

基于车载用燃料电池直流变换器的研究及应用

姚乃元, 苏建徽

(合肥工业大学, 安徽 合肥 230001)

摘要: 通过对燃料电池的特性及碳化硅(SiC)功率器件分析, 研究适合车载用的高效率和高可靠性的燃料电池专用 Boost 变换器。通过对变换器的拓扑结构的优化、效率的提升及控制方法改进等方面研究, 设计了一款电压变换比大的适合燃料电池运行要求的高效及可靠运行的变换器。试验样机测试证明, 该变换器具有良好的动态和稳态控制特性、效率高, 可实现燃料电池的稳定输出运行, 有效保护了燃料电池, 进一步延长了燃料电池寿命。

关键词: 燃料电池; Boost; 载波移相; 直流变换器

中图分类号: TN 624 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)07-0073-05

Research and Application of Automotive Fuel Cell DC Converter Based on Vehicle

YAN Naiyuan, SU Jianhui

(Hefei University of Technology, Hefei 230001, China)

Abstract: Through the analysis of the characteristics of fuel cells, the main research for vehicle-mounted fuel cell power electronics converter was given. Through the optimization of the topology of the Boost converter, the improvement of the efficiency and the improvement of the control method, the design of an efficient and reliable converter suitable for the fuel cell with a large voltage conversion ratio was designed. Through experimental tests, it was proved that the converter could realize stable output operation of the fuel cell, effectively protect the fuel cell, further prolong the life of the fuel cell, and prevent the battery characteristics from being lowered.

Key words: fuel cell; Boost; carrier phase shifting; DC converter

0 引言

燃料电池是一种电化学的发电装置, 属于高效的绿色发电技术, 不同于传统内燃机。燃料电池通过电化学反应释放, 其等温的按电化方式直接将化学能转化为电能。与燃烧相比, 电化学反应能量转化效率高、无噪声、零排放、无污染, 是理想的清洁能源, 在交通运输领域燃料电池汽车被视为新能源汽车的终极绿色解决方案。但是燃料电池产生的直流电不稳定, 输出伏安特性偏软, 动态响应性能慢, 不适合直接应用, 因此需要在其输出端配备直流变换器, 通过变换器进行调节、控制和管理电源输出, 以满足汽车的能量控制管理

需求。

本文主要研究适合车载用的燃料电池专用电力电子直流变换器。通过优化变换器的拓扑结构、碳化硅场效应管(SiC-MOSFET)的选用及控制方法改进等方面研究, 设计一种适合燃料电池的高效、可靠运行的变换器。通过试验测试证明该变换器可实现燃料电池的稳定输出运行, 能有效保护燃料电池, 进一步延长燃料电池寿命, 防止电池特性降低。

1 燃料电池特性

质子交换膜燃料电池的输出伏安($U-I$)特性如图1所示, 其中, 输出电压是电化学反应能力的特性

作者简介: 姚乃元(1997—), 男, 研究方向为新能源材料与器件。

苏建徽(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源技术和电力变换控制技术等。

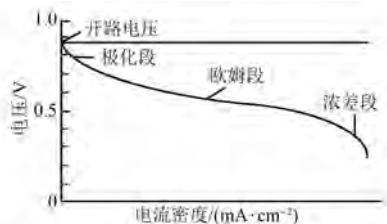


图1 燃料电池的输出伏安特性

反映,输出电流是质子导通能力的反映, $U-I$ 的变化关系是电堆在不同功率段的输出特性体现。按其化学反应及工作损耗特性,可分成3种极化,即活化极化段、欧姆极化段、浓差极化段。实际燃料电池的不可逆损失常被称为极化过电势或者过电压。这些损失会导致燃料电池电压小于理想电势。

由图1可以看出,燃料电池工作具有电压变化范围宽、电流大的特点,因此适配的直流变换器要具备适应3种极化阶段工作的性能。

2 燃料电池用直流变换器理论分析

基于燃料电池的一种发动机动力系统构成如图2所示,包括燃料电池、直流变换器、储能单元、动力驱动变换器等主要部件。

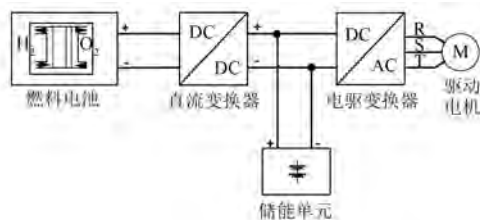


图2 燃料电池发动机动力系统

储能单元可以是储能电池、超级电容等。本文研究的动力系统选取锂离子电池为储能单元,其中质子交换膜燃料电池为主电池,储能单元为辅助电池。燃料电池为车辆行驶中提供稳定的能量,并对锂电池充电;汽车加减速瞬态过程中由锂离子电池快速补充能量或吸收回馈能量。

根据燃料电池的特性,其车载用配套直流DC/DC变换器应具备输入电压低且变化范围宽、输入电流大、输出电压高且变化范围宽、转换效率高、可靠性高等特点。本文选择非隔离Boost变换器作为研究对象。该变换器具有拓扑简单特点,如图3所示。

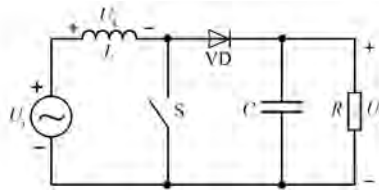


图3 Boost变换器

在连续工作模式下,输入电压与输出电压关系^[1]为

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1-D} = M \quad (1)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2)$$

式中: U_i ——输入电压;

U_o ——输出电压;

D ——占空比;

M ——电压增益;

T_s ——开关周期值, $T_s = T_{on} + T_{off}$;

T_{on} 、 T_{off} ——开关管开通、关断时间。

式(1)为电感电容无寄生电阻的理论升压关系式。由于电感与电容存在等效串电阻,导致占空比 D 和电压增益 M 受限。根据文献[2]实际验证,其最大峰值为

$$D_{max} = 1 - \sqrt{\frac{R}{R_L}} \quad (3)$$

$$M_{max} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R}{R_L}} \quad (4)$$

式中: R_L ——电感的寄生电阻。

由式(4)可知,要实现高升压比输出,在输入电压与输出负载电阻不变的情况下,需要降低电感的等效串电阻 R_L 。

3 变换器电压增益与效率优化

直接将传统Boost变换器应用于燃料电池无法满足高效、高增益要求,需通过对其拓扑优化、功率器件选择、控制改进等使其适配燃料电池。采用改进型双相交错并联Boost变换器,拓扑结构如图4所示。

该拓扑结构可有效提高开关频率,等效频率为单管频率的2倍。由于采用并联结构,输入电感的等效串电阻更低,根据式(4)可知,相对单个Boost拓扑电压增益可提高约1.4倍,即电压增益更高。

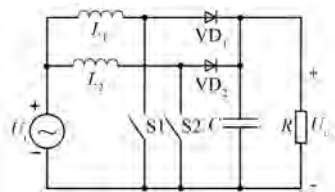


图4 改进型双相交错并联 Boost 变换器

传统高压大功率 Boost 器件多采用绝缘栅极双极型晶体管 (IGBT) 与快恢复二极管 (FRD) 构成, 由于 IGBT 自身特性, 开关频率低、损耗高, 电感量及等效串电阻大。采用 SiC-MOSFET 与肖特基势垒二极管 (SiC-SBD) 的方案则可使变换器具有开关频率高、体积小、效率高等优点。

由于 SiC 的绝缘击穿场强是 Si 的 10 倍, 所以能够以低阻抗、薄厚度的漂移层实现高耐压, 在相同的耐压值的情况下, SiC 可以得到单位面积导通电阻更低的器件。因此, 不需要对 SiC 器件进行电导率调制就能够实现高耐压、低阻抗、高开关频率。同时, SiC-MOSFET 原理上不产生尾电流, 门极电荷量 Q_g 和结电容较小, 用其替代 IGBT 时, 能够明显地减少开关损耗, 实现散热部件的小型化; SiC-MOSFET 开关频率远高于 IGBT 的工作开关频率, 从而实现电感、电容等被动器件的小型化。

3.1 开通损耗 E_{on} 的比较

在功率器件开通时, 回流臂上产生的恢复电流贯通到相对一侧, 从而使开关器件的开通损耗增大。SiC 器件构成二极管的恢复速度快, 反相恢复电流小, 使得 SiC 功率模块的开通损耗小, 且外部门极电阻小, 进一步降低损耗。IGBT 和 SiC-MOSFET 开通损耗对比如图 5 所示。

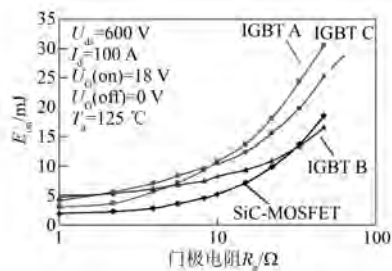


图5 开通损耗对比

3.2 关断损耗 E_{off} 的比较

IGBT 的关断损耗是由尾电流引起的, 对门极

电阻的依赖性不明显, 门极电阻一般较大。SiC-MOSFET 在原理上不存在尾电流, 所以可以超快速、低损耗地进行开关动作, 外部门极电阻阻值越低, 损耗越小。IGBT 和 SiC-MOSFET 关断损耗对比如图 6 所示。

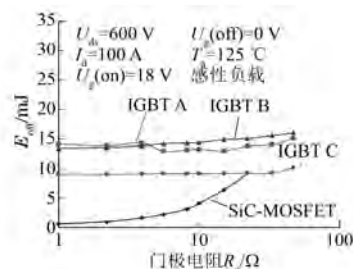


图6 关断损耗对比

3.3 恢复损耗 E_{rr} 的比较

IGBT 模块中因 FRD 峰值反向恢复电流与反向恢复时间很大, 导致恢复损耗较大; 而 SiC-SBD 的反向恢复电流和反向恢复时间非常小, 损耗值几乎可以忽略不计。IGBT 与 SiC-MOSFET 恢复损耗对比如图 7 所示。

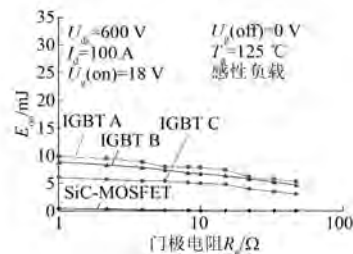


图7 关断损耗对比

3.4 总开关损耗 E_{sw} 的比较

在同等条件下, 对不同 3 家 IGBT 功率模块和 SiC-MOSFET 功率模块进行比较, 如图 8 所示。

从总开关损耗对比得到, 选择合适的门极电阻情况下, SiC-MOSFET 功率模块的总开关损耗 ($E_{on} + E_{off} + E_{rr}$) 能够比损耗最小的 IGBT 模块降低 85%, 即在高频应用中 SiC 功率器件比 Si 功率器

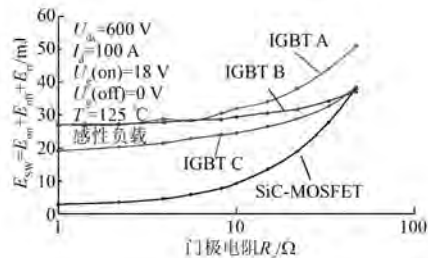


图8 总损耗对比

件具有明显的优势。

4 系统的硬件设计

本文设计了一款高效率、宽电压输入与输出的 Boost 变换器。以 30 kW 质子交换膜燃料作为输入电源,输入电压的范围为 125~265 V,输出电压范围为 450~690 V,输入最大电流为 190 A。根据输入、输出电压范围知,最大电压变换系数 $M_{\max}$ 为 5.52, R_L 约为 0.008 Ω 。为降低 R_L 值,选择双相交错并联型 Boost 拓扑,两电感规格相同,电感量为 0.08 mH,电感等效电阻为 0.127 Ω ;为获得低纹波的输出电压,输入电容选择 200 μF ,输出电容选择 500 μF 。

项目选用碳化硅功率模块和碳化硅二极管作为主电路的器件,其开关频率可工作高达 100 kHz,二极管恢复电流小,开关损耗小。由于大功率条件下电感选材与制作工艺难度高,综合优化后系统开关频率设计为 36 kHz,总等频率为 72 kHz,电路结构简单,重量轻。系统构成及控制如图 9 所示。

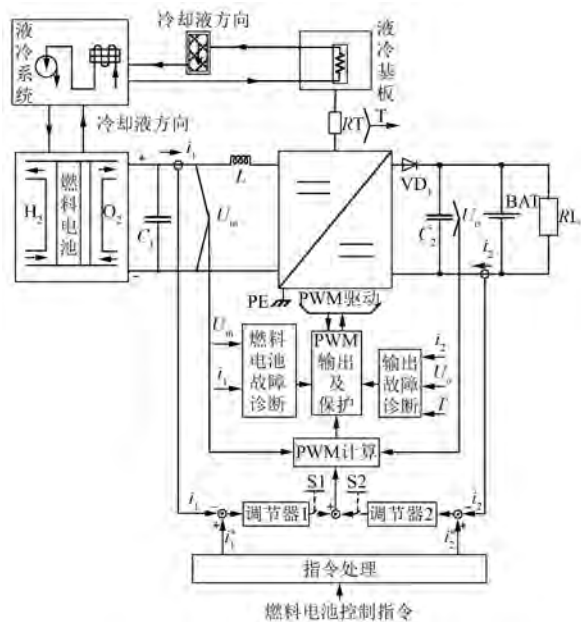


图9 系统构成及控制图

系统构成包括:燃料电池、液冷系统、变换器用冷却基板、储能电容 BAT、等效负载 R_L 及控制单元等。变换器控制工作流程为:燃料电池为直流变换器的输入提供直流电源,燃料电池起动完成后,给出直流变换器的运行控制指令,直流变换

器根据指令进行电流闭环选择。

变换器可工作在输入电流闭环控制、输出电流闭环控制、输出功率闭环控制等不同闭环的控制模式,输出指令通过调节器 1 或调节器 2 进行电流内环控制,通过闭环反馈得到控制目标输出量。脉宽计算(PWM)单元根据调节器输出控制目标变量、输入电压、输出电压进行各功率器件的驱动信号的占空比计算,并送至 PWM 输出及保护单元,PWM 输出及保护单元根据故障单元的故障类型进行控制,若系统无故障,则正常输出至 PWM 驱动单元,直流变换器按指令进行工作,若系统出现故障,封锁 PWM 输出,功率器件全部关断。

由于是车辆用变换器,因此其特殊保护设计是控制重点之一。故障保护控制的实现按故障发生的来源,分别为来自燃料自身故障诊断单元、控制器及功率器件的 PMW 驱动保护单元、外部负载侧的输出故障诊断单元。燃料电池故障诊断由其控制系统通过对燃料电池的工作特性等运行数据对燃料电池的工作状况进行故障判定^[4],包括有膜过干、膜被水淹、电极异常、双极板输出能力下降等故障。控制器自身故障主要包括电压传感器失效、电流传感器失效、温度传感器失效、过热保护、存储器存储失效、I/O 控制失效及通信异常等故障。输出故障诊断单元通过输出电压、电流及其变换特性对外部负载侧进行故障诊断,主要有过压、欠压、过流、短路等故障。故障保护单元根据故障类型按对应的保护策略进行稳压、升压、降压、限流、稳流、降功率、升功率、停机、断开输入等保护控制。

系统通过以上几大功能单元及电流、电压多闭环的跟踪控制,具有瞬时电流快速响应及良好的稳态特性,电流、电压跟踪的相位误差和幅值跟随控制误差小,可按燃料电池控制指令使变换器工作在燃料电池输出的最佳性能上,同时具有完善的诊断保护,满足燃料电池输出要求。

5 试验分析

根据燃料电池的 3 个极化阶段工作特性要求,燃料电池专用直流变换器样机如图 10 所示。

为了验证硬件设计的可靠性及控制策略的对控制指令的响应稳态、动态特性,图 11~图 17 给出了冷却系统温度为 65 $^{\circ}\text{C}$ 的不同负载条件下的



图 10 燃料电池专用直流变换器

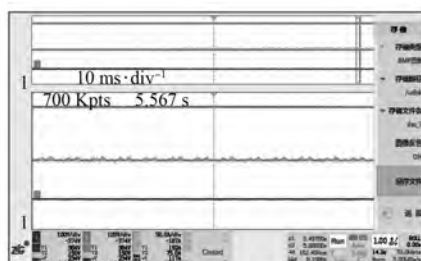


图 11 150 V 升压至 690 V 电压、电流波形



图 12 燃料电池输出 20~190 A 电流波形

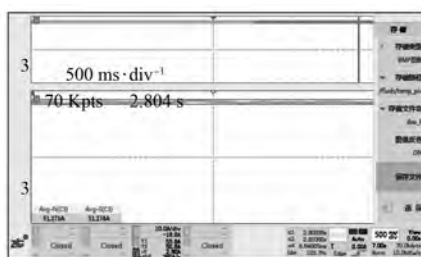


图 13 燃料电池输出约 51 A 的电流纹波

运行波形图及系统转换效率对比图。

从图 11~图 17 可以看出,系统的动态与稳态特性满足设计要求指标。190 A 额定电流工作下纹波电流峰值 5.5 A,纹波电流占比约为 2.9%;21% 额定负载,即 51 A 输入电流的纹波电流为 1.4 A,纹波电流占比约为 2.7%。实测证明,在不同功率范围内输入电流纹波均小于 5% 的设计要求。从 SiC-MOSFET 的 V_{DS} 波形和系统变换效率可知,由于碳

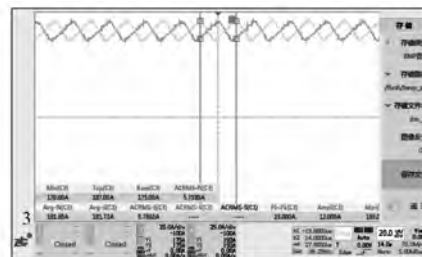


图 14 燃料电池输出约 51 A 的电流纹波

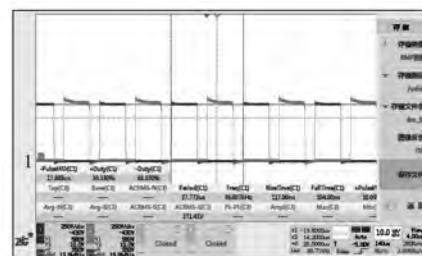
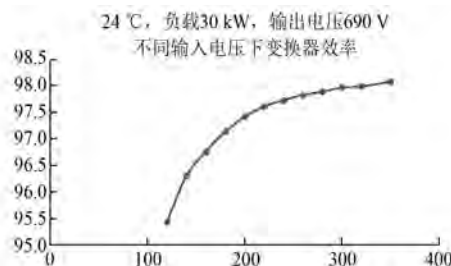
图 15 碳化硅开关 U_{DS} 电压波形

图 16 不同输入电压下系统转换效率

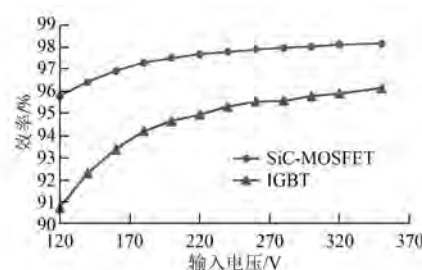


图 17 IGBT 与 SiC-MOSFET 系统效率对比

化硅二极管具有较小的反向电流和快速关断特性,使 SiC-MOSFET 开通关断的开关电压振荡较小,无需软开关就可实现高效变换。通过效率曲线可以看出,系统最高效率达到 98.08%。

试验对各保护功能进行了验证,由于该电路非隔离,当输出端发生短路时,样机经过软件及控

(下转第 83 页)

平台中采用变频驱动系统控制,通过变频软启动及变频调速控制,在电机绕组内部埋置 PT100 温度传感器监测。



图 12 电机的温升试验测试平台

表 4 所示为电机转速为 740 r/min 时,功率分别为 2 400 kW 和 2 800 kW 运行时绕组温升试验值与仿真计算值。

表 4 仿真计算值与试验结果的比较

运行工况	定子绕组温升/K	
	试验值	仿真值
2 400 kW	54	52
2 800 kW	73	71

由表 4 可知,电机在额定转速下,功率为 2 400 kW 和 2 800 kW 运行时,绕组温升的试验值和计算值基本吻合,验证了热流耦合仿真分析方法的准确性。

5 结 语

(1) 大功率低速异步变频电机建议在冷却器顶部加离心风扇,采用顶吸式强迫通风冷却系统,可有效地解决功率密度高、内部风阻大的问题。

(上接第 77 页)

制电路优化对短路进行控制,有效地防止了短路造成系统停机、开路等不必要的损坏维修。

6 结 语

本文主要研究了燃料电池新能源汽车专用直流变换器问题,并以电动汽车动力系统需求为目标,选择新一代碳化硅功率半导体器件设计了一款燃料电池专用高效变换器。该变换器具有高耐压比、高效率、高可靠的特点,适用于 30 kW 燃料电池汽车。通过对变换器的拓扑结构的优化、效率的提升及控制方法改进等方面的研究测试,证明该变换器可实现燃料电池的稳定输出运行,有

(2) 电机定子齿压板宽度参数是电机内风路风量分配、温升分布和风阻特性的敏感因素。通过调整宽度尺寸,探索了风量、温升及风阻的内在规律,为该机组通风系统的设计提供了重要依据。

(3) 通过对三相和九相电机槽绝缘的结构分析和温度场仿真计算,采用九相减薄绝缘结构线圈,可有效地提升电机的功率密度。

(4) 电机在额定转速下,功率为 2 400 kW 和 2 800 kW 运行时,绕组温升的试验值和计算值基本吻合,说明了热流耦合仿真分析方法的可行性。

【参考文献】

- [1] DING S Y, LIU H R, SUN Z Q, et al. Research of fluid flow characteristic inside radial ventilation duct for large generator [C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010: 93-98.
- [2] 丁树业, 孙兆琼, 姜楠, 等. 大功率双馈风力发电机内部流变特性数值仿真[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(4): 28-34.
- [3] RAJAGOAL M S. Finite element analysis of radial cooled rotating electrical machines [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 1999, 9(1): 18-38.
- [4] 廖毅刚, 侯小全. 全空冷汽轮发电机通风冷却研究[J]. 东方电机, 2007(5): 1-12.
- [5] 丁树叶. 复杂结构内流体流动与传热特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008.
- [6] 路义萍, 郑国丽, 李俊亭, 等. 空内冷汽轮发电机的转子多路通风均匀性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 99-104.

收稿日期: 2018-06-15

效保护燃料电池,从而进一步延长燃料电池寿命,防止损坏燃料电池使其性能降低。

【参考文献】

- [1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [3] ROHM Co., Ltd. SiC 功率模块的基本使用方法[G]. 日本: 罗姆半导体集团, 2015.
- [4] 全睿. 燃料电池发动机故障诊断研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.

收稿日期: 2018-03-05