the super capacitor tramcar [J]. Power Electronics, 2017, 51(10): 71-73.
- [12] 周京华, 李秋需, 章小卫, 等. 储能有轨电车新型充电系统研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(6): 101-103.
ZHOU Jinghua, LI Qiupei, ZHANG Xiaowei, et al. New charging system study of energy storage trolley [J]. Power Electronics, 2015, 49(6): 101-103.
- [13] SIMON A, ALEJANDRO O. Power-switching converters (Second Edition) [M]. Crc Press, 2005.
- [14] 郭伟, 王跃, 王兆安, 等. 应用于电动汽车充电站的PWM整流器控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 153-158.
GUO Wei, WANG Yue, WANG Zhaoan, et al. Control strategy for PWM rectifier in electrical vehicle charging station [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2012, 27(2): 153-158.
- [15] 孔历波, 郑正仙, 何春林, 等. 电动汽车跨区域互联运营通信网络组网方案与实践[J]. 浙江电力, 2016, 35(10): 60-64.
KONG Libo, ZHENG Zhengxian, HE Chunlin, et al. The establishment scheme and practice of communication network for interregional electric vehicle peration [J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(10): 60-64.
- [16] 乐文海, 何春林, 郑正仙, 等. 国内电动汽车充换电设施标准体系[J]. 浙江电力, 2017, 36(3): 5-8.
LE Wenhai, HE Chunlin, ZHENG Zhengxian, et al. Domestic standard system for electric vehicle charging and battery-swapping facilities [J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(3): 5-8.
- [17] 韩华春, 丁昊, 黄地, 等. 面向主动配电网的电动汽车充放电功率控制技术[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 8-13.
HAN Huachun, DING Hao, HUANG Di, et al. Electric vehicle power control strategy for active distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 8-13.
- [18] 余明杨, 蒋新华, 王莉, 等. 开关电源的建模与优化设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 165-169.
YU Mingyan, JIANG Xinhua, WANG Li, et al. Modeling and optimization design for switching power supply [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 165-169.
- [19] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3089-3097.
CHEN Jie, CHEN Xin, FENG Zhiyang, et al. A control strategy of seamless transfer between grid-connected and islanding operation for microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3089-3097.

作者简介:



田 伟

田 伟(1978—),男,硕士,高级工程师,从事新能源发电、电力电子技术相关工作(E-mail: tianwei@sgepri.sgcc.com.cn);

常鹏飞(1980—),男,硕士,工程师,从事新能源发电、电力电子技术相关工作(E-mail: changpengfei@sgepri.sgcc.com.cn);

潘文霞(1961—),女,教授,博士生导师,研究方向为可再生能源发电技术与电力系统和高电压与绝缘技术。

Research on the Power Supply System for the Super Capacitor Tramcar

TIAN Wei¹, CHANG Pengfei¹, PAN Wenxia²

(1. NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211106, China)

Abstract: According to the charging demand of modern tram and charging characteristics of supercapacitor, the charging method of constant current first and constant voltage second is used in this paper. It is proposed that the AC/DC side of charging device uses PWM rectification technology, and the DC/DC side adopts the control strategy of giving the initial value to integrator. The implementation scheme is analyzed in details, simulation model is built to verify the control strategy, the simulation results and experimental results show that this control-strategy greatly reduces the influence of the charging device on the power grid, the peak value of the output voltage and output current at the moment of conversion between the charging methods is very small, which have a positive impact to promote the promotion of modern tram in the major cities.

Key words: trams; super capacitor; filter method; control-strategy; charging-method

(编辑 方 晶)