

永磁同步牵引电动机的特殊性

陈致初, 李益丰, 符敏利

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 在阐述永磁同步牵引电动机与异步牵引电动机工作原理的差异以及永磁材料稳定性基础上, 从转子不产生损耗带来的优点、过载能力、极数的选择、环境适应性、控制方式、不可逆退磁以及磁场不可调节所带来的缺点等方面, 分析永磁同步牵引电动机的特殊性, 并提出设计上应采取的措施, 为永磁同步牵引电动机的设计提供参考。

关键词: 永磁同步牵引电动机; 异步牵引电动机; 控制方式; 永磁体; 退磁; 效率

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)03-0025-06

Specificity of Permanent Magnet Synchronous Traction Motor

CHEN Zhi-chu, LI Yi-feng, FU Min-li

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Based on expounding the differences of working principle between permanent magnet synchronous traction motor and asynchronous traction motor and the description of stability for permanent magnet material, this paper analyzes the specificity of permanent magnet synchronous traction motor, including low loss of rotor, overload capacity, pole number selection, environmental adaptability, control mode, and the faults caused by irreversible demagnetization and the fact that magnetic fields cannot be adjusted. The relative measures in motor design are also proposed. It provides a reference for the design of permanent magnet synchronous traction motor.

Key words: permanent magnet synchronous traction motor; asynchronous traction motor; control mode; permanent magnet; demagnetization; efficiency

0 引言

与传统的异步牵引电动机相比, 永磁同步牵引电动机在效率、过载能力、体积重量等性能指标方面有较大的提高, 是一种很有前途的高效节能电机, 在电动汽车、轨道交通及风力发电等领域得到越来越广泛的应用。

永磁同步牵引传动系统已成为下一代轨道交通牵引传动系统的发展方向^[1]。与轨道交通领域目前广泛采用的第二代异步牵引电动机相比, 永磁同步牵引电动机不仅工作原理不同, 而且由于其主磁场由永磁体产生、不需要励磁电流, 但磁场不能调节, 且永磁体环境适应性较差, 因此在性能、结构及控制方式等方面存在

较大的特殊性, 主要表现在转子损耗、转矩、极数的选择、磁场调节性、退磁和环境适应性等方面。本文在阐述永磁同步电动机与异步电动机工作原理的差异以及永磁材料特点的基础上, 分析永磁同步牵引电动机的特殊性, 并提出设计上应采取的措施。

1 工作原理差异

永磁同步电动机(PMSM)和异步电动机(IM)同属于交流电动机, 定子通入三相交流电时, 定子绕组就会产生旋转磁场, 和转子磁场相互作用产生电磁转矩, 驱动转子旋转。它们工作原理的主要区别在于励磁方式^[2]。

1.1 异步电动机

异步电动机由定子励磁绕组产生旋转磁场; 鼠笼转子处于旋转磁场中, 转子导体切割磁力线, 并产生感

收稿日期: 2012-02-06

作者简介: 陈致初(1982-), 男, 工程师, 主要从事永磁电机研发工作。

应电势；转子导体通过端环自成闭路，并产生感应电流；感应电流与旋转磁场相互作用产生电磁力；电磁力作用在转子上将产生电磁转矩，并驱动转子旋转。其典型特点为电动机转子转速与定子产生的旋转磁场转速（同步转速）存在差异。异步牵引电动机稳态性能分析的基础为T型等效电路。图1示出异步电动机T型等效电路，图中 R_1 为定子电阻， $X_{1\sigma}$ 为定子漏抗， $X'_{2\sigma}$ 为折算到定子侧的转子漏抗， R_2/s 为转子电阻， s 为转差率， X_m 为励磁电抗， P_2 为输出功率， M 为输出转矩。

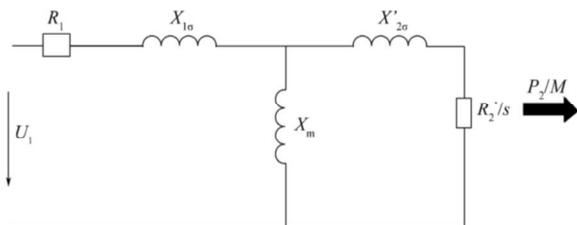


图1 异步电动机T型等效电路图

Fig.1 T-type equivalent circuit of IM

异步电动机转速 n 、同步转速 n_0 、定子电压 U_1 及电磁转矩 T_{em} 方程如下^[3]：

$$n = n_0 (1-s) \quad (1)$$

$$n_0 = 60f_1/p \quad (2)$$

$$U_1 = -E_1 + I_1(R_1 + jX_{1\sigma}) \quad (3)$$

$$T_{em} = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2]} \quad (4)$$

式中： f_1 ——定子频率； p ——电机极对数； E_1 ——定子反电势； I_1 ——定子电流； m_1 ——相数。

1.2 PMSM

PMSM由安装在转子上的永磁体励磁，转子磁场因受定子磁场磁拉力作用而随定子旋转磁场同步旋转，即转子以等同于定子旋转磁场的速度和方向旋转，其大小取决于电源频率和定、转子的极对数，不随负载的变化而改变^[4]。PMSM稳态性能分析基础与同步电动机的相同（即采用双反应理论），其转速、定子电压、电磁转矩方程如下^[4]：

$$n = n_0 = 60f_1/p \quad (5)$$

$$U_1 = E_0 + I_d R_1 + jI_d X_d + jI_q X_q \quad (6)$$

$$T_{em} = \frac{m_1 p U_1 E_0}{\omega X_d} \sin \theta + \frac{m_1 p U_1^2}{2\omega} (\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}) \sin 2\theta \quad (7)$$

式中： E_0 ——空载反电势； I_d ——直流电流； I_q ——交轴电流； X_d ——直轴同步电抗； X_q ——交轴同步电抗； ω ——电角速度； θ ——功率角。

2 永磁材料的稳定性

永磁材料的稳定性主要包括热稳定性、磁稳定性和化学稳定性。目前，在永磁同步牵引电动机上普遍采用的永磁材料是钕铁硼和钕钴，稳定性较差，这是永磁电机与电励磁电机的性能区别之一，在永磁电机设计时需特别考虑。此外，还要注意避免因装配不当或发生剧烈振动等机械方面原因使永磁体破损、碎裂，引起永磁体磁性能降低，它可能导致永磁体磁性不可恢复的损失。

永磁材料的热稳定性反映永磁体随环境温度的改变而引起磁性能变化的程度，又称温度稳定性。永磁材料的磁性能随着温度的升高而降低，可用温度系数来表示其变化的程度。钕铁硼材料温度系数较高，高温时磁场减小，电机反电势降低、输出转矩降低。永磁材料的温度特性还可用居里温度和最高工作温度来表示。温度系数越低，居里温度和工作温度越高，永磁材料的热稳定性越好，永磁电机的稳定性和可靠性就越好。

在外磁场干扰下，永磁材料磁性能会发生变化，甚至可能发生不可逆退磁。永磁材料抵抗外磁场干扰的能力称为磁稳定性。永磁材料内禀矫顽力反映其磁稳定性能。内禀矫顽力越大，内禀退磁曲线矩形度越好，则磁稳定性越好。

钕铁硼永磁材料化学稳定性差，易氧化。在生产过程中需采取各种措施来防止材料氧化，同时在成品表面涂敷保护层，如镀锌、镀镍、电泳等。

3 永磁同步牵引电动机特殊性

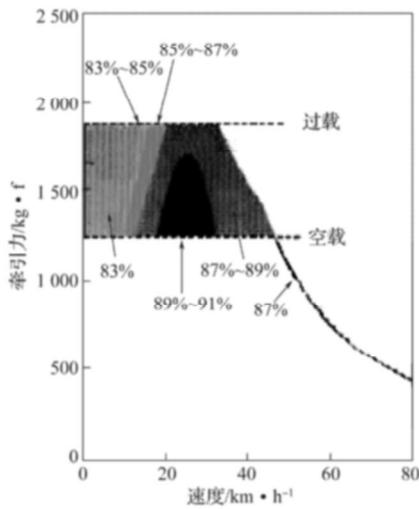
3.1 转子损耗

永磁电机无需电流励磁，因此理论上无转子损耗，这一方面可提高电机工作效率，降低全生命周期的费用，同时使得在永磁同步牵引电动机上采用全封闭结构和直接驱动方式成为可能。由于转子不产生损耗，电机的效率将会显著提高，包括额定点的效率、最高效率以及整个运行范围的高效率区的提高。图2示出国外某公司对相同应用场合下永磁同步牵引电动机和异步牵引电动机效率的对比。图3示出400 kW永磁同步电动机和异步牵引电动机的在整个运行区间内的效率比较^[5]。据国外公司分析，对于一辆4 000 hp(1 hp=735 W)的内燃机车，采用永磁同步牵引整车效率比采用异步牵引提高7.1%，一年可节省油费64 000美元。Siemens公司针对Syntegra转向架用永磁牵引系统进行了效率和经济性分析^[6]，其主要结论如表1所示。

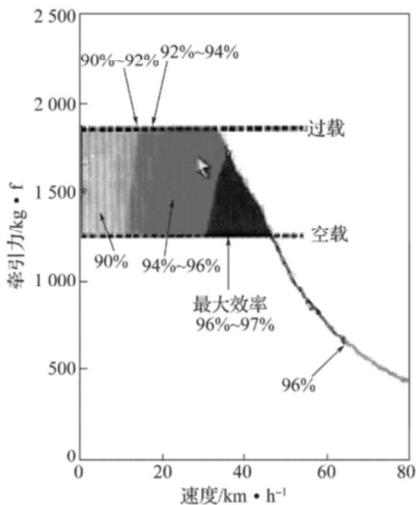
表1 Syntegra转向架采用永磁牵引系统的效率和经济性分析

Tab.1 Analysis of efficiency and economy of Syntegra bogies traction systems with permanent magnet technology

	4 节车列车的 (A W 3 负荷时) 质量/t	动力轮对 的旋转质 量/t	总动态 质量/t	启动转矩 / N · m (启动加速度为 1.1 m/s ²)	运行间隔中 的传动损 耗 / kW · h	制动中的能量 损耗 / kW · h	每年总能 耗 / GW · h	每年总能 量费 / €
标准动力转向架异步 电动机 + 传动齿轮	234.6	22.4	257	5 600	124.6	190.4	1.70	136 000
未减轻质量的 Syntegra技术	234.6	22.4	257	5 600	101.6	190.4	1.58	126 400
减轻质量的 Syntegra技术	218.6	4.8	223.4	4 900	87.0	165.5	1.36	108 800



(a) 异步牵引电动机
(a) Asynchronous traction motor

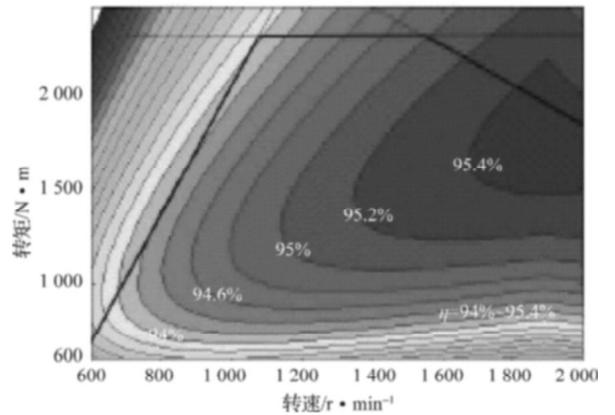


(b) 永磁同步牵引电动机
(b) Permanent magnet synchronous motor

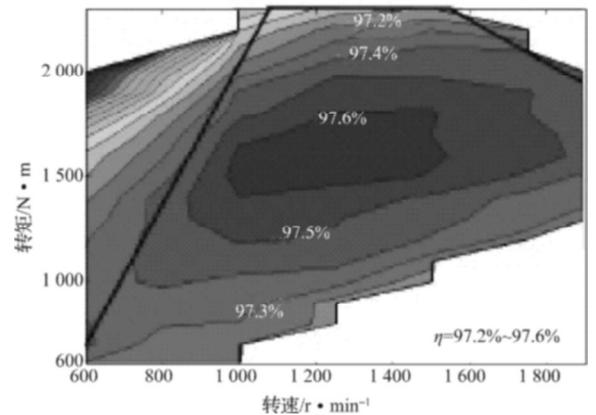
注：1 kg · f = 9.806 65 N

图2 效率比较

Fig.2 Efficiency comparison between asynchronous traction motor and permanent magnet synchronous traction motor



(a) 异步牵引电动机
(a) Asynchronous traction motor



(b) 永磁同步牵引电动机
(b) Permanent magnet synchronous motor

图3 效率区的比较

Fig.3 Comparison of efficiency regions between asynchronous traction motor and permanent magnet synchronous traction motor

牵引电动机一般采用开启通风方式冷却，但冷却风中含有尘埃、铁屑等杂质，会污染电机内部构造，需要定期进行清扫；而采用全封闭结构可以避免杂质进入电机内部，从而提高电机的可靠性，减少电机的维护工作量。异步牵引电动机由于转子存在损耗，若采用全封闭结构，则转子的热量会影响转子的强度和轴承的寿命，因此一

般采用开启通风冷却,只有电机功率在250 kW以下的特定应用领域才采用全封闭结构,比如低地板车用异步牵引电动机^[7]。永磁同步牵引电动机一方面因转子不产生损耗,使得采用全封闭结构成为可能;另一方面因永磁体对铁屑具有强烈的吸附作用,很难清除,一旦吸附铁屑,会降低电机的可靠性,因此也要求采用全封闭结构。

电机采用直接驱动方式可以取消齿轮箱(齿轮箱维护工作量大,噪声大,且污染环境),但电机转矩大、转矩密度高;而效果良好的冷却方式(如水冷)只能冷却定子铁心,不能冷却转子,因此转子的冷却和散热方式制约了在异步牵引电动机上采用直接驱动方式的可能。永磁同步牵引电动机不存在转子冷却问题,因而可以采用直接驱动。

3.2 短路转矩与最大转矩倍数

3.2.1 短路转矩

异步电动机在突然短路时会产生约5倍额定转矩的冲击转矩,而永磁电机在突然短路所产生的冲击转矩只有3倍左右^[8]。该优点有利于电机转轴设计和机械传动系统(齿轮、联轴器等)的设计。

3.2.2 最大转矩倍数

最大转矩倍数是电动机最大可能输出的转矩与额定转矩之比,代表电动机的过载能力。异步电动机的最大转矩又称为颠覆转矩,同步电动机的最大转矩又称为失步转矩。

异步电机的颠覆转矩倍数 K_M 与频率的关系为(忽略定子电阻)^[31]:

$$T_{\max} = \frac{m_1 p U_1^2}{8\pi^2 f_1^2 (L_{1\sigma} + L'_{2\sigma})} \quad (8)$$

$$K_M = T_{\max} / T_N \quad (9)$$

式中: T_{\max} ——最大转矩(颠覆转矩); T_N ——额定转矩; L_1 ——定子漏感; L_2 ——折算到定子侧的转子漏感。

图4示出异步电动机最大转矩与转速关系。可以看出,电压一定时,颠覆转矩倍数与频率的平方成反比。

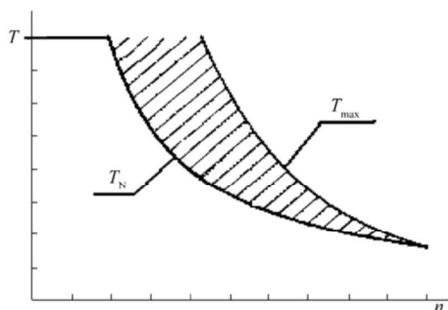


图4 异步电动机颠覆转矩与转速关系

Fig.4 Relationship between overturning torque and speed of IM

永磁电动机的失步转矩倍数为^[8]:

$$K_M = \frac{T_{\max}}{T_N} = \frac{\sin \theta_{\max} + \frac{K_{EX}}{2} \sin 2\theta_{\max}}{\sin \theta_N + \frac{K_{EX}}{2} \sin 2\theta_N} \quad (10)$$

式中: T_{\max} ——最大转矩(失步转矩); K_{EX} ——计算系数,

且 $K_{EX} = \frac{U_1}{E_0} \times \frac{(X_q - X_d)}{X_q}$; θ_N ——额定转矩时的功率角;

θ_{\max} ——最大转矩时的功率角,且 $\theta_{\max} = \arccos\left(\frac{1}{4K_{EX}} \pm \frac{1}{\sqrt{16K_{EX}^2 + 0.5}}\right)$ 。

图5示出永磁电动机失步转矩与转速的关系。可以看出,在电压一定时,失步转矩倍数与频率无关。

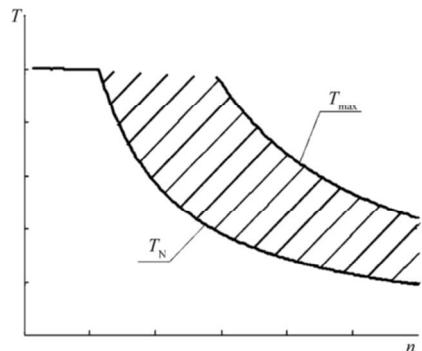


图5 永磁电动机失步转矩与转速关系

Fig.5 Relationship between synchronous pull-out torque and speed of PMSM

3.3 极数

由电机学原理及变频电机的特点可知,变频牵引电机的极数越高,定子轭部则越薄,电机端部长度越短,因而电机体积越小、重量越轻;极数越高,电机的最高频率也越高,则要求逆变器的开关频率和最大允许频率越高。

对异步牵引电动机而言,极数越高,电机的磁化电流则越大,功率因数也越低;但随着极数的提高,电机的漏抗增大,电机的恒功范围受到制约,因此异步牵引电动机一般采用4极或6极^[9-10]。

永磁同步电动机极数只受逆变器的频率限制,因此一般采用高级数,这也是永磁电机具有较高功率密度的原因之一。

3.4 不可逆退磁

永磁电机在工作时,定子电流产生的定子磁场将干扰永磁体产生的转子磁场,特别是在永磁牵引电动机弱磁工况下运行时,永磁体磁场被削弱,严重时可能发生不可逆退磁。导致永磁同步牵引电动机用永磁体出现不可逆退磁现象的因素有温度和电枢反应电流。

永磁同步电动机运行时,由定子去磁电流产生、施加在永磁体上的退磁磁场强度是反复变化的。如图6所示,只要永磁体的工作点不移动到拐点 k 以下,则工作点沿退磁曲线 kB_r 往复移动,回复线与退磁曲线重合;如果工作点移动到拐点 P 以下,工作点将沿新的回复线 PR 返回,永磁体出现不可逆退磁。永磁同步牵引电机的功率密度高、体积较小,决定了其具有较高的工作温度,高温时电机不可逆退磁风险加大。一方面,电机在出现过载或短路、匝间短路等故障时,如果故障时间持续较长,过大的电流导致过高的电机温升,一旦永磁体温度超过其最高工作温度,永磁体将产生不可逆退磁;另一方面,随着永磁体温度的升高,一旦退磁磁场超过拐点,永磁体将出现不可逆退磁。永磁电机目前普遍采用的钕铁硼永磁材料热稳定性较差,随着温度的升高,退磁曲线的拐点也将升高。

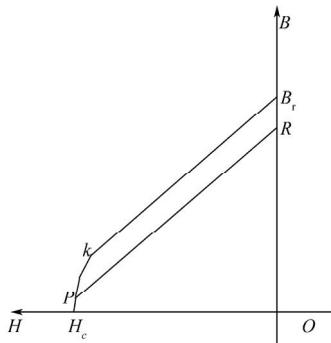


图6 永磁材料退磁曲线及其拐点

Fig.6 Demagnetization curve and knee of permanent magnet material

不可逆退磁最严重的情况是高温条件下电机定子绕组突然短路,在实际设计时将其作为永磁体的最大去磁工作点。为了防止由于永磁材料热稳定性差而造成永磁电机失磁,必须在设计中校核永磁电机的最大去磁工作点和最高工作温度下永磁材料退磁曲线的拐点,以增强其可靠性,使电机在最不利情况下(包括高温、大电流)工作点仍然在永磁体退磁曲线拐点的上方往返变化。当电机停止运行时,永磁材料的剩余磁感应强度 B_r 基本不变。

3.5 环境适应性

钕铁硼永磁材料中的主要成分——钕和铁都是容易被氧化和腐蚀的元素,而且由于永磁体对铁磁材料的强烈吸附作用,从电机外部进入的铁屑容易粘附在转子上,很难清除,因此永磁体的环境适应性较差。异步电机采用简单的、导体为铜或铝的鼠笼式结构,环境适应性更好。

为了提高永磁电机的环境适应性,除了在永磁体表面采用涂敷处理外,为防止外部铁屑进入电机内部,

永磁电机一般都被要求采用全封闭结构。

3.6 磁场不可调节性

与电励磁同步电动机不同,永磁同步电动机由于采用永磁体励磁,磁场无法关闭,难以调节,这从某种程度上成为永磁电机的缺点:

(1) 弱磁控制

当电动机电压达到逆变器输出的最高电压时,只有通过调节定子电流,增加直轴去磁电流分量来削弱电机磁场,使电压保持平衡,达到弱磁扩速的目的。弱磁控制增加了电机控制的复杂性,同时使电机的性能相对变差。

(2) 电动机功率因数和效率降低

尽管永磁体不产生损耗,但高速弱磁时,较大的去磁电流分量将增大电动机的定子电流,使电动机铜耗增加,从而降低电动机的效率,并降低电动机的功率因数。

(3) 控制失效时电压突然升高及铁耗增加

由于永磁同步电动机的励磁不可关闭,在控制失效时,电动机将产生较高的端电压,尤其是电动机运行在高速时。高电压一方面可能损伤逆变器的元器件,另一方面由于逆变器难以再次给电动机供电,将产生“高速重投”的问题。常用的解决方法是在电动机与逆变器之间增加隔离开关(图7)^[6],但这会增加系统的复杂性和成本。

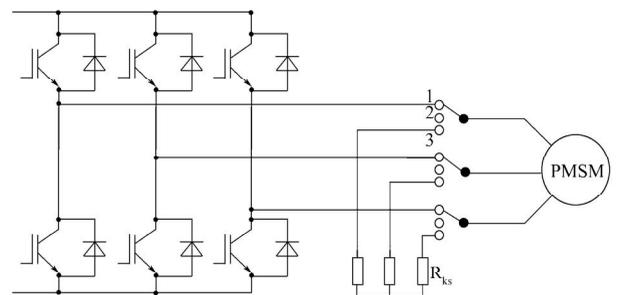


图7 永磁同步牵引系统主电路图

Fig.7 Main circuit of permanent magnet synchronous traction system

当控制失效时,隔离开关断开,此时电动机没有电流,但由于反电势很高,磁路高度饱和,电动机内的铁耗可能很大,尤其是电动机处于高速运行时。最严重的情况是,铁耗使电动机在短时间内烧损。

(4) 电动机匝间故障迅速扩大

只要电动机旋转,就会在定子绕组中产生电压。一旦匝间存在缺陷,会使匝间故障迅速扩大。根据文献[11]介绍,所研究的电动机在给定工况下当其第14匝线圈发生匝间故障时,37 s时间内电动机故障会迅速扩大(图8)。

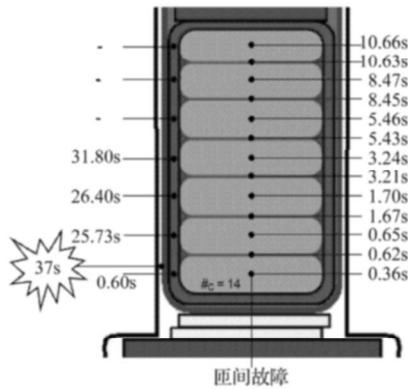


图8 永磁同步电动机匝间故障示意图

Fig.8 Schematic diagram of turn-turn failure in PMSM

3.7 单轴控制

当电动机应用于轨道牵引时,在运行中,车辆速度一定,由于存在轮差,每个车轮对应的电动机转速要求不一致。

异步电动机转速与同步转速(定子频率)不一致,因而在异步牵引系统中,一台逆变器既可给一台电动机供电,也可给数台电动机供电,即可采用所谓的轴控、架控及车控等供电模式。换言之,每个供电电动机的定子频率一样,通过调节每一个电动机的转差率,使得每个电动机的转速不一样。

而永磁同步电机转速与定子频率为固定关系。当电动机转速不同时,要求电动机定子频率也不同,这使得电机供电频率相同的群控模式成为不可能。因此,永磁牵引电动机在轨道牵引上只能采用单轴控制,即一台逆变器给一台电动机供电的模式,这将增加控制系统的复杂性,同时也增加了系统的成本。

3.8 工艺和制造差异

鼠笼式异步牵引电动机为结构最为简单的电动机之一,制造工艺非常成熟,成本相对较低,利于大批量生产。

相对而言,由于永磁体带磁性,具有很大的吸附力,给永磁同步电动机的制造带来很大的挑战,包括转子铁心叠压、转子动平衡、永磁体嵌装和固定、转子运输、电机组装等。对转子动平衡、永磁体嵌装和固定等工序,需采用特殊、非铁磁性的工量具进行操作和检测;对永磁体磁性能的检测,需增加检测设备;位置传感器的定位、安装和检测也给永磁牵引电机的制造增

加了困难。

与异步牵引电动机的铜条相比,永磁体价格贵很多,且由于制造工艺的复杂性等原因,永磁同步牵引电动机的制造费用也将增长,因此价格成为制约永磁同步牵引电动机推广应用的重要因素之一。

4 结语

本文根据永磁同步牵引电动机“永磁”和“同步”的特点,分析了永磁同步牵引电动机与异步牵引电动机相比的特殊性。与异步牵引电动机比较,永磁同步牵引电动机具有诸多的优势,但在可靠性、电机控制、制造等方面也存在不利因素。因此,在设计和应用中,应针对其特殊性采取相应的对策和措施,扬长避短,最大限度地发挥永磁电机的优势。

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] 许实璋. 电机学[M]. 北京:机械工业出版社,1980.
- [3] 西南交通大学电机系. 牵引电机[M]. 4版. 北京:中国铁道出版社,1986.
- [4] 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.
- [5] Neudorfer H, Neudorf W. Entwicklung eines flüssigkeitsgekühlten Traktion-synchrongenerators in Permanentmagnet-technologie[J]. ZEV Rail Glasers Annalen 2008,132(2):30-38.
- [6] 王渤洪. 创新的直接传动动力转向架Syntegra[J]. 机车电传动 2007(2):44-51.
- [7] Neudorfer H. 液体冷却的三相交流牵引电动机[J]. 变流技术与电力牵引,2001(6):34-36.
- [8] Koch T. Permanentmagneterregte Synchronmaschine als Direktantrieb für die elektrische Traktion[M]. Aachen:Shaker Verlag GmbH,2007.
- [9] Moritz WD, Rühlk J. Drehstrom-Asynchronfahrmaschinen für elektrische Triebfahrzeuge-Entwicklung und Auslegungskriterien [J]. EB,1979(3):65-71.
- [10] Feldmann U, Lange H, Lienert W. Besonderheiten der Bemessung und Konstruktion von modernen Asynchron-Lokomotiv-Motoren [J]. EB,1988(4):131-137.
- [11] Smeets J. Study of turn-turn failure in permanent magnet traction motor for railway applications[C]// Royal Institute of Technology of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm, 2008.
- [12] 李钟明,刘卫国,刘景材. 稀土永磁电机[M]. 北京:国防工业出版社,1999.