

研
究
开
发

地铁永磁直驱牵引系统设计方法

周永刚, 陈超录, 刘 雄

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 周永刚(1977-), 男, 工程师, 从事轨道交通传动系统技术研究和产品开发工作。

摘 要: 介绍了地铁永磁直驱牵引系统设计的核心问题, 从主电路拓扑、牵引/电制动特性、稳态短路电流、空载反电势、电机额定功率与冷却方式 6 个方面详细分析并阐述了永磁直驱牵引系统的设计方法, 最后分析了国外地铁永磁直驱牵引系统典型应用案例。

关键词: 地铁; 永磁直驱; 牵引系统; 参数匹配; 主电路; 反电势

中图分类号: U231; TM351 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2015)06-0034-04

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.06.009

Metro Permanent Magnet Direct-driving Traction System Design Method

ZHOU Yonggang, CHEN Chaolu, LIU Xiong

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Core problems of metro permanent magnet direct-driving traction system design were introduced, and the system design method was analyzed and expounded in detail form main circuit, traction/brake characteristics, steady short-circuit current, no-load opposing generated voltage, motor rated power and cooling style. At last, the foreign application cases of permanent magnet direct-driving traction system were introduced.

Keywords: metro; permanent magnet direct-driving; traction system; parameter matching; main circuit; opposing generated voltage

0 引言

牵引传动系统是地铁列车实现机电能量转换的“心脏”单元, 其性能在某种程度上决定了地铁列车的动力品质、能耗和控制特性, 因而是地铁列车技术升级的关键。

永磁同步牵引系统具有高效率、高功率密度、高功率因数等显著优势, 是当前轨道交通牵引系统技术研究的热点。永磁同步电机体积小、重量轻的优点使得地铁列车取消齿轮箱、采用直接传动模式成为了可能。直接传动模式因取消了齿轮箱, 没有传递损耗, 降低了地铁列车的牵引能耗, 同时可以为转向架的设计提供更多的自由空间, 能减小转向架轴距, 大幅降低列车最小转弯半径, 有利于轨道交通站段线路的设计, 降低线路建设成本。文章将主要介绍地铁永磁直

驱牵引系统设计方法。

1 国内外研究现状

以德国、法国和日本为代表的轨道交通装备制造强国纷纷开展轨道车辆永磁直驱牵引系统的研制, 目前已经完成样机的研制, 并进行了相应的装车运行考核^[1]。

西门子针对地铁列车开发了 150 kW 永磁直接传动系统, 其永磁直驱电机如图 1 所示, 转向架如图 2 所示, 轴间距由传统的 2.5 m 缩短到 1.6 m。



图 1 直接传动永磁同步电机

收稿日期: 2015-10-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAG12B01)



图 2 直接传动转向架

JR 东日本铁路公司开始为 AC Train 电动车组开发了直接传动永磁同步电机（DDM），其装有直接传动永磁电机的轮对如图 3 所示。2002 年开始，搭载在商业运行的 103 系电动车组上进行了大约 20 万 km 的运行试验，沿线噪声约可降低 5 dB。

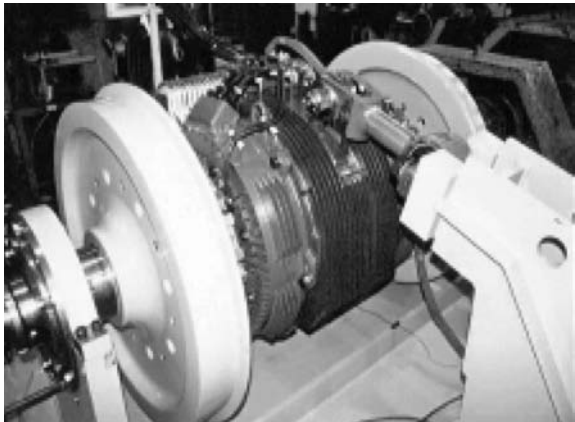


图 3 装有直驱永磁同步电机的轮对

斯柯达公司针对低地板车开发了永磁直驱牵引系统，电机额定功率 30 kW，额定转速 196 r/min，最高转速 706 r/min。装有永磁直驱牵引电机的低地板车如图 4 所示。



图 4 装有永磁直驱电机的低地板车辆

国内轨道车辆永磁直驱牵引系统研究工作起步较晚，目前主要有南车株洲电力机车研究所有限公司（株洲所）开展了相关的研究工作。

株洲所开发的 190 kW 地铁永磁同步电机于 2011 年在沈阳地铁 2 号线成功装车考核，实现了永磁同步牵引系统在国内轨道交通领域的首次应用。之后又在 350 km/h 动车组、长沙地铁 1 号线列车与浦镇低地板

有轨电车等项目上实现了永磁同步牵引系统的小批量应用。然而，上述应用是基于带减速齿轮箱传动模式的，直驱式永磁同步牵引系统开发在国内尚处于起步阶段，株洲所已开发相关功能样机并在进行地面试验研究。

2 地铁永磁直驱牵引系统的核心问题

永磁直驱牵引系统在给地铁列车转向架带来一系列优点的同时也带来了一个问题：因牵引电机的输出转矩成倍上升，其重量也大幅增加，尤其是抱轴式直驱电机大幅增加了转向架的簧下质量，既影响了转向架的可靠性，也限制了列车运行的速度等级。因此，如何降低直驱电机的重量成为永磁直驱牵引系统的核心问题。

交流传动系统参数匹配存在 2 种技术路线：一种是大电机小逆变器模式，另一种是小电机大逆变器模式。前者为了降低逆变器的容量，不惜增加电机的体积。在电力电子变流技术不发达的年代，逆变器占系统的主要成本，该模式被普遍采用；而后者则相反，为了减小电机体积，将逆变器的容量做大。当今电力电子变流技术日趋成熟，逆变器成本逐渐降低，小电机大逆变器模式的应用越来越广泛。

毫无疑问，直驱电机的体积重量是地铁永磁直驱牵引系统设计的主要问题，为降低直驱电机的体积重量而适当增加逆变器的容量是系统设计所能够接受的。因此，地铁永磁直驱牵引系统设计的关键参数匹配原则是小电机大逆变器模式。

3 地铁永磁直驱牵引系统设计方法

3.1 主电路拓扑

永磁直驱牵引系统采用的是直驱式永磁同步牵引电动机，其驱动主电路的拓扑结构也需要符合永磁同步牵引电动机的特点。图 5 是一种典型的永磁直驱牵引系统主电路拓扑结构。

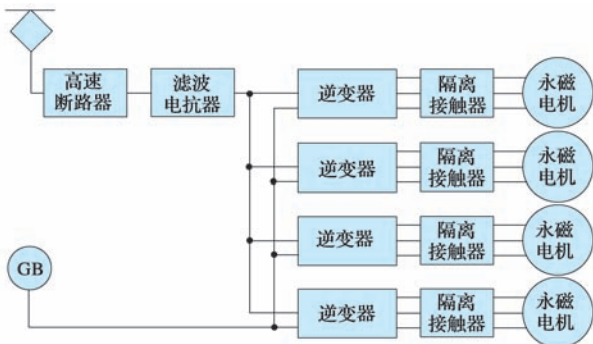


图 5 永磁直驱牵引系统主电路拓扑图

永磁同步电机运行时，定子频率必须与转子频率同步，而列车同一辆车上 4 组轮对的轮径存在一定差别，无法保证 4 组轮对转速相同，因此永磁同步电机必须采用轴控方式。图 5 中 4 台永磁同步电动机分别由 4 台逆变器模块驱动，为轴控模式，符合上述特点。

永磁同步电机转子为永磁体励磁，电机转动时就

会产生反电势且无法关断,因此为避免电机失控时该不可关断的反电势对系统产生影响,逆变器与永磁电机中间设置有三相隔离接触器。每当电机失控时,隔离接触器断开,从而将永磁电机与牵引系统隔离,保障了系统的安全性。

因此,永磁直驱牵引系统主电路拓扑的特点是采用轴控结构,且逆变器输出端带有隔离接触器。

3.2 牵引 / 电制动特性

列车的牵引 / 电制动特性关系到牵引系统的最大输出能力,对于牵引系统性能来说至关重要,必须与牵引电机的特点相匹配。

现有地铁列车的牵引电制动曲线如图 6 中虚线部分所示,牵引特性高速区段包含有自然特性区是因为异步电机高速过载能力较弱的缘故,很显然,该特性曲线用于永磁直驱牵引电机并不合适,需要重新设计一套适合永磁直驱牵引电机特点的牵引 / 电制动特性,既要体现永磁直驱牵引电机的优势,又要能有效控制直驱电机的重量。

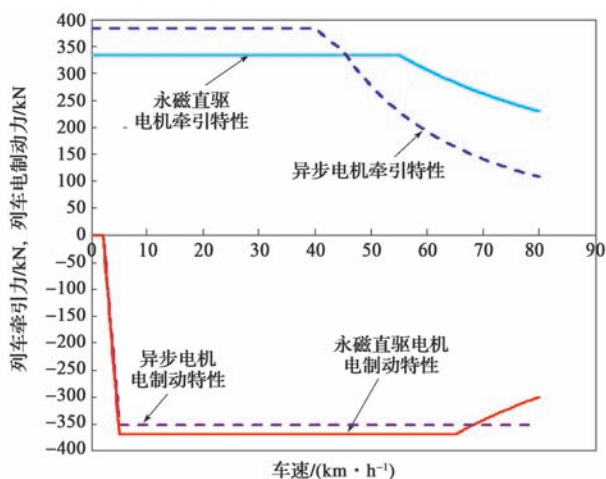


图 6 永磁直驱牵引系统主电路拓扑图

图 6 中实线部分为根据永磁直驱电机特点设计的列车牵引 / 电制动特性曲线。

牵引特性部分：首先取消异步电机特性中高速段的自然特性区；原特性影响直驱电机重量的是最大牵引力，因此永磁直驱电机牵引特性中将最大牵引力降低，而将恒功点往后移，以保持列车平均旅行速度不变；若牵引功率过大也会增加电机重量，因此恒功点也不宜太靠后。

电制动特性部分：原特性影响直驱电机重量的是最大功率，因此永磁直驱电机电制动特性将恒功点往前移，增加最大电制动力以保持列车平均旅行速度不变，但受限于最大粘着系数，最大电制动力也不宜太大。

3.3 稳态短路电流

永磁直驱电机的稳态短路电流关系到电机的转矩过载能力。稳态短路电流设计太小则电机转矩过载能力较小，输出最大力矩时有颠覆的风险；稳态短路电

流设计太大则一旦牵引设备发生短路故障就有烧损的风险。因此，稳态短路电流要与牵引设备承受能力相匹配，既不能太小也不能太大。

3.4 空载反电势

永磁直驱牵引电机的转子采用永磁材料励磁，因此只要电机转动就会在电机定子绕组上感应反电势，当电机没有通电时，该感应反电势即为空载反电势，是永磁牵引电机设计的一个关键参数。

永磁直驱牵引电机空载反电势会直接影响其工作时的供电电压，影响系统安全。

对电机驱动系统来说，空载反电势越高，电机电压越高电流越小，逆变器容量需求较小；但是电机电压会在更低转速点进入满电压，最高速时弱磁深度更深，导致弱磁控制更困难；另外，当电机弱磁控制失效时，驱动系统需要承受高反电势的压力，容易使驱动系统受到损害，系统安全性较低。反之亦然。

对于永磁直驱牵引电机而言，空载反电势越高，电机电流越小，更有利于电机减小体积、降低重量，但是高速时弱磁电流更大，电机效率会降低。反之亦然。

综上，永磁直驱牵引电机空载反电势需要权衡电机与驱动系统的利弊，综合选择合适的反电势。

为提高系统安全性，可以采取设计方法降低电机反电势，例如采用凸极电机转子方案可以利用磁阻转矩降低永磁电机最大反电势。

永磁电机转矩公式：

$$T_{em} = \frac{mpUE_0}{\omega X_d} \sin \theta + \frac{mpU^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

式中： $\frac{mpUE_0}{\omega X_d} \sin \theta$ 为电磁转矩，与空载反电势 E_0 成正比；

$\frac{mpU^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$ 为磁阻转矩，与空载反电势 E_0 无关。

电机设计时，可通过提高磁阻转矩、降低电磁转矩，实现降低空载反电势 E_0 的目的。

另外，当需要较高反电势时，也可以适当地提高牵引设备元器件的耐压等级。

3.5 额定功率

额定功率主要影响电机的散热，电机越大散热能力越强，能够承受的额定功率越大。在满足列车应用需求的前提下，适当降低电机额定功率可以减小永磁直驱牵引电机的重量。

目前国内 A、B 型地铁列车大多采用额定功率 190 kW 的牵引电机，该等级的牵引电机主要是为 A 型地铁列车需求设计的，也用于 B 型地铁列车，便于维护和降低成本。对于带齿轮箱的牵引电机而言，额定功率取较大裕量所增加的重量并不多，列车完全能够接受；

但是对于永磁直驱牵引电机来说,降低电机重量是关键,额定功率裕量过大明显不合适。

从目前国内地铁列车的应用情况分析,A 型地铁永磁直驱牵引电机额定功率仍需要 190 kW,但 B 型地铁电机额定功率可以降低至 160 kW 以下。

3.6 电机冷却方式

目前地铁列车牵引电机的冷却方式一般为自带同轴风扇冷却,该冷却方式无需外部风源,简单可靠,但冷却效果随电机转速变化。电机转速高时,风扇转速高,风量较大,冷却效果好;电机转速低时,风扇转速低,风量较小,冷却效果差。

因为取消了减速齿轮箱,永磁直驱牵引电机转速仅为普通带齿轮箱电机的几分之一。所以,如果再采用自带同轴风扇冷却,则冷却风量很小,冷却效果将很不理想。从国外直驱系统应用情况来看,永磁直驱牵引电机大多采用强迫水循环冷却方式。一方面,强迫水循环冷却方式不受电机转速影响,全速度范围内冷却效果一致;另一方面,直驱电机效率相对带齿轮箱电机略低,而强迫水循环冷却方式的冷却效果更好,可以将更多的热量带走。

从目前情况来看,尽管采用强迫水循环冷却方式需要列车增加一套水冷换热装置,但仍然是地铁永磁直驱牵引电机冷却的最佳解决方案。

4 国外典型永磁直驱系统方案

西门子、阿尔斯通、斯柯达、日立、东日本铁路公司等均相继开发了适用于地铁、低地板车、高速列车等的永磁直驱牵引系统。地铁领域最典型的一款永磁直驱牵引系统为西门子开发的 Syntegra 永磁直驱牵引系统。

根据西门子对外公开的 Syntegra 永磁直驱牵引系统资料,其牵引/电制动特性也针对永磁直驱牵引电机的特点进行了优化设计:牵引特性没有自然特性区,牵引时的最大转矩有一定程度降低(低于最大电制动转矩),电制动功率在高速段采用了限功,最大电制动功率仅为 300 kW,具体如图 7 所示^[2]。

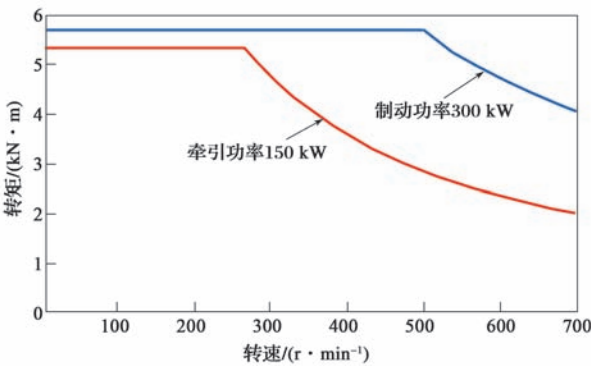


图 7 西门子 Syntegra 永磁直驱牵引电机牵引/电制动特性曲线

Syntegra 永磁直驱牵引电机的额定功率仅为 120 kW,是根据其应用的城郊线路列车的实际工况匹配的,明

显低于一般地铁列车的电机功率。

该直驱电机采用强迫水循环冷却方式,车载水冷换热装置给牵引电机提供冷却用水,电机为有机壳结构,冷却水从电机机座的 4 个角上流过给电机冷却降温。图 8 为 Syntegra 永磁直驱牵引电机的定转子分解图,从图中定子可清晰看出冷却水路结构。

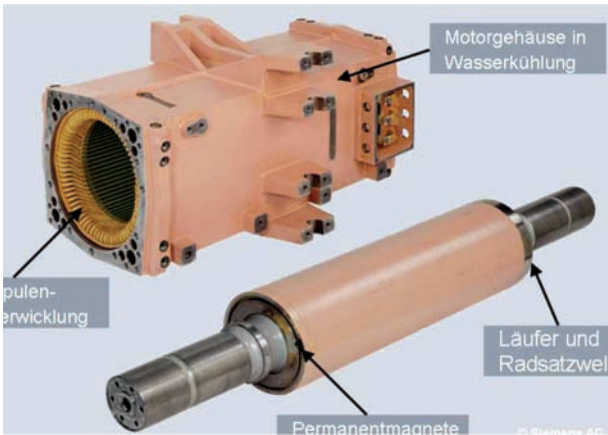


图 8 西门子 Syntegra 永磁直驱牵引电机

西门子采用了一系列具有永磁直驱特色的牵引系统参数优化匹配方法,另外还将列车轮径大幅降低(半磨耗 660 mm),从而有效降低了永磁直驱牵引电机重量,使得转向架的簧下质量处于合理范围之内。

5 结语

在地铁列车系统中,传动齿轮箱存在 3 个令设计人员困扰的问题:第一,齿轮箱传动效率一般不超过 0.98,国产齿轮箱尤低;第二,齿轮箱噪声很大,在车辆上仅次于轮轨噪声而大幅高于牵引电机的风噪;第三,齿轮箱的故障率高于牵引电机,且维护不易。地铁列车采用永磁直驱牵引系统后,传动齿轮箱被取消,上述 3 个问题迎刃而解。

相较于技术优势,永磁直驱牵引系统在工程化应用也存在几个难题:电机重量较大、需要轴控主电路、反电势与稳态短路电流影响系统安全、原有冷却方式不再高效等等。

本文详细分析并阐述了永磁直驱牵引系统的设计方法,为解决上述几个永磁直驱牵引系统工程化应用的技术难题提供了思路。

参考文献:

[1] 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.
[2] 王勃洪. 创新的直接传动动力转向架 Syntegra[J]. 机车电传动, 2007(2): 44-51.
[3] 陈致初, 李益丰, 符敏利. 永磁同步牵引电动机的特殊性[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 25-30.
[4] 肖华, 陈文光, 王龙, 等. 3M3T 城轨列车永磁牵引系统特性设计研究[J]. 机车电传动, 2015(3): 65-68.
[5] 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.