



永磁同步牵引电机在青岛地铁的应用与优化研究

李大勇, 乙永强, 陈明可, 张红江

(青岛地铁运营有限公司 车辆部, 山东 青岛 266031)

摘要: 永磁同步牵引电机凭借其节能、高效、轻量化等特点, 在轨道交通领域得到了快速发展, 但在实际运用过程中也暴露出一些问题。文章以青岛地铁永磁牵引项目为例, 对其应用过程中出现的永磁电机异常失磁、齿轮箱异响、节能效果不显著等问题, 通过相关标准研究、问题理论分析、现车测试论证等手段开展了问题分析与研究, 并提出问题解决措施及优化建议; 在此基础上, 从控制策略、失效模式分析角度对轨道交通永磁电机设计中的失磁故障和短路故障等关键环节开展探讨, 结合实践应用对永磁电机的设计制造、试验标准提出改善建议, 对后续地铁车辆永磁牵引技术的应用升级具有参考及借鉴意义。

关键词: 永磁同步电机; 地铁车辆; 型式试验; 失磁故障; 齿槽转矩; 主动短路保护

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)02-0121-08

0 引言

永磁同步牵引电机具有体积小、重量轻、功率密度高、节能高效的特点, 近几年在轨道交通行业尤其是地铁领域得到快速应用和推广^[1]。各相关公司对永磁牵引系统和永磁同步牵引电机进行了深入的研究^[2-4], 并推出了永磁同步牵引电机的国际和国家标准^[5-6]。为响应国家节能降耗的号召, 青岛地铁运营有限公司在青岛地铁3号线上进行了永磁同步牵引系统的应用和推广。考虑车辆改造的经济性、可靠性及整车均衡性等因素, 青岛地铁3号线采用将现有异步牵引系统改造为永磁牵引系统的技术路线。

青岛地铁3号线于2015年开通运营, 车辆采用6节编组B型列车, 牵引系统为Alstom公司的OptOnix平台系列产品, 1C4M架构, 牵引电机为异步感应电机。考虑车辆改造的经济性、可靠性及整车均衡性等因素, 青岛地铁牵引系统改造采用利用既有牵引逆变器箱体安装结构空间, 被动适应性设计牵引逆变器箱的思路。系统改造后的空载试运行期间, 列车整体运行平稳,

未出现较大的牵引逆变器与永磁电机在牵引制动匹配方面的控制逻辑问题, 但永磁电机在地面进行牵引系统组合试验阶段和车辆型式试验阶段均出现了几个典型问题: ①在永磁电机地面联调型式试验阶段, 出现多台电机异常失磁问题; ②永磁电机装车后在车辆型式试验阶段, 出现了列车非自身动力条件下低速运行时永磁电机引起的齿轮箱异响问题; ③在车辆型式试验阶段, 永磁电机能耗试验数据未达到预期目标问题; ④永磁系统设计缺少永磁电机失磁故障和短路故障的有效预警机制和应对措施。

本研究通过理论分析和现场试验, 探索了针对上述问题的解决方案, 并对永磁电机的设计、试验标准提出了优化建议。

1 永磁系统改造参数

永磁电机采用轴控方式, 永磁系统改造主要更换相应牵引电机和制动电阻箱, 其他牵引系统设备利用车辆既有部件。列车牵引系统主电路采用两电平电压型直-交逆变电路。经受流器输入的DC 1 500 V直流电

通信作者: 李大勇, 男, 高级工程师, 主要从事轨道交通技术研究; E-mail: lidayong888@163.com

引用格式: 李大勇, 乙永强, 陈明可, 等. 永磁同步牵引电机在青岛地铁的应用与优化研究[J]. 机车电传动, 2025(2): 121-128.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.014.

Citation: LI Dayong, YI Yongqiang, CHEN Mingke, et al. Application and optimization research of permanent magnet synchronous traction motors in Qingdao metro[J]. Electric drive for locomotives, 2025(2): 121-128.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.014.

由牵引变流器变换成频率、电压均可调的三相交流电，向永磁牵引电机供电。每台牵引逆变器含有2套功率模块，每个功率模块含有2组牵引逆变单元与1组斩波单元。

永磁同步牵引电机型号为TQ-230，电机类型为永磁同步牵引电机，6极，轴向自通风，全悬挂式电机；永磁材料为钕钴SmSo32合金，转子冲片材料为硅钢50WW470。

主要技术参数：

额定功率	230 kW
额定转矩	1 157 N·m
额定电机电压（基波有效值）	1 050 V
额定电机电流（基波有效值）	161 A
额定转速	1 900 r/min
额定频率	95 Hz
额定效率（基波值）	95%
绝缘等级	200级

2 永磁同步牵引电机应用问题分析

2.1 永磁电机异常失磁

2.1.1 故障现象

青岛地铁永磁牵引电机在地面实验室进行牵引系统组合试验阶段，出现多台电机不同程度失磁的故障，最大失磁率达50%。失磁电机拆解后，电机的转子铁芯表面防腐蚀漆脱落，冲片有发蓝现象，呈现典型的高温变色状态；定子齿部表面漆脱落，冲片未变色。失磁电机的转子和定子状态如图1所示。



图1 永磁电机失磁后转子和定子状态

Fig. 1 States of rotor and stator of permanent magnet motor demagnetized

2.1.2 故障原因分析

1) 型式试验项目分析

重新复核永磁电机部件级型式试验报告，结果显示电机严格按照标准中合格线的要求进行了温升试验、短时过载试验、防失磁能力校验试验等试验项目，试验报告中测试结果数据均为“合格”。

复核地面牵引系统组合试验阶段，按照IEC 61133标准要求对地面试验台、陪试电机及试验方法等进行排查，均未发现异常。其中地面联调试验台选定VVVF逆变器作为永磁电机的驱动试验装置，保证了

电机从静止到额定间平稳过渡的运转工况。

2) 电机永磁体材料分析

永磁电机的永磁体一般使用合金永磁材料：常见为铁铈硼、钕钴^[7]。这两种材料主要区别为：钕铁硼磁铁是最强的永磁体之一，比钕钴磁铁的磁力强；但钕铁硼磁铁在高温、潮湿环境下的稳定性不如钕钴磁铁。其中，永磁材料的内禀矫顽力(H_{cj})是衡量磁体抗退磁能力的一个物理量，表示材料中的磁化强度退到零的矫顽力；矫顽力(H_{cb})表征永磁材料抵抗外部反向磁场或其他退磁效应的能力。从故障电机烧损情况分析来看，故障时刻的转子温度在200℃以上。青岛地铁永磁牵引电机永磁体材料采用钕钴合金，永磁体正常使用温度为-40~300℃，最高连续工作温度300℃^[8]。其主要特性指标如下：

①物理特性：

剩磁(B_r)的温度系数：典型值-0.035%K⁻¹ (20~300℃)；

内禀矫顽力(H_{cj})的温度系数：典型值-0.2%K⁻¹ (20~300℃)；

密度：8.3~8.5 g/cm³。

②磁力特性：

剩磁(B_r)：1.120 T(11.2 kGs)≤ B_r ≤1.125 T (11.25 kGs)，20℃；

剩磁(B_r)：1.089 T(10.89 kGs)≤ B_r ≤1.094 T (10.94 kGs)，100℃；

矫顽力(H_{cb})：≥840 kA/m (10.3 kOe)，20℃；

矫顽力(H_{cb})：≥786 kA/m (9.88 kOe)，100℃。

综上，从电机永磁体的材料选用以及材料的温度、磁力特性等角度分析，材料选型无问题。

3) 电机热设计分析

由于永磁电机采用的是全封闭设计结构，电机温度过高会导致永磁体失磁^[9]，这会对电机的安全运行造成严重后果。因此，排查电机的热设计因素，电机温升计算结果如图2所示。

在环境温度为40℃时，定子线圈最高温升为122.5 K，平均温升为116.0 K。线圈端部温度高的一侧是电机出风口一侧，出风口温度(57℃)较入风口高，换热强度减弱，故出风口侧线圈温度较高。定子铁芯最高温升为104.3 K，平均温升为90.5 K。转子部位的温度为90℃，均小于永磁体最高连续工作温度300℃。因此，电机热设计无问题。

4) 电机磁设计分析

在永磁电机结构设计中，定子、转子槽数、沟槽结构会影响电机的振动、噪声、温升情况，特别是转子的斜极能够改变电机径向电磁力大小，一般斜极分段越多，斜极角度越大；径向电磁力越小，电机振动噪声也越小。对于永磁电机，转子永磁体产生的磁场是静态的(DC磁场)，不会随时间变化，因此一般情

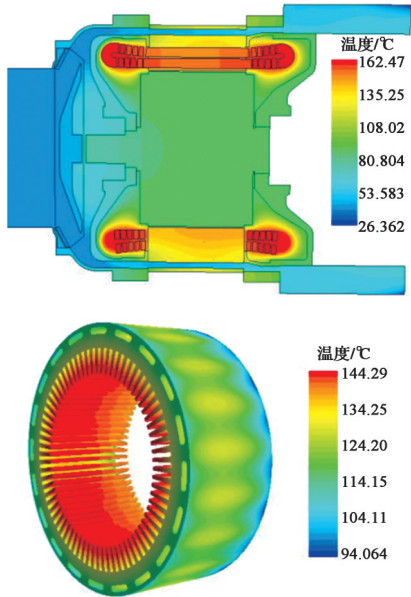


图2 永磁电机温升计算

Fig. 2 Temperature rise calculation of permanent magnet motor

况下不会引起铁损损耗（铁损损耗主要包括磁滞损耗或涡流损耗），但电流中的高频谐波可能导致转子铁芯中产生高频涡流损耗。因此，对电机磁设计进行分析，经过仿真分析最终发现电机磁密过高，存在磁场饱和的问题，转子冲片材料50WW470在高频下铁损损耗过大。电机磁场分布如图3所示。

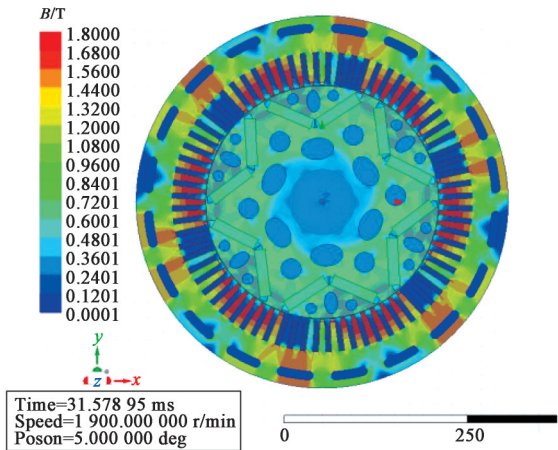


图3 永磁电机额定负载磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution of permanent magnet motor at rated load

模拟仿真后发现电机的反电势谐波较大，存在23项、25次谐波，电机在额定转速时的谐波含量为18.7%，最高转速时谐波含量为38%，高频谐波加剧了冲片的铁损损耗，电机电势波形及谐波如图4所示。

综合分析，此次电机退磁的主要原因是电机设计方案不合理，磁密过高，存在高次谐波使电机损耗偏大，电机铁芯温度持续升高，从而导致磁钢高温退磁。

2.1.3 解决措施及效果

分析永磁电机异常失磁的原因后，对青岛地铁永磁牵引电机进行优化，措施如下：

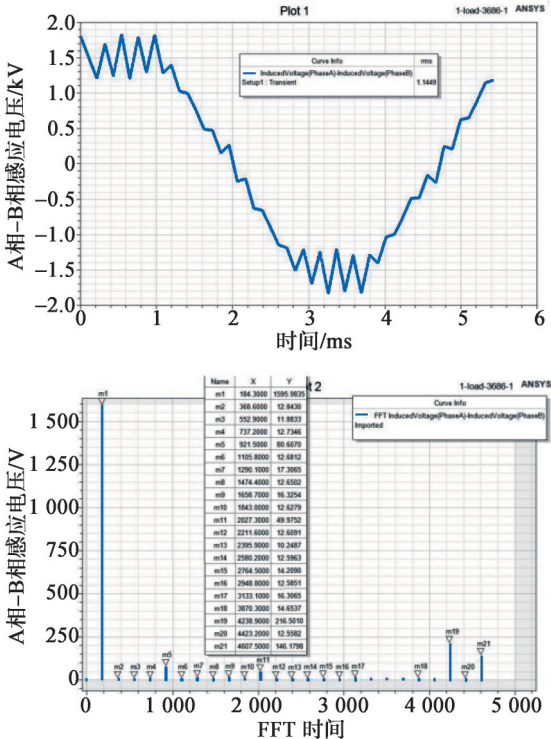


图4 永磁电机负载工况最高转速反电势波形及谐波情况

Fig. 4 Back electromotive force waveform and harmonic condition of permanent magnet motor at maximum speed under load conditions

①优化电机转子冲片材质，转子硅钢冲片材料由50WW470变更为B35AV1900，进一步提高导磁率、降低铁芯损耗。

②定子转子间气隙由1.5 mm变更为2.5 mm，改善气隙磁场的波形，降低气隙磁场的谐波，降低电机定子齿部磁密。

③转子永磁体轴向分8段交错式错极布局，错极角度2.5°，消除反电势的谐波。

④在转子端部增加扇叶，搅动电机内部空气，利于内部空气在端盖处的热交换。

优化后的电机磁场分布如图5所示，电势波形及谐波如图6所示。

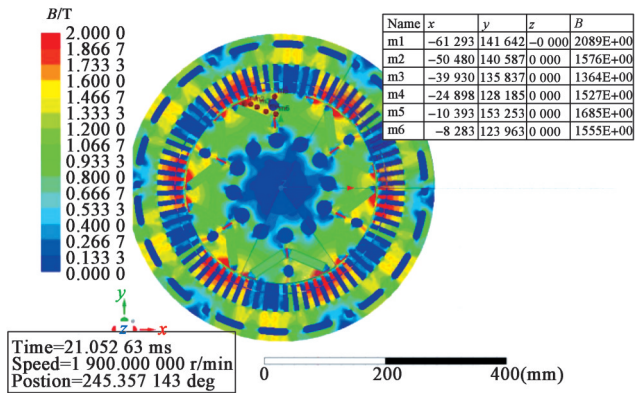


图5 优化后永磁电机额定负载磁场分布

Fig. 5 Magnetic field distribution of optimized permanent magnet motor at rated load

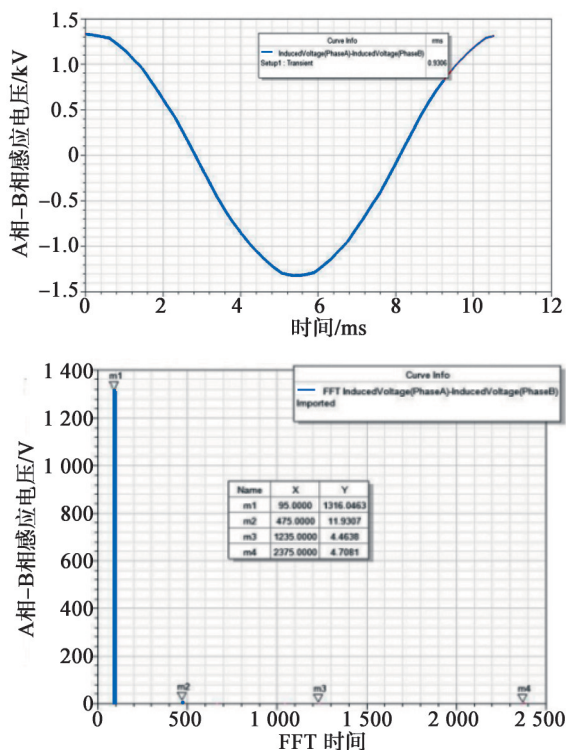


图6 优化后永磁电机负载工况最高转速反电势波形及谐波情况

Fig. 6 Back electromotive force waveform and harmonic condition of optimized permanent magnet motor at maximum speed under load conditions

试验表明, 青岛地铁永磁电机按上述项点重新优化设计后, 已装车于正线运行考核。列车在AW0~AW3各种工况下累计运行达1 000 km, 无故障报出, 跟踪永磁电机处的温度贴纸, 显示温度值在正常范围。至此, 永磁电机异常失磁问题得以解决。

2.2 齿轮箱运行时异响

2.2.1 故障现象

青岛地铁永磁电机在装车后的车辆型式试验阶段, 出现了列车非自身动力条件下(外界动力下推拉车时), 列车由静止到启动的低速段时(一般3 km/h左右), 动车齿轮箱发出“咯噔”的机械锤击响声。该问题存在影响齿轮箱和联轴节使用寿命的风险。

2.2.2 故障原因

为找到异响声来源, 工作人员在现场采用噪声测试仪、听诊器等设备进行定位跟踪, 声音测量结果显示最大值在93 dB左右。分析车辆牵引逆变器输出30%级位时, 电机理论输出力矩约为303 N·m; 20%级位时电机输出力矩约为200 N·m。永磁电机的启动转矩在40~50 N·m。考虑车辆的启动阻力和永磁电机特性, 列车凭自身动力启动时, 牵引力的传递方向为: 电机定子旋转电磁力矩→电机转子→联轴节→齿轮箱→轮对, 电机启动时的力矩远大于齿槽转矩, 因此异响不明显; 列车在非动力情况下被推动时, 牵引力的传递方向为

轮对→齿轮箱→联轴节→电机转子→电机定子。低速下, 转子经过定子上连续的2个齿顶时, 相互的磁力作用, 导致同样转矩下, 克服齿槽转矩的出力较小, 齿槽转矩更明显, 而且低转速下拖动电机转矩中包含了机械转矩、单边磁拉力等其他的转矩。因此, 列车在非动力情况下被推动时, 齿轮箱异响明显。

永磁电机的齿槽转矩是转子永磁体与定子铁芯沟槽结构之间相互作用的电磁力矩, 齿槽转矩的计算公式^[10]为

$$T_{\text{cog}} = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (1)$$

式中: T_{cog} 为永磁体电机齿槽转矩; W 为电机磁场储能; α 是定子和转子之间的相对位置角。

青岛地铁永磁电机齿槽转矩设计值为6.25 N·m, 在地面对转矩值进行了实际测量, 结果如下: 电机在50 r/min转速下, 齿槽转矩最大约为5 N·m; 10 r/min转速下, 齿槽转矩最大约为17 N·m; 5 r/min转速下, 齿槽转矩最大约为30 N·m。经分析, 由于IEC 60349-4中规定齿槽转矩作为研究性试验, 且限值未明确标准。永磁电机在出厂时, 受限于转矩试验台精度问题及现场试验条件, 未进行电机齿槽转矩试验。

综上分析, 青岛地铁永磁项目齿轮箱异响原因为永磁电机齿槽转矩设计不合理, 转矩值偏大, 导致转子旋转时, 克服转子磁极与定子冲片凸起之间的磁力过大, 进而将冲击力由电机转轴传递至齿轮箱的齿轮, 最终齿轮箱发出异响。

2.2.3 解决措施及效果

相关研究表明, 永磁同步牵引电机的设计应减小齿槽转矩和转矩波动^[11]。目前抑制齿槽转矩的方法主要分成两种: 第一种是通过VVVF对电机的控制策略来抵消齿槽转矩的被动抑制, 但目前该方法仅停留在研究阶段, 尚无有效的实施手段; 第二种是主动抑制方法, 在结构设计阶段即考虑该因素, 从电机定子沟槽、转子冲片形状等本体结构考虑, 在设计电机时通过改变其结构参数等来削弱电机的齿槽转矩^[12]。

目前, 由于青岛地铁永磁电机已批量生产, 该问题暂无有效解决措施, 可补救方案为: 通过在永磁电机、联轴节、齿轮箱处贴温度贴纸, 日常跟踪统计温度值; 车辆运行60万km后对牵引电机、联轴节、齿轮箱进行评估。因此, 永磁电机在设计时应充分考虑定子沟槽形状、转子冲片形状及转子永磁体嵌入角度等因素, 使之尽可能减小齿槽转矩, 并在部件级型式试验中予以验证。

2.3 节能不显著

2.3.1 永磁牵引系统能耗

牵引系统是实现轨道车辆能量转换的关键, 其能耗约占轨道交通能耗的30%~50%^[13]。德国为EO4P

高速列车开发了抱轴式直驱永磁同步电机,装车试验结果表明,与同功率的异步电机相比,其损耗降低了50%,质量减小了30%,噪声降低了15 dB^[14]。理论计算分析和实际线路测试数据表明,永磁同步牵引系统综合节能可达30%^[15],采用永磁同步牵引电机是降低牵引能耗实现节能减排的有效措施。为验证青岛地铁永磁同步牵引电机的能耗特性,特将开展的能耗试验作为研究性试验。

通过测试牵引逆变器、辅助逆变器、制动电阻的电压、电流值,计算牵引能耗、辅助能耗和制动电阻能耗。

车辆采用ATO模式在典型运行图下进行能耗测试,线路全长25.56 km,永磁电机车辆和异步感应电机车辆分别在AW0、AW2、AW3工况下进行能耗试验。永

磁电机的能耗试验数据如图7所示。
永磁同步电机与异步感应电机的能耗对比见表1。

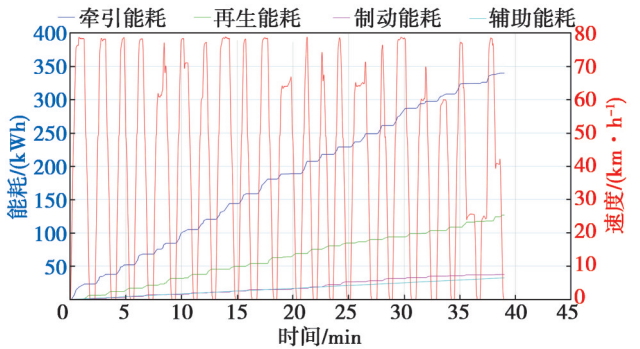


图7 永磁电机AW0工况能耗数据
Fig. 7 Energy consumption data of permanent magnet motor under AW0 conditions

表1 永磁电机与异步感应电机AW0工况能耗数据对比分析

Table 1 Comparative analysis of energy consumption data between permanent magnet motor and asynchronous induction motor under AW0 conditions

电机类型	工况	区 间	牵引 能耗/(kW·h)	再生 能耗/(kW·h)	制动电阻 能耗/(kW·h)	辅助 能耗/(kW·h)	牵引用时/ min
永磁同步电机	AW0	青岛北—青岛	340.45	125.72	73.08	30.51	31
		青岛—青岛北	322.15	88.75	92.18	34.45	30
异步感应电机	AW0	青岛北—青岛	356.07	46.85	145.60	34.46	31
		青岛—青岛北	351.96	62.94	120.87	34.93	30

由测试数据可见,永磁同步牵引电机较异步感应电机确实可以节能,但节能效果并未达到预期。

2.3.2 能耗高的原因

青岛地铁的永磁项目为车辆改造项目,受改造现场等诸多客观条件限制,无法与新造车辆的良好兼容性相比,逆变器的散热设计也受限。永磁电机节能效果最终与牵引逆变器的匹配设计和车辆整车布局设计等因素有关,同时,电机结构设计中转子与定子间气隙较大,从而影响节能效果的发挥。

2.3.3 建议的优化措施

永磁牵引系统的节能优化,除了从永磁电机自身结构设计优化和与牵引逆变器匹配设计来进行外,还可从以下几方面进一步提升永磁牵引系统的节能性能:

①由于采用永磁电机,应优化车辆牵引系统和制动系统的电空配合逻辑,降低车辆电空转换点,以最大效率发挥电制动,既能减少闸瓦的磨耗,又能实现节能。考虑3号线仅进行了1列车的永磁改造,为保证整体车辆牵引制动软件的一致性,最终未采取该措施。

②取消车辆制动电阻,在正线设置合理的能馈装置,以充分发挥车辆回馈制动的优势。目前主流的地面能馈装置主要有中压逆变装置、飞轮储能装置、地面制动电阻等形式。通过地面能馈装置合理的间距和容量设计,匹配车辆斩波制动频率,最终实现地面能馈装置控制供电牵引网侧车辆供电母线的电压稳定性,实现“削峰添谷”。从轨道交通大系统角度,更好地发

挥永磁电机的节能效果。青岛地铁已经采取该措施配合永磁系统实现进一步节能。

③优化列车运行图,通过调整同一供电分区内不同列车的牵引、制动状态,实现“此列车牵引彼列车制动”的效果,避免供电牵引网整体电能浪费,此方式可获得较大的节能效益。目前青岛地铁已经开始立项研究该节能方式,具体节能效果有待后续跟踪验证。

3 对永磁同步牵引电机设计的建议

3.1 永磁电机失磁故障和短路故障控制策略探讨

伴随永磁技术的发展,结合青岛地铁永磁同步牵引电机的应用情况,目前永磁电机技术主要存在的问题是缺少有效的电机侧短路诊断与保护设计、电机失磁的诊断与保护设计。

电机侧短路诊断与保护设计的主要研究方向是主动短路保护技术ASC(active short circuit),当永磁电机发生电机侧匝间短路后,电机的三相间会产生不平衡电流,进而产生不平衡转矩,最终引起电机异常抖动。即使切除永磁电机后,由于永磁体的存在,电机仍处于发电状态,电机旋转不平衡仍然存在。可通过闭合VVVF主回路的IGBT三相桥臂的上桥臂或下桥臂^[16],形成电机三相短接的效果,人为实现电机故障情况下三相电流平衡,减少对正线载客运营列车的影响。据相关研究表明,永磁电机在转速较高的情况下,如果

将永磁同步电机三相互短, 电机的转矩输出接近零^[17]。但是, 该方案没有对主动短路过程中电机的状态及影响进行研究, 亦缺少实车验证, 仍有待进一步研究。

电机失磁的诊断与保护设计是指当失磁故障发生时, 如何准确地诊断出电机失磁, 并快速切除失磁电机是问题的核心所在。电机失磁时的电机电流谐波、转矩、磁链、温升等相关量会发生变化^[18], 可通过算法进行识别, 但该解决思路也主要处于理论研究阶段, 期待研究的突破性进展。

上述两个问题对地铁运营商的影响比较大, 也是制约永磁电机大批量应用的关键因素。

3.2 永磁电机故障模式及失效分析

与异步牵引系统相比, 永磁牵引系统特有的故障是永磁同步电机短路故障。因此, 设计时必须考虑电机短路故障的应急处置。根据电机热计算并结合运营商的救援方案, 提前制定应急处理方案。永磁同步电机短路故障等级应为严重故障, 处理措施应结合运营线路长度、存车线设置、线路限速等客观条件, 对电机短路进行仿真计算, 制定车辆限速运营或退出运营条件, 以最大限度降低永磁电机故障对运营造成的影响。

4 对永磁同步牵引电机标准修订的建议

目前永磁同步牵引电机试验考核的主要依据为 IEC 60349-1 “旋转电机 定额和性能”、IEC 60349-2 “电子变流器补偿的交流电动机”、IEC 60349-4 “与电子变流器相连接的永磁同步电机”、GB-T 22669 “永磁同步电动机试验方法”等。标准规定的型式试验项点主要包括温升试验、特性试验、超速试验、振动试验、噪声试验、空载试验、负载电流试验、绝缘试验等。由于永磁电机的特殊性, 与异步感应电机相比, 永磁电机型式试验项点主要增加了防失磁能力校验、旋转编码器试验等。

考虑永磁电机目前使用永磁材料的稳定性较差, 且从青岛地铁永磁电机的应用情况来看, 仅达到标准内例行试验、型式试验中合格线的要求, 已无法全面验证永磁电机的可靠性。对永磁电机标准修订建议如下:

①建议将研究性试验——齿槽转矩试验、感应电压温度系数试验纳入型式试验项目, 同时应提高温升和短路等型式试验的严酷等级, 达到高于标准中合格线的要求。

②在部件级型式试验阶段增加永磁电机在高次谐波下的电磁设计、热设计仿真设计和实测验证环节。

③齿槽转矩对永磁电机装车后的影响较大, 对齿轮箱、联轴节产生冲击会影响使用寿命。由于标准中

未明确齿槽转矩限值, 建议永磁电机齿槽转矩设计值小于 10 N·m。

5 结束语

永磁同步牵引电机在轨道交通领域的发展势头强劲, 结合永磁牵引系统在青岛地铁的实际应用, 建议从车辆整车设计阶段提前介入、试验阶段充分验证, 使永磁系统的节能优势得以充分发挥; 同时应从各种工况下电机热磁设计仿真、转子磁极结构优化、电机齿槽转矩设计与验证等方面开展优化, 特别是考虑永磁电机在特殊条件下的稳定性, 以提升整个永磁系统的可靠性。

随着技术研究的逐步深入和运营单位对运营指标要求的不断提高, 亟须形成永磁电机的失磁故障和短路故障的监测、预警、处置的完善闭环措施, 并从实车验证的角度出发, 开展实质性效果验证与研究。

参考文献:

- [1] 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): 9-17.
FENG Jianghua. Key technologies and development trends of permanent magnet motor traction system for rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2018(6): 9-17.
- [2] 周永刚, 陈超录, 刘雄. 地铁永磁直驱牵引系统设计方法[J]. 机车电传动, 2015(6): 34-37.
ZHOU Yonggang, CHEN Chaolu, LIU Xiong. Metro permanent magnet direct-driving traction system design method[J]. Electric drive for locomotives, 2015(6): 34-37.
- [3] 戴计生, 胡德安, 徐海龙, 等. 基于深度高斯过程的永磁牵引电机匝间短路分级评估方法[J]. 机车电传动, 2024(2): 108-117.
DAI Jisheng, HU Dean, XU Hailong, et al. Grading evaluation method for inter-turn short circuit of permanent magnet traction motor based on deep Gaussian processes[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 108-117.
- [4] 赵川宇, 刘雄, 饶东, 等. 基于 DC 750 V 供电的地铁永磁牵引电机设计[J]. 机车电传动, 2018(2): 87-89.
ZHAO Chuanyu, LIU Xiong, RAO Dong, et al. PMSM design for DC 750 V power supply metro vehicle[J]. Electric drive for locomotives, 2018(2): 87-89.
- [5] IEC. Electric traction - rotating electrical machines for rail and road vehicles part 4: permanent magnet synchronous electrical machines connected to an electronic converter: IEC 60349-4: 2012[S]. Geneva: IEC, 2012.
- [6] 全国牵引电气设备与系统标准化技术委员会. 电力牵引轨道机车车辆和公路车辆用旋转电机 第4部分: 与电子变流器相连的永磁同步电机: GB/T 25123.4—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Technical Committee 278 on Electric Equipment

- and Systems for Railways of Standardization Administration of China. Electric traction—rotating electrical machines for rail and road vehicles—part 4: permanent magnet synchronous electrical machines connected to an electronic converter: GB/T 25123.4—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [7] 宋欣, 贾文涛, 李健, 等. 2:17型钕钴永磁材料的相变机制研究新进展[J]. 材料导报, 2023, 37(3): 65-73.
SONG Xin, JIA Wentao, LI Jian, et al. Recent progress on phase transformations of 2:17-type Sm-Co permanent magnets[J]. Materials reports, 2023, 37(3): 65-73.
- [8] 马颖涛, 李红, 李岩磊, 等. 轨道交通中永磁同步牵引系统的优势与挑战[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(3): 66-70.
MA Yingtao, LI Hong, LI Yanlei, et al. Overview of advantages and challenges of permanent magnet synchronous traction system in railway transit[J]. Railway locomotive & car, 2015, 35(3): 66-70.
- [9] 董明桂. 直接驱动式牵引电机的特点及应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2006, 29(2): 56-58.
DONG Minggui. Characteristics and application of direct drive motor[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2006, 29(2): 56-58.
- [10] 闫宏亮, 武亚斌, 杨泽心, 等. 定转子双开槽对永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(7): 166-170.
YAN Hongliang, WU Yabin, YANG Zexin, et al. Effect of double slotting of the stator and rotor on the tooth torque of permanent magnet synchronous motors[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2023(7): 166-170.
- [11] 李明明. 城轨列车永磁同步牵引电机拓扑结构优化与磁场分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
LI Mingming. Topology optimization and magnetic field analysis of permanent magnet synchronous traction motors for urban rail train[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [12] 梁飞飞. 基于有限元分析的表贴式永磁同步电机齿槽转矩研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
LIANG Feifei. Research of surface-mounted permanent-magnet synchronous motor cogging torque based on finite element analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [13] 张济民, 苏辉, 任乔, 等. 轨道交通永磁同步牵引系统发展概况与关键技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(6): 63-77.
ZHANG Jimin, SU Hui, REN Qiao, et al. Review on development and key technologies of permanent magnet synchronous traction system for rail transit[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(6): 63-77.
- [14] 陈萍, 罗情平. 国外永磁同步牵引系统的发展与应用[J]. 国外铁道车辆, 2017, 54(5): 14-18.
CHEN Ping, LUO Qingping. Analysis of the development and application of the permanent magnet synchronous traction system at abroad[J]. Foreign rolling stock, 2017, 54(5): 14-18.
- [15] 綦芳, 王峥, 江巧逢. 城市轨道交通节能措施研究[J]. 铁道车辆, 2023, 61(3): 102-108.
QI Fang, WANG Zheng, JIANG Qiaofeng. Research on energy-saving measures of urban rail transit[J]. Rolling stock, 2023, 61(3): 102-108.
- [16] 暴杰, 许重斌, 孙明冲. PMSM三相短路暂态过程解析建模及主动短路功能实现[J]. 微电机, 2023, 56(1): 70-74.
BAO Jie, XU Chongbin, SUN Mingchong. Analytical modeling of PMSM three-phase short-circuit transient process and realization of active short-circuit function[J]. Micromotors, 2023, 56(1): 70-74.
- [17] 吴志红, 陆科, 朱元. 车用电机控制器功能安全及主动短路分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 1298-1305.
WU Zhihong, LU Ke, ZHU Yuan. Analysis of active-short-circuit of permanent magnet synchronous motor in electric vehicles[J]. Journal of Tongji university(natural science), 2018, 46(9): 1298-1305.
- [18] 罗兵, 彭思程, 谭学武, 等. 永磁同步电机失磁故障检测综述[J]. 湖南电力, 2022, 42(3): 104-108.
LUO Bing, PENG Sicheng, TAN Xuewu, et al. Review on fault detection of permanent magnet synchronous motor[J]. Hunan electric power, 2022, 42(3): 104-108.

Application and optimization research of permanent magnet synchronous traction motors in Qingdao metro

LI Dayong, YI Yongqiang, CHEN Mingke, ZHANG Hongjiang

(Rolling Stock Department, Qingdao Metro Operation Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266031, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous traction motors have experienced rapid development in urban rail transit due to their characteristics, such as energy saving, high efficiency, and lightweight design. However, some deficiencies have emerged in practical applications. Based on the permanent magnet traction system of Qingdao metro, this study analyzed issues encountered during actual operation, including abnormal demagnetization of permanent magnet motors, abnormal noise from gearboxes, and limited energy-saving effects, through investigating relevant standards, the theoretical analysis of problems, and on-board experimental demonstrations. Solutions and optimization suggestions were then proposed. Based on these results, a subsequent study focused on the design of permanent magnet motors in urban rail transit, emphasizing control strategies and failure mode analysis, with particular attention to key aspects such as demagnetization faults and short-circuit faults. Improvement suggestions were formulated for the design, manufacturing, and testing standards of permanent magnet motors, taking into account practical applications. The study outcomes offer references and insights for future upgrades in the application of permanent magnet traction technology in metro vehicles.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; metro train; type test; demagnetization fault; cogging torque; active short-circuit protection