

高速列车永磁同步牵引系统研究与应用

屈 斌, 詹哲军, 李 霞
(中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710016)

摘 要: 介绍了高速列车、轻轨、地铁等轨道交通领域永磁同步牵引系统技术在国内外的研究和产业应用现状, 分析说明了永磁同步牵引系统的技术优势、风险分析及预防措施。以 CRH5 型车为原型, 详细说明了永磁同步牵引系统样机设计过程的设计思路、关键技术和分析仿真试验。地面联调试验和装车考核结果表明, 牵引控制单元、辅助控制单元、控制算法等系统核心技术安全可靠, 系统效率提升 3% 以上。

关键词: 永磁同步牵引系统; 永磁同步电机; 高速列车; 牵引控制单元; 牵引辅助变流器

中图分类号: TM 922.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)08-0087-09

Research and Application of Permanent Magnet Synchronous Traction System for High-Speed Train

QU Bin, ZHAN Zhejun, LI Xia
(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: The foreign and domestic technology research and industry application status of permanent magnet synchronous traction system for rail transit field were introduced, involving high-speed train, light rail, subway and so on. The technology advantages, risk analysis and preventive measures of permanent magnet synchronous traction system were demonstrated. The design ideas, key technology and analysis simulation test for prototype design of permanent synchronous traction system were described in detail using CRH5 as prototype. Ground joint test and loading assessment results showed that the system core technologies such as traction control unit, auxiliary control unit and control algorithm were safe and reliable, and the system efficiency was improved by above 3%.

Key words: permanent magnet synchronous traction system; permanent magnet synchronous motor; high-speed train; traction control unit; traction auxiliary converter

0 引 言

随着我国高铁时代的来临, 高速铁路所承载的运营压力越来越大, 承担的任务也越来越重。目前高速列车广泛采用交流异步牵引系统, 但永磁同步电机相比异步电机, 具有结构简单、效率高、响应速度快等优势, 更能满足轨道交通车辆环保绿色、安全可靠的行业和技术发展要求, 得到了越来越多的用户关注。随着永磁材料性能的大幅度提升和控制算法的不断优化, 永磁同步牵引系统得到更加广泛的应用, 高效节能的永磁同步牵引系统正成为下一代牵引系统的发展方向^[1-5]。

20 世纪 90 年代, 欧洲、日本等国家最先开始研究永磁同步系统技术, 自 1997 年开始, 陆续有试验产品出现并成功应用到轻轨、高速列车、地铁等轨道交通领域并进行了装车考核。运行结果表明, 相比异步牵引系统, 永磁同步牵引系统有高效率、低速大扭矩、节能、低噪声等优势, 整车节能 10%~30%, 效率提高 3%~4%; 永磁同步电机相比同规格异步牵引电机, 效率提高 3%~5%, 功率密度提升 30%, 噪声级比 IEC 规定的限值低 3~7 dB, 以同样冷却方式为前提, 体积和质量减小 25%~30%^[6]。国内的大功率牵引永磁同步电机及控制系统的研制处于起步和推广应用阶段。

2003 年以来,中车株洲电力机车研究所有限公司(以下简称株洲所公司)、中车永济电机有限公司(以下简称永济公司)、中车四方车辆有限公司(以下简称四方公司)等单位联合高校、研究院开始进行永磁同步系统理论和技术研究,已经在城市轨道、高速铁路、低地板现代有轨电车、风力发电、船舶等多个领域开展验证,开始步入商业批量应用阶段。

本文结合某型高速列车的永磁同步牵引系统研究与开发,介绍了牵引变流器、永磁同步牵引电机及对应的系统牵引控制及网络通信设计过程,为高速列车永磁同步牵引系统研制及应用提供了一定的参考依据,同时为其他永磁系统设计提供了可用的技术平台。

1 国内外现状

1.1 国外现状

1.1.1 法国阿尔斯通公司

2008 年,阿尔斯通公司研制的永磁同步牵引电机分别在 Citadis 有轨电车和 AGV 单层高速动车上陆续装车应用,比异步电机效率提高 3%~4%,节能 15%,质量减少 30%,噪声降低 7 dB^[7]。

2011 年,意大利首批订购 35 列采用永磁同步牵引系统的 AGV 车辆完成交付使用。2018 年接到法国国家铁路公司 100 列下一代超高速 TGV 列车——Avelia Horizon 订单,该列车均采用永磁同步牵引系统,2023 年起开始分期交付。

1.1.2 加拿大庞巴迪公司

2007 年,加拿大庞巴迪公司为瑞典国家铁路设计完成首代 Mitrac 永磁同步牵引系统产品,开始配属斯德哥尔摩至韦斯特罗斯的城际列车。与原异步系统牵引特性相比,牵引力增强 2.6 倍,额定工况系统最高效率 97.1%,2 台永磁同步电机可取代一辆车上的 4 台原异步电机。2011 年开始,庞巴迪公司开发的第二代永磁同步系统陆续运用于瑞士联邦铁路公司动车组。

1.1.3 德国西门子公司

德国西门子公司在 1997~1998 年间联合达姆斯达特大学,依据 ICE3 高速列车技术规格,研制完成 2 台 500 kW 永磁同步牵引电机。与同功率异步牵引电机相比,损坏率降低 50%,质量减少 30%,噪声降低 15 dB^[8]。

2005 年,西门子公司运输部研究开发了集传动和制动技术为一体的创新型直驱转向架(Syntegra)系统并应用在新一代城轨车辆上,其中永磁直驱电机为全封闭水冷电机,比异步电机效率提升了 3%、噪声下降了 15 dB,体积节减了 30%^[9]。2008 年在德国慕尼黑地铁正式投入载客试运行。

2018 年 6 月,西门子公司新推出的 Velaro Novo 列车全部装配永磁牵引系统,最高时速 360 km/h,线路综合能耗降低 30%。目前测试车正在德国进行试运行,预计 2023 年前正式投产运行。

1.1.4 日本公司

1992 年,日本东海铁路客运公司(JR 东海)开发了新干线 TMT908X 型轻量永磁同步牵引电动机驱动系统,并在 300 系、700 系新干线电动车组上开始应用,列车最高速度 270 km/h,东京-新大阪运行时间由 190 min 缩短至 150 min,实现整车性能大幅提高和运行能耗大幅降低。

日本东芝公司 2001 年开始进行 155 kW 小功率永磁同步电机试验;2003 年开始进行 360 kW 的高速车辆的永磁同步电机试验;2007 年,完成 120 kW 永磁同步牵引电机研制并在东京地铁 Ginza 线开始运营。与异步牵引电机相比,可降低噪声 2~6 dB,实现节能 10%^[10]。2015 年开发完成永磁地铁牵引系统并获新加坡地铁改造订单,2018 年 7 月装配韩国釜山地铁 1 号线并进入商业运营。

1.2 国内现状

株洲所公司 2003 年开始进行永磁同步牵引系统理论和技术研究,2008 年完成 40/90 kW 永磁同步系统研制并在混合动力公交车上实现装车运营,2011 年在沈阳地铁 2 号线成功装车运用,2014 年完成高速永磁动车组的装车,2018 年高速永磁动车组完成 30 万 km 考核,百公里人均能耗降低 11.7%^[8]。

永济公司 2014 年完成电力机车 1 200 kW 直驱永磁系统研制。通过对比性研究试验,永磁系统比异步系统传动效率高 2%~4%,谐波含量低 15%。2015 年开展时速 400 km 及以上高速客运装备永磁同步牵引电机的小型化、轻量化、低噪声、高速轴承及润滑结构、检修维护等方面研究,

完成地面联调试验,具备动车永磁同步系统配套能力。2016年3月完成高速列车永磁同步牵引系统样机试制及试验,实现对原车异步系统的同等替换,全工况平均效率提高3%。10月为香港电车公司开发永磁电传动系统上线载客运营,运用情况良好。2017年完成西安地铁2号线永磁同步牵引系统、青岛四编组导轨电车永磁电传动系统研制并开始装车运用。2018年研制完成世界最大功率(6台永磁同步牵引电机、2台牵引变流器,总功率7 200 kW)的电力机车大功率永磁直驱电传动系统并在同车公司装车运用。

四方公司2016年自主研制完成国内首台地铁车辆永磁直驱转向架,通过永磁电机直接驱动车辆轮对,与电机牵引、齿轮箱驱动的传统转向架技术相比,可实现降低噪声10 dB,降低能耗15%的良好技术和经济效益。

2 永磁同步牵引系统优势分析

因为采用永磁材料励磁,所以永磁同步牵引电机没有励磁损耗。经过国内外大量试验验证,永磁同步系统比异步牵引系统在动力品质、控制特性等方面具有显著优势。结合永磁同步牵引电机的应用特点,可从轻量化、节能性、兼容性等3个方面做具体的对比分析。

2.1 轻量化

部件的小型轻量化,让整车可以做到小型轻

量化,运行风阻减小,损耗降低。永磁同步电机采用永磁体励磁,结构简单、功率因数高、效率高,与同等功率的异步电机相比,永磁同步电机体积小、重量轻、转动惯量小、功率密度高(可达1 kW/kg),适合列车上有限的空间。根据设计值,该功率等级的永磁同步电机与异步电机相比,体积可缩小10%~20%,重量可缩减10%~30%,更节省空间。

由于永磁同步牵引系统的高效率特点,变流器和系统的其他部件设计时热损耗减少,产品可以做到小型轻量化。从整车角度来说,永磁同步牵引系统可以让车辆很好地“瘦身”,同时保证了优良的牵引性能,使列车的运行效率更高,自身负担更小。从长远利益来看,轻量化车辆,更加符合全社会提倡的“绿色环保”的发展理念。

2.2 节能性

图1和图2所示分别为系统牵引工况和再生制动工况的部件功率计算。由以上分析可知,同种工况下,永磁同步牵引系统比异步系统变压器容量少146 kVA,制动工况下永磁系统比异步系统反馈能量多79 kVA。因此,永磁同步牵引系统在牵引时,比异步系统更节约能量,在制动时,永磁同步牵引系统比异步牵引系统馈网能量也更多。以现有车辆变速变负载运行工况统计,采用永磁同步牵引系统后预计节约电能消耗可达到10%以上。

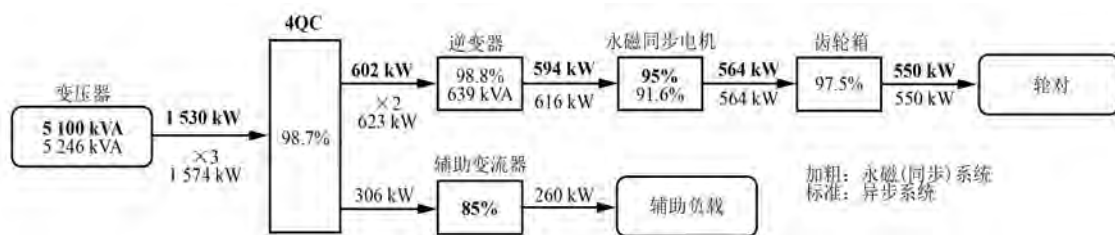


图1 系统牵引工况部件功率计算



图2 再生制动工况部件功率计算

2.3 兼容性

永磁同步牵引系统的主电路拓扑、永磁同步电机和变流器等主要部件的接口外形均与异步

牵引系统保持一致。图3和图4所示分别为异步系统主电路拓扑和永磁同步牵引系统主电路拓扑。

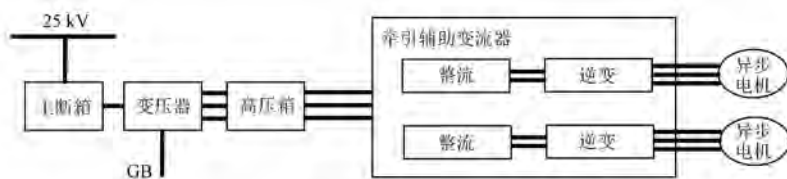


图3 异步牵引系统的主电路

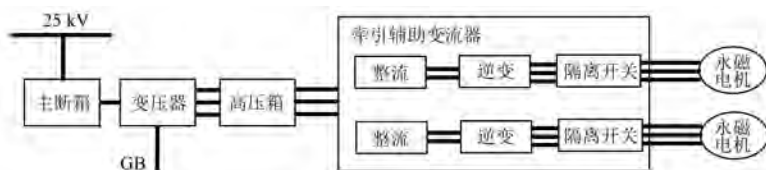


图4 永磁同步牵引系统的主电路

由图3~图4可见,永磁同步牵引系统可完全替换异步系统并实现混合应用。在整车牵引、制动及网络通信等性能方面,永磁同步牵引系统与异步牵引系统可保持一致,装车兼容性好、可靠性高。

3 永磁同步牵引系统风险分析及预防措施

3.1 反电动势所带来的风险及预防措施

对于应用于轨道交通上的永磁同步牵引系统来说,当处于惰性工况时,永磁同步电机会产生反电动势,给牵引系统带来 IGBT 烧毁、再生制动产生、电机重投困难等诸多问题。

针对反电动势问题,可以从2个方面采取措施:(1)优化匹配电压电势参数,确保反电动势不超过主回路耐压值;(2)增加高压接触器在牵引逆变器和永磁同步牵引电机中间,出现惰性或者故障情况时,可断开高压接触器并起到保护器件的作用。图5所示为三相交流接触器控制原理图。

3.2 永磁同步电机失磁所带来的风险及预防措施

在电机温度、机械振动、应用环境等风险因素影响下,永磁体存在不可逆失磁现象和风险。针对永磁体失磁,可采取更优化的防反措施,主要有以下几点:

(1) 短路去磁分析。在三相短路状态下,瞬

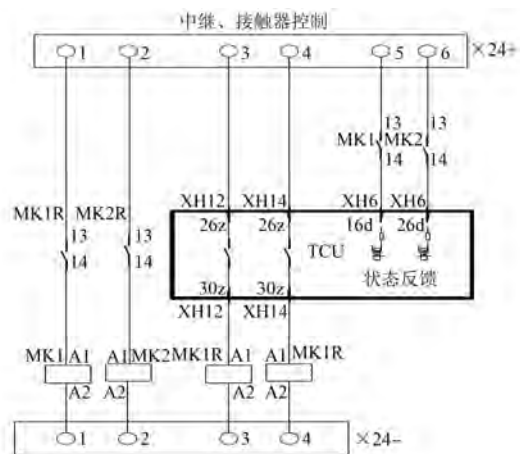


图5 三相交流接触器控制原理图

态最大电流峰值为1 227 A,稳态电流有效值为290 A,短路电流不会对定子绕组和永磁体造成损坏。

(2) 永磁体温度去磁分析。对钕钴和钕铁硼2种永磁材料进行对比分析,选取耐高温、低温温度系数的2:17型钕钴30H永磁材料,最高温度可达350℃,以避免高温引起的永磁体失磁风险。同时钕钴永磁材料不易被氧化,可有效避免化学因素引起的永磁体失磁。

(3) 永磁体结构去磁分析。采用小型化、拼块式永磁体结构,加强表面防护,以降低涡流损耗和失磁风险。

4 永磁同步牵引系统设计

4.1 配置与布局

在列车上采用 1 套永磁同步牵引系统同等替换 1 套异步牵引系统, 与原异步牵引系统车辆的参数比较, 应用标准化、系列化、模块化的精益设

计理念, 保证接口一致, 性能相同, 控制、通信均与现有其他异步系统保持一致, 永磁同步牵引系统替换完全可行, 而且不影响现有车辆上的配置及布局, 完全满足车辆运行的可行性和可靠性。永磁同步牵引系统布局如图 6 所示。

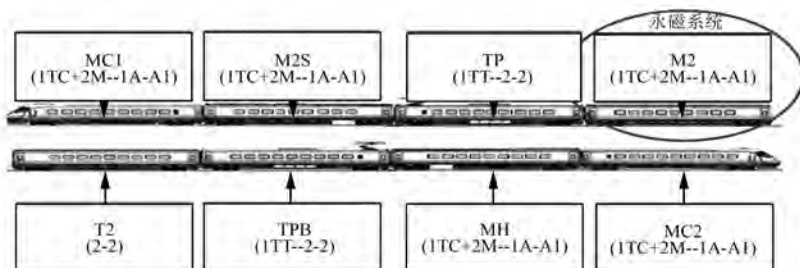


图 6 永磁同步牵引系统布局图

4.2 电气原理

永磁同步牵引系统通过接触网、受电弓、高压箱、牵引变压器、牵引辅助变流器和永磁同步牵引电机形成完整的供电回路。采用交直交电传动技

术, 其中牵引辅助变流器包括牵引控制装置 (TCU)、辅助控制装置 (ACU)、控制软件、四象限整流器、牵引逆变器、辅助逆变器、斩波器等。电气系统原理如图 7 所示。

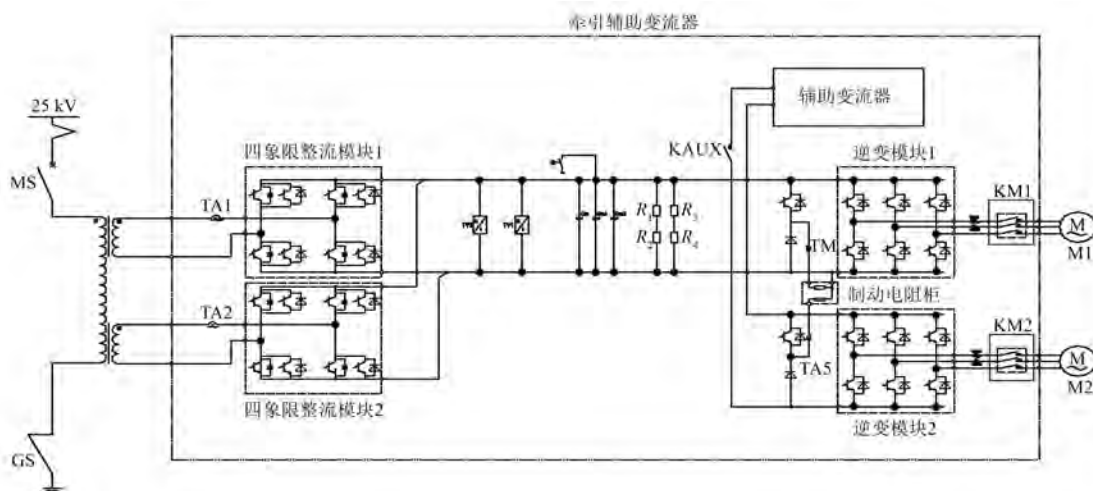


图 7 电气系统原理图

接触网通过受电弓将 25 kV 高压电传给高压箱^[11], 来自高压箱的高压电通过牵引变压器、牵引变流器以三相供电的形式向永磁同步牵引电动机供电; 辅助变流器通过中压控制箱给充电机等列车辅助负载提供 400 V/50 Hz 的中压电。通过牵引、辅助控制单元控制列车运行工况和行车速度调节。

4.3 牵引控制单元

牵引控制单元的硬件系统是基于内部标准总

线的一个多处理器系统, 总体架构如图 8 所示。

(1) CPCI 总线用于主控板卡 (MCPU)、网络接口板卡 (NETI)、DSP 控制板卡 (DSP) 和调试板卡 (OUTI) 之间的快速通信;

(2) CAN 总线用于 I/O 接口板 (包括数字量输入板卡 DI、数字量输出板卡 DO 和模拟量输入输出板卡 AIO) 和网络接口板卡 NETI 之间的通信;

(3) MVB 总线用于牵引控制单元与列车网络控制系统 (TCMS) 之间的通信。

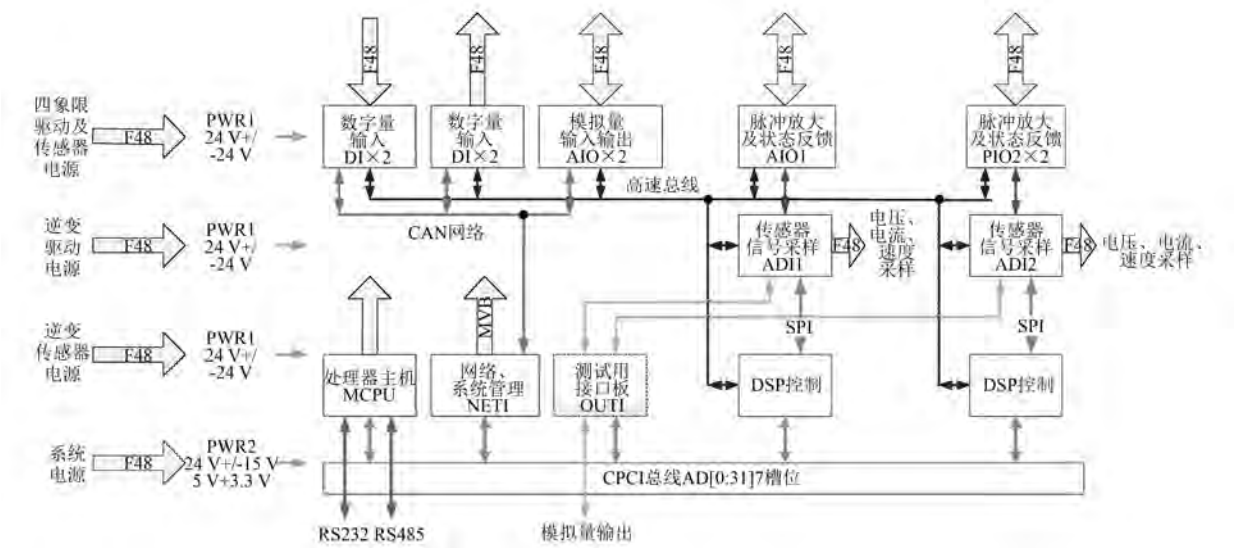


图 8 永磁同步牵引控制单元系统构架

4.4 牵引辅助变流器

在永磁同步牵引系统中,由于牵引辅助变流器在发生过流、过压、接地等故障时会突然导致逆变器停止工作或者主断路器跳开。为了避免永磁同步电机反电动势对功率模块等电力电子器件造成损坏,在逆变器输出和永磁同步牵引电机中间增加三相交流接触器。当发生故障时,为了防止

故障进一步扩大,通过控制断开三相交流接触器来达到保护电力器件的目的。

图 9 和图 10 所示分别为异步牵引辅助变流器和永磁牵引辅助变流器安装结构示意图。通过热仿真、强度仿真分析,结果表明该结构设计合理,性能稳定可靠。

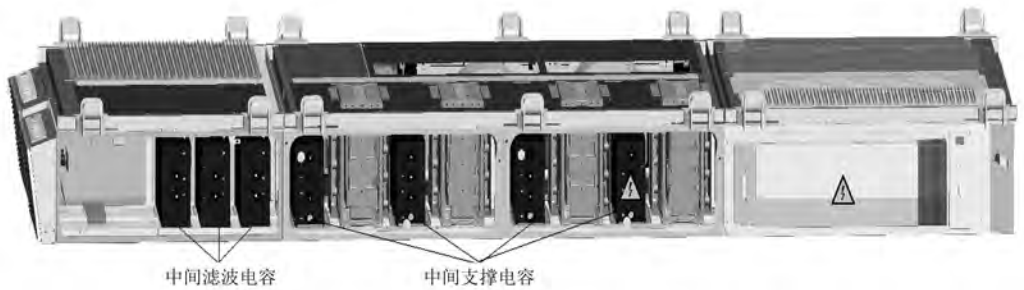


图 9 异步牵引辅助变流器安装结构示意图

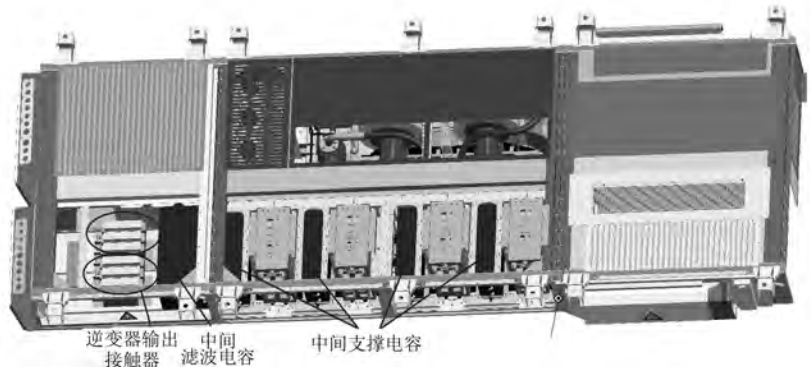


图 10 永磁牵引辅助变流器安装结构示意图

4.5 永磁同步牵引电动机

(1) 电机转子磁路结构采用 V 形径向内置式磁路结构, 永磁体为 2:17 型钕钴 30H 永磁材料。转子压圈采用齿形结构, 以容纳较多的永磁体, 提高电机功率密度, 同时减小铁心齿胀。转子装配如图 11 所示。



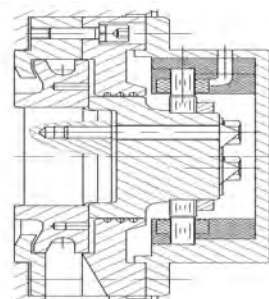
图 11 转子装配图

(2) 传动端端盖为球墨铸铁端盖, 因设置风路, 端盖整体性铸造难度大, 采用内外筒体分别铸造在装配结构, 提高了铸造工艺性, 同时对其强度进行有限元分析, 确保安全可靠。传动端与非传动端端盖如图 12 所示。



图 12 传动端与非传动端端盖

(3) 非传动端设有旋转变压器, 与安装座构成整体式结构, 使拆装、更换更加方便, 同时旋转变压器电缆自带电连接器, 插接方便。旋转变压器装配如图 13 所示。



(a) 模具



(b) 实物

图 13 旋转变压器装配图

5 仿真分析与试验验证

5.1 仿真平台

依据 HiGale 半实物仿真平台, 真实设备包括牵引控制单元 (TCU)、辅助控制单元 (ACU)、控制算法等, 虚拟设备 (模型) 包括弓网供电、牵引电机、变流器、制动控制单元 (BCU) 等。整车牵引系统仿真平台总体结构如图 14 所示。

系统方案及主要算法验证了该系统设计方案正确、参数匹配合理、控制算法正确有效。

5.2 谐波分析

系统分别在三分频 144 Hz (2 880 r/min)、0.8 倍额定转矩, 三分频 194 Hz (3 880 r/min)、0.8 倍额定转矩, 五分频 117.5 Hz (2 350 r/min)、0.8 倍额定转矩, 五分频 98 Hz (1 960 r/min)、0.8 倍额定转矩, 七分频 67 Hz (1 340 r/min)、0.8 倍额定转矩, 七分频 77 Hz (1 540 r/min)、0.8 倍额定转矩时对脉冲、电流波形进行了谐波分析, 分析结果表明:

(1) 管道式的电流抬高/降低主要是因为电流中叠加一个直流量, 电流中的谐波含量主要与电流的正弦度有关。

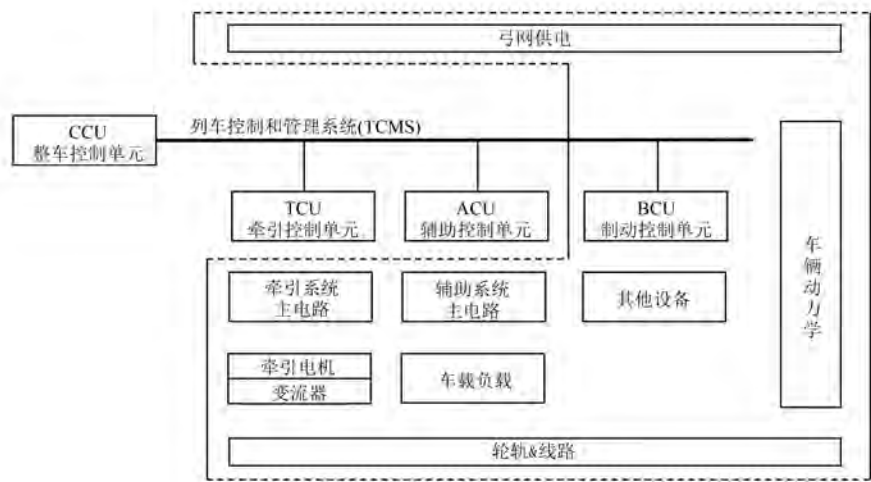


图 14 整车牵引系统仿真平台总体结构图

(2) 在与脉冲对比中发现,脉冲谐波含量高,电流谐波含量未必高,两者之间没有必然的联系。

(3) 调制算法中采用 SHEPWM 特定次消谐算法,如 N 是奇数,消除谐波次数 n 最大为 $3N-2$;如 N 是偶数,消除谐波次数 n 最大为 $3N-1$ ^[12]。从数据分析可以看出,对于正常脉冲、电流波形

时,该算法消谐效果比较理想,验证了理论基础的正确性。

图 15~图 16 所示为永磁同步牵引系统和异步系统逆变器输出电压谐波分析。图 17~图 18 所示为永磁同步牵引系统和异步系统逆变器输出电流谐波分析。

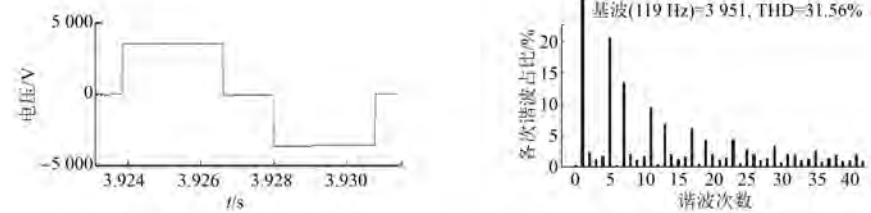


图 15 永磁同步牵引系统逆变器输出电压谐波分析

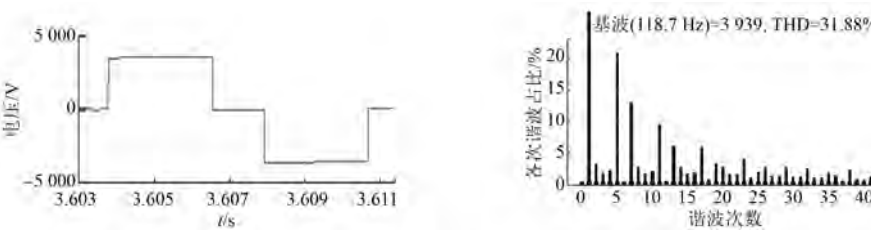


图 16 异步系统逆变器输出电压谐波分析

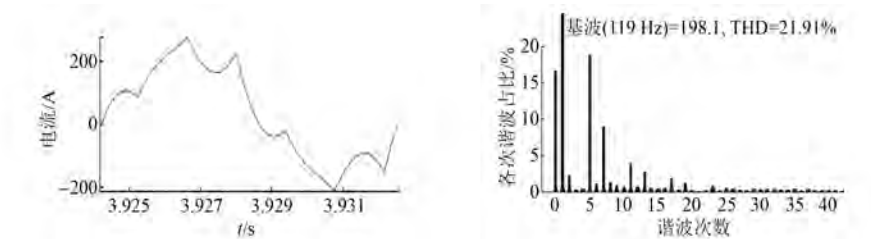


图 17 永磁同步牵引系统逆变器输出电流谐波分析

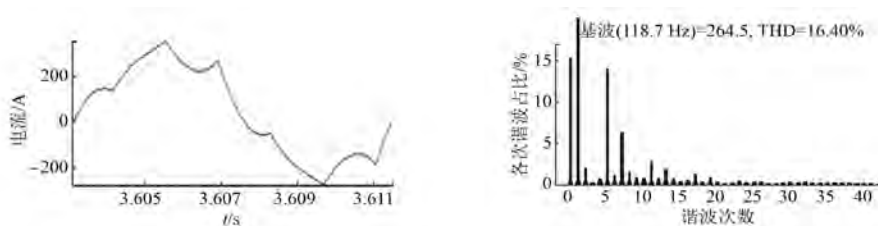


图 18 异步系统逆变器输出电流谐波分析

由图 15、图 16 可知,永磁同步牵引系统逆变器输出电压基波频率为 119 Hz,有效值为 2 794 V,总谐波含量 THD 为 31.56%;异步系统逆变器输出电压基波频率为 118.7 Hz,有效值为 2 785 V,总谐波含量 THD 为 31.88%。

由图 17、图 18 可知,永磁同步牵引系统逆变器输出电流基波频率为 119 Hz,有效值为 140.1 A,总谐波含量 THD 为 21.91%;异步系统逆变输出

电流基波频率为 118.7 Hz,有效值为 187 A,总谐波含量 THD 为 16.40%。

5.3 脉冲调制切换仿真分析

永磁同步电机在牵引的过程中随着转速的升高,PWM 调制状态分别为异步调制(660 Hz)→9 脉冲同步调制→7 脉冲同步调制→3 脉冲同步调制→方波调制。三分频向方波切换的试验波形如图 19 所示。

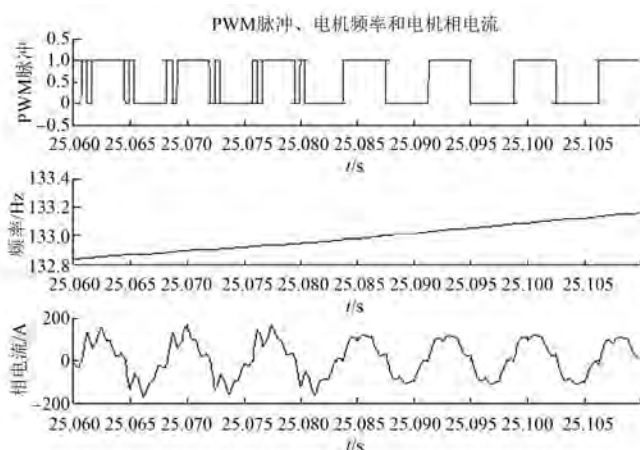


图 19 三分频向方波切换的试验波形

永磁同步电机在牵引的过程中转速不断上升,在不同的 PWM 调制状态下运行稳定,不同 PWM 调制切换的过程中,电流冲击小,电机速度平稳。永磁同步电机在制动的过程中转速下降,电机在不同 PWM 调制切换的过程中,电流冲击小,电机速度平稳。

6 结 语

本文阐述了高速列车永磁同步牵引系统、牵引控制单元、牵引辅助变流器、永磁同步牵引电机的设计思路。以现有 CRH5 型车为原型车,通过完成 1 套永磁同步牵引系统的样机设计,不仅满足列车的牵引、制动、通信等要求,并且可以跟该

车的异步牵引系统进行同步替换。高速列车用永磁同步牵引系统已完成装车 and 组合试验调试,在系统动态特性、温升与损耗方面,永磁同步电机均优于异步牵引电机,电传动系统效率在额定点时,比异步系统提高了约 3%。永磁同步牵引系统技术在高速列车动力应用上的突破,将进一步提升我国高铁的核心优势和技术竞争力。

【参考文献】

- [1] GENDUSO F, MICELI R, RANDO C, et al. Back EMF sensorless-control algorithm for high-dynamic performance PMSM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2092.

(下转第 109 页)

电机系统》标准规定的技术条件和试验方法为基本依据,结合其他相关标准对电动汽车用驱动电机试验的具体要求,基于节能、经济、可靠、先进等原则进行设计,实现了电动汽车用 PMSM 的在线性能检测。系统综合应用了先进的变频测量技术和计算机控制测量技术,具有精度优、自动化程度高、技术先进、运行稳定等优点。设备的成功研制和运用大幅降低了试验人员的作业强度,满足了电动汽车电机流水线在线检测的要求,为厂家电动汽车用 PMSM 检测提供了设备支持和技术保障,有效地提高了产品的竞争力。

【参考文献】

- [1] 王传军,李怀珍,姚金生.电动汽车电机及控制器故障诊断专家系统的研究[J].电机与控制应用,2016,43(5): 69.
- [2] 严蓓兰.新能源汽车电机发展趋势及测试评价研究[J].电机与控制应用,2018,45(6): 109.
- [3] 葛治国.电机自动测试系统研制与研究[D].杭州:浙江大学,2002.
- [4] 成哲.新能源汽车动力总成系统测试平台概述[J].时代汽车,2018(4): 75.
- [5] 张奇,李珂,张承慧,等.电动汽车用永磁同步电机特性试验设计与研究[J].实验室研究与探索,2015,34(10): 47.
- [6] 李怀珍,王传军.电动汽车电机及控制器性能测试系统[J].电机与控制应用,2016,43(3): 79.
- [7] 何洪文,余晓江,孙逢春,等.电动汽车电机驱动系统动力特性分析[J].中国电机工程学报,2006,26(6): 136.
- [8] 许华.变频器输出波形分析与测试系统[J].电机与控制学报,2001,5(4): 242.
- [9] 王海军,李怀珍.伺服电机及系统特性性能测试系统设计[J].电机与控制应用,2018,45(1): 127.
- [10] 李庆莲,徐伟专,庞林.变频电机计量与检测探讨[J].电机与控制应用,2014,41(7): 64.

收稿日期: 2019-04-19

(上接第 95 页)

- [2] CHEN J, LIU T, CHEN C. Design and implementation of a novel high-performance sensorless control system for interior permanent magnet synchronous motors [J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(4): 226.
- [3] LIN C K, LIU T H, LO C H. Sensorless interior permanent magnet synchronous motor drive system with a wide adjustable speed range [J]. IET Electric Power Applications, 2009, 3(2): 133.
- [4] LEE J, HONG J, NAM K, et al. Sensorless control of surface-mount permanent-magnet synchronous motors based on a nonlinear observer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2): 290.
- [5] FOO G, RAHMAN M F. Sensorless direct torque and flux-controlled IPM synchronous motor drive at very low speed without signal injection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 395.
- [6] SOULARD J. System analysis of permanent magnet traction drives [R]. Stockholm: KTH, 2012.
- [7] 刘荣强,周国聘,姬春霞.永磁电机在铁路机车牵引领域的应用[J].内燃机车,2008(5): 19.
- [8] 冯江华.轨道交通永磁电机牵引系统关键技术及发展趋势[J].机车电传动,2018(6): 9.
- [9] 张江,钟文生,刘高坤.转向架永磁同步电机直接驱动技术在国内外的发展概述[J].铁道机车车辆,2014,34(3): 79.
- [10] 冯江华.轨道交通永磁同步牵引系统的发展概况及应用挑战[J].大功率变流技术,2012(3): 1.
- [11] 顾秀江,杨玺,解鹏.CRH5G 型高寒动车组牵引辅助变流器研制[J].电子测试,2018(10): 34.
- [12] 余华,李岩,李国锋,等.应用于机车变流器的分段调制工程实现方法[J].机车电传动,2014(6): 43.

收稿日期: 2019-04-22