

高阶电磁力波对电动汽车IPMSM 振动特性影响分析

何文丹, 李晓华, 赵容健, 冯安惠

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 电动汽车用整数槽多极对数内置式永磁同步电机(IPMSM)的主要振动是0阶和 $2p$ 阶固有频率处的振动, 普遍认为这两处振动是由空间0阶和 $2p$ 阶电磁力波引起。为研究高阶电磁力波对这两处振动的贡献, 提出了一种分析电动汽车用整数槽多极对数IPMSM高阶电磁力波对电机振动贡献的单位力波谱响应分析方法。以一台48槽8极电动汽车IPMSM为例, 首先理论分析了高阶空间电磁力波的谐波来源, 然后建立样机的有限元仿真模型, 分析各高阶力波对0阶和8阶固有频率处振动的影响。结果表明, 48阶、40阶空间电磁力波分别对0阶、8阶固有频率处振动有较大贡献。实验结果验证了理论分析和仿真模型的正确性。

关键词: 电动汽车IPMSM; 高阶电磁力波; 单位力波谱响应分析; 振动

中图分类号: TM351; TM341 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23153

Analysis of the Influence of High-order Electromagnetic Force Waves on the Vibration Characteristics of IPMSM for Electric Vehicles

HE Wendan, LI Xiaohua, ZHAO Rongjian, FENG Anhui

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The main vibration of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) with integer slot multi-pole pair for electric vehicles is the vibration at 0-order and $2p$ -order natural frequencies, which are generally believed to be caused by the spatial electromagnetic force waves of 0-order and $2p$ -order. In order to study the contribution of high-order electromagnetic force waves to these two vibrations, a unit force wave harmonic response analysis method was proposed to analyze the contribution of higher-order electromagnetic force wave to the vibration of IPMSM with integer slot multi-pole pair for electric vehicles. Taking a 48 slot 8-pole IPMSM for electric vehicle as an example, firstly, the harmonic source of high-order spatial electromagnetic force wave was analyzed theoretically, and then the finite element simulation model of the prototype was established to analyze the influence of each high-order force wave on the vibration at 0-order and 8-order natural frequencies. The results show that 48-order and 40-order spatial electromagnetic force waves have great contribution to the vibration at 0-order and 8-order natural frequencies respectively. The experimental results verify the correctness of the simulation model and theoretical analysis.

Key words: electric vehicles IPMSM; high-order electromagnetic force wave; unit force wave harmonic response analysis; vibration

电动汽车整数槽多极对数内置式永磁同步电机(interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM)的振动主要由基波和齿谐波相互作用引起的0阶和 $2p$ 阶空间力波在0阶和 $2p$ 阶固有频率处引起的共振产生^[1-2]。本文将继续研究

高阶空间电磁力波对电动汽车IPMSM振动特性影响并分析力波来源。

国内外许多学者对永磁电机的振动特性及来源进行了深入的研究。永磁电机振动的根源被认为是径向力而非脉动转矩^[3], 径向电磁力波

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707114)

作者简介: 何文丹(1995—), 女, 硕士, 研究生, Email: hewendan95@163.com

通讯作者: 李晓华(1974—), 女, 博士, 副教授, Email: lixiaohua96@126.com

的阶数越低,产生的电磁振动噪声越大,因此低阶径向力波是引起电磁振动的主源,更高阶力波由于影响很小,可以忽略^[4-5]。永磁电机中电磁力波的最小模数能引起较大的电磁振动,且最小模数为电机槽数和极数的最大公约数^[6-7]。对于传统的电机振动分析,非零低阶振动更受学者们的关注。近年来,许多学者对0阶振动进行了研究,对于传统的无刷电机(即120槽/80极),0阶振动引起的形变幅度比最低非0阶振动大得多^[8]。研究表明,整数槽永磁同步电机主要电磁振动噪声源是0阶电磁力波^[1,9],而文献[10]认为槽数阶电磁力波是样机0阶振动的主源,并以一台36槽6极永磁同步电机为例进行空载工况下的仿真和实验,验证了结论的正确性。类似地,文献[11-12]也发现了高阶空间电磁力会引起低阶模态振动这一现象,但并未进一步分析原因。

许多学者对电机电磁振动的计算进行了研究。文献[13]提出了一种永磁同步电机快速半解析计算模型。文献[14-15]基于多物理场有限元法分析了电机振动特性。文献[16]提出一般集中力加载方式忽略了电磁力沿齿面的不均匀分布和电磁力波空间阶次的高阶成分,对中低频段电磁振动的预测有较大影响。文献[17]提出一种基于力响应叠加的振动噪声计算方法,并分析了三种不同气隙力分解方案,认为选择不含槽区域的定子齿面作为力分解区域可以很好地逼近原始

气隙力,进而快速准确地计算出振动响应。

基于以上分析,为了研究高阶电磁力波对电动汽车IPMSM振动特性的影响,本文采用单位力波谱响应分析法研究了高阶空间电磁力波对整数槽多极对数IPMSM的振动特性的影响并分析了原因。以一台48槽8极(s 槽 $2p$ 极)IPMSM为例,样机参数为:槽数48,极数8,相数3,额定功率45 kW,峰值功率90 kW,额定转速3 500 r/min,峰值转速10 000 r/min,冷却方式为水冷。首先理论分析了高阶力波的谐波来源,然后建立样机的有限元仿真模型,分析各高阶力波对0阶和8阶固有频率处振动的影响。最后利用力响应叠加法来评估样机在某一工况下的振动频谱特性,并用振动实验进行验证。

1 电动汽车IPMSM空间电磁力波来源分析

对整数槽永磁同步电机来说,电机的振动噪声主要是由定转子高次谐波磁场相互作用引起的。文献[1-2]对永磁电机单位面积上径向电磁力波的瞬时解析表达进行了推导。根据文献[1-2]中的理论推导可以得到IPMSM定转子磁场相互作用高阶力波频率分量来源表,其中48槽8极电动汽车IPMSM定转子磁场相互作用引起的48阶和40阶空间电磁力波频谱分量来源如表1和表2所示。

表1 48槽8极电机定、转子磁场相互作用48阶力波来源表

Tab.1 Source table of 48-order electromagnetic force wave of stator and rotor magnetic field interaction of 48 slot 8-pole motor

	$P_{pml\Lambda_0 - s\Lambda_0}$		$P_{pml\Lambda_0 - s\Lambda_k} P_{pml\Lambda_k - s\Lambda_0}$		$P_{pml\Lambda_k - s\Lambda_k}$	
	$(\mu + v)p$ μ/v	$(\mu - v)p$ μ/v	$(\mu + v)p \pm z$ μ/v	$(\mu - v)p \pm z$ μ/v	$(\mu + v)p \pm 2z$ μ/v	$(\mu - v)p \pm 2z$ μ/v
6f	5/7,5/-17	7/-5,7/19	5/19,5/-5,5/-29	7/-17,7/7	5/-17,5/7	7/19,7/-29,7/-5
12f	11/-23	13/1,13/25	11/13,11/-11	13/-11,13/13	11/1,11/-23,11/25,	13/1,13/25,13/-23
18f	17/-5,17/-29	19/7	17/7,17/-17	19/-5	17/19,17/-5	19/-17,19/7
24f	23/-11	25/13	23/1,23/-23	25/1,25/25	23/13,23/-11	25/-11,25/13

表2 48槽8极电机定、转子磁场相互作用40阶电磁力波来源表

Tab.2 Source table of 40-order electromagnetic force wave of stator and rotor magnetic field interaction of 48 slot 8-pole motor

	$P_{pml\Lambda_0 - s\Lambda_0}$		$P_{pml\Lambda_0 - s\Lambda_k} P_{pml\Lambda_k - s\Lambda_0}$		$P_{pml\Lambda_k - s\Lambda_k}$	
	$(\mu + v)p$ μ/v	$(\mu - v)p$ μ/v	$(\mu + v)p \pm z$ μ/v	$(\mu - v)p \pm z$ μ/v	$(\mu + v)p \pm 2z$ μ/v	$(\mu - v)p \pm 2z$ μ/v
2f	1/-11	3/13	1/1,1/-23	3/1,3/25	1/13	3/-11
4f	3/7	5/-5	3/-5	5/7,5/-17	3/-17	5/19,5/-29
8f	7/-17	9/19	7/-5	9/7	7/7	9/-5
10f	9/1	无	9/-11	11/13,11/-11	9/-23,9/25	11/-23,11/25
14f	13/-23	15/25	13/-11	15/13	13/1	15/1

表1和表2中: $P_{pm/\Lambda_0 - s/\Lambda_0}$ 为平均磁导调制的定、转子磁场相互作用引起的电磁力波; $P_{pm/\Lambda_0 - s/\Lambda_1}$ 为平均磁导调制的转子磁场和定子开槽磁导调制的定子磁场相互作用产生的电磁力波; $P_{pm/\Lambda_1 - s/\Lambda_0}$ 为定子开槽磁导调制产生的转子磁场和平均磁导调制的定子磁场相互作用产生的电磁力波; $P_{pm/\Lambda_1 - s/\Lambda_1}$ 为定子开槽磁导调制产生的定、转子磁场相互作用产生的电磁力波; p 为电机的极对数; μ 为转子磁场谐波次数; v 为定子磁场谐波次数; z 为电机槽数。

分析表1、表2可得:

1) $r=0, 24, 48$ 阶电磁力波频率分量分别为 $6f, 12f, 18f, 24f \dots$; $r=48$ 阶力波 $12f$ 分量主要是基波、11次、13次一阶齿谐波和23次、25次二阶齿谐波相互作用产生,与主要产生0阶固有频率处振动的0阶力波频率分量相同^[1]。

2) $r=8, 16, 32, 40$ 阶电磁力波频率分量分别为 $2f, 4f, 8f, 10f, 14f \dots$; $r=40$ 阶力波 $2f$ 分量主要是基波、11次、13次一阶齿谐波和23次、25次二阶齿谐波相互作用产生,与主要产生8阶固有频率处振动的8阶力波频率分量相同。

2 电动汽车IPMSM电磁振动特性仿真分析

2.1 单位空间电磁力波振动特性分析

为了研究高阶电磁力波对样机振动的影响,本文建立了样机定子铁心的3D有限元仿真模型,如图1所示。计算了定子铁心在 $r=0, 8, 16, 24, 32, 40, 48$ 阶单位空间力波激励下的频响函数特性,各阶单位空间力波作用于定子铁心齿面分布示意图如图2所示。各阶单位空间力波振动加速度频谱图如图3所示。

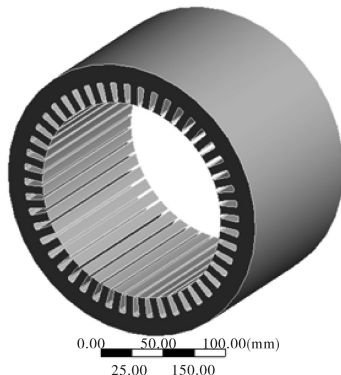


图1 定子铁心3D有限元模型

Fig.1 3D finite element model of stator core

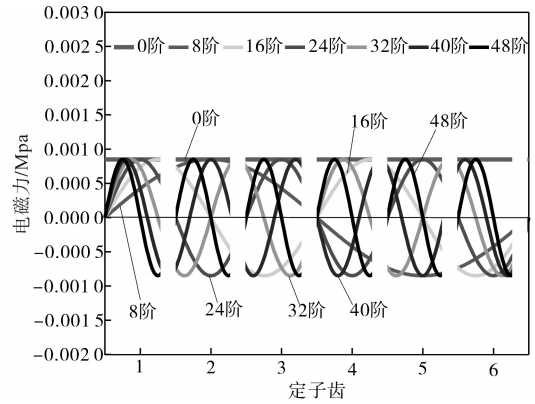


图2 各阶单位空间力波激励示意图

Fig.2 Schematic diagram of each order unit spatial force wave excitation

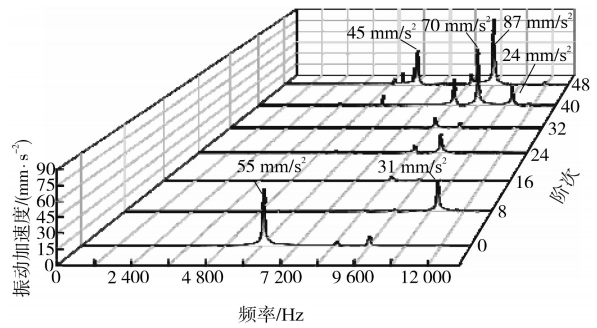


图3 各阶单位空间力波振动加速度频谱

Fig.3 Vibration acceleration spectrum of each order unit spatial force wave

分析图3可得:在0~13 000 Hz频段范围内,振动加速度在6 000 Hz,9 500 Hz和11 000 Hz频率附近的值较大,样机结构模态振型图如图4所示。由图4可得:

1) 0阶单位空间力波和48阶单位空间力波在6 085 Hz处激振出的形变模态是0阶,振动加速度幅值分别是 $55 \text{ mm/s}^2, 45 \text{ mm/s}^2$,振型图如图4a所示。48阶力波可激励0阶振动,且其振幅为0阶单位力波激振0阶振动的82%;24阶空间力波激励振动相对较小。

2) 40阶和48阶单位空间力波在9 578 Hz处激振出的形变模态是0阶扭振,振动加速度幅值分别是 $70 \text{ mm/s}^2, 87 \text{ mm/s}^2$,振型图如图4b所示。40阶、48阶力波可激励出振幅较大的0阶扭振,其他阶数力波在此处激励振动相对较小。

3) 8阶和40阶单位力波在11 074 Hz处激振出的形变模态是8阶,振动加速度幅值分别是 $31 \text{ mm/s}^2, 24 \text{ mm/s}^2$,振型图如图4c所示。40阶力波可激励8阶振动,且其振幅为8阶单位力波激振8阶振动的77%,16阶、32阶力波激励振动

相对较小。

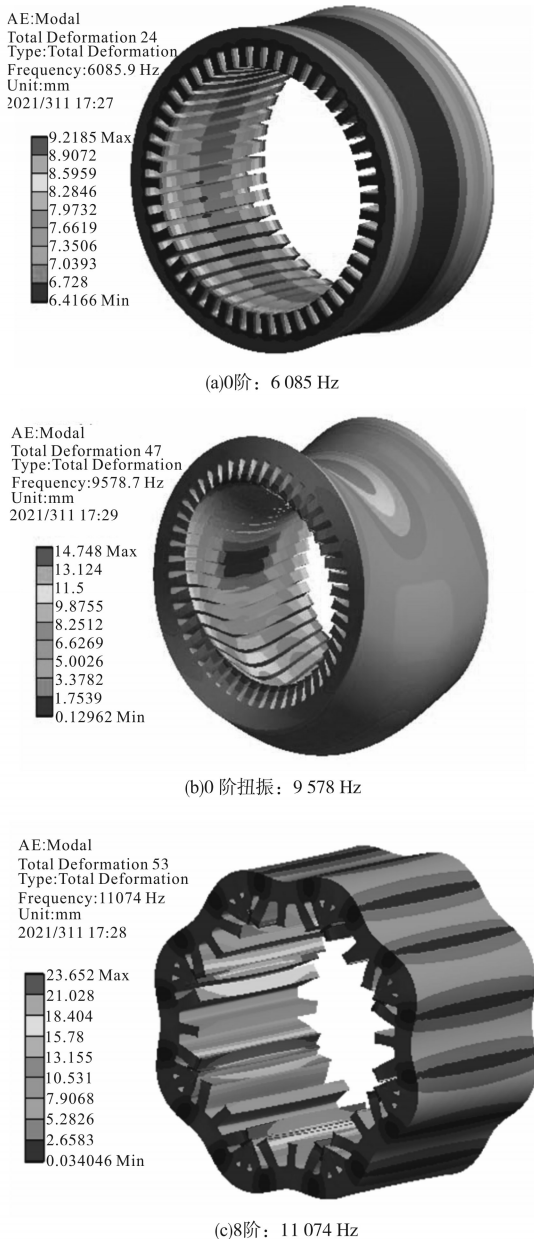


图4 模态振型

Fig.4 Modal shape

2.2 响应叠加

为了进一步说明高阶空间电磁力波对样机振动的贡献,在额定工况 7 500 r/min 时,对 0 阶、8 阶、40 阶、48 阶空间电磁力波进行谐波响应分析,得到 0 阶力波与 0 阶、48 阶力波叠加的振动加速度频谱图,如图 5a 所示。8 阶力波与 8 阶、40 阶力波叠加的振动加速度频谱图如图 5b 所示。由图 5a 可知,单独 0 阶力波激励与 0 阶、48 阶力波叠加激励的振动加速度频谱变化趋势相同,叠加 48 阶力波后,0 阶固有频率处的振动幅值增加了 46%,0 阶扭振固有频率处的振动幅值

增加了 5 倍。由图 5b 可知,8 阶力波单独作为激励与 8 阶、40 阶力波叠加作为激励的振动加速度频谱变化趋势相同,叠加 40 阶力波后,加速度频谱幅值整体增加,其中 8 阶固有频率处的振幅增加了 14%,0 阶扭振固有频率处的振动幅值增加了 2.7 倍。

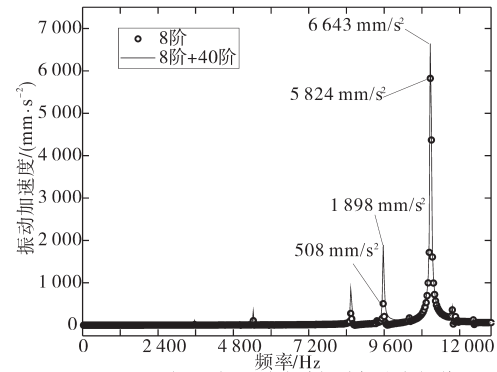
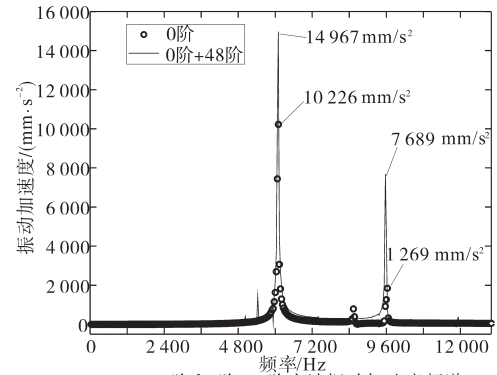


图5 振动加速度频谱对比图

Fig.5 Spectrum comparison of vibration acceleration

综上所述可得:0 阶固有频率处的振动主要由 0 阶、48 阶电磁力波激振产生;8 阶固有频率处的振动主要由 8 阶、40 阶电磁力波激振产生,0 阶扭振固有频率处的振动主要由 40 阶、48 阶力波激振产生。并且考虑 48 阶力波后,0 阶固有频率处振幅增加了 46%,0 阶扭振固有频率处振幅增加了 5 倍。考虑 40 阶力波后,8 阶固有频率处振幅增加了 14%,0 阶扭振固有频率处振幅增加了 2.7 倍。因此,在研究电磁力波对整数槽多极对数永磁同步电机振动的影响时,高阶力波是不可忽略的。

3 实验分析

为了验证以上分析结果的正确性,本文对样机进行振动实验测试分析。样机振动实验测试现场图如图 6 所示,采用美国 DP 动态信号分析仪,三向加速度传感器用 502 胶水粘到机壳表面,

加速传感器的输出信号经过动态信号采集仪处理后得到振动信号频谱图。

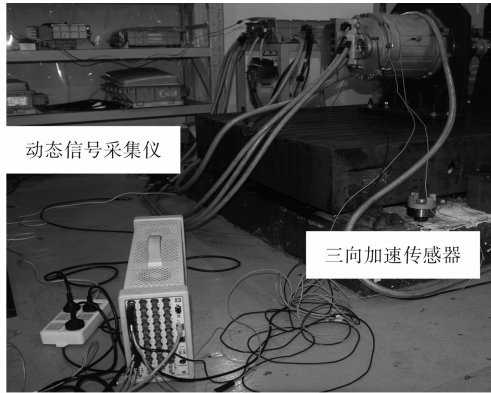


图6 样机振动实验测试图

Fig.6 Vibration test diagram of prototype

由上文分析可知,0阶、8阶、40阶、48阶空间电磁力波对样机振动贡献较大。在额定工况7500 r/min时对样机进行振动实验,并与仿真结果进行对比验证本文方法的正确性。实验和仿真振动加速度频谱图如图7所示。实验和仿真0阶、8阶和0阶扭振固有频率处振动加速度幅值及误差如表3所示。

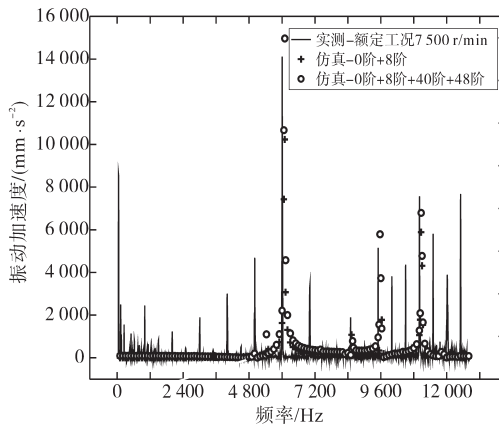


图7 样机7500 r/min实验和仿真振动加速度对比图

Fig.7 Comparison of vibration acceleration between experiment and simulation of 7500 r/min prototype

表3 振动加速度幅值对比

Tab.3 Comparison of vibration acceleration amplitude

振型	实验/ (mm·s ⁻²)	0阶+8阶+40阶+48阶		0阶+8阶	
		振动/ (mm·s ⁻²)	误差/%	振动/ (mm·s ⁻²)	误差/%
0阶	14 110	14 971	6.0	10 231	-27.5
8阶	7 561	6 795	-10.0	5 889	-22.0
0阶扭振	5 150	5 791	12.4	1 477	-72.0

由图7可得:考虑40阶、48阶力波和仅考虑0阶、8阶力波仿真模型的振动加速度频谱分布规律都与实测结果相一致,且都在6000 Hz、9500 Hz和11000 Hz频率附近出现峰值,但仿

真模型考虑40阶、48阶力波后振动加速度幅值整体增大。

分析表3可得,相比仅考虑0阶、8阶力波的仿真模型,考虑40阶、48阶力波后,0阶(6085 Hz处振型)、8阶(11074 Hz处振型)和0阶扭振(9578 Hz处振型)固有频率处的振动加速度幅值与实测结果相比误差均减小。综上,考虑高阶力波的仿真模型所计算出的振动幅值误差均较小,更加接近实际运行情况,说明高阶电磁力波对样机振动有较大贡献,不可忽略。

4 结论

本文提出了单位力波谱响应分析法,研究了高阶空间电磁力波对电动汽车用整数槽多极对数IPMSM振动特性的影响。得出以下结论:

1)对整数槽多极对数IPMSM,0阶、 $s/2$ 阶、 s 阶空间电磁力波的时间频率分量是 $6f, 12f, 18f, 24f \dots$; $2p$ 阶、 $4p$ 阶、 $8p$ 阶、 $10p$ 阶空间电磁力波的时间频率分量是 $2f, 4f, 8f, 10f, 14f \dots$ 。

2)0阶固有频率处的振动主要由0阶、48阶空间电磁力波激振;8阶固有频率处的振动主要由8阶、40阶空间电磁力波激振;0阶扭振固有频率处的振动主要由40阶、48阶空间电磁力波激振。

3)整数槽多极对数IPMSM 0阶、8阶、40阶和48阶空间电磁力波的主要都是基波和齿谐波相互作用产生。

通过分析,发现高阶电磁力波对0阶、8阶固有频率处的振动不可忽略,且其都是基波和齿谐波相互作用产生。此结论为整数槽多极对数IPMSM振动的抑制提供理论基础。

参考文献

[1] 李晓华,刘成健,梅柏杉,等.电动汽车IPMSM宽范围调速振动噪声源分析[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5219-5227.
Li Xiaohua, Liu Chengjian, Mei Boshan, et al. Vibration and noise sources analysis of IPMSM for electric vehicles in a wide-speed range[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5219-5227.

[2] 李晓华,赵容健,田晓彤,等.逆变器供电对电动汽车内置式永磁同步电机振动噪声特性影响研究[J].电工技术学报,2020,35(21):4455-4464.
Li Xiaohua, Zhao Rongjian, Tian Xiaotong, et al. Study on vibration and noise characteristics of interior permanent magnet

- synchronous machine for electric vehicles by inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (21): 4455-4464.
- [3] Islam Rakib, Husain Iqbal. Analytical model for predicting noise and vibration in permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46 (6): 2346-2354.
- [4] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
Ma Dayou. Zao sheng yu zhen dong kong zhi gong cheng shou ce [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [5] 康娟, 蒋卫伟, 杨思雨, 等. 电动客车用永磁同步电机噪声特性研究[J]. 微电机, 2020, 53(1): 20-24, 42.
Kang Juan, Jiang Weiwei, Yang Siyu, *et al.* Noise characteristics study of permanent magnet synchronous motor for electric bus[J]. Micro Motors, 2020, 53(1): 20-24, 42.
- [6] Yang Haodong, Chen Yangsheng. Influence of radial force harmonics with low mode number on electromagnetic vibration of PMSM[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29 (1): 38 - 45.
- [7] 杨浩东. 永磁同步电机电磁振动分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
Yang Haodong. Electromagnetic vibration analysis of permanent magnet synchronous[D]. Hangzhou: Zhengjian University, 2011.
- [8] Valavi M, Le Besnerais J, Nysveen A. An investigation of zero-order radial magnetic forces in low-speed surface-mounted permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(8): 1-6.
- [9] Hofmann A, Qi F, Lange T, *et al.* The breathing mode-shape 0: is it the main acoustic issue in the PMSMs of today's electric vehicles?[C]/2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014: 3067-3073.
- [10] Wang Shanming, Hong Jianfeng, Sun Yuguang, *et al.* Analysis of zeroth mode slot frequency vibration of integer slot permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(4): 2954-2964.
- [11] Fang Haiyang, Li Dawei, Qu Ronghai, *et al.* Modulation effect of slotted structure on vibration response in electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2998-3007.
- [12] Liang Wenyi. The investigation of electromagnetic radial force and associated vibration in permanent magnet synchronous machines[D]. Bedfordshire: Cranfield University, 2017.
- [13] 林福, 左曙光, 毛钰, 等. 考虑电流谐波的永磁同步电机电磁振动和噪声半解析模型[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 24-31.
Lin Fu, Zuo Shuguang, Mao Yu, *et al.* Semi-analytical model of vibration and noise for permanent magnet synchronous motor considering current harmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 24-31.
- [14] 王玉娟, 王华强. 转子分段斜极永磁同步电机电磁振动噪声研究[J]. 电气传动, 2021, 51(2): 75-80.
Wang Yujuan, Wang Huaqiang. Research on electromagnetic vibration and noise of permanent magnet synchronous motor with rotor step skewing[J]. Electric Drive, 2021, 51 (2): 75-80.
- [15] 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(S1): 53-59.
Zheng Jiang, Dai Ying, Shi Jian. Electromagnetic noise characteristics of permanent magnet synchronous motor applied in electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 53-59.
- [16] 左曙光, 刘晓璇, 于明湖, 等. 永磁同步电机电磁振动数值预测与分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 159-167.
Zuo Shuguang, Liu Xiaoxuan, Yu Minghu, *et al.* Numerical prediction and analysis of electromagnetic vibration in permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 159-167.
- [17] Matthias Bosing. Acoustic modeling of electrical drives-noise and vibration synthesis based on force response superposition [D]. Germany: RWTH Aachen University, 2012.

收稿日期: 2021-03-03

修改稿日期: 2021-03-11

(上接第7页)

- nal space vector modulation for four-leg voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17 (3): 314-326.
- [18] 罗耀华, 许铁岩. 一种三相四桥臂空间矢量脉宽调制方法[J]. 电力电子技术, 2013, 47(1): 61-63.
Luo Yaohua, Xu Tieshan. A three-phase four-arm space vector pulse width modulation method[J]. Power Electronics Technology, 2013, 47(1): 61-63.
- [19] 孙驰, 毕增军, 魏光辉. 一种新颖的三相四桥臂逆变器解耦控制的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 124-130.
Sun Chi, Bi Zengjun, Wei Guanghui. Modeling and simulation of a novel three-phase four-leg inverter decoupling control[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2004, 24(1): 124-130.
- [20] 苏森, 王志强, 谢长静. 四桥臂逆变器的三维空间矢量脉宽调制[J]. 电气应用, 2014(9): 47-51.
Su Sen, Wang Zhiqiang, Xie Changjing. Three-dimensional space vector pulse width modulation of four-leg inverter[J]. Electrical Application, 2014(9): 47-51.

收稿日期: 2020-12-07

修改稿日期: 2020-12-24