

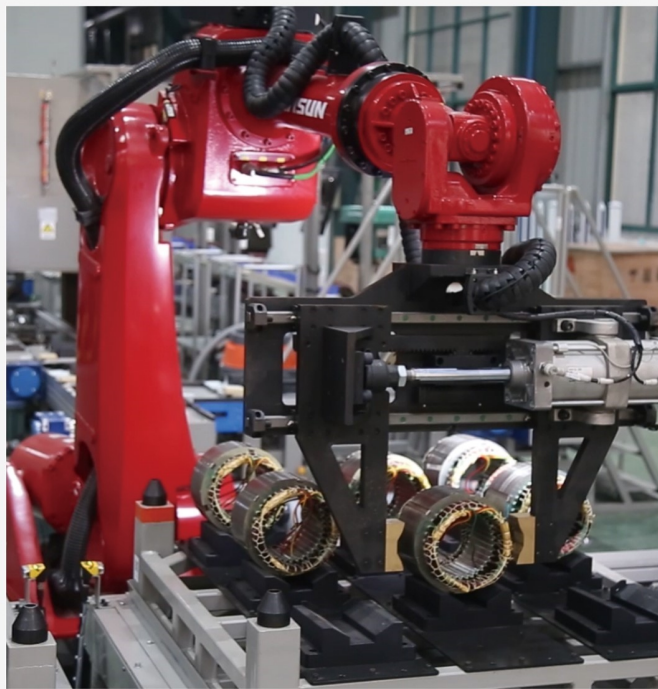
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

李祥成,王迎春,王德国,刘永强.
感应牵引电机定子绕组涡流附加损耗
分析.
电机与控制应用,2021,48(11):45.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

感应牵引电机定子绕组涡流附加损耗分析*

李祥成, 王迎春, 王德国, 刘永强
(中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 高功率密度感应牵引电机具有结构紧凑、磁通饱和度高、工作频率高、单位体积损耗密度大等特点。高工作频率导致定子绕组趋肤效应和邻近效应明显增加, 在定子绕组中感应高频涡流附加损耗, 引起附加铜耗大大增加。基于感应电机内部谐波磁场理论分析定子绕组涡流附加损耗的来源、计算方法及影响因素, 并对一款 4 极 650 kW 感应牵引电机进行了详细有限元分析。分析了感应牵引电机定子槽内磁场分布、槽内磁场的各次谐波、谐波幅值与距槽口深度的关系, 并计算了槽内导体的涡流附加损耗。计算结果表明槽口附近导体的涡流附加损耗最大, 随着距离槽口深度的增加, 槽内导体的涡流附加损耗呈明显减小的趋势, 通过合理设计定子槽口深度可以有效减小槽口附近导体的涡流附加损耗。

关键词: 感应牵引电机; 涡流附加损耗; 谐波磁场; 相带谐波; 齿谐波; 2D 有限元; 槽口深度

中图分类号: TM 922.71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)11-0045-06

doi: 10.12177/emca.2021.104

Analysis of Eddy Current Additional Loss in Induction Traction Motor Stator Winding*

LI Xiangcheng, WANG Yingchun, WANG Deguo, LIU Yongqiang
(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: High-power-density induction traction motors have the characteristics of compact structure, high magnetic flux saturation, high operating frequency and high volume loss density. The high operating frequency leads to the significant increase of skin effect and proximity effect of the stator windings. The high frequency eddy current additional loss is generated in the stator windings, causing additional copper loss to increase greatly. Based on the internal harmonic magnetic field theory of the induction motor, the source, calculation method and influencing factors of the stator windings eddy current additional loss are analyzed. A 4-pole 650 kW induction traction motor is analyzed in detail with the finite element method. The stator slot inner magnetic field distribution, the harmonics of the magnetic field in the slot, and the relationship between harmonic amplitude and depth from slot opening are analyzed, and the eddy current additional loss of conductors in the slot is calculated. The calculation results show that the eddy current additional loss of the conductors near the slot opening is the largest, and as the depth from the slot opening increases, the eddy current additional loss of conductors in the slot shows a significant reduction trend. By reasonable design of the stator slot opening depth, the eddy current additional loss of the conductors near the slot opening can be effectively reduced.

Key words: induction traction motor; eddy current additional loss; harmonic magnetic field; phase band harmonic; tooth harmonic; 2D finite element; slot opening depth

收稿日期: 2021-08-13; 收到修改稿日期: 2021-09-15

* 基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题项目(P2020J023)

作者简介: 李祥成(1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为牵引电机设计。

0 引言

在轨道交通牵引电机等应用领域,为满足安装空间、整车重量的严格限制以及列车高起动加速性能要求,牵引电机往往具有高功率密度、高通饱和度、高工作频率和高体积损耗密度等特点,定子绕组中的损耗明显高于普通应用领域的电机。准确计算定子绕组损耗对进一步提高电机的功率密度和效率非常重要。

电机定子绕组置于以下 4 部分交变磁场中:(1)电机的基频磁场;(2)定子槽中的基波漏磁场;(3)定子开槽、铁心饱和以及转子运动产生的高频谐波磁场;(4)PWM 逆变器产生的高频谐波磁场^[1]。这些交变磁场会在定子绕组导体中感应出涡流,频率越高,涡流效应越明显。国内外学者对高频下定子绕组的涡流附加损耗进行了研究,分析了槽口尺寸、导体位置、并绕根数等参数对涡流分布和涡流附加损耗大小的影响,并提出了一些减小涡流附加损耗的措施^[2-5]。尽管上述文献在电机定子绕组涡流附加损耗计算方面展开了大量研究,但对其影响因素的分析很少从电机内部谐波磁场入手分析谐波磁场对涡流附加损耗的具体影响。

本文分析了定子绕组涡流附加损耗的来源、计算方法及影响因素,以一台 4 极 650 kW 感应牵引电机为例,建立详细的有限元分析模型,包括定子槽形、槽内导体和导体的分布位置,分析了定子槽内磁场分布、槽内磁场谐波、谐波幅值与距槽口深度的变化关系,定子绕组相带谐波、转子齿谐波对定子绕组涡流附加损耗的影响,进而探究了定子绕组涡流附加损耗随定子槽口深度变化的关系。计算结果表明槽口附近导体的涡流附加损耗最大,随着距离槽口深度的增加,槽内导体的涡流附加损耗呈明显减小的趋势,通过合理设计定子槽口深度可以有效减小定子绕组相带谐波和转子齿谐波在定子绕组中感应的涡流附加损耗。

1 相带谐波和齿谐波

异步电机中除产生基波磁动势外,还产生一系列谐波磁动势,其气隙合成磁动势算式^[6]如下:

$$f(\theta, t) = f_p(\theta, t) + \sum_{\nu} f_{\nu}(\theta, t) + \sum_{\mu} f_{\mu}(\theta, t) \quad (1)$$

式中: $f_p(\theta, t)$ 为主波合成磁动势; $f_{\nu}(\theta, t)$ 为定子绕组谐波磁动势; $f_{\mu}(\theta, t)$ 为转子绕组谐波磁动势。

当三相定子绕组采用 60° 相带,每极每相槽数为整数时,定子绕组磁动势相带谐波次数为

$$\nu = (6k_1 + 1)p, k_1 = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2)$$

式中: p 为极对数;+ 表示旋转方向与主波相同,- 表示旋转方向与主波相反。

定子绕组的齿谐波不会因为采用短距绕组或分布绕组而削弱,定子绕组齿谐波的次数为

$$\nu_1 = \left(k_1 \frac{Z_1}{p} + 1 \right) p, k_1 = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (3)$$

式中: Z_1 为定子槽数。

ν_1 次定子齿谐波相对定子铁心的频率为

$$f_{\nu_1} = \left(k_1 \frac{Z_1}{p} + 1 \right) f_1 \quad (4)$$

式中: f_1 为定子频率。

鼠笼转子由于各槽相位不同,不存在转子相带谐波,仅有磁动势齿谐波,其次数为

$$\mu_1 = \left(k_2 \frac{Z_2}{p} + 1 \right) p, k_2 = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (5)$$

式中: Z_2 为转子槽数。

μ_1 次转子齿谐波相对定子铁心的频率为

$$f_{\mu_1} = \left[k_2 \frac{Z_2}{p} (1-s) + 1 \right] f_1 \quad (6)$$

式中: s 为转差率。

2 定子绕组涡流附加损耗

单根矩形导体放置于均匀的交变磁场中,导体中感应出的涡流附加损耗表示为^[7]

$$P_{\text{eddy}} = L_a \frac{w_c h_c^3 \sigma (\omega B)^2}{24} \quad (7)$$

式中: L_a 为导体有效长度; B 为正弦交变磁场的幅值; h_c 为矩形导体高度; w_c 为矩形导体宽度; σ 为导体材料的电导率; ω 为电频率。

定子绕组中导体位置的交变磁场主要来自在导体层下方的槽内所有导体产生的漏磁场,因此也可以使用式(8)计算交变磁场的幅值 B ^[7]:

$$B = \frac{\mu_0 \sum_{n=1} N I}{w_n} \quad (8)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; $\sum_{n=1} N I$ 为导体位置下方

的绕组所有导体的总安培匝数; w_n 为层宽。

由式(7)、式(8)可以看出,定子绕组涡流附加损耗与导线截面尺寸、导线的长度、通电导线所在空间交变磁场的幅值及频率有关。并随着导线截面尺寸、交变磁场的幅值及频率增大而增大。考虑交变磁场受漏磁、磁路饱和的影响,很难通过解析法计算得到精确解,从而导致解析法存在较大的计算误差^[8]。采用有限元分析可以精确计算电机内磁场的分布,在此基础上得到的涡流附加损耗分布具有较高的精度。

3 涡流附加损耗分析

本文以一台三相 4 极 140 Hz, 2 800 V, 650 kW 绕组 Y 连接的感应牵引电机进行分析,样机基本参数如表 1 所示。

表 1 样机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	650	极数	4
额定电压/V	2 800	定子槽数	60
额定电流/A	170	转子槽数	48
额定转速/(r·min ⁻¹)	4 180	定子内径/mm	315
额定频率/Hz	140	气隙长度/mm	1.8
额定转差率/%	0.476	并联支路数	2

3.1 有限元模型的建立

按电机实际尺寸建立 2D 仿真模型,模型定子为矩形槽,采用成型绕组,每个线圈 8 匝,每匝由 2 根矩形导线并绕。1/4 的电机 2D 模型如图 1 所示。

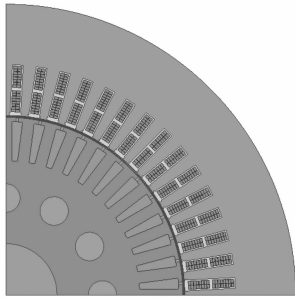


图 1 电机 2D 模型

模型中详细建立了槽内导体和导体的分布位置,并对槽内绕组每匝导体进行编号,槽口处导体编号为 1#,槽底处导体编号为 16#,中间各匝导体

依次递增,槽内导体的详细分布如图 2(a)所示。

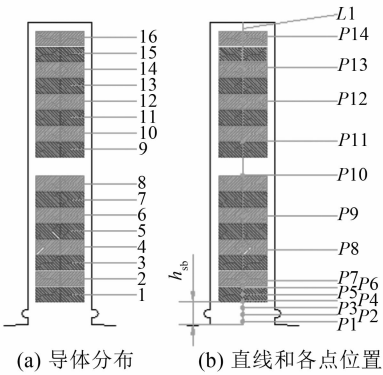


图 2 槽内导体分布和槽内直线和各点位置

3.2 仿真分析

3.2.1 定子槽内磁场分布

在定子槽中心处,从槽口位置至槽底建立直线 L1,并在直线上距离槽口不同的深度建立点 P1~P14,直线 L1 和点 P1~P14 的详细位置如图 2(b)所示。槽内编号为 1#的导体距离槽口的深度用 h_{sb} 表示,P1~P14 各点距离槽口的深度如表 2 所示。

表 2 槽中心各点距离槽口深度

点	距离槽口深度/mm	点	距离槽口深度/mm
P1	0.5	P8	11
P2	1.5	P9	16
P3	2.5	P10	22
P4	3.5	P11	27
P5	4.5	P12	33
P6	5.5	P13	38
P7	6.5	P14	42.5

建立分析模型,给电机转子施加旋转运动,转速为 4 180 r/min,定子绕组施加三相对称正弦波电压激励,频率为 140 Hz,线电压有效值 2 800 V,仿真达到稳态后,定子槽内磁场分布如图 3 所示。

由图 3 可知,定子槽内磁场从槽口至槽底不断减小,磁场交变主要集中在槽口部位。获取定子槽中心处从槽口至槽底各点的磁通密度,可得距离槽口不同深度时,定子槽中心处的磁通密度分布规律如图 4 所示。

由图 4 可知,槽口处磁通密度最高达到 0.3 T,随着距槽口的深度增加,定子槽中心处的

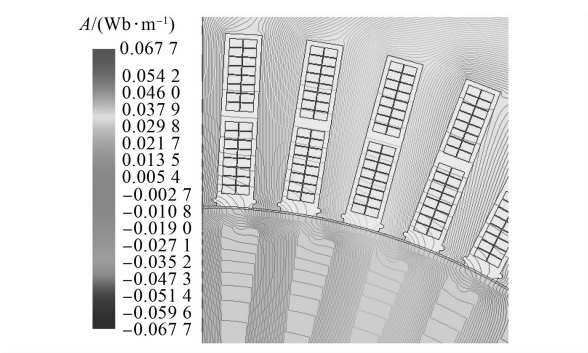


图3 定子槽内磁场分布图

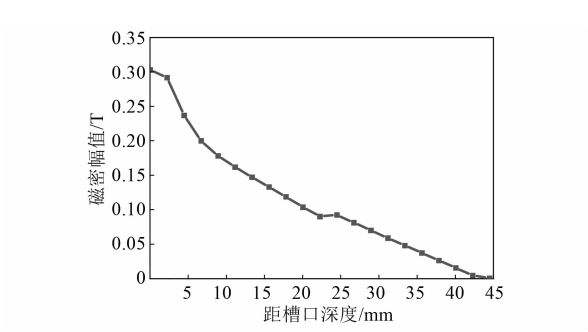


图4 槽内磁通密度与距槽口深度关系

磁通密度逐渐减小,至槽底位置,磁通密度减小为 0 T。选取槽中心上点 $P1 \sim P14$,显示各点垂直于定子槽中心线方向磁通密度随时间的变化曲线如图 5 所示。

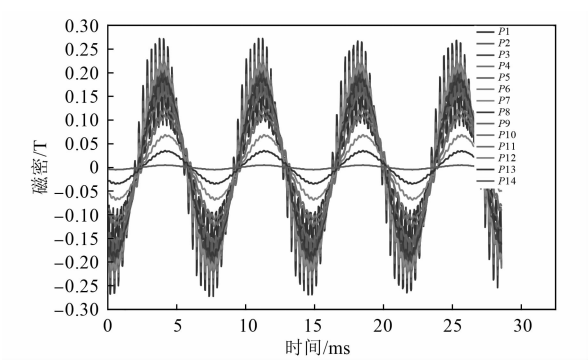


图5 槽内各点磁通密度波形

由图 5 可知, $P1 \sim P14$ 各点磁通密度基波为 140 Hz,且从槽口至槽底,各点磁通密度逐渐减小, $P1 \sim P6$ 的高次谐波含量明显高于 $P7 \sim P14$ 。选取其中 $P1$ 、 $P4$ 、 $P8$ 、 $P10$ 、 $P12$ 、 $P14$ 共 6 点磁通密度波形进行傅里叶分解可以得到槽内各点磁通密度各次谐波分量。

图 6 中,靠近槽口的 $P1$ 点频率为 3 187、3 222、3 467、3 502、6 549、6 829、9 876、10 517、13 239、13 519 Hz 的各次谐波幅值较大, $P4$ 点频率为 3 187、3 222、3 467、3 502、6 549、6 829 Hz 的各次谐波幅值较大,其余各点在以上频率的谐波幅值较小并随着离槽口深度增大而减小。根据式 (2) 和式 (6),将磁通密度各次谐波分类如表 3 所示。

3 222、3 467、3 502、6 549、6 829、9 876、10 517、13 239、13 519 Hz 的各次谐波幅值较大, $P4$ 点频率为 3 187、3 222、3 467、3 502、6 549、6 829 Hz 的各次谐波幅值较大,其余各点在以上频率的谐波幅值较小并随着离槽口深度增大而减小。根据式 (2) 和式 (6),将磁通密度各次谐波分类如表 3 所示。

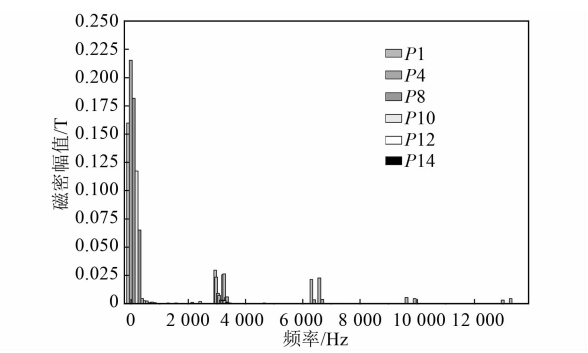


图6 槽内各点磁通密度谐波

表3 槽中心处磁通密度谐波分类

谐波频率/Hz	谐波次数	谐波类型
140	1	基波
700	5	相带谐波
980	7	
1 541	11	
1 821	13	
2 381	17	
2 661	19	转子一阶齿谐波
3 187	23	
3 222	23	
3 467	25	转子一阶齿谐波
3 502	25	相带谐波
4 903	35	
5 183	37	
6 549	47	
6 829	49	转子二阶齿谐波
9 876	71	转子三阶齿谐波
10 157	73	
13 239	95	转子四阶齿谐波
13 519	97	

由表 3 可知, $P1$ 点位置的高次谐波主要为转子一、二、三、四阶齿谐波,23 次、25 次定子绕组相带谐波, $P4$ 点位置的高次谐波主要为转子一、二

阶齿谐波, 23 次、25 次定子绕组相带谐波。P8、P10、P12、P14 各点高次谐波幅值很小, 主要为 140 Hz 的基波和部分低次定子绕组相带谐波。

3.2.2 定子导体涡流分布

仿真达到稳态后, 定子槽内导体区域整体电流密度分布如图 7 所示。

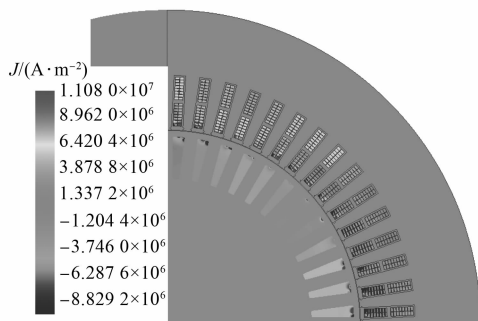


图 7 导体电流密度分布图

由图 7 可知, 由于每槽导体的分相存在差异, 各槽内导体电流密度分布不同, 导体内最大电流密度为 11 A/mm^2 。单个槽内导体电流密度分布如图 8 所示。

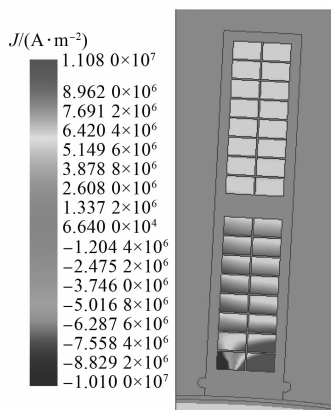


图 8 槽内导体电流密度分布图

由图 8 可知, 定子槽内导体电流密度分布不均最大的位置为靠近槽口部位, 主要为靠近槽口的 2 匝导体, 这种现象主要是由槽口附近的转子一、二、三、四阶齿谐波, 23 次、25 次定子绕组相带谐波较大引起的。导体之间存在循环电流, 并且由于趋肤效应, 电流主要流向导体外部(第 1 匝的中心电流密度为 5.3 A/mm^2 , 一侧涡流值为正, 而在另一侧为负。电流密度从 -10.1 A/mm^2 至 11.0 A/mm^2)。理论上输入电机的平均电流密度

为 5.7 A/mm^2 , 这意味着导体局部承载的等效电流密度几乎为额定电流密度的 1.93 倍, 如果在设计过程中未正确考虑, 则会导致局部温度热点, 并可能导致绝缘失效。

3.2.3 涡流附加损耗计算

计算槽内导体内涡流附加损耗, 得到导体涡流附加损耗与导体编号关系如图 9 所示。

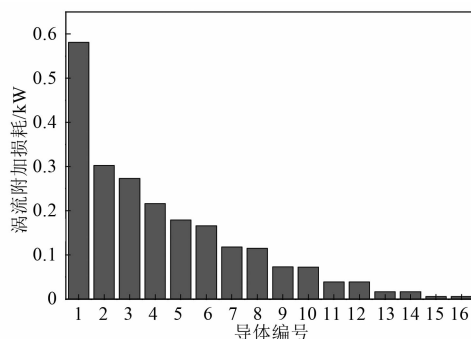


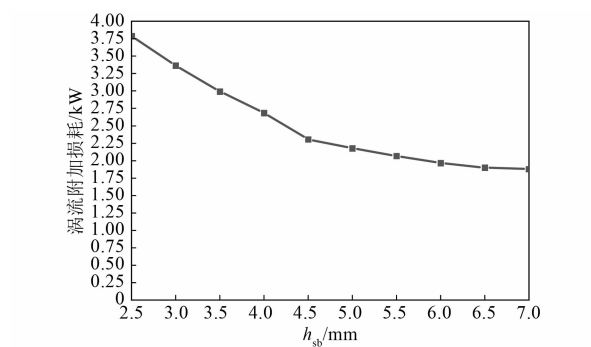
图 9 槽内导体涡流附加损耗

由图 9 可以看出, 槽内导体涡流附加损耗主要集中在 1#导体内, 随着距离槽口深度的增加, 导体的涡流附加损耗呈明显减小的趋势, 这是因为随着距离槽口深度的增加, 导体位置的高次谐波磁通密度下降, 导体涡流附加损耗急剧减小。

3.3 定子槽口深度对涡流附加损耗的影响

定子槽内编号为 1#的导体距离槽口的深度 h_{sb} 是感应牵引电机一个重要的设计参数, 对定子绕组导体内的涡流附加损耗影响较大。为进一步分析 h_{sb} 对涡流附加损耗的影响, h_{sb} 在 $2.5 \sim 7.0 \text{ mm}$ 之间每隔 0.5 mm 取一个值进行建模, 定子槽宽、槽深、导体绝缘及线圈整体绝缘结构保持不变, 共建立 10 个分析模型。分析各模型内导体的涡流附加损耗, 可得定子绕组涡流附加损耗随 h_{sb} 变化的关系如图 10 所示。

由图 10 可知, 随着 h_{sb} 的增加, 定子绕组涡流附加损耗呈减小的趋势。当 h_{sb} 超过 4.5 mm 后, 随着 h_{sb} 的增加, 定子绕组涡流附加损耗减小趋势变缓; 当 h_{sb} 超过 6.5 mm 后, 定子绕组涡流附加损耗减幅非常小。这与槽内磁通密度及高次谐波幅值与距槽口深度变化趋势相同。对于本电机, 在考虑铁心的有效利用率前提下, h_{sb} 为 6.5 mm 为最优取值。

图 10 涡流附加损耗与 h_{sb} 关系

4 结 语

本文分析定子绕组涡流附加损耗的来源、计算方法及影响因素。分析定子槽内磁场分布、槽内磁场的各次谐波、谐波幅值与距槽口深度的变化关系,定子绕组相带谐波、转子齿谐波对定子绕组涡流附加损耗的影响。进而探究了定子绕组涡流附加损耗随定子槽口深度的变化关系。计算结果表明定子槽口位置主要的高磁谐波为转子一齿谐波、转子二阶齿谐波、定子绕组 23 次相带谐波、定子绕组 25 次相带谐波,定子槽内导体涡流附加损耗主要集中在槽口附近的 2 匝导体,通过合理设计定子槽口深度可以有效减小定子绕组相带谐波和转子齿谐波在定子绕组中感应的涡流附加损耗。

【参考文献】

- [1] ISLAM M J, ARKKIO A. Effects of pulse-width-modulated supply voltage on eddy currents in the form-wound stator winding of a cage induction motor [J]. IET Electric Power Applications, 2009, 3(1): 50.
- [2] 邹继斌,江善林,梁维燕. 考虑邻近效应的高速永磁无刷电机交流损耗[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 49.
- [3] ISLAM M J, ARKKIO A. Time-stepping finite-element analysis of eddy currents in the form-wound stator winding of a cage induction motor supplied from a sinusoidal voltage source [J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(4): 256.
- [4] VOLPE G, POPESCU M, MARIGNETTI F, S, et al. AC winding losses in automotive traction e-machines: a new hybrid calculation method [C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2019.
- [5] 张炳义,刘云飞,冯桂宏,等. 高速永磁电机扁铜线绕组交流铜耗研究[J]. 机电工程, 2017(34): 9.
- [6] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [7] MELLOR P, WROBEL R, SIMPSON N. AC losses in high frequency electrical machine windings formed from large section conductors [C] // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014.
- [8] 夏雪,黄允凯,彭飞,等. 高速电机绕组交流铜耗的计算与测量[J]. 微电机, 2019, 52(12): 1.

【主要栏目】

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |
| · 实用技术成果 | | |