

沈阳地铁二号线车辆永磁同步牵引系统

解培金¹, 刘卓², 闫磊³, 陈文光¹

(1. 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 沈阳地铁集团有限公司, 辽宁 沈阳 110011;
3. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

摘要: 阐述了采用永磁同步牵引系统的沈阳地铁二号线第20列车M车的主电路方案及永磁同步牵引电动机的技术特点、参数, 并就该电机损耗、温升等试验结果与异步牵引系统进行了对比。对永磁同步牵引系统进行了线路型式试验和空载运行考核, 系统状态良好。

关键词: 地铁车辆; 永磁同步电机; 牵引系统; 主电路; 安装; 试验

中图分类号: U231; TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)03-0008-04

Permanent Magnet Synchronous Traction System for the Vehicles of Shenyang Metro Line 2

XIE Pei-jin¹, LIU Zhuo², YAN Lei³, CHEN Wen-guang¹

(1. Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China; 2. Shenyang Metro Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110011, China;
3. CSR Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: It describes the main circuit of PMSM traction system for M car of the 20st vehicle for Shenyang Metro Line 2 as well as technical characteristic, parameters of PMSM, and compares the test results of motor loss and temperature-rise for PMSM traction system with the one for asynchronous motor traction system. PMSM traction system is well evaluated as a result of line prototype test and no-load operation.

Key words: metro vehicle; PMSM; traction system; main circuit; installation; test

0 引言

沈阳地铁二号线第20列车M车装载永磁同步牵引系统是国内轨道交通领域的首次尝试及应用。该系统是由株洲南车时代电气股份有限公司设计及生产的, 并与沈阳地铁集团有限公司和南车青岛四方机车车辆股份有限公司联合装车应用。具体地说就是, 沈阳地铁二号线第20列车M车原3、4轴的异步牵引电动机由永磁同步牵引电动机替代, M车1、2轴仍保留异步牵引电动机, M车牵引主电路直流侧保持不变, 以最小的改动量实现永磁同步牵引系统的装车。

1 永磁同步牵引系统主电路

沈阳地铁二号线列车采用3动3拖编组形式, 一节

动车和一节拖车组成一个单元, 即共3个单元, 编组形式为+Tc-Mp-M-T-Mp-Tc+(Tc——带司机室拖车; Mp——带受电弓动车; M——不带受电弓动车; T——无司机室拖车)。原异步牵引系统每节动车配置4台异步牵引电动机, 列车牵引系统是VVVF逆变器和异步牵引电动机构成的交流电传动系统, 采用车控方式。

进行永磁同步牵引系统改造时, 考虑到永磁同步牵引电动机的同步性, 每台永磁同步电机必须单独控制, 借用原M车牵引逆变器模块1实现对第3轴永磁同步牵引电动机的供电, 模块2继续给原有的两台异步牵引电动机供电, 模块1和模块2在控制上独立, 即相当于采用轴控+架控方式。沈阳地铁二号线第20列车M车永磁同步牵引系统的主电路如图1所示。

主电路由高压电器及能量释放单元(1F01, QS1, 1Q02, F1, V1, R2) 电容器充放电单元(KM1, KM2, QS11, R1, R3, R4) 滤波单元(L, C) 逆变器单元(1R01, 1R02, INVMK1,

收稿日期: 2012-02-02

作者简介: 解培金(1982-), 男, 工程师, 主要从事城市轨道交通交流电传动系统设计工作。

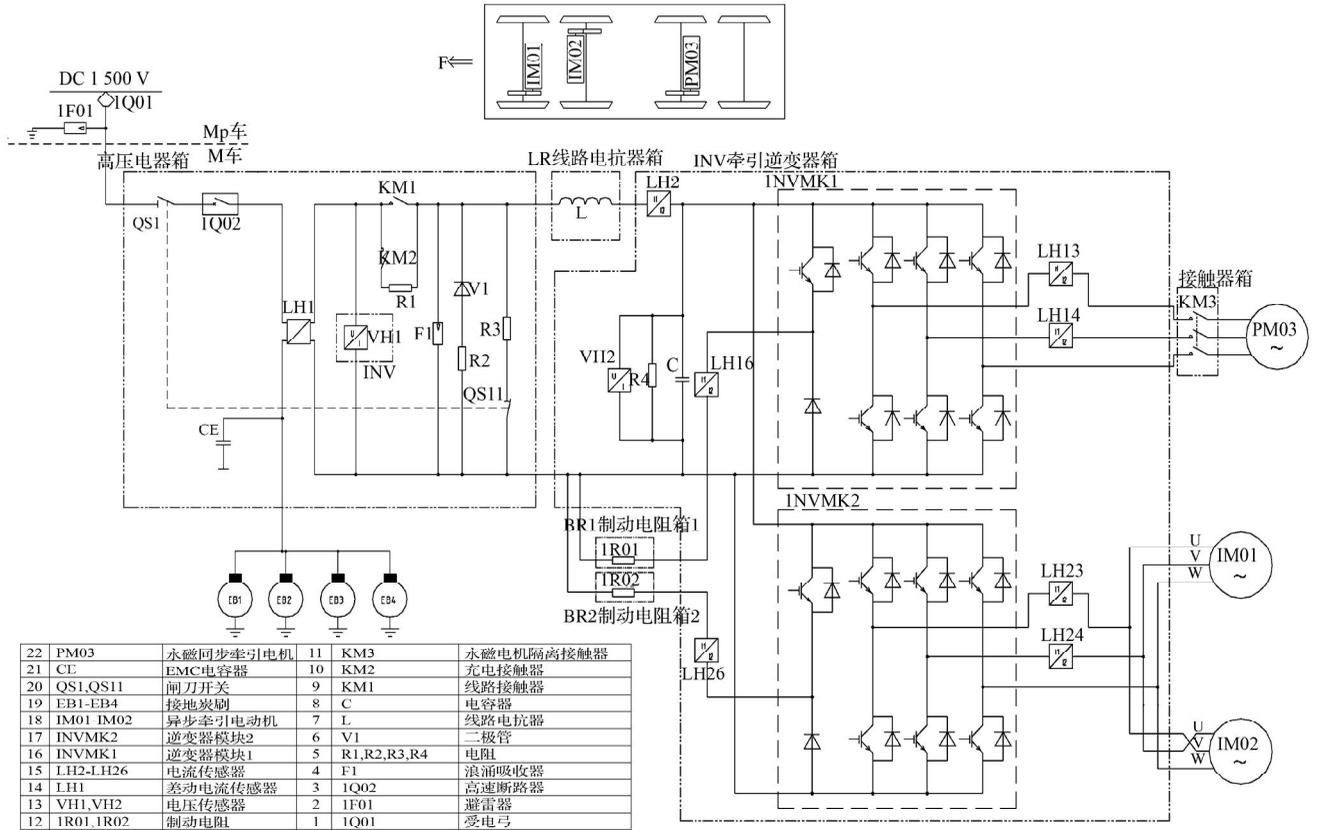


图 1 沈阳地铁二号线第 20 列 M 车装载永磁同步牵引系统的主电路图

Fig.1 Main circuit of PMSM traction system installed on the M car of the 20st vehicle for Shenyang Metro Line 2

INVMK2)、异步牵引电动机(IM01~IM02)、永磁同步牵引电动机(PM03)、隔离接触器(KM3)及检测单元(LH1, LH2, LH13, LH14, LH16, LH23, LH24, LH26, VH1, VH2)等组成。各部件均能满足列车牵引系统性能的要求。

保留主电路中原有的高压电器箱、线路电抗器、制动电阻,更换了牵引逆变器,新增加了隔离接触器箱。原异步牵引系统为车控方式,而装载永磁同步牵引系统后为轴控+架控方式,控制方式不同,牵引逆变器内部布线及插件将不同,因此对原牵引逆变器进行了更换。当主电路电机前侧出现故障时,为了保护设备,避免永磁同步牵引电动机反电势造成故障的进一步扩大,特在永磁同步牵引电动机(PM03)的U、V、W三相前端增加了一个隔离接触器(KM3)。当系统处于故障模式时,跳开隔离接触器(KM3),将永磁同步牵引电动机和牵引逆变器断开,以保护牵引设备。从应用角度看,永磁同步电动机与异步电动机的最大区别在于励磁无法关断,本系统设计时永磁电动机最高转速对应的线反电势的有效值约为1 400 V,取值相对较低,即使失控,反电势对3 300 V功率器件也不会造成损坏。

沈阳地铁二号线永磁同步牵引电动机是在数种永

磁同步牵引电动机开发经验基础上,根据地铁车辆的特点而研制的。它采用强迫通风的全封闭结构,能大幅度地提高可靠性及降低维护成本;采用耐热等级200级的绝缘系统;转子采用高性能的稀土永磁材料和优化的磁路结构。该电机具有效率高、功率密度高、节能等特点。为方便替换,永磁同步牵引电动机的机械接口保持与异步牵引电动机的一致,因此其大小与异步牵引电动机接近,但由于采用全封闭结构,相比异步牵引电动机在环境的适应性和可维护性上更优。

永磁同步牵引电动机主要技术参数如下:

极数	8极
额定功率	190 kW
额定电压	900V
额定电流	142A
额定转速	1800 r/min
最大转速	3686 r/min
额定效率	96.3%
额定转矩	1 008 N·m
额定频率	120 Hz

沈阳地铁二号线列车的牵引最大粘着系数较大,最大加速度牵引时粘着系数为18.5%,为保证粘着利用性能,

永磁同步牵引电动机力矩特性与异步牵引电动机的一致,故粘着利用率限制了永磁同步牵引电动机功率的发挥,装载永磁同步牵引系统的第20列车较其他装载异步牵引系统的列车动力将损失1/12。由于损失动力,列车启动时间变长,因此会增加牵引系统负荷;但由于永磁同步牵引电动机效率高,有利于节能和减少直流侧电器部件的电气定额。永磁同步牵引电动机需单独控制的特点,从系统角度可提高粘着利用率,最大程度发挥列车牵引/电制动力,但动力冗余度和故障的增加也会带来成本的提高。

2 永磁同步牵引系统的安装

沈阳地铁二号线共有20列车,其中第20列车从青

岛运抵至沈阳用户现场后于2011年11月25日~27日实施了永磁同步牵引系统的安装替换工作。安装替换工作主要包括:M车3、4轴异步牵引电动机替换为永磁同步牵引电动机(第3轴永磁同步电机为工作电机,第4轴永磁同步电机为备用电机);更换牵引逆变器箱;增加隔离接触器箱以及相关的改接线工作。安装替换后的列车编组如图2所示,安装后的永磁同步牵引电动机如图3所示。由于永磁同步牵引电动机采用位置传感器来实现转子位置和转速的检测,车辆在生产过程中已在M车上对3、4轴永磁同步牵引电动机的位置传感器线进行了预埋,安装时位置传感器线通过连接器与永磁同步电机连接,永磁同步牵引电动机上的温度传感器线与原来车辆的温度传感器线连接。

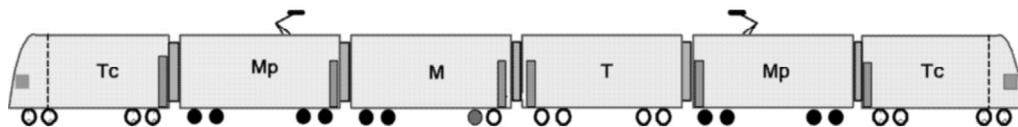
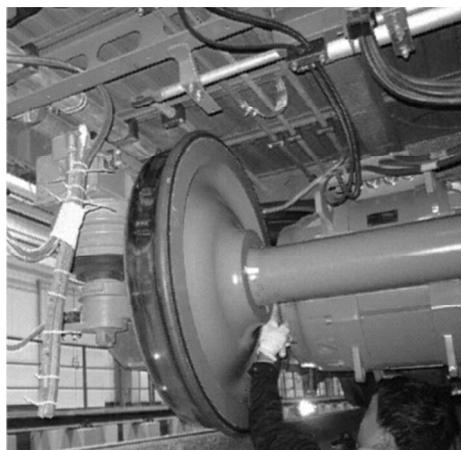


图2 列车编组示意图

Fig.2 Schematic diagram of train configuration



(a) 3轴永磁同步牵引电动机
(a) PMSM on No.3 axle



(b) 4轴永磁同步牵引电动机
(b) PMSM on No.4 axle

图3 永磁同步牵引电动机的安装
Fig.3 Installation of PMSM

在主电路中隔离接触器安装在3轴永磁同步牵引电动机与牵引逆变器模块1之间,隔离接触器箱布置在车底高压箱和制动电阻之间(图4)。



图4 接触器箱安装位置

Fig.4 Installation position of contactor case

由于永磁同步牵引电动机必须采用一个逆变器模块进行单独控制,因此对原来的牵引逆变器也进行了更换,替换后的牵引逆变器箱如图5所示。

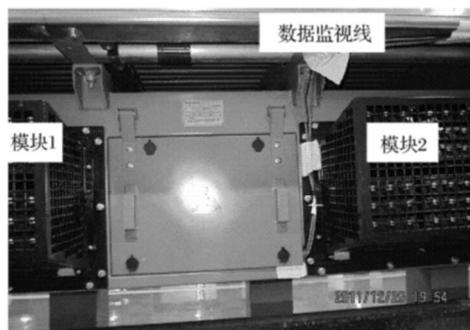


图5 牵引逆变器箱

Fig.5 Traction inverter case

3 调试及试验情况

至2011年12月30日,装载了永磁同步牵引系统的列车在用户现场试验线及沈阳地铁二号线上完成了空载

(AW0)及超载(AW3)工况的相关调试及试验。试验结果表明,列车牵引系统满足原车的性能要求,但由于损失一台电机动力,加速度较原车小。本文重点介绍与异步牵引系统不一致的试验内容。

列车在用户现场试验线上进行了AW0 工况下的粘着性能试验,粘着性能良好,能及时抑制空转滑行的发生。粘着本质上是轮轨关系,虽然永磁同步牵引电动机的自然特性与异步牵引电动机的一不一样,但永磁同步牵引系统与异步牵引系统的粘着调试目标是一致的。只是异步牵引电动机在发生空转后,如果粘着控制系统未能及时有效抑制空转,随着空转的扩大和电机转速的升高,其转矩输出能力下降,从而又会抑制转速的升高,这个特点在开环控制系统中有一定的优势。但是目前车辆粘着利用控制和电机控制构成了一个闭环控制系统,当检测到电机发生空转或有空转趋势时,迅速减小电机力矩给定,无论对永磁或异步牵引电动机,只要转矩响应迅速及时,就能有效避免空转的发生。

在沈阳地铁二号线上进行了AW3 工况加载试验,由于列车载重补偿功能是在一个单元(一节动车和一节拖车)上进行,因此仅在M 车和T 车上用沙袋模拟AW3 工况。图6、图7、图8、图9和图10分别为AW3 工况下永磁同步牵引电动机在启动、满手柄牵引、惰行、满手柄制动、停车时的典型电流波形。与异步牵引系统相比,永磁同步牵引电动机的励磁电流较小。

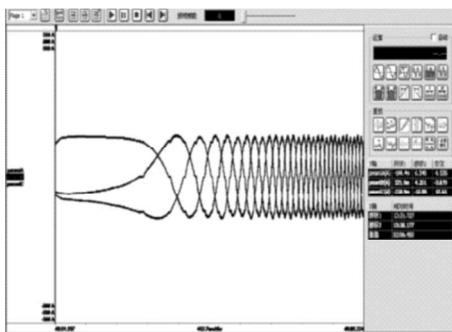


图6 牵引启动电流波形

Fig.6 Waveforms of traction system's current while train starting

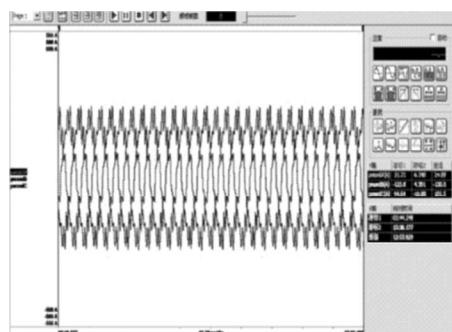


图7 满手柄牵引电流波形

Fig.7 Waveforms of traction system's current while train full running

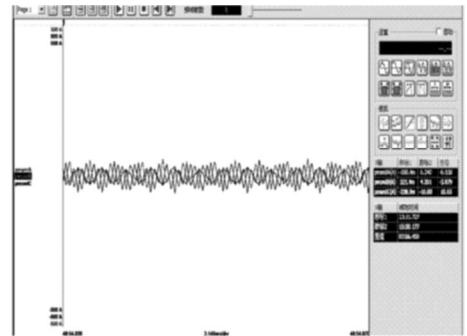


图8 惰行电流波形

Fig.8 Waveforms of traction system's current while train coasting

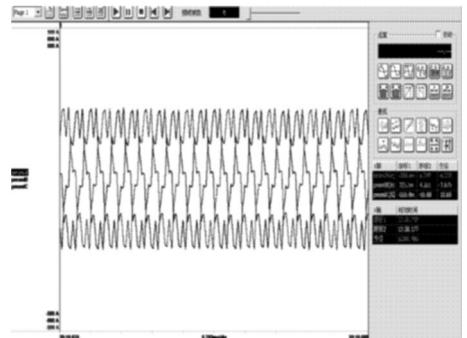


图9 满手柄制动波形

Fig.9 Waveforms of traction system's current while train full braking

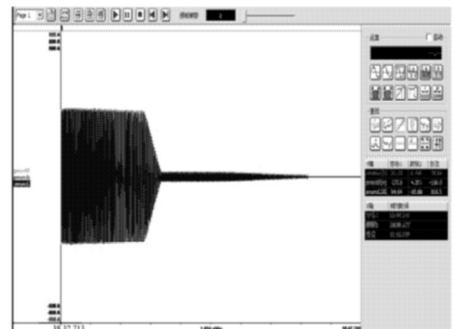


图10 停车波形

Fig.10 Waveforms of traction system's current while train stopping

在AW3 工况下,对M 车永磁同步牵引电动机和异步牵引电动机的温度进行了监视。列车在二号线上以AW3 工况连续运行约3 h 后,永磁同步牵引电动机和异步牵引电动机的温度即进入稳定阶段,永磁同步牵引电动机定子铁心温度稳定在57 左右,异步牵引电动机定子铁心温度稳定在80 左右,环境温度为12 。永磁同步牵引电动机虽然采用全封闭结构,但是电机温升仍然比异步牵引电动机低23 K 左右,这表明永磁同步牵引电动机的发热小、损耗小、效率高。

在AW3 工况下还进行了能耗测试。为了对比永磁同步牵引电动机和异步牵引电动机的能耗,对M 车的永磁同步牵引电动机和其中一台异步牵引电动机分别增加了电压和电流传感器,并将电压和电流传感器的

(下转第24页)

在完成组合试验的基础上,针对沈阳地铁二号线典型线路完成了10 h的连续循环试验,即峰值转矩牵引27 s——小手柄维持最高转速40 s——峰值转矩制动18 s——停站20 s,整个试验过程正常,未有任何故障发生。

4 结语

牵引系统是地铁车辆的核心关键技术之一。本文在搭建永磁同步牵引系统地面试验平台的同时,针对地铁车辆用永磁同步牵引电动机,在分析其数学模型的基础上提出了永磁同步牵引电动机的控制策略;针对的恒转矩区和弱磁区提出了对应的控制策略;针对

永磁同步牵引电动机的特点实现了高速时带速度重新投入控制;并且针对典型线路进行了连续循环试验。地面试验工作为永磁同步牵引电动机在地铁车辆上的装车应用奠定了坚实的理论和实践基础。

参考文献:

[1] 许峻峰,张朝阳,冯江华,等. 电动公交车用永磁同步电机实验研究[J]. 变流技术与电力牵引,2008(6):38-40.
 [2] 唐任远. 现代永磁电机:理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
 [3] 冯江华. 城轨车辆用永磁同步电机驱动系统控制策略研究[D]. 长沙:中南大学,2008.

(上接第11页)

信号送至波形记录仪进行能耗的计算。通过连续测量得出,永磁同步牵引电动机的能耗为138.11 kW·h,异步牵引电动机的能耗为152.8 kW·h,永磁同步牵引电动机相比于异步牵引电动机可实现节能9.61%。由于本次试验只采用了一台永磁同步牵引电动机,因此只能从电机输入端进行能耗的测量,制动过程中能量是回馈到电网还是消耗在制动电阻上无法区分,如果后续能有一个完整的单元或一列车采用永磁同步牵引系统,从电网输入侧测量能耗,然后与采用异步牵引系统的一个完整的单元或一列车进行对比,数据将会更准确。

4 结语

沈阳地铁二号线第20列车在正线上完成了AW0及AW3工况下的列车试验及6 000 km的无故障运行,试验结果令人满意,永磁同步牵引电动机在温升和能耗上相比异步牵引电动机具有优势。试验同时验证了永磁同步牵引系统设计方法的正确性。由于永磁同步牵引电动机的励磁无法关断的特点,给永磁同步牵引系统

的设计带来了特殊性,在系统设计时必须考虑反电势对系统的影响,在保障系统安全的同时发挥永磁同步牵引系统的性能。永磁同步电动机控制系统充分借鉴了异步牵引电动机控制系统成熟的经验,所采用的硬件平台完全与异步牵引电动机硬件平台一致。

沈阳地铁二号线车辆永磁同步牵引系统是国内轨道交通领域的首次尝试及应用,地铁车辆永磁同步牵引系统集成技术、永磁同步牵引电动机设计技术和控制技术等关键技术从中得到了验证。永磁同步牵引系统的成功装车为永磁同步牵引系统技术在轨道交通领域的发展奠定了良好的基础,对国内轨道交通永磁同步牵引系统的发展具有里程碑意义。

参考文献:

[1] 张安,任天浩. 沈阳地铁2号线地铁车辆[J]. 机车电传动,2010(4):49-54.
 [2] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统研究[J]. 机车电传动,2010(5):15-21.
 [3] 冯江华,桂卫华,符敏利,等. 铁道车辆牵引系统用永磁同步电机比较[J]. 铁道学报,2007,29(5):111-116.