

氢燃料电池有轨电车结构设计 及控制方法研究

韩庆军, 姚正斌

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心, 山东 青岛 266111)

摘要: 设计了由燃料电池、动力电池、超级电容3个动力单元组成的氢燃料电池有轨电车混合动力系统结构, 并研究了车辆驱动模式和制动模式下的控制方法。驱动模式下, 基于母线电压控制方式, 按照燃料电池、动力电池、超级电容的先后次序, 依次切入动力单元, 响应车辆驱动功率要求; 制动模式下, 按照超级电容、动力电池先后顺序, 吸收回馈电能。解决了燃料电池与复合储能系统双模式运行条件下的动力匹配问题, 使车辆达到设计的目标最高车速, 并改善了经济性。通过实车测试, 分析了运行工况、氢气消耗和燃料电池功率变化情况, 验证了混合动力系统结构和控制方法的可行性。

关键词: 氢燃料电池; 有轨电车; 结构分析; 控制方法

中图分类号: U239.5 **文献标识码:** A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.02.012

Structure Design and Control Method for Hydrogen Fuel Cell Tramcar

HAN Qingjun, YAO Zhengbin

(R&D Center, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: Mixed power system composed with the three power units of fuel cell, power battery and super capacitor for hydrogen fuel cell tramcar was designed, and the control method for the driving mode and brake mode was researched. In the driving mode, based on DC-bus voltage control, power units were switched in with the sequence of fuel cell, power battery and super capacitor to satisfied the vehicle driving power requirement; in the brake mode, regenerated energy was absorbed by super capacitor and power battery sequentially. The power matching problem of fuel cell and combined energy-storage system double-mode operation was settled, which realized the vehicle max design speed and improved the economy. With the test, the operation conditions, hydrogen consumption and fuel cell power variation were analyzed, and the mixed power structure and control method were validated.

Keywords: hydrogen fuel cell; tramcar; construction analysis; control method

0 引言

有轨电车是一种在轨道上运行的新型低地板车辆, 适用于中低运量城市轨道交通系统。氢燃料电池首次应用于轨道交通出现于2002年, Vehicle Projects LLC公司和Fuel Cell Propulsion协会联合开发了燃料电池动力拖动机车, 其后丹麦、日本、美国、西班牙、英国

以及我国西南交通大学相继研发了氢燃料电池站场调车机车、矿用机车、工程作业机车等机车车型。氢燃料电池是一种将氢和氧的化学能通过电极化学反应直接转化为电能的装置, 且因反应生成物为水, 对环境无污染、发电效率较高、运行噪声小, 在新能源车辆领域得到国内外重视。

中车青岛四方机车车辆股份有限公司最新研制的100%低地板有轨电车有弓网和储能2种供电方式, 由接触网通过受电弓供电, 或者由车载动力电池、超级

电容组成的复合储能系统供电。当受限于城市现有基础设施和景观要求, 线路无法设置供电网络时, 有轨电车必须工作于离线模式。如果离线运行线路过长, 此时原车复合储能系统能力不足, 在系统中需集成燃料电池, 以燃料电池作为里程延长器, 从而形成“燃料电池 + 动力电池 + 超级电容”(或称为“燃料电池 + 复合储能系统”)的混合动力系统。

1 结构分析

氢燃料电池有轨电车“燃料电池 + 动力电池 + 超级电容”的动力系统结构如图 1 所示。

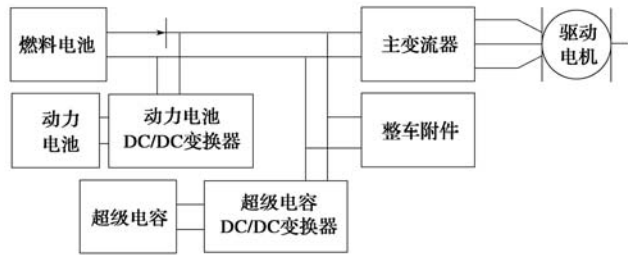


图 1 氢燃料电池有轨电车动力系统结构

燃料电池为质子交换膜氢燃料电池 (PEMFC), 工作电压 440~710 V, 工作电流最大 320 A, 额定功率 150 kW, 允许短时过载 180 kW; 动力电池为钛酸锂电池组, 容量 60 A·h, 存储电能 20.7 kW·h, 额定电压 345 V, 持续功率 80 kW, 额定电流 232 A, 能量密度约 90 W·h/kg; 超级电容容量 15.75 F, 电压区间 150~480 V, 等效串联阻抗 18 mΩ, 峰值功率可达到 180 kW, 存储电能 450 W·h。

燃料电池和锂离子动力电池的电压 - 电流特性不同。燃料电池的特性较“软”, 体现为输出一定量的电流后, 电压下降迅速, 即等效内阻较大; 锂离子动力电池的特性较“硬”, 体现为输出一定量的电流后, 电压变化不大, 即等效内阻较小; 超级电容功率密度大、大电流放电能力强、充放电速度快, 能提供瞬时加速所需的较大功率。

燃料电池直接连接母线, 为实现动力电池和超级电容输出电压与母线电压的匹配, 同时保证能够向储能系统充电, 动力电池和超级电容在接入母线前, 分别设置了双向升降压型 DC/DC 变换器, 从而形成 3 条供电支路。母线输出电能主要用于给主变流器供电, 驱动电机运行, 此外还提供车载空调、空压机、照明、多媒体等整车附件系统所需电能。

2 控制方法

车辆控制模式为基于母线电压的自动切换模式。整车控制器检测司控器位置信号、母线电压和车速信号, 协调燃料电池、动力电池和超级电容 3 个动力源。司控器挡位信号用于判定车辆加减速情况, 母线电压用于动力源的切换, 车速信号结合机车动力学用于计算整车功率需求。燃料电池有轨电车功率计算过程如

表 1 所示。

1) 整车功率需求

燃料电池有轨电车功率需求采用逆向计算方法, 首先根据机车动力学获取整车功率需求, 然后分别计算电机电功率和附件电功率需求, 从而得到母线直流侧功率需求, 推导过程详见表 1。

表 1 燃料电池有轨电车功率计算

计算内容	计算公式	符号注释
基本阻力	$F_0 = m g p_0 / 1000$, $p_0 = 5 + 0.06 v_{\text{tram}} + 0.00262 v_{\text{tram}}^2$ (原车文档提供), $p_0 = 4.3585 - 0.0803 v_{\text{tram}} + 0.0015 v_{\text{tram}}^2$ (匀速工况拟合得到)	p_0 为基本阻力系数, 为车速二次多项式拟合曲线, m 为车质量, v_{tram} 为有轨电车速
坡度阻力	$F_s = m g p_s / 1000$	p_s 为坡度阻力系数, 取 0
弯道阻力	$F_R = m g P_R / 1000$, $P_R = 650 / (R - 55)$	P_R 为弯道阻力系数
加速力	$F_a = \delta m a$	δ 为转动惯量转换系数, a 为加速度, 匀速时为 0
总驱动力	$F_{\text{drv}} = F_0 + F_s + F_R + F_a$	总驱动力为各阻力与加速力之和
车辆驱动功率	$P_m = P_{\text{tram}} = F_{\text{drv}} v_{\text{tram}}$	也是电机输出功率
电机输入电功率	$P_{\text{me}} = P_m / \eta_m$	η_m 为电机效率
附件输入电功率	$P_{\text{auxe}} = P_{\text{aux}} / \eta_{\text{aux}}$	η_{aux} 为附件效率
母线直流侧功率需求	$P_e = P_{\text{auxe}} + P_{\text{me}}$	
驱动模式下功率分配	当 $V_{\text{bus max}} > V_{\text{bus}} > V_1$, $P_{\text{fc}} = P_e$; 当 $V_1 \geq V_{\text{bus}} \geq V_2$, $P_{\text{fc}} + P_{\text{bat}} / \eta_{\text{batdc}} = P_e$; 当 $V_1 > V_{\text{bus}} > V_{\text{bus min}}$, $P_{\text{fc}} + P_{\text{bat}} / \eta_{\text{batdc}} + P_{\text{uc}} \eta_{\text{ucdc}} = P_e$	η_{batdc} 、 η_{ucdc} 分别为动力电池、超级电容 DC/DC 变换器效率
制动模式下功率分配	$P_{\text{fc}} = P_{\text{auxe}}$; 当超级电容没充满, $P_{\text{uc}} = P_{\text{me}}$; 当动力电池没充满, $P_{\text{uc chg max}} + P_{\text{bat}} = P_{\text{me}}$; 当电池和电容都充满, $P_{\text{uc chg max}} + P_{\text{bat chg max}} + P_{\text{rst}} = P_{\text{me}}$	$P_{\text{bat chg max}}$ 、 $P_{\text{uc chg max}}$ 分别为动力电池和超级电容最大充电功率

总驱动力 F_{drv} 克服基本阻力 F_0 、坡度阻力 F_s 、弯道阻力 F_R 后产生加速力 F_a , 驱动车辆运行, 因此, 总驱动力由阻力和加速力求和得到。基本阻力计算是受力分析的关键环节, 原车标定的系数 $(a, b, c) = (5, 0.06, 0.002\ 62)$, 因不满足实车工况, 需重新标定。本文采样多组匀速工况下的车速和功率数据, 利用二次多项式重新拟合了基本阻力系数 $(a, b, c) = (4.358\ 5, -0.080\ 3, 0.001\ 5)$ 。

由表 1 可知, 车辆驱动功率 P_{tram} 等价于电机输出功率 P_m , 由总驱动力 F_{drv} 与当前车速乘积得到 P_{tram} 。考虑到电机旋转运动过程的机械损耗, 电机效率以 η_m 计, 从而得到电机输入端电功率 P_{me} ; 同理, 根据整车附件输出功率 P_{aux} 和附件效率 η_{aux} , 求得附件输入端电功率 P_{auxe} 。上述 2 个电功率求和得到母线直流侧功率需求 P_e 。母线直流侧功率需求 P_e 又是燃料电池、动力电池和超级电容所输出的功率 P_{fc} 、 P_{bat} 、 P_{uc} 总和, 即功率需求在 3 个动力单元之间分配。车辆驱动模式和制动模式下, 功率分配应用不同控制方法, 详见图 2。