

转子不同方式分段斜极对永磁同步电机噪声的影响

范庆锋^{1,2}, 王光晨^{1,2}

(1. 中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 湖南省新能源汽车电机工程技术研究中心, 湖南 株洲 412001)

摘要: 电磁振动噪声水平是衡量电动汽车舒适性的综合指标。径向电磁力是电磁振动噪声的主要激励源。对电动汽车驱动用永磁同步电机(PMSM)的径向电磁力进行分析,对径向电磁力时空分离得到的三维频谱图提取出对电磁噪声影响较大的时空阶次及力密度,再运用有限元法对转子不同方式分段斜极的PMSM进行振动噪声仿真,通过结果对比找到最优的转子分段斜极方式。

关键词: 永磁同步电机; 转子分段斜极; 径向电磁力; 电磁振动噪声

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)09-0079-05

doi: 10.12177/emca.2020.102

Effect of Rotor Stepped Skewing in Different Ways on Vibration and Noise of Permanent Magnet Synchronous Motor

FAN Qingfeng^{1,2}, WANG Guangchen^{1,2}

(1. CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Electric Vehicle Motors, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Electromagnetic vibration and noise level is a comprehensive index to measure the comfort of electric vehicles. Radial electromagnetic force is the main excitation source of vibration and noise. The radial electromagnetic force of permanent magnet synchronous motor (PMSM) is analyzed. The three-dimensional spectrum obtained from the radial electromagnetic force space-time separation is used to extract the certain time-space order and the corresponding force densities which have great influence on the electromagnetic noise. The finite element method is used to simulate the vibration and noise of PMSMs with different types of step-skewed rotor. The optimal type of step-skewed rotor is found by comparing the results.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); step-skewed rotor; radial electromagnetic force; electromagnetic vibration and noise

0 引言

随着新能源汽车领域的发展,驱动电机各方面的性能不断提升,对电磁噪声提出了更高的要求。因为电磁噪声主要来源于电机驱动系统,所以驱动用永磁同步电机(PMSM)的噪声水平直接

影响电动汽车的舒适性^[1-3]。

PMSM电磁力可分为切向电磁力和径向电磁力2种,前者主要用于输出电磁转矩,但会引起转矩脉动,使定子齿部弯曲变形;后者使电机的定子铁心产生周期性形变而引起振动噪声,是引起电机振动噪声的主要原因^[4-5]。

收稿日期: 2020-05-30; 收到修改稿日期: 2020-07-15

作者简介: 范庆锋(1977—),男,硕士,高级工程师,研究方向为新能源汽车驱动电机。

王光晨(1992—),男,硕士,助理工程师,研究方向为新能源汽车驱动电机。

电机的振动噪声涉及电磁、机械、力学、声学等多个领域,研究方法主要有解析法、有限元法和试验法^[6]。文献[7]通过对8极48槽PMSM进行了不同斜极分段数的径向电磁力仿真,分析了不同斜极分段数下电磁力波主要阶次的变化规律和对振动噪声的影响,但并没有研究不同斜极方式对电机振动噪声的影响;文献[8]研究了转子分段斜极与径向电磁力的之间关系,但并没有进一步研究对电磁噪声的影响;文献[9]提出了转子通过分段斜极以削弱齿谐波,降低0阶电磁力的改进方案,降低了电机的电磁噪声,但没有分析径向电磁力对电磁振动的影响。研究转子不同方式分段斜极对电磁振动噪声的影响对电磁振动噪声的研究和抑制具有一定的意义,但目前国内相关研究较少。

本文以1台额定功率100 kW的纯电动客车驱动用PMSM为研究对象,利用有限元方法对电磁振动噪声进行仿真计算,通过对比分析转子不同方式分段斜极的谐波响应和声场结果,得到最优的转子斜极方式。

1 电磁分析

1.1 电机模型与设计参数

本文用于振动噪声研究的PMSM转子拓扑如图1所示。PMSM参数如表1所示。

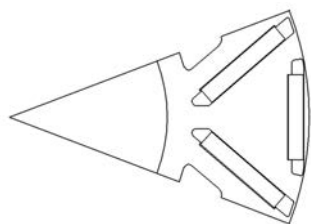


图1 PMSM 转子拓扑

表1 PMSM 参数

参数名称	数值
电池电压/V	DC 540
额定功率/kW	100
额定转速/(r·min ⁻¹)	955
额定转矩/(N·m)	1 000
峰值功率/kW	180
峰值转速/(r·min ⁻¹)	2 800
极数/槽数	12/72

1.2 径向电磁力分析

定子铁心受到的径向电磁力远远大于切向电磁力,且在电机运行的过程中随着时空交变,是电磁振动噪声的主要激振源,因此本文只考虑径向电磁力。由于磁导率的影响,切向气隙磁密远远小于径向气隙磁密,前者可忽略不计,则径向电磁力密度可以近似表示为

$$\sigma_r = -\frac{B_r^2}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中: B_r 为径向气隙磁密; μ_0 为真空磁导率。

$$B_r = (f_r - f_s) \frac{\mu_0}{g} \quad (2)$$

式中: f_r 为转子永磁磁动势; f_s 为定子电枢反应磁动势; g 为气隙长度。

对定子电枢反应磁动势和转子永磁磁动势进行傅里叶分解,可得:

$$f_s = -\sum_v \frac{F_{s,1} k_{\omega v}}{\nu k_{\omega 1}} \cos(p\mu v_s - p\alpha - \gamma_i) \quad (3)$$

$$f_r = \sum_{\mu} F_{r,\mu} \cos\left(p\mu v_s - p\mu\alpha + \frac{\mu\pi}{2} - \varphi_{\mu}\right) \quad (4)$$

式中: ν 为电枢反应磁场谐波次数; $F_{s,1}$ 为定子电流产生的基波磁势幅值; $k_{\omega v}$ 、 $k_{\omega 1}$ 为绕组系数; p 为极对数; v_s 为定子参考位置; α 为旋转角; γ_i 为电流角; μ 为转子永磁磁场谐波次数; $F_{r,\mu}$ 为永磁体产生的谐波磁势幅值; φ_{μ} 为转子磁动势初相角。

由式(4)可得转子分段斜极后的径向电磁力密度为

$$\sigma_{rad} = -\frac{\mu_0}{2g^2} \left[\sum_{\mu} \sum_{\nu} f_r \cos\left(\mu p v_s - \mu p \alpha + \frac{\mu\pi}{2} - \varphi_{\mu}\right) + \frac{k_{\omega v}}{\nu k_{\omega 1}} f_s \cos(\mu p v_s - p\alpha + \gamma_i) \right]^2 \quad (5)$$

其中, $k_{\omega v}$ 为转子分段的斜极系数,表达式为

$$k_{\omega v} = \frac{\sin\left(\frac{n}{n-1} \frac{\mu\alpha}{2}\right)}{n \sin\left(\frac{1}{n-1} \frac{\mu\alpha}{2}\right)} \quad (6)$$

由于 α 为转子分段斜极的机械角度,则各转子铁心段之间错开的角度 α_i 与分段数 n 有关,可以表示为

$$\alpha = \frac{n-1}{n} \alpha_i \quad (7)$$

式中: α_i 为齿距机械角。

只考虑定转子之间的耦合作用,径向电磁力密度可以表示为

$$\sigma_{rad} = -\frac{\mu_0}{2g^2} \sum_{\mu} \sum_{\nu} \frac{f_s k_{\omega\nu}}{\nu k_{\omega 1}} \cdot \left\{ \cos[(\mu + \nu) p v_s - (\mu + 1) p \alpha + \frac{\mu \pi}{2} - \varphi_{\mu} - \gamma_i] + \cos[\mu - \nu) p v_s - (\mu - 1) p \alpha + \frac{\mu \pi}{2} - \varphi_{\mu} + \gamma_i] \right\}$$

(8)

当 $\mu = \nu$ 或 $\mu = -\nu$ 时会产生空间 0 阶次的电磁力,该阶次的电磁力对振动噪声的影响最大,因此主要关注空间 0 阶次下电磁力密度大的电磁力^[10]。

在转子分段不斜极的情况下,对本文研究的 12 极 72 槽 PMSM 空载和额定负载工况下的电磁力进行时空分离得到三维频谱图,从中找出引起振动噪声主要电磁力波的时空阶次及电磁力密度,如图 2 所示。

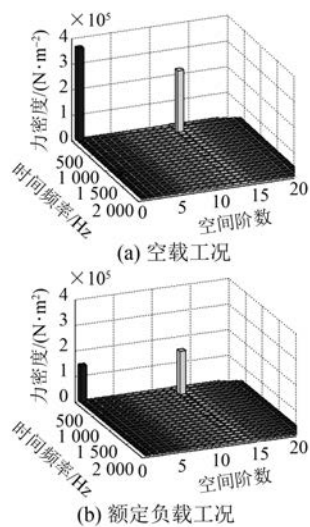


图 2 径向电磁力时空分离三维频谱

电磁振动噪声影响较大的电磁力波时空阶次和力密度,如表 2 所示。

从表 2 可以看出,空载和额定负载工况下,空间阶次为 0、时间次数为 72 的电磁力密度均是最大的,对电磁振动噪声的影响也是最大的,主要由 11 次和 13 次谐波引起;其次空间阶次为 0、时间次数为 36 的电磁力,对振动噪声的影响比较大,主要由 5 次和 7 次谐波引起^[11-13]。由于 72 阶电磁力密度最大,重点分析不同斜极方式下 72 阶电

表 2 径向电磁力波阶次及力密度

工况	空间阶次	时间次数	力密度/(N·m ⁻²)
空载	0	72	294.31
	0	36	220.53
	0	144	202.00
	0	12	193.78
额定负载	0	72	8 281.39
	0	36	1 714.94
	0	144	932.61
	0	54	366.09

磁力对振动噪声的影响。

2 基于 ANSYS 有限元软件的振动噪声仿真分析

为了验证不同分段斜极方式对电机振动噪声的影响,应用 ANSYS 有限元法对 PMSM 振动噪声进行仿真分析。该纯电动客车驱动用 PMSM 采用 12 极 72 槽的配合方式,转子分段斜极一个定子齿距 5°,分别建立不同方式的转子分段斜极的电磁模型进行振动噪声仿真。

2.1 转子分段斜极方式及段数选取

转子分段斜极不仅能够削弱谐波,优化齿槽转矩和转矩脉动,还能有效降低径向电磁力造成的振动噪声^[14]。

转子斜极方式和分段数的选取均对电机的振动噪声有影响。本文将转子铁心分为 6 段,对转子进行分段不斜极、Z 型斜极、单边斜极和双边斜极的处理,分别对 4 种转子进行振动噪声的仿真分析,如图 3 所示。

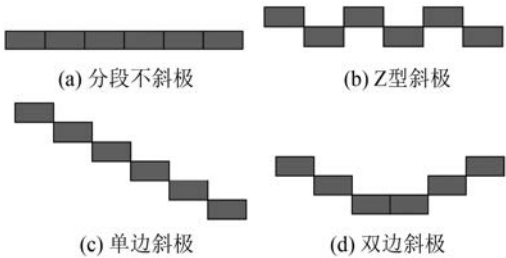


图 3 转子不同分段斜极方式

在上述分段斜极的基础上,以第一段为参考,汇总各段错开的机械角度,如表 3 所示。

表 3 转子不同斜极方式下各段错开角度 (°)

斜极方式	1	2	3	4	5	6
分段不斜极	0	0	0	0	0	0
Z 型斜极	0	$\frac{5}{2}$	0	$\frac{5}{2}$	0	$\frac{5}{2}$
单边斜极	0	$\frac{5}{6}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{15}{6}$	$\frac{20}{6}$	$\frac{25}{6}$
双边斜极	0	$\frac{10}{3}$	$\frac{20}{3}$	$\frac{20}{3}$	$\frac{10}{3}$	0

2.2 振动噪声分析

2.2.1 谐响应分析

建立 PMSM 定子的三维模型,用于谐响应分析和声场仿真计算;选取驱动电机最大外特性曲线上的工作点按转速为增量添加到各电磁仿真模型,将随转速变化的电磁力分别添加到各段定子铁心模型的对应齿上,再添加约束条件、求解设置,得到电机的谐响应分析结果^[15]。

在谐响应计算结果中提取出随转速逐渐变化的 36 阶和 72 阶等效辐射功率,如图 4 所示。

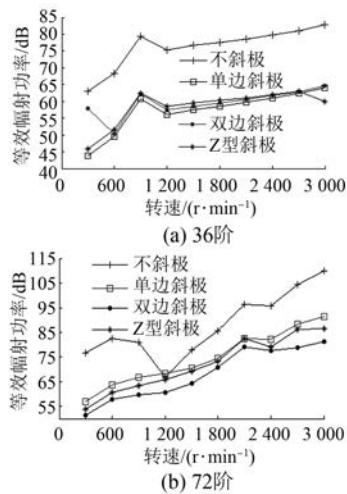


图 4 不同斜极方式下 36 阶和 72 阶谐响应结果

汇总不同斜极方式中 36 阶和 72 阶等效辐射功率的最大值,如表 4 所示。

表 4 不同斜极方式的最大等效辐射功率 dB

斜极方式	不斜极	Z 型斜极	单边斜极	双边斜极
36 阶	82.92	63.07	64.10	59.47
72 阶	110.08	86.39	91.38	85.39

通过对比谐响应的计算结果,可以发现:

(1) 随着转速的增加,每个阶次的等效辐射功率均呈上升状态,斜极方式不同,但均表现为

72 阶最明显,其次是 36 阶,这与电磁力时空分离的结果相吻合,主要与电机的 12 极 72 槽配合有关。

(2) 对于不同斜极方式产生的等效辐射功率而言,转子分段不斜极的效果最差,辐射功率最大值为 110.08 dB,其次是单边斜极、Z-Z 型斜极,双边斜极的等效辐射功率最低,为 85.39 dB,效果最优。

2.2.2 声场分析

在上述谐响应计算结果的基础上进行电机多转速工况的噪声仿真。建立电机声场的仿真模型,在电机外表面构建 1 000 mm 的空气包络,并对其进行网格剖分、导入载荷和声域求解设置,仿真计算得到电机的声场结果。

从不同斜极方式的声场计算结果中提取随转速变化的 36 阶和 72 阶声功率曲线,如图 5 所示。

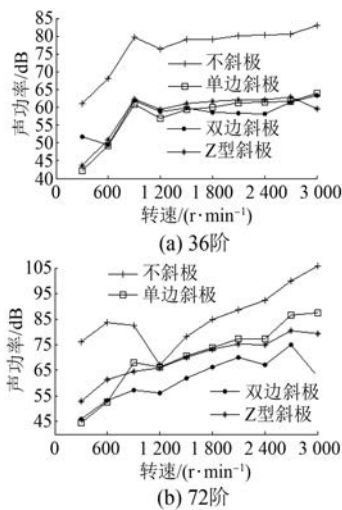


图 5 不同斜极方式下 36 阶和 72 阶声场结果

不同斜极方式下 36 阶和 72 阶声功率的最大值如表 5 所示。

表 5 不同斜极方式的最大声功率 dB

斜极方式	不斜极	Z 型斜极	单边斜极	双边斜极
72 阶	105.92	87.59	87.95	79.90
36 阶	83.00	62.91	64.06	60.00

由以上分析可以看出,对于本文所研究的驱动用 PMSM 而言,转子分段不斜极的效果最差,转子双边斜极的效果最好,二者的最大声功率相差 26 dB,声场计算结果如图 6 所示。

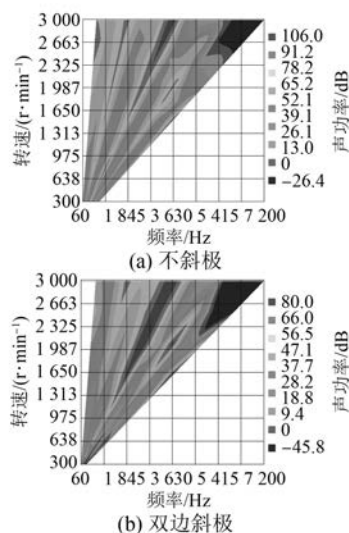


图6 不斜极与双边斜极声场结果对比

通过不同斜极方式的声场结果对比,可以发现:

(1) 不同斜极方式的 36 阶和 72 阶声场计算结果与谐响应分析的结果基本一致,均随着转速的增加呈上升趋势,且 72 阶表现的最明显。

(2) 转子分段不斜极时的声功率最大,为 105.92 dB;其次是单边斜极、Z 型斜极;双边斜极的声功率最低,降噪效果最优,最大值 79.90 dB。

3 结 语

本文以 1 台额定功率 100 kW 的纯电动客车驱动用 PMSM 为例进行转子不同方式分段斜极的振动噪声仿真,通过对比分析得到以下结论:

(1) 电机产生的振动噪声主要受径向电磁力的影响,该径向电磁力主要与极槽配合有关。本文采用 12 极 72 槽的配合方式,72 阶电磁力对振动噪声的影响最大,其次是 36 阶电磁力。

(2) 在转子分段数相同的情况下,转子斜极方式不同,对振动噪声的削弱也不一样,对于本文所研究的电机而言,双边斜极产生的振动噪声最低,效果最好。

【参考文献】

[1] 郑江,代颖,石坚. 车用永磁同步电机的电磁噪声特性[J]. 电工技术学报,2016,31(增刊1): 53.
[2] MA C, ZUO S. Black-box method of identification and diagnosis of abnormal noise sources of permanent

magnet synchronous machines for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5538.

[3] 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: 4-5.
[4] 王晓远,贺晓钰,高鹏. 电动汽车用 V 型磁钢转子永磁电机的电磁振动噪声削弱方法的研究[J]. 电工技术学报,2019,39(16): 4919.
[5] 谢颖,李飞,黎志伟,等. 内置永磁同步电机减振设计与研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(18): 5437.
[6] GIERAS J F, WANG C, LAI J C. Noise of Polyphase Electric Motors[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
[7] 徐珂,应红亮,黄苏融,等. 转子分段斜极对永磁同步电机电磁噪声削弱的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(11): 2248.
[8] 魏家明. 新能源汽车用分数槽集中绕组永磁同步电机振动分析与结构优化[D]. 合肥:安徽大学,2018.
[9] 王淑旺,王威,范佳伦. 车用永磁同步电机电磁噪声的分析与优化[J]. 汽车技术,2019(8): 12.
[10] BLUM J, MERWERTH J, HERZOG H G. Investigation of the segment order in step-skewed synchronous machines on noise and vibration[C] // 2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2014.
[11] CASSAT A, ESPANET C, COLEMAN R, et al. A practical solution to mitigate vibrations in industrial PM motors having concentric windings [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(5): 1526.
[12] 李晓华,黄苏融,李良梓. 电动汽车用永磁同步电机振动噪声的计算与分析[J]. 电机与控制学报,2013,17(8): 37.
[13] 宋志环,韩雪岩,陈丽香,等. 不同极槽配合永磁同步电机振动噪声分析[J]. 微电机,2007,40(12): 11.
[14] 应红亮,张舟云,曲家骥,等. 转子分段斜极在永磁同步电机中的应用分析[J]. 微特电机,2009,37(7): 10.
[15] VEREZ G, BARAKAT G, AMARA Y, et al. Impact of pole and slot combination on vibrations and noise of electromagnetic origins in permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 8101104.