

基于超级电容有轨电车的储能变流器并网充电研究

储能有轨电车以其无须架设外部供电网、零尾气排放等优点受到广泛关注,其储能单元由充电速度快、充电效率高的超级电容组成,其快速储能技术在短时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。针对传统有轨电车充电装置存在的诸多问题,提出了一种有轨电车新型供电系统,即通过储能变流器并网控制,采用超级电容储能供电方式。仿真及试验结果表明,该供电方式具有功率因数可控、谐波含量低以及输出电压稳定性好等优点,具有极高的推广应用价值。

赵 军¹ 曾海涛¹ 赵云云² 饶河平¹ 张文波³/1.广州有轨电车有限责任公司
2.广州地铁设计研究院有限公司 3.国电南瑞科技股份有限公司

0 引言

随着环保、能源等问题的日益突出,以超级电容储能为动力的有轨电车成为一种新型交通工具,对于解决能源危机和环境污染问题有很大帮助。有轨电车可以缓解国家对石化资源的依赖,优化能源结构,保证社会的可持续发展。所以大力发展这种清洁、高效和智能的交通工具是21世纪的必然选择^[1-2]。

充电装置作为电网和超级电容储能介质的接口,是整个供电系统的核心装置。有轨电车充电装置主要采用传统多脉波整流技术,由于其固有特性,导致整流器交流输入电压畸变、电流谐波含

量高以及输出电压纹波大等问题,对电网造成谐波污染。为提高有轨电车的生存率,减少对供电电网的容量依赖及冲击影响,降低建设运营成本,有必要对其线路供电方式以及装置性能作进一步深化研究。

因此,本文针对传统有轨电车充电装置存在的诸多问题,提出了一种有轨电车新型供电系统,即通过储能变流器并网控制,采用超级电容储能供电方式。该方式具有功率因数可控、谐波含量低以及输出电压稳定性好等优点,变流器交流侧采用LCL滤波器设计,有效减少了输出谐波,并抑制了交流电压失真和电流谐波^[3]。

1 主电路拓扑

储能变流器主电路采用单级三相PWM整流逆变拓扑,主要由绝缘栅双极型晶体管(IGBT)三相全桥搭建的功率模块组成。隔离变压器(400 V/200 V)起到隔离、电压匹配以及交流滤波器的作用。电网侧输入开关包括断路器和接触器,然后经过交流隔离变压器和LCL滤波进入三相PWM整流逆变模块,直流输出通过接触器开关向超级电容充电。储能变流器的主电路拓扑如图1所示。

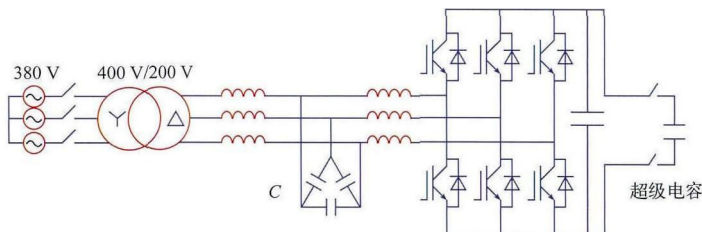


图1 储能变流器的主电路拓扑



赵 军/高级工程师

关键词/Keywords

有轨电车·
储能·
变流器·
超级电容·

2 控制策略

2.1 LCL滤波器的数学模型

忽略两侧电感电阻，网侧单相LCL滤波器的拓扑结构和物理量如图2所示。

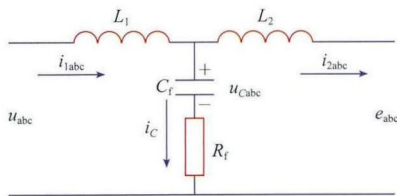


图2 单相LCL滤波器拓扑结构

对于电流*i_{1abc}*、*i_{2abc}*以及滤波电容电压*u_{Cabc}*分别有

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{1abc}}{dt} = u_{abc} - [u_{Cabc} + R_f(i_{1abc} - i_{2abc})] \\ C_f \frac{du_{Cabc}}{dt} = i_{1abc} - i_{2abc} \\ L_2 \frac{di_{2abc}}{dt} = u_{Cabc} + R_f(i_{1abc} - i_{2abc}) - e_{abc} \end{cases} \quad (1)$$

式（1）即为三相坐标系下LCL滤波器的数学模型，记滤波电容支路的总电压*u_{Cabc}* = *u_{Cabc}* + *R_f(i_{1abc} - i_{2abc})*，可得LCL滤波器的模型框图如图3所示。

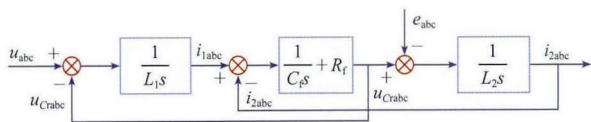


图3 LCL滤波器的模型框图

框图中LCL滤波器的输入为网侧变流器的输出电压*u_{abc}*，与三相桥式变流电路的原理有关^[4-5]。

2.2 三相变流器控制策略

三相变流器最常用的控制策略是基于坐标变换的双闭环控制，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。根据坐标变换理论，可以得到三相变流器在两相同步旋转*dq*坐标系下的数学模型，如图4所示。

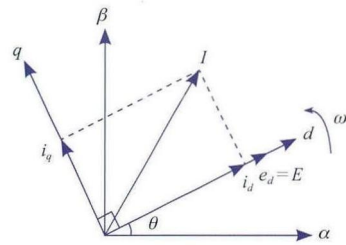


图4 dq坐标系下的网侧矢量图

输出控制量*u_d*、*u_q*的表达式为

$$\begin{cases} u_d = -Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q + V_d \\ u_q = -Ri_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d + V_q \end{cases} \quad (2)$$

式（2）即为同步旋转坐标系下变流器的数学模型，其中*V_d*、*V_q*分别为同步旋转坐标系下的*dq*分量。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^[6-7]，其控制框图如图5所示。

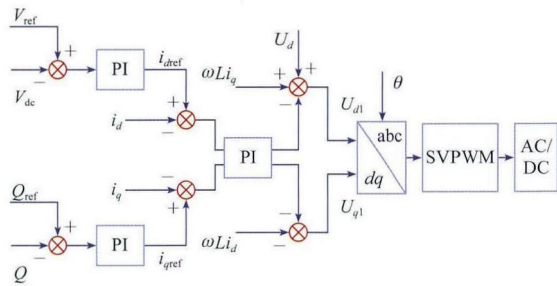


图5 三相变流器控制框图

3 系统软件架构

储能变流器软件系统架构如图6所示，主要包括系统初始化模块、状态判断、A-D采样处理模块、保护模块、孤岛检测模块、矢量控制模块、脉冲生成（SVPWM）模块和通信模块。

4 硬件电路设计

微电网储能变流器控制系统主要包括数字信号处理器（DSP）、开入/开出信号控制、脉冲宽度调制（PWM）及故障信号和通信接口电路。该系统采用双DSP设计，使系统具有实时控制性和接受调度响应的快速性。其中DSP选用最新先进的TMS320C28346作为控制核心，主频300 MHz。具

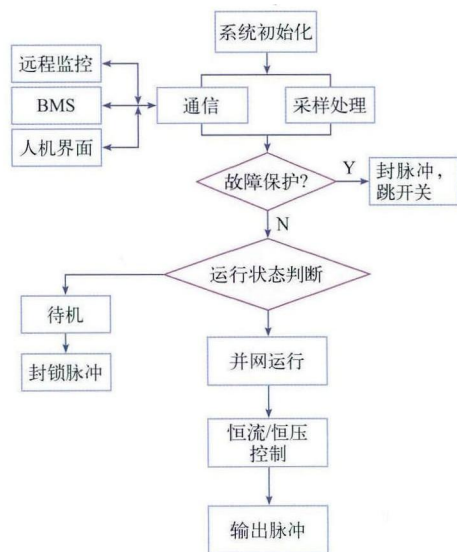


图6 系统软件架构

有较强实时控制能力和PWM事件管理能力。其中DSP1负责通信数据的处理，DSP2负责逻辑控制、保护功能、开入开出处理控制算法处理以及PWM脉冲的生成，BMS采用CAN通信。人机界面采用RS 485通信，并网点保护装置采用RS 485通信。上位机为以太网通信。DSP1和DSP2采用双口RAM进行实时数据交互，保证数据传输的快速性。储能变流器控制系统框图如图7所示。

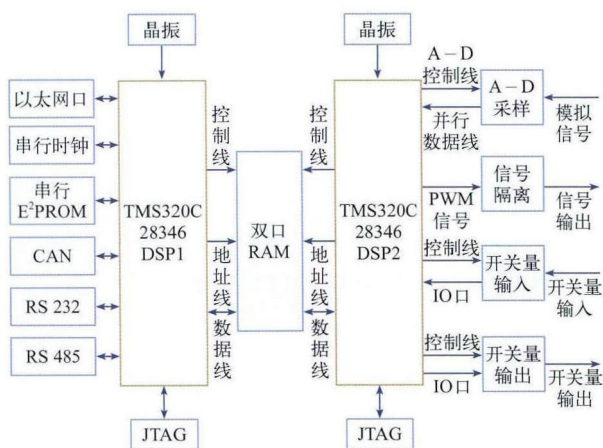


图7 储能变流器控制系统框图

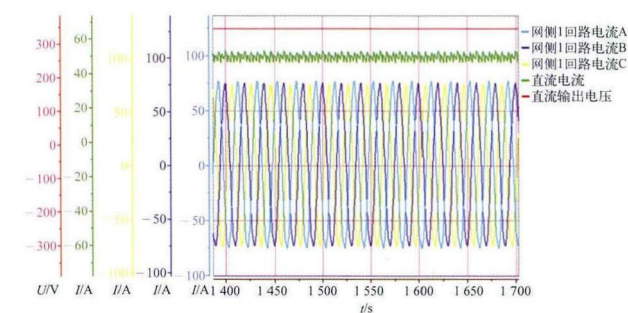
5 仿真与试验

基于以上研究，研制了一台50 kW储能变流器，储能介质为超级电容。超级电容容值为140 F，输入电压为AC 380 V，注入电网电流谐波（THD）

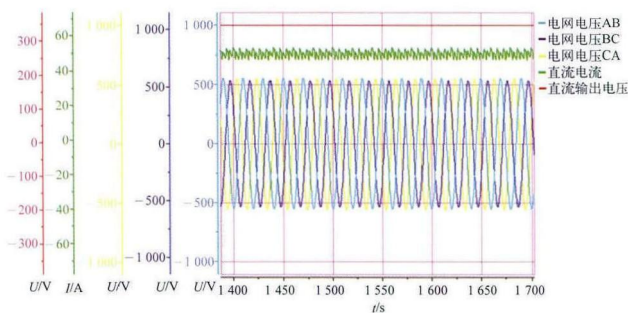
小于5%，输出电压为DC 300~600 V，充电效率不小于96%，稳压准确度为 $\pm 0.5\%$ ，纹波系数为 $\pm 1\%$ ，开关频率为2.9 kHz，采样频率为20 kHz。

5.1 仿真结果及分析

图8为充电装置工作时的主要仿真波形。由图中可以看出，储能变流器以恒流50 A给超级电容充电，随着电量的增长，超级电容电压逐渐上升。在充电过程中，电网侧三相电流输出稳定，无波动。当电容电压达到设定值600 V时，装置进入恒压充电状态，此时充电电流自动减小，电容电压稳定在600 V；整个充电过程，电网电压保持稳定无波动；变流器网侧电流则随着充电电流 I_c 的变化而变化。



(a) 输出直流电压、电流及网侧电流



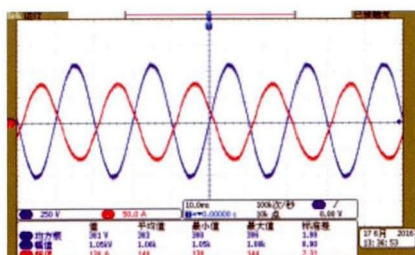
(b) 输出直流电压、电流及网侧电压

图8 充电装置系统仿真波形

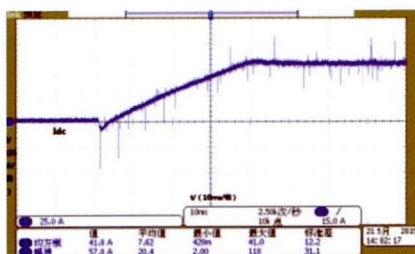
5.2 试验结果及分析

充电装置试验波形如图9所示。图9a为储能变流器给超级电容并网充电时的电网电压和电网电流波形，由试验波形可知，整个充电过程中，电网电压保持稳定，无畸变，验证了LCL滤波器的有效性。图9b为储能变流器给超级电容充电的电流波形，充电电流在恒流控制下由0爬坡到50 A

后, 储能变流器保持恒流运行状态, 给超级电容充电, 验证了该控制策略的有效性和稳定性。



(a) 电网电压、电流



(b) 直流充电电流

图9 试验波形

6 结束语

本文针对传统有轨电车充电装置存在的诸多问题, 提出了一种有轨电车新型供电系统, 即通过储能变流器并网控制, 采用超级电容储能供电方式, 研究了系统控制策略并设计硬件电路, 研制了一台50 kW储能变流器, 仿真及试验结果表明, 该供电方式具有功率因数可控、谐波含量低以及输出电压稳定性好等优点, 变流器交流侧采

用LCL滤波器设计, 有效减少输出谐波, 抑制交流电压失真和电流谐波。该供电系统已成功应用到广州有轨电车充电装置系统中, 运行稳定, 具有极高的推广应用价值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 陈朗. 超级电容在城市轨道交通系统中的应用[J]. 都市轨道交通, 2008, 21(3): 76-79.
- [3] 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).
- [4] Lu Xiaonan, Liserre Marco, Sun Kai, et al. Resonance propagation of parallel operated DC-AC converters with LCL filters [C]. Proceedings of the 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 2012: 877-884.
- [5] 肖振鹏, 陈特放, 成庶, 等. 动态陷波滤波器在牵引变流器中的应用研究[J]. 电气工程学报, 2016, 11(8): 1-8.
- [6] 杨恩星, 仇志凌, 陈国柱, 等. 并联双PWM变流器在低速永磁直驱风力发电系统中的应用[J]. 电力系统及其自动化, 2009, 33(10): 95-99.
- [7] 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.

(收稿日期: 2016-12-26) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告