

永磁牵引技术在南京地铁 9 号线列车上的应用 可行性分析

李 栋

(中铁上海设计院集团有限公司, 200042, 上海)

摘 要 [目的] 相同动力配置下, 永磁同步牵引系统的成本高于异步牵引系统, 但永磁同步牵引系统能够有效降低列车运营能耗, 因此有必要对永磁牵引技术在工程项目上的应用可行性进行分析。[方法] 以南京地铁 9 号线为例, 分别对永磁同步牵引系统和异步牵引系统的系统配置、运行能耗和维护成本进行了对比分析; 提出将列车动力配置由 4M2T (4 动 2 拖) 改为 3M3T (3 动 3 拖) 的改进方案, 对比分析了两种动力配置的列车牵引制动性能。[结果及结论] 3M3T 配置的永磁同步牵引系统能有效降低列车运营能耗, 在牵引制动、故障运行性能和救援能力方面均能满足南京地铁 9 号线的运营要求, 且其全寿命维护成本也相对较低。研究结果表明, 在线路条件许可的条件下, 可通过改变动力配置进行成本控制。

关键词 地铁; 永磁牵引技术; 应用可行性分析

中图分类号 U223.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.045

Feasibility Analysis of Permanent Magnet Traction Technology on Nanjing Metro Line 9 Trains

LI Dong

(China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., 200042, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Under the same power configuration, the cost of a permanent magnet synchronous traction system is higher than that of an asynchronous traction system. However, the former can effectively reduce the operational consumption of trains. Therefore, it is necessary to analyze the feasibility of applying permanent magnet traction technology in engineering projects. [Method] Taking the Nanjing Metro Line 9 as an example, a comparative analysis is conducted on the system configuration, operational energy consumption, and maintenance cost of permanent magnet synchronous traction system and asynchronous traction system. An improvement proposal is presented to change the train power configuration from 4M2T (4 motor 2 trailer) to 3M3T (3 motor 3 trailer), and a comparative analysis of the traction and braking performance of the

two power configurations is performed. [Result & Conclusion] The 3M3T configuration with a permanent magnet synchronous traction system can effectively reduce the operational energy consumption of trains. It meets the operational requirements of Nanjing Metro Line 9 in terms of traction braking, fault operation performance, and rescue capabilities. Moreover, the overall life-cycle maintenance cost of the 3M3T configuration is relatively low. The research results indicate that, under permissible line conditions, cost control can be achieved by modifying the power configuration.

Key words metro; permanent magnet traction technology; application feasibility analysis

0 引言

相比于传统的异步牵引系统, 永磁同步牵引系统在列车牵引能耗、列车再生制动能量、电动机运行噪声、电动机维护等方面具有明显的优势, 尤其是在列车运营能耗方面的优势较大。但由于永磁同步牵引电动机(以下简称“永磁电机”)的市场价格略高于异步牵引电动机(以下简称“异步电机”), 永磁同步牵引系统额外配置了隔离接触器箱, 且采用轴控控制方式, 导致永磁电机的全寿命周期系统维护成本较高。相同动力配置下, 永磁同步牵引系统的成本高于异步牵引系统, 即所谓的“节能但不省钱”, 这为永磁同步牵引系统的市场推广带来了一定的阻力。

本文比较了永磁同步牵引系统与异步牵引系统的系统配置、运行能耗和维护成本, 并以南京地铁 9 号线为例, 结合其工程特点、车辆批复及招投标实际情况, 针对采用永磁同步牵引系统引起的列车单价提升、维保费用增加等问题, 基于本线最大坡度未达到 30‰且均为地下线的情况, 提出适当减小列车动力配置单元的改进措施, 在保障故障运行能力和救援能力的前提下, 降低购置成本和维护费

用,达到“既节能又省钱”的目的,使本线应用永磁同步牵引系统具备了可行性。

1 工程概况

南京地铁 9 号线一期工程是线网西北方向的局域线,工程北起红山新城站,南至江苏大剧院·宪法广场站,途经玄武区、鼓楼区及建邺区 3 个行政区。线路全长为 19.677 km,共设车站 16 座,全部为地下线,线路最大坡度为 29.896‰。

根据初步设计批复,列车采用 6 节编组 B 型车(4 动 2 拖,以下简称“4M2T”),直流 1 500 V 架空接触网供电方式,最高运行速度为 80 km/h。全线初期、近期、远期配属车分别为 20 列、56 列、69 列,批复概算为 650 万元/辆。

表 1 永磁同步牵引系统和异步牵引系统对比

Tab.1 Comparison of permanent magnet synchronous traction system and asynchronous traction system																
牵引系统	控制方式	牵引变流器								牵引电机						
		电抗器	IGBT 规格	IGBT 模块数量/个	逆变电路数量/路	输出隔离	外形尺寸	质量/kg	冷却方式	类型	整体结构	转子结构形式	测速机构	整体结构	额定效率/%	质量/kg
永磁同步牵引系统	轴控,空转滑行控制更优,可以适应更大的轮径差异	双线圈	500 A 双管 IGBT	2	4	设有输出隔离接触器	2 270.0 mm × 1 996.0 mm × 616.5 mm	1 150	强迫通风冷却	永磁电机	全封闭结构	转子上装有永磁体,不需要励磁电流	无,采用无位置传感器技术	全封闭结构,进风口不设置滤尘器	97	475
异步牵引系统	车控	单线圈	1 500 A 单管 IGBT	1	1	无需设置	2 127.0 mm × 1 430.0 mm × 623.5 mm	880	自然通风冷却	鼠笼式异步电机	非全封闭结构	转子为鼠笼式结构,需要励磁电流	需要配置速度传感器	非全封闭结构,进风口需要设置滤尘器	92	590

注:IGBT 为绝缘栅双极型晶体管;永磁同步牵引系统的永磁电机转子转速(即轮对转速)需要与定子磁场转速同步,而列车 4 个轮对的轮径必定存在差异,因此必须采用轴控方式控制;永磁同步牵引系统中的牵引逆变器设有两个牵引逆变器模块,两个模块的脉冲不同步,需采用双线圈以抑制模块间可能产生的环流;每台永磁电机配置 1 台三相隔离接触器,以便在永磁电机故障时隔离不可关断的反电势,避免对设备产生不良影响。

2.2 列车运行仿真能耗对比

列车运行仿真模拟是根据设计线路纵断面、列车牵引特性、供电特性、列车阻力特性、牵引网电压及运营组织要求等资料,仿真各运营阶段全线列车的运行状态。根据采用永磁电机的 4M2T 列车资料和南京地铁 9 号线线路资料及行车组织资料,采用永磁电机和异步电机的 4M2T 列车运行仿真能耗对比如表 2 所示。

相较于采用异步电机的 4M2T 列车,采用永磁电机的 4M2T 列车牵引单位能耗降低了 4.3%,给

2 永磁同步牵引系统与异步牵引系统差异分析

2.1 系统配置对比

永磁同步牵引系统与异步牵引系统配备相同的受电弓、高压电器箱、滤波电抗器和接地装置,其设备安装形式也完全相同。二者的主要差异为永磁同步牵引系统使用永磁电机,并在牵引逆变器与永磁电机之间设置有隔离接触器,用于牵引电机与牵引系统的隔离保护。

以 4M2T 列车为例,永磁同步牵引系统和异步牵引系统对比如表 1 所示。由系统差异引起的车辆单价差异约为 20%。

电能耗降低了约 4.3%,再生能量增加了约 5.0%。按照全日行车计划,采用永磁电机的 4M2T 列车方案全年可节约牵引能耗约 2.58×10^6 kWh。

2.3 维护成本对比

4M2T 列车的永磁同步牵引系统和异步牵引系统的设备箱配置一致,但永磁同步牵引系统的牵引变流器 IGBT 模块规格及数量、逆变电路数量、输出隔离接触器均有所增加。由此引起的牵引系统维护内容和成本也会有所不同,主要表现为两种牵引电机和牵引逆变器在全寿命周期内的检修项目、工

表 2 采用永磁电机和异步电机的 4M2T 列车运行仿真能耗对比

Tab. 2 Comparison of simulation energy consumption of 4M2T trains with permanent magnet motor and with asynchronous motor									
电机	上、下行	给电能耗/ (kWh)	再生能量/ (kWh)	运行 时间/s	区段 距离/km	牵引 质量/t	每万吨每公里的 单位能耗/(kWh)	运行速度/ (km/h)	旅行速度/ (km/h)
永磁 电机	上行	355.1	-210.5	1 293.0	19	279.1	6.709×10^6	52.8	38.5
	下行	353.0	-222.6	1 292.2	19	279.1	6.670×10^6	52.8	38.5
异步 电机	上行	371.1	-200.4	1 293.0	19	279.1	7.011×10^6	52.8	38.5
	下行	369.0	-212.1	1 292.2	19	279.1	6.972×10^6	52.8	38.5

时、物料成本均有所差异。永磁电机和异步电机工时及物料成本对比如表 3 所示。全寿命周期(按 30 年计)内永磁电机维护工时为 935 h,物料成本为 81 500 元,而异步电机维护工时为 1 140 h,物料成本为 99 900 元。永磁同步牵引逆变器的全寿命周期维护工时为 914 h,物料成本为 1 053 000 元。异步牵引逆变器的全寿命周期维护工时为 919 h,物料成本为 595 400 元。

表 3 永磁电机和异步电机工时及物料成本对比
Tab. 3 Comparison of working hours and material costs of permanent magnet motor and asynchronous motor

检修 周期	永磁电机		异步电机	
	工时/h	物料成本/元	工时/h	物料成本/元
列检	0.1	0	0.1	0
月检	0.5	0	1.0	0
年检	1.0	600	1.5	600
架修	18.0	9 500	24.0	11 500
大修	95.0	19 300	100.0	25 500

对于一列 4M2T 列车而言,采用永磁电机与永磁同步牵引变流器的列车全寿命周期维护工时为 8 616 h,物料成本为 5 516 000 元,采用异步电机与异步牵引变流器的列车全寿命周期维护工时为 11 916 h,物料成本为 3 980 000 元。由此可知,采用永磁电机与永磁同步牵引变流器的 4M2T 列车的全寿命周期维护工时能够降低 3 300 h,但其物料成本增加了 1 536 000 元。将维护工时按 50 元/h 折算成总成本后进行对比,采用永磁电机与永磁同步牵引变流器的 4M2T 列车的总维护成本增加了 1 371 000 元。

3 4M2T 和 3M3T(3 动 3 拖) 永磁同步牵引系统对比

对于 6 节编组的地铁列车而言,4M2T 是主流

的动力配置方式,可以更好地满足地铁列车牵引制动的需求,尤其适应列车故障救援时的牵引要求。根据文献[1],3M3T 列车配置的永磁同步牵引系统,在列车性能上完全能够达到 4M2T 列车的配置要求。

为了降低采用永磁同步牵引系统 4M2T 列车的购置成本和维保费用,本文结合南京地铁 9 号线线路特点,提出将 4M2T 列车改为 3M3T 列车的编组方案,以达到经济节能的目的。

根据南京地铁 9 号线的线路参数,在干燥、清洁的平直轨道上,在 AW2(满座+6 人/m²,额定载荷)工况、额定接触网电压及车轮半磨耗状态下,采用 4M2T 和 3M3T 编组方案的列车牵引制动性能对比如表 4 所示。采用 3M3T 编组方案的列车平均启动加速度和电制动减速度均有所降低,牵引黏着系数和电制动黏着系数均有所增加,表明牵引制动性能有所下降。鉴于南京地铁 9 号线均为地下站,线路运行不存在极端恶劣天气工况,故其空转打滑风险可控。此外,南京地铁 9 号线的最大坡度小于 30‰,3M3T 编组列车的故障运行性能和救援能力也都满足相应的要求,因此本线采用 3M3T 具备可行性。

采用永磁同步牵引系统的 3M3T 编组列车的全寿命周期维护工时为 15 525.8 h,物料成本为 3 687 400 元。采用异步牵引系统的 4M2T 编组列车全寿命周期维护工时为 23 519.6 h,物料成本为 3 967 000 元。由此可知,采用永磁同步牵引系统的 3M3T 编组列车的全寿命周期维护工时能够降低 7 993.8 h,物料成本降低了 279 600 元。将维护工时按 50 元/h 折算成总成本后进行对比,一列采用永磁同步牵引系统 3M3T 编组列车的全寿命维护成本能够降低约 68 万元。

表 4 采用 4M2T 和 3M3T 编组方案的列车牵引制动性能对比

Tab.4 Comparison of train traction and braking performance in 4M2T and 3M3T formation schemes

列车	整车牵引力/kN	牵引黏着系数	平均起动加速度/(m/s ²)	平均加速度/(m/s ²)	整车电制动力/kN	电制动黏着系数	电制动减速度/(m/s ²)
4M2T 列车	351	0.167	≥1.00	≥0.6	351	0.167	1.0
3M3T 列车	295	0.187	≥0.83	≥0.5	279	0.177	0.8

注:3M3T 列车的整车电制动力虽有所降低,在雨雪天气存在空转和打滑风险,但鉴于本线为地下线,故风险可控;3M3T 列车的平均起动加速度、平均加速度虽有所降低,但仍满足 GB/T 7928—2003《地铁车辆通用技术条件》要求;电制动减速度在满级位制动情况下需要补充空气制动。

4 结语

永磁电机具有节能、环保等优点,符合目前低碳、绿色发展政策,未来势必会在轨道交通牵引传动系统中获得较为广泛的应用。永磁同步牵引系统能够有效降低列车的运营能耗,但由于增加了牵引逆变器模块和三相隔离接触器等设备,使得列车购置成本及维护成本有所增加。鉴于此,在既定线路条件下,本文通过仿真研究发现,3M3T 编组列车在牵引制动、故障运行性能和救援能力方面均能满足南京地铁 9 号线的运营要求,且其全寿命维护成本也相对较低,为永磁同步牵引系统的推广应用提供了思路。

由于种种原因,南京地铁 9 号线最终未采用永磁同步牵引系统,但本文提出的通过改变动力配置的方式来平衡成本和效益,为推广应用永磁同步牵引系统提供了可行性思路。假以时日,永磁同步牵引系统的应用必将带来更多的经济效益和社会效益。

参考文献

[1] 肖华, 陈文光, 王龙, 等. 3M3T 城轨列车永磁牵引系统特性

(上接第 233 页)

现的绝缘故障问题,针对性地提出改进措施,彻底解决了牵引电机定子绝缘故障问题,避免同类问题再次发生,提高了牵引电机定子制作试验合格率,确保了牵引电机定子绕组绝缘质量。

参考文献

[1] 刘冠芳, 史开华, 郭琪, 等. 牵引电机绝缘系统的可靠性试验研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(1): 45.
LIU Guanfang, SHI Kaihua, GUO Qi, et al. Reliability experimental research on insulation system of traction motor[J]. Insulating Materials, 2021, 54(1): 45.
[2] 刘佳音, 周升, 唐文进, 等. 耐电晕聚酰亚胺薄膜绕包扁铜线烧结工艺的研究[J]. 绝缘材料, 2011, 44(4): 20.

设计研究[J]. 机车电传动, 2015(3): 65.
XIAO Hua, CHEN Wenguang, WANG Long, et al. Research on design of 3M3T metro vehicle permanent magnet traction system characteristics[J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(3): 65.
[2] 闫磊, 郭枫. 永磁同步牵引系统在沈阳地铁 2 号线地铁车辆上的应用[J]. 机车电传动, 2013(3): 46.
YAN Lei, GUO Feng. Application of permanent synchronous motor traction system in Shenyang Metro Line 2 vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(3): 46.
[3] 邓浩衡, 钟碧羿. 长沙地铁 1 号线永磁同步牵引列车能耗分析[J]. 现代城市轨道交通, 2017(9): 10.
DENG Haoheng, ZHONG Biyi. Train energy consumption analysis of permanent magnet synchronous traction system for Changsha Metro Line 1[J]. Modern Urban Transit, 2017(9): 10.

· 收稿日期:2021-10-08 修回日期:2021-12-01 出版日期:2024-02-10
Received:2021-10-08 Revised:2021-12-01 Published:2024-02-10
· 通信作者:李栋,高级工程师,379480024@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

LIU Jiayin, ZHOU Sheng, TANG Wenjin, et al. The sintering process of corona-resistant polyimide film for flat copper wire[J]. Insulating Materials, 2011, 44(4): 20.
[3] 牛志钧, 卫文改, 王鑫. HX 系列机车交流牵引电机典型故障分析与解决方案[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(1): 95.
NIU Zhijun, WEI Wengai, WANG Xin. Malfunction analysis and solution for AC traction motor of HX series locomotive[J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(1): 95.

· 收稿日期:2021-07-21 修回日期:2021-11-20 出版日期:2024-02-10
Received:2021-07-21 Revised:2021-11-20 Published:2024-02-10
· 通信作者:那春龙,高级工程师,710860456@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license