

电动汽车用永磁同步电机控制器设计*

黄其^{1,2}, 陈翔², 罗玲¹, 薛利昆¹

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072;

2. 江苏中车电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 电动汽车逐渐成为人们出行的交通工具之一, 对技术可靠性和安全性的要求较高。电机控制器是实现电池直流电源向三相交流电源转换的装置, 驱动永磁同步电机(PMSM)输出力能。设计了一款基于瑞萨单片机的PMSM控制器, 从元器件选型、硬件保护电路原理、PCB布局、控制算法、结构强度和热分析方面展开分析。最后生产控制器样机并搭建试验平台, 对PMSM控制器进行了效率特性测试、发电测试和温升测试。试验结果验证了设计方案的合理性。

关键词: 永磁同步电机; 硬件保护; PCB布局; 弱磁; 温升

中图分类号: TM 351:U 469.7 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)10-0084-08

Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Controller for Electric Vehicle*

HUANG Qi^{1,2}, CHEN Xiang², LUO Ling¹, XUE Likun¹

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Jiangsu CRRC Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Electric vehicles were gradually used in people's daily transportation, and the requirements of their technical reliability and safety were very high. The motor controller was a device that converted the battery DC power supply to the three-phase AC power supply, and then drove the permanent magnet synchronous motor (PMSM) of electric vehicles. A PMSM controller based on Renesas microcontroller was designed. Analysis was carried out from the aspects of component selection, hardware protection structure principle, printed circuit board (PCB) layout, control algorithm, structural strength and thermal analysis. Finally, the prototype controller was produced and the experimental platform was built. The efficiency characteristic test, power generation test and temperature rise test were performed on the PMSM controller. The experimental results verified the rationality of the design.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); hardware protection; printed circuit board (PCB) layout; field weakening; temperature rise

0 引言

电动汽车以电机作为驱动机构。与传统燃油发动机汽车相比, 电动汽车起动力矩大、加速快, 省去了变速箱, 噪声减少, 行驶中没有尾气排放, 应用越来越广泛^[1]。永磁同步电机(PMSM)作为电动汽车动力机构, 频繁工作在正反转交替、电动和发电状态, 且要求同时有较大的过载能力和较

宽的调速范围, 因此控制器是实现电池直流电源向三相交流电源转换的装置, 驱动PMSM输出力能^[2]。

电动汽车在高速公路上行驶时, 大部时间处于匀速状态, 阻力较小, 此时电机应保持低转矩特性和高转速输出; 电动汽车在爬坡时, 电机的转速较低但输出力矩较大^[3-4]。因此, 电动汽车用电机驱动在低速区应有较高的转矩输出能力, 在低

* 基金项目: 贵阳市高新技术产业设计项目(GXCX-2017-012)

作者简介: 黄其(1986—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为新能源汽车设计、驱动控制和测试。

转矩时应有较高的转速输出能力,类似于传统汽车中不同挡位工作在不同的路况中。对于电动汽车驱动电机,在低速区电动汽车需具有好的转矩输出性能,应尽可能提高电机转矩输出能力;而在高速区,当电机转速增大时,电机绕组反电动势也随转速增大而上升,当达到额定转速时,反电动势也达到逆变器的最大值,此时若不采取弱磁控制,控制器会出现饱和失效现象,使电动汽车的性能指标降低。交流电机矢量控制是将电流分解为转矩分量和去磁分量,控制矢量电流的相位,就可以控制去磁分量和转矩分量,去磁分量的方向与永磁磁链方向相反,可以实现弱磁控制^[5],使得电机能在基速度以上运行,拓宽 PMSM 的调速范围。本文设计了一款电动汽车用 PMSM 控制器,介绍了其硬件组成、模块功能、PCB 结构布局、散热设计和程序算法设计;加工了控制器样机并搭建试验平台,对控制器进行了调速、效率、发电和温升测试。

1 控制器硬件设计

本文设计的电动汽车用 PMSM 控制器技术指标如下:额定电压 600 V,额定功率 36 kW,额定转速 5 600 r/min,额定转矩 61.4 N·m。峰值扭矩 180 N·m,峰值功率 56 kW,持续时间 1 min;最高转速 7 500 r/min,长时间运行。控制器最大效率大于 95%,重量小于 10 kg。位置传感器采用旋转变压器,温度传感器采用 PT100,冷却方式为水冷。

PMSM 控制器的硬件模块组由高压薄膜电容、主电路绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块、光电隔离驱动与保护、24 V 电源模块、母线电流检测模块、母线电压检测模块 6 大部分组成,如图 1 所示。控制器内控制板集成了控制电源、数模转换接口、驱动信号空间电压矢量调制(SVPWM)接口、旋转变压器位置信号接口、温度检测接口、控制器局域网络(CAN)通信功能接口、串行通信接口(SCI)程序下载及 IO 控制使能唤醒接口。

1.1 控制芯片

针对汽车安全等级需求和 PMSM 的控制特点,选用瑞萨电子 SH72AW/AY 微处理器。瑞萨 SH72AW/AY 是一款汽车级电机控制 DSP 芯片,工作温度范围是-40~125 ℃,嵌入专用旋变编码器 AU6802,多功能定时器脉冲单元 3(MTU3)

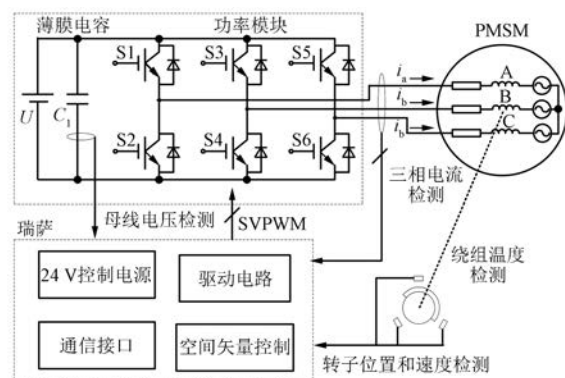


图1 PMSM 控制器系统框图

可实现 3 路互补脉宽调制(PWM)或矩形输出,2 路 16 bit 计数器,160 MHz 主频,精简指令集计算机(RISC),哈佛结构,实现高速的指令执行,I/O 口供电电压为 DC 5 V,控制电路简单。

1.2 直流母线滤波电容

目前,汽车电机控制器直流母线电容逐渐采用薄膜电容^[6]。薄膜电容使用高温聚丙烯膜作为介质,耐过压能力强、产品温度使用范围广(-40~105 ℃)、频率特性稳定、没有极性、能承受反向电压、通过耐纹波电流能力强、抗浪涌电流能力强、不易老化、使用寿命长。

1.3 功率器件

电动汽车功率器件厂家主要集中在欧美国家和日本等。其中,英飞凌、富士电机、三菱电机、赛米控等公司专门针对车用 IGBT 展开研究并成功推出了产品,能满足电动汽车需求。目前 ROHM 与 CREE 等公司已经开始提供 SiC 功率器件。该电机控制器采用赛米等公司生产的 SKiM 93 功率模块。SKiM 93 采用烧结芯片,无焊接分层,无故障温度循环数达 1 500 次。采用 AlCu 绑定线连接二极管和高性能导热硅脂,可使性能提升 23%。

1.4 功率器件驱动电路

功率器件工作在高频时,布线电感容易产生尖峰电压,必须注意布线电感和组件的配置。应设定的保护项目:过电流保护、过电压保护、栅极过压及欠压保护、安全工作区、过热保护。因为 IGBT 开关速度快,容易产生浪涌电压,所以必须设有浪涌钳位电路。Avago 公司的 ACPL-38JT 是汽车 IGBT 用栅极驱动光耦器,输出电流 2.5 A,集成了去饱和(VCE)检测和故障状态反馈。

ACPL-38JT 驱动芯片组成的 U 相驱动原理图如图 2 所示。为了保证驱动电路的可靠性,在电路中设计有滞后欠压锁定电路。当电源电压低于一定值时输出滞后欠压信号,以此对 IGBT 进行保护。为了保证输入 PWM 波出现上下管子直通,设计了输入互锁电路,上下桥的驱动信号分别

输入上桥驱动的 U_{IN+} 、 U_{IN-} 和下桥驱动的 U_{IN-} 、 U_{IN+} ,组合成导通与关断状态。为了提高 ACPL-38JT 驱动电路的驱动能力,采用推挽电路。输出电压 U_{OUT} 经过 2 个快速三极管推挽输出,使驱动电流增大^[7],能够快速驱动 1 200 V、450 A 的 IGBT 功率管。

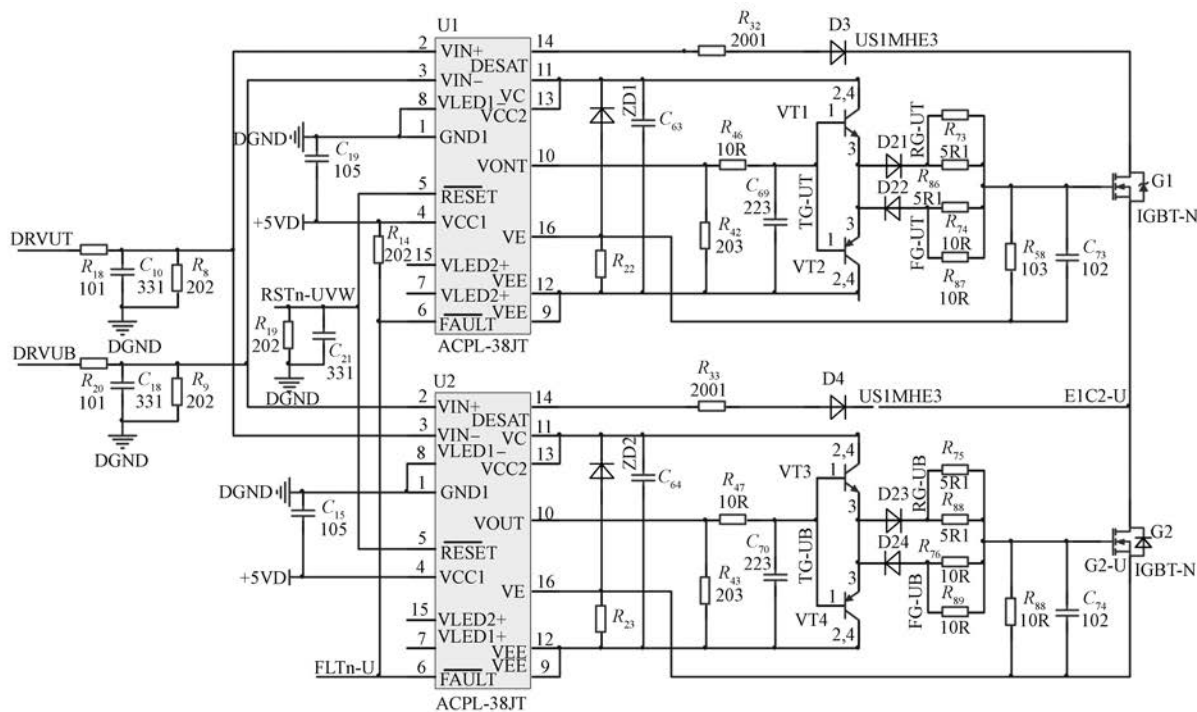


图 2 U 相驱动原理图

1.5 电流、电压检测

为了实现永磁电机矢量控制,需要采样电机三相绕组的电流值,进行坐标变换。同时在电机运行时要时刻监测母线电压和电流值,针对欠压、过压、过流情况对电机进行保护。

该电机控制器采用莱姆 HC5F300S 电流传感器检测直流母线电流,采用莱姆 HC5F400S 检测电机三相绕组电流。HC5F 系列用于测量直流、交流及脉冲电流,主要应用于大功率、低电压的汽车。在一次侧电路(大功率)和二次侧电路(电子电路)间采用电气隔离设计。该系列的传感器在同一封装中可以选择不同的峰值电流($\pm 200 \sim \pm 900$ A)。电机控制器的母线电压检测采样电阻分压法,电压传感器采用 ACPL-C87 芯片,如图 3 所示。图 3 中,UP 点接母线正极,母线负极和 E2-W 是连通的,采样电阻为 10 个 100 k Ω 电阻和

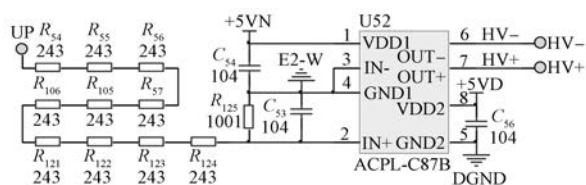


图 3 母线电压检测

1 个 2 k Ω 电阻串联,母线额定电压 600 V 时,采样电路电阻功耗为

$$P_R = \frac{U^2}{R} = \frac{600^2}{1\,002\,000} \approx 0.36\text{ W} \quad (1)$$

式中: P_R ——电阻功耗;

U ——母线额定电压;

R ——电阻。

11 个采样电阻的封装均为 0805 (1/8W) 封装。在母线最高电压 750 V 时,每个电阻的分压约为 75 V,在 0805 (1/8W) 封装要求的安全工作

电压范围内。

Avago 公司的 ACPL-C87x 光隔离放大器采用先进的光电耦合技术,并且由于整合了 Sigma-Delta($\Sigma-\Delta$) 模数转换器、斩波稳定放大器和全差分电路拓扑,差分输出设计提供超越其他产品的隔离模式噪声抑制、低偏移、高增益精确度和稳定性。图 4 中 ACPL-C87B 的 2 脚 U_{in+} 由 R_{125} 电阻分压输入,当母线电压为 600 V 时,有:

$$U_{IN+} = 600 \times \frac{2}{1\ 002} \approx 1.198\text{ V} \quad (2)$$

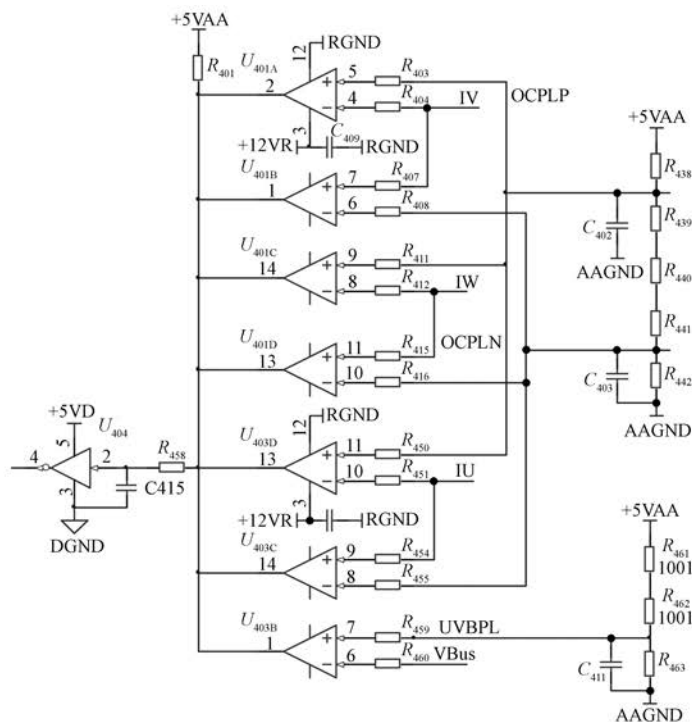


图 4 硬件保护电路

电流保护值定标:电流传感器型号 HC5FW 400-S_SP1 额定电流 0~400 A 时输出电压变化范围 0.5~4.5 V。根据设计要求计算,需要将保护电流设置为 ± 360 A,换算成正负电流的输出电压保护值分别是 4.3 V 和 0.7 V。分压电阻 R_{438} 、 R_{439} 、 R_{441} 、 R_{442} 值均为 1 k Ω ,分压电阻 R_{440} 值为 3 k Ω ,阻值用 1% 精度。

电压保护值定标:电压传感器输出电压 1 V 代表一次性母线电压 500 V,经过运放放大 1.5 倍。若电压为 1.5 V,则母线电压为 600 V,电压范围 400~750 V。试验时将过压保护设定为约 785 V,整定保护电压为 2.26 V,修改分压电阻

改变 R_{125} 电阻值即可改变 U_{in+} 的电压值。ACPL-C87B 的差分输出信号经过运算放大器放大后输入控制芯片的 AD 采样口。

1.6 硬件保护电路

当控制器母线电流和电机的任一相绕组电流传感器检测出现过电流故障时,或控制器母线有过电压情况发生时,比较器芯片 NCV2901DR2G 输出低电平,经过滤波后接入单片机的外部中断引脚,快速产生保护中断,如图 4 所示。

R_{462} 、 R_{461} 值为 2 k Ω ,修改电阻 R_{463} 值为 3.3 k Ω ,阻值用 1% 精度。

2 控制器结构设计

2.1 PCB 布局

PCB 电路板布局操作遵照“先大后小、先难后易、均匀分布、重心平衡、版面美观”的布置原则,即重要的单元电路、核心元器件应当优先布局。布局中应参考原理框图,根据单板的主信号流向规律安排主要元器件。驱动电路中隔离光耦驱动芯片 ACPL-38JT 的电源、PWM 输出及对管放大电路是驱动板的重要单元电路,应该优先布

局。同时,要考虑电路板的电磁兼容问题,原因是信号回路面积过大,不仅会产生较强的电磁辐射,而且会使电路对外界干扰敏感。要改善线路的电磁兼容性,最简单的方法是减小敏感信号的回路面积。控制器驱动板 PCB 电路板如图 5 所示。

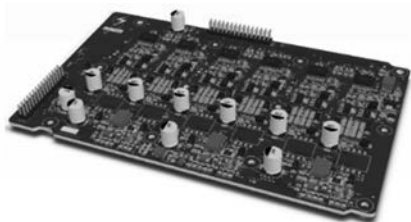


图 5 控制器驱动板 PCB 电路板

该电机控制器的元器件均采用汽车级认证器件,温度特性范围是 $-40 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。除了信号连接的双排直插排针和排母以外,其他器件均采用贴片元器件,体积小、重量轻、容易保存,体积和质量只有传统插装元件的约 1/10。采用贴片技术电子产品体积缩小 40%~60%,质量减轻 60%~80%,抗振能力增强、焊点缺陷率低、高频特性好,减少了电磁和射频干扰,易于实现自动化,提高了生产效率,降低了成本。

2.2 散热设计

电动汽车要求电机具备较大的过载能力,但是电机过载时通常会带来较大的温升。为了获得较高的过载能力和功率密度,电机和控制器通常采用螺旋水道的水冷却方式,使流体的速度均匀化,流动阻力减小,从而提高散热能力。

电机控制器功率模块散热的基本途径主要有:热传导、热对流和热辐射 3 种^[8]。与其他固体半导体器件相比,IGBT 对温度的敏感性更强。IGBT 损耗主要由 IGBT 和续流二极管 2 个部分组成,分别包括开通损耗、关断损耗、通态损耗、截止损耗和驱动损耗 5 大部分。在散热设计时需先从热传导方面考虑,因为热量首先从 IGBT 封装模块中传导到散热器。为了便于散热,IGBT 等功率器件直接安装在散热器表面,结温升高后,元器件表面散出的大部分热量通过底座直接传导到散热器上,再通过水冷的方式将热量散发至周围环境的空气中。螺旋散热水道如图 6 所示。

2.3 轻量化结构设计

为了减轻电机控制器的质量,控制器机壳、端

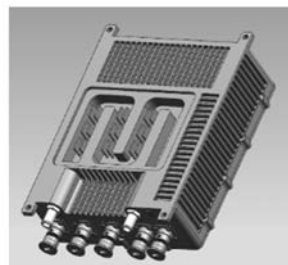


图 6 螺旋散热水道

盖均采用压铸铝合金 YL113/ADC12(压铸模铸件),抗拉强度 $R_m \geq 230\text{ MPa}$,并对机壳和端盖进行了局部减重。但支撑材料的减少会导致支撑能力的减低,因此必须对控制器的结构进行强度分析。使用 UG 软件的仿真分析应用模块,分别对盖板、箱体、安装吊耳等进行仿真分析,如图 7 所示。

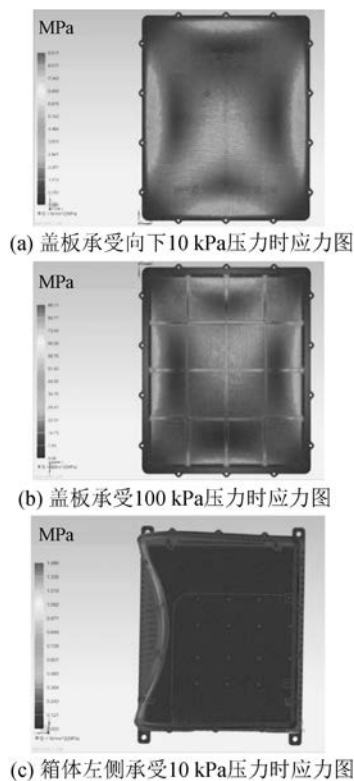


图 7 机壳强度仿真

对比承受 10 kPa 压力仿真分析结果,压力盖板最大应力为 8.80 MPa,箱体最大应力为 2.00 MPa(后部承受压强时),箱体吊耳最大应力为 0.04 MPa,均远小于材料的抗拉强度。结构中盖板承受 100 kPa 压力仿真分析结果显示,最大应力为 88.20 MPa,仍小于材料抗拉强度。

3 控制器软件设计

3.1 主程序结构

电机控制器的软件开发环境是瑞萨 High-Performance Embedded Workshop 软件。整个程序分为初始化程序、变量定义程序、主程序、中断处理程序和循环程序。初始化程序完成相关控制寄存器的初始化,变量定义程序完成变量的定义和初始值的设置,一般针对全局变量的定义,然后进入开环起动程序,完成后进入闭环运行程序。当中断到来时,响应并执行相应的中断服务子程序。中断服务子程序包括 SVPWM 中断服务子程序、CPU 定时程序和外部中断保护子程序等。主程序流程图如图 8 所示。利用 CPU 定时程序来实现实时性较高的检测保护功能,控制器上电时进行检测判断以保证安全运行。

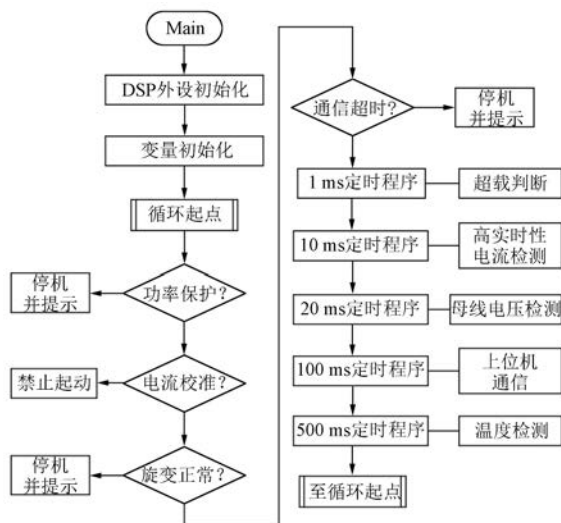


图 8 主程序流程

3.2 电机控制程序

瑞萨 SH72AWAY 提供了多种中断资源入口。在电机控制系统中,电流电压值的检测,错误信号标志位的检查,模糊逻辑控制器计算,空间矢量电压输出,均通过 EVA 接口的定时器中断完成,是程序的主中断程序,也是完成电机控制的最主要的软件模块。主中断程序流程图如图 9 所示。

控制板还包括了硬件看门狗功能的设计和硬件电流保护功能的设计。运用全数字核心控制算法,除了包括深度弱磁技术、死区补偿技术、抗积分饱和 PI 技术、解耦技术等磁场定向控制技术

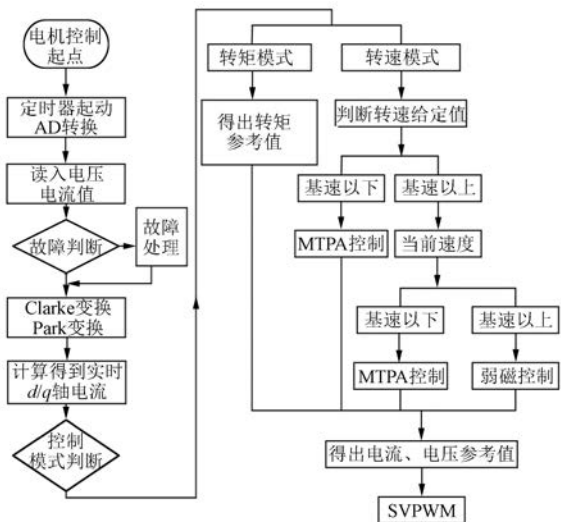


图 9 主中断程序流程图

外,为了满足电动车辆的高度可靠性和安全要求,数字化车用驱动控制系统还要求具有故障监控、故障保护和自诊断等功能,以提高控制器的安全性能。

4 样机试验

4.1 样机与试验平台

电机控制采用模块化零件技术,利用插针拼接,模块之间不需要连线,外形整洁,方便组装和维修;功率模块采用非焊接的压针技术,减少加工工序;采用定制化薄膜电容,长方形形状能有效利用机壳空间,减少机壳体积和质量;控制器接线端采用航空接头,连接简便,安装牢固安全,省去了以前打开接线盒拧螺丝固定工序。整个控制器从原材料和加工工序上降低了生产成本。控制体积减少到原来的 1/3,质量从 35 kg 减少到 10 kg,更适合轻量化新能源汽车。前后 2 种控制器如图 10 所示。

整个电机和控制器测试系统如图 11 所示。电源柜将外部三相交流电源整流成直流电源:(1)经过稳压直流电源给 PMSM 控制器供电;(2)供给变频器控制负载变频电机,变频电机给被测 PMSM 加载。功率分析仪 EV3000 有四路测量通道,其中一路采用单表法测量 PMSM 控制器的直流母线电压和电流,另外三路通道采用三表法测量 PMSM 的三相绕组电压电流^[9];转速转矩传感器测量 PMSM 的输出。测量信号通过网线传输

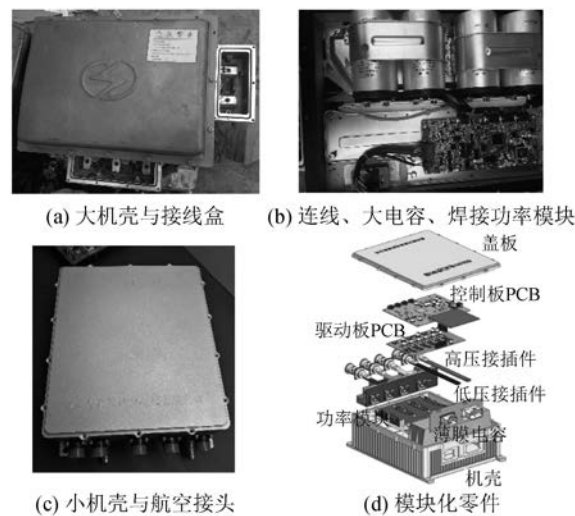


图 10 前后 2 种控制器

给上位机显示,可实现测量数据的数值和波形显示、谐波分析和数据图像保存等功能。

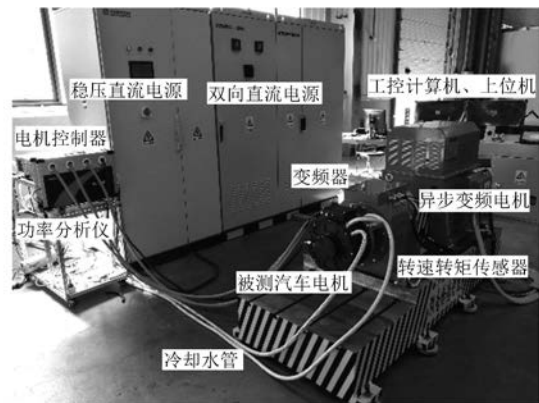


图 11 测试系统

4.2 电机弱磁升速测试

系统设计要求最高转速为 7 500 r/min,经过试验测试,轮边电机转速 6 500 r/min 以上时,需要增加去磁电流,才能继续提高系统轮边电机转速。

图 12 所示为 6 600、7 000、7 500 r/min 下去磁电流随功率增加时的施加情况。可以看到在 6 600 r/min 时,去磁电流从 0 A 增加到 10 A; 7 000 r/min 时,需要一开始就施加去磁电流,并随着功率的增加从 15 A 增加到 35 A;最高转速 7 500 r/min 时,去磁电流从 35 A 电流开始,并最终增加到 50 A。

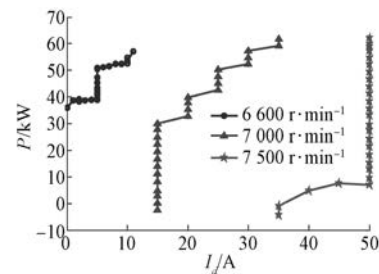


图 12 不同转速时的去磁电流

4.3 控制器效率曲线测试

对 PMSM 和控制器在低速、中速、额定转速和最大转速下加额定负载 61 N·m,测得电机控制器的输入直流母线和输出三相交流的电压、电流、功率如表 1 所示。PMSM 控制器在低速 (10.6 kW, 1 500 r/min, 61 N·m) 时效率为 94.64%,在中速 (25.7 kW, 3 600 r/min, 61 N·m) 时,效率为 97.65%;在额定功率 (36 kW, 5 600 r/min, 61 N·m) 时,效率为 98.05%;在最大转速 (52.6 kW, 7 500 r/min, 61 N·m) 时,效率为 98.13%。

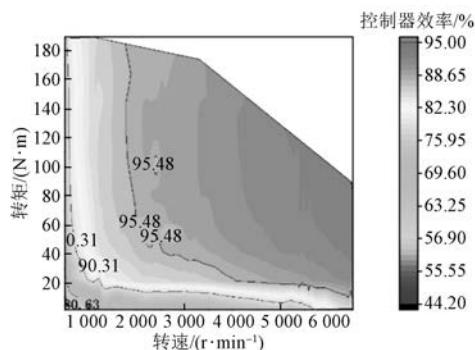
表 1 控制器测试数据

测试内容	直流母线			三相交流 (相平均值)			效率/ %
	电压/V	电流/A	功率/W	电压/V	电流/A	功率/W	
低速	599.9	17.70	10 627	100.8	59.40	10 039	94.64
中速	599.9	40.92	25 700	413.9	40.92	24 715	97.65
额定	599.4	64.54	38 684	409.8	65.05	37 465	98.05
最大	599.4	87.40	52 646	426.9	112.40	64 589	98.13
发电	600.1	83.61	50 181	340.0	201.79	53 090	95.40

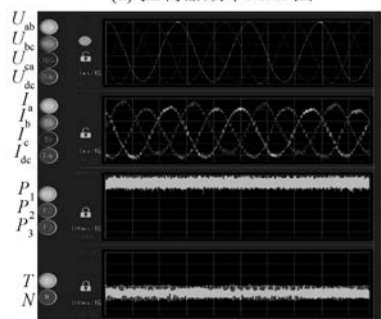
控制器效率 MAP 图如图 13(a) 所示,其中控制器效率最高位置在额定功率点附近,在 95% 以上;控制器效率大于 90% 的工况占总工况 90% 以上。图 13(b) 所示为永磁电机控制器的输出线电压、相电流、功率、转速、转矩随时间变化的波形,右侧波形显示了负载变换时的响应曲线,整个控制系统超调小、响应快。

4.4 发电试验

原动机拖动 PMSM 到指定的速度并稳定转速,电机控制器控制 PMSM 发电速度开环加载运行,测功机电动并稳定转速运行^[10]。表 1 展示了 PMSM 控制系统在超过峰值 56 kW 和发电输出功



(a) 控制器效率MAP图



(b) 线电压、相电流、功率、转速、转矩响应曲线

图 13 试验结果

率 60.6 kW 时的性能,当前转速 3 199.31 r/min,母线电压 600.16 V,发电母线电流 83.61 A,控制器效率 95.40%,PMSM 效率 86.81%,系统效率 82.81%。PMSM 及控制器系统最大峰值发电输出功率达到了 56 kW 以上,发电工况完全满足设计要求。

4.5 转速精度试验

测试电机的速度控制精度,根据试验要求额定转速下测试精度为 $\pm 0.2\%$,则 6 000 r/min 时,系统最大误差需在 12 r/min 以内。给定电机稳定转速为 6 000 r/min,给定电机转矩为 10 ~ 110 N·m,记录电机的转速情况,试验测试得到最大误差为 5.1 r/min,满足要求。

4.6 温升试验

测试条件:水流量 12 L/min。由于水冷系统有制冷功能,控制出水口温度为 30 ℃,水温控制在为 30 ℃,测试时间为 1 h。轮边电机转速设置为 5 600 r/min,功率为额定功率 36 kW,转矩为 60 N·m。控制器接水冷控制系统的出水口,进入轮边电机控制器的水温度约在 30 ℃,控制器 IGBT 的温度最高为 42 ℃。

5 结 语

由本文测试结果可知,PMSM 及控制器系统最大峰值电动输出功率达到了 60 kW 以上,最大峰值发电输出功率达到了 60 kW 以上,控制器发电状态最大功率达到 56 kW,PMSM 控制系统调速范围为 100 ~ 7 500 r/min,并且可以在最高速度 7 500 r/min 条件下长时间运行,满足设计要求。PMSM 及控制器满足峰值功率运行 1 min 的设计要求。

【参考文献】

- [1] 黄其,薛利昆,罗玲,等.电动汽车整车控制器设计及测试[J].自动化与仪表,2019,34(3): 14.
- [2] 罗川宁,郝润科,杨威.电动汽车中永磁同步电机转速的控制[J].测控技术,2018,37(1): 51.
- [3] PAWAR S B, LOKHANDE M M, KUMAR B H. Design of dynamic load for test bench setup of electric vehicle applications [C] // 2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), 2018.
- [4] 黄其,陈星宇,唐扬,等.电动汽车电机及控制器智能测试系统设计[J].自动化与仪表,2019,34(6): 63.
- [5] 郑洁.智能功率分析仪在电机自动测试系统中的运用[J].微电机,2018,51(8): 61.
- [6] 吕健璐,钱苏翔,张今朝,等.永磁同步电机互馈对拖测试实践应用[J].机械设计与制造,2017(3): 173.
- [7] WOO J, JUNG D, CHOI J, et al. A study on IPMSM design, as the load motor for the motor driving test of urban railway vehicle through HILS, for achieving high power density [C] // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016.
- [8] 徐英智,魏卫,朱君玮.基于 LabVIEW 的空间压气机电机负载模拟系统[J].自动化与仪表,2017,32(11): 60.
- [9] 王晓远,傅涛.基于模型预测控制策略的电动车用无刷直流电机回馈制动的研究[J].电工技术学报,2017,32(9): 16.
- [10] 黄其,罗玲,冯光亮,等.一种低成本四极串励电动机的设计与分析[J].微特电机,2013,41(10): 44.

收稿日期: 2019-07-03