

# 电动汽车用永磁同步牵引电机及驱动系统电磁特性研究

房俊生<sup>1</sup> 张卫冬<sup>2</sup>

1. 陕西法士特松正电驱系统股份有限公司; 2. 恒银金融科技股份有限公司

**[摘要]**在电机加工过程中,不可避免地会出现装配误差或者转轴弯曲等问题,因此实际的圆周气隙不再均匀分布,即出现转子偏心情况。气隙长度大小的改变使气隙磁密发生改变,并且影响电磁转矩和电磁力,加剧振动噪声,恶化轴承的工作情况。偏心程度严重时,甚至会出现定转子扫膛的情况。因此,为准确分析电机的实际性能,本文针对48槽/8极永磁同步电机对转子偏心的影响进行分析,并寻找抑制偏心影响的方法。

**[关键词]**永磁同步牵引; 电机; 驱动系统; 电磁特性

**[DOI]** 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.09.979

## 一、永磁同步牵引电机转子偏心情况分析

转子偏心时转子轴线和定子轴线不再重合,根据旋转轴的位置不同,可将偏心情况分为两类,即静态偏心和动态偏心。对电机发生转子偏心时的气隙磁密、电磁转矩、电磁力和损耗等电磁特性进行了分析。

对于转子偏心对气隙磁密的影响分析,采用子域法和叠加法等方法对气隙磁密进行求解,较为准确地分析正常状态下和转子偏心时的气隙磁密。以偏心度为变量,根据矢量磁位推导转子静态偏心时气隙磁密的解析表达式。以上指出,在发生转子偏心时,气隙磁密变得不平衡,会出现新的谐波分量。分析静态偏心对表贴式永磁同步电机气隙磁密和齿槽转矩的影响,并说明影响程度与电机的齿槽数有关,对于满足一定齿槽数的电机,其电磁转矩基本不受转子静态偏心的影响。采用子域法分析得出转子偏心情况下的电磁转矩,说明转子偏心会使电磁转矩中出现新的谐波分量,增大转矩脉动。对于偏心情况下电磁力,文章138对比分析了表贴式永磁同步电机和内置式永磁同步电机发生转子偏心时的电磁特性,在说明内置式永磁同步电机中,电磁力不平衡度更大。针对无刷直流电机进行分析,指出发生转子偏心时会产生不平衡磁拉力。

关于转子偏心对损耗的影响的分析,针对高速永磁同步电机分析了转子偏心对各个永磁体涡流损耗的影响,结果表明,靠近最短气隙处的永磁体的损耗明显增大,在高速时该问题较为明显。转子偏心时,各个槽中导线的反电势幅值不再相同,不同的绕组连接方式对应的反电势会有不同。对转子偏心对不同绕组结构的电机的影响进行了对比。对比了两种两路并联的绕组结构在转轴倾斜情况下的电磁特性,指出在该偏心情况下,采用跳极的连接方式有助于抑制环流并减小电磁力和噪声。对比分析在不同绕组结构下的感应电机发生转子偏心时的电流和电磁力,说明不同绕组结构对电磁性能的影响,以及并联支路间时的环流有助于减小不平衡磁拉力。

鉴于转子偏心对电机电磁特性产生的不好影响,有学者研究对转子偏心的检测方法。根据偏心情况下定子电流中会增加转子谐波,通过检测定子电流,从而检测PMSM的转子偏心故障,并区分故障类型(静态偏心和动态偏心)和判断偏心程度。除了对定子电流进行分析,通过对电压谐波的检测,判断是否出现转子偏心。另有学者提出因各类故障情况下 $L_d$ 的变化情况不同,因此可以根据 $L_d$ 的变化情况检测转子偏心。

以上关于转子偏心影响的研究,指出气隙磁密、电磁转矩、电磁力和损耗等电磁特性均会受到转子偏心的影响。但其中大多是对空载情况或在相电流中通入理想正弦电流源时的电磁特性进行分析,未考虑转子偏心时可能造成的三相不平衡问题,以及未考虑驱动系统中发生转子偏心的电机的性

能。

## 二、转子偏心对永磁同步电机驱动系统的影响

在电机实际运行中,电机的电磁性能除了会受到控制系统中PWM谐波的影响之外,还普遍会受到装配误差和制作工艺问题引起的转子偏心问题的影响。在同一生产线批量生产出的电机,其振动噪声表现可能相差很大。

为考虑电机实际运行状态下的电磁特性,结合电机驱动系统对永磁同步牵引电机的转子偏心问题进行分析。通过对比说明和正常状态相比,转子偏心情况下的电磁转矩、气隙磁密、电磁力密度和损耗的变化情况,说明转子偏心对电机性能的影响。并考虑不同绕组结构的永磁同步电机在转子偏心情况下电磁特性的区别,以抑制转子偏心问题对电机性能的影响。

### (一) 永磁同步牵引电机转子偏心情况

在正常的情况下,定转子的轴线重合,转子沿着轴线旋转过程中,圆周各方向的气隙大小保持均匀。但是在实际中,由于加工误差的存在,定转子的轴线难以完全重合,因此电机中普遍存在转子偏心的情况,气隙分布不再均匀。根据电机转子的旋转中心区分,可以将转子偏心分为两类,一类是转子沿着自身轴线旋转的静态偏心,一类是转子沿着定子轴线旋转的动态偏心。静态偏心是由安装误差、转轴承受单边拉力等原因引起,在电机运转时,气隙最短位置固定(相对于定子的位置保持不变);动态偏心是由于转轴弯曲、轴承磨损等原因产生,在电机运行时,最短气隙的位置始终随着转子的旋转而改变。

在发生转子偏心的情况下,实际各方向的气隙长度不再均匀,而是与空间角度有关。静态偏心时各绕组对应的气隙长度与其对应的转子角度有关,而动态偏心时气隙长度不仅与转子角度有关,还和时间有关。

### (二) 正弦电流激励下转子偏心对电机电磁性能的影响

由于电机发生偏心后,气隙磁密不再均匀分布,结构上不具有正常状态下的周期性,因此不能使用八分之一模型对偏心情况进行分析,所有的分析均针对全模型进行。第二章电机考虑斜极时,在模型设置中对轴向分成5段处理,由于偏心情况下考虑斜极的全模型的仿真耗时太久,因此分析转子偏心的影响时未考虑斜极。

本节中,通过模型I(绕组通入正弦电流源)对发生转子偏心的电机进行分析。在正常情况下,分析气隙中间(即以定、转子圆心为圆心,以 $r=(r_1+r_2)/2$ 为半径的圆周)的气隙磁密和电磁力。由于动态偏心时转子轴线时刻改变,为统一分析,在两种偏心情况中,均是对以定子圆心为圆心,以 $r=(r_1+r-h)/2$ 为半径的圆周上的气隙磁密和电磁力密度进行分析。

1. 气隙磁密分析。对采用串联绕组结构的电

机,分析其在相同转速( $n=2200\text{r/min}$ )和电流激励( $I_m=286\text{A}$ ,  $\gamma=37.2^\circ$ )下,在正常状态、发生静态偏心和动态偏心情况下的磁场分布情况。其中,在静态偏心和动态偏心情况下,偏心度均取30%。在正常情况下,B,在空间中近似为正弦分布,且由于电机为4对极,在任意时刻下B,的空间分布可视为4个周期。而在静态偏心时,由于最短气隙所处位置始终在 $180^\circ$ 方向。因为在正常状态下和静态偏心时,气隙长度始终固定,所以当时间相差一个电周期(或其整数倍)时,对应的气隙磁密相同(例如0.5T和1.5T时的数据相同,电磁力也有相同结论)。在动态偏心情况下,最短气隙和最长气隙所处的空间位置随着电机运行时刻改变。

2. 电磁转矩分析。对电机分别处于正常状态、发生静态偏心和动态偏心情况的电磁转矩进行对比。其中,三种情况下电机结构和电流激励情况相同,绕组都是采用串联结构。静态偏心和动态偏心的偏心度均为30%。发生转子偏心后,在相同的电流下,电机产生的电磁转矩有所减小,而转矩脉动有所增大,且动态偏心对电磁转矩的影响比静态偏心更大一些。不过在两种偏心情况下,转矩降低的幅度和转矩脉动增大的幅度都很小,平均转矩下降不到 $0.5\text{N}\cdot\text{m}$ ,转矩脉动增大不到0.5%。

3. 电磁力密度分析。在正常情况下,由于电机为8极结构,任意时刻下 $p$ ,在空间圆周上的分布均可视为8个周期。而在静态偏心时,由于最短气隙所处位置始终在 $180^\circ$ 方向。在动态偏心情况下,最短气隙和最长气隙所处的空间位置随着电机运行时刻改变。

4. 不平衡电磁拉力。在发生转子偏心时,由于气隙不均匀,气隙各方向的磁阻大小不同,合成的电磁力矢量不再为0,将之称为不平衡磁拉力,其作用方向为减小偏心度的方向(即对于轴承,是从气隙最短位置指向气隙最长位置的方向)。不平衡磁拉力的存在会使轴承受力不均,加重轴承的形变和磨损,影响使用寿命。选取气隙内一路径(以定子圆心为圆心的圆),分析其上面等分为1001份处各点的气隙磁密和电磁力密度数据。近似认为每段路径上的磁场是均匀分布的,且电磁力密度是相同的,因此可以根据每段路径的面积(轴长)求圆周上每段的电磁力。考虑每段圆周对应的角度,可以求出合成的总磁拉力。在静态偏心时,一个周期内电磁力基本在常数(898.3N)上下波动。而在动态偏心时,由于电机最短气隙位置随着转子旋转而改变,因此,电磁拉力是幅值一定、方向是空间旋转的。在出现30%偏心度的动态偏心时,电磁拉力的水平方向分量在4个电周期(一个转子旋转周期)的变化情况,近似为正弦波,其有效值为668.4N,基波幅值为943.3N。

### (三) 不同绕组结构下转子偏心的影响

在转子偏心状态下,永磁同步电机的气隙不再均匀分布,因此圆周各位置的气隙磁密的幅值和各个槽内导体的反电势幅值都不再相等。对于采用并联绕组结构的电机而言,各支路的反电势由该支路的所有元件反电势矢量相加得到。因此,在转子偏心情况下,各支路的反电势可能会发生改变,并且并联支路间的反电势可能会不同,从而在并联支路之间产生环流。针对该电机,分析其采取不同绕组结构的情况下,在正常情况和发生转子偏心时的性能,以找出较优的绕组结构,在正常情况和转子偏心状态下都有较好的电磁性能。本节分析均是基于在外电路中给相绕组通入理想正弦电流源激励。

### (四) 不同绕组结构说明

本文分析的为48槽/8极的永磁同步电机,采用单层绕组,因此每相绕组各由8个元件组成。现在分析其采用串联结构、两路并联结构和四路并联结构的情况下,分别在正常状态和发生转子偏心时的电机电磁性能。对绕组两路并联的情况,分为两种情况分析。其中,并联的两路支路分别位于电机的两侧,相邻极下的元件连接在一起,A相的两条并联支路中,支路A1由1,2,3,4号元件连接而成,支路A2由5,6,7,8号元件构成,每条支路仅对应半个圆周。跳级连接每隔一极下的元件连接在一起,支路A1由1,3,5,7号元件连接而成,支路A2由2,4,6,8号元件构成,每条支路均分布在整个圆周。

### 三、发卡绕组永磁同步电机交流铜损分析

发卡绕组永磁同步电机的电流密度、功率密度更高,电机体积重量更小,更加符合电动汽车牵引电机的要求,因而备受关注。但是发卡绕组永磁电机在有效铜槽满率高的同时,其导线截面积大也带来了缺点:导线中的涡流损耗(即交流铜损)增大,高速时的交流铜损问题尤其严重。对于采用利兹线的绕组,导线中的涡流效应不明显,高频电流谐波对铜损的影响很小;而发卡绕组中,集肤效应和邻近效应等比较明显,因此高频电流谐波产生的影响需要考虑。

针对一个48槽/8极的发卡绕组永磁同步电机的交流铜损,利用第二章中的各个仿真模型,分析实际驱动系统中交流铜损分布情况以及PWM对交流铜损的影响。分析的发卡绕组电机的并联支路数为2,但是在Maxwell中仿真交流铜损时,软件规定并联支路数必须为1,因此,对于并联支路数为2的情况,首先得出其各个MTPA或MTPV工作点对应的电流,然后将电流幅值除以2后,分析对应激励下电机绕组采用串联结构时的交流铜损。如无特殊说明,下面各个工作点的电流幅值都是指并联支路数为2时的数据。

### 结束语

本文阐述了基于驱动系统分析永磁同步电机实际性能的意义。三相间会发生不平衡,但是不平衡的程度很小,可近似忽略不计;对于该电机,转子偏心对电机性能的影响主要体现在使气隙磁密和电磁力畸变,可能会加剧振动噪声,而对电磁转矩和损耗的影响较小。另外分析发生转子偏心问题时采用不同绕组结构的电机的性能,可以通过改变绕组结构改善电机的性能。针对发卡式绕组永磁同步电机较为严重的交流铜损问题,分析48槽/8极发卡式绕组永磁同步电机在驱动系统中的交流铜损,并从控制系统和本体结构方面分析交流铜损的影响因素。说明不恰当的绕组排布方式下产生的并联支路间的环流,会显著增大交流铜损,因此需要对绕组结构进行优化。

### 参考文献:

[1] 谭建蓉,罗铃霖,龙云,等. 电动汽车电机驱动系统电磁干扰分析与优化研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019, (8): 76-79.

[2] 赵辉,孙立志,陆永平,等. 电动汽车用轮式永磁电机驱动系统的研究[J]. 电工电能新技术, 2000, 19(2): 26-29, 40.

[3] 佚名. 电动汽车交流感应电机驱动系统的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2006, (7): 29-31.

[4] 盛义发,喻寿益,洪镇南,等. 内置式永磁同步电机驱动系统效率优化研究[J]. 电气传动, 2011, 41(6): 14-18.

[5] 张奇,李珂,张承慧,等. 电动汽车用永磁同步电机特性试验设计与研究[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(10): 47-50, 58.