

永磁同步电机永磁体分块对涡流损耗的影响分析^{*}

刘朋鹏¹, 张琪¹, 何彪¹, 黄苏融¹, 陈世军^{1,2}

(1. 上海大学, 上海 200444; 2. 安庆师范大学, 安徽 安庆 246133)

摘要: 逆变器供电的永磁同步电机(PMSM)中电子器件的高频开关会产生高频的电流时间谐波, 进而引起永磁体涡流损耗的显著增加。给出了一种考虑电流时间谐波的永磁体涡流损耗计算的解析式, 详细分析了永磁体尺寸和透入深度与涡流损耗之间的关系, 并通过一个理想的3D模型进行验证。以1台逆变器供电的48槽8极PMSM为例进行涡流损耗仿真计算, 结果表明: 永磁体合理的分块数可以有效减少涡流损耗。

关键词: 电流时间谐波; 涡流损耗; 永磁体分块; 集肤效应; 解析法

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0056-06

Impact Analysis of Permanent Magnet Segments on Eddy Current Loss in Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

LIU Pengpeng¹, ZHANG Qi¹, HE Biao¹, HUANG Surong¹, CHEN Shijun^{1,2}

(1. Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

Abstract: In the inverter-powered permanent magnet synchronous motor (PMSM), high frequency current time harmonics was produced by the high frequency switch tube, and the eddy current loss of permanent magnet (PM) was increased. Considering the current time harmonics in PM, an analytic equation about the eddy current loss was proposed. The relationship between the dimension of PM, penetration depth and eddy current loss was deduced in details. Then the conclusion was drawn. The eddy current loss of PM was greatest when the axial or circumferential dimension of PM was twice the penetration depth, and the accuracy of the conclusion was verified by an ideal 3D model. In addition, the eddy current loss simulation of a 48-slot 8-pole water-cooled PMSM powered by an inverter was taken as an example. The results showed that a reasonable number of segments in PM could effectively reduce the eddy current loss.

Key words: time harmonic; eddy current loss; segments of magnet; skin effect; analytic method

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)由于具有高效率、高功率密度等优点, 在众多领域得到了广泛的应用^[1]。PMSM的优化设计技术也引起人们的高度关注。与正弦波供电电机相比, 逆变器供电的PMSM含

有大量的高频电流时间谐波分量, 导致永磁体集肤效应显著, 涡流损耗增加, 进而引起永磁体的温度升高, 甚至造成不可逆的退磁。因此在永磁同步电机设计中, 尽可能地降低永磁体涡流损耗极为重要, 直接影响到电机运行的安全性^[2-3]。

永磁体拼块技术是抑制永磁体涡流损耗的有效措施, 但是如何精确计算永磁体的涡流损耗, 合

^{*} 基金项目: 上海市产学研合作年度计划项目(沪CXY-2015-014)

作者简介: 刘朋鹏(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机设计方法。

张琪(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为高品质永磁电机和新结构电机的基本理论设计方法和仿真技术。

黄苏融(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为汽车电机及控制系统、新结构电机及其控制系统、电机设计与控制技术。

理选择拼块尺寸是值得研究的问题^[4-7]。以往的永磁体涡流损耗计算方法忽略了集肤效应,或者将透入深度看成一个定值并假设其涡流均匀分布,与实际的永磁体涡流分布情况存在很大的偏差。针对永磁体涡流损耗问题,国内外学者进行了大量研究。李洪凤等^[8]提出了一种计算永磁球形电动机永磁体涡流损耗的三维解析模型,分析了不同永磁体厚度与气隙等结构参数对永磁体涡流损耗的影响规律。陈萍等^[9]针对表贴式永磁电机的涡流损耗分布情况进行了研究,指出了永磁体涡流损耗的分布受永磁体形状的影响,最大涡流损耗的位置在永磁体轴向或周向较长的边线上,时间谐波是变频器供电 PMSM 永磁体涡流损耗产生的主要来源。Dominic A. Wills 等^[10]提出了在永磁体涡流密度较大的边缘进行部分分块的方法,减小了涡流密度且避免了永磁体分块和块间黏合,降低永磁体涡流损耗和生产成本。Jiabin Wang 等^[11]分析了永磁体周向分块对涡流损耗的影响,并指出周向不同位置的永磁体涡流损耗差异很大。

本文提出一种考虑电流时间谐波和集肤效应的永磁体涡流损耗的计算方法。分析了永磁体的轴向、周向分块数以及频率变化对永磁体涡流损耗的影响规律,并用一个理想的模型进行仿真验证。本文以 1 台 48 槽/8 极逆变器供电的 PMSM 为例,采用 MATLAB/Simulink 平台上的空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 供电电流仿真波形,运用 Maxwell 软件进行永磁体涡流损耗的仿真计算,以验证本文导出的永磁体涡流损耗计算方法的正确性,为优化设计和降低永磁体涡流损耗提供重要参考。

1 永磁体涡流损耗的基本理论

1.1 永磁体涡流损耗求解方程

以图 1 所示的永磁体结构为例进行涡流损耗分析。作如下假设:(1)永磁体的周向、轴向长度分别为 a 、 b ,径向厚度为 h ,且 $h \gg a, h \gg b$;(2)永磁体内的磁场为 z 方向且随时间正弦变化,磁场强度 H_z 是 x 和 y 的函数,即 $H_z = H_z(x, y)$;(3)永磁体的电导率各向同性。

永磁体二维涡流方程为

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} = \mu \sigma \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (1)$$

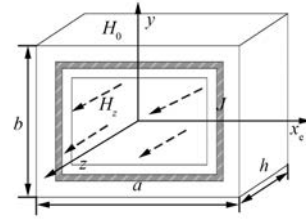


图 1 永磁体模型

式中: σ 、 μ ——永磁体的电导率和磁导率。

边界条件为

$$\begin{cases} H_z = H_0 & |_{x = \pm \frac{a}{2}} \\ H_z = H_0 & |_{y = \pm \frac{b}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

由边界条件和 H_z 的二维涡流方程,可得磁场强度 H_z 为

$$H_z = \frac{4}{\pi} H_0 \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{\sin\left(k \frac{\pi}{2}\right)}{k} \times \left[\frac{\operatorname{ch}\left(q_k x\right)}{\operatorname{ch}\left(q_k \frac{a}{2}\right)} \cos\left(k \frac{\pi}{b} y\right) + \frac{\operatorname{ch}\left(\gamma_k y\right)}{\operatorname{ch}\left(\gamma_k \frac{b}{2}\right)} \cos\left(k \frac{\pi}{a} x\right) \right] \quad (3)$$

式中:

$$q_k = \sqrt{j\omega\mu\sigma + k^2 \frac{\pi^2}{b^2}} \quad (4)$$

$$\gamma_k = \sqrt{j\omega\mu\sigma + k^2 \frac{\pi^2}{a^2}} \quad (5)$$

其中, $\omega = 2\pi f$, f 为激励频率。

永磁体涡流损耗为磁场产生复功率的实部,即

$$P_e = \operatorname{Re} \oint \Pi \cdot ds = -\frac{4}{\pi^2} \omega \mu H_0^2 a b h \times \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} \operatorname{Im} \left[\frac{\operatorname{th}\left(q_k \frac{a}{2}\right)}{q_k \frac{a}{2}} + \frac{\operatorname{th}\left(\gamma_k \frac{b}{2}\right)}{\gamma_k \frac{b}{2}} \right] \quad (6)$$

式中: $\oint \Pi \cdot ds$ ——永磁体涡流的复功率;

Π ——能流向量。

为了求式(6)的永磁体涡流损耗,首先将式(4)、式(5)改写为

$$\begin{cases} q_k = q_{kx} + j q_{ky} \\ \gamma_k = \gamma_{kx} + j \gamma_{ky} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中的 q_{kx} 、 q_{ky} 、 γ_{kx} 、 γ_{ky} 分别表示为

$$q_{kx} = \sqrt{\frac{\sqrt{\left(k^2 \frac{\pi^2}{b^2}\right)^2 + \left(\frac{2}{\delta^2}\right)^2} + k^2 \frac{\pi^2}{b^2}}{2}} \quad (8)$$

$$q_{ky} = \sqrt{\frac{\sqrt{\left(k^2 \frac{\pi^2}{b^2}\right)^2 + \left(\frac{2}{\delta^2}\right)^2} - k^2 \frac{\pi^2}{b^2}}{2}}$$

$$\gamma_{kx} = \sqrt{\frac{\sqrt{\left(k^2 \frac{\pi^2}{a^2}\right)^2 + \left(\frac{2}{\delta^2}\right)^2} + k^2 \frac{\pi^2}{a^2}}{2}} \quad (9)$$

$$\gamma_{ky} = \sqrt{\frac{\sqrt{\left(k^2 \frac{\pi^2}{a^2}\right)^2 + \left(\frac{2}{\delta^2}\right)^2} - k^2 \frac{\pi^2}{a^2}}{2}}$$

式中: δ ——永磁体透入深度, $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}$ 。

将式(6)双曲正切函数按指数展开,得永磁体的涡流损耗为

$$P_e = P_{ex} + P_{ey} \quad (10)$$

式中: P_{ex} 、 P_{ey} —— x 、 y 方向磁场产生的涡流损耗。

$$P_{ex} = -\frac{4\omega\mu H_0^2 abh}{\pi^2} \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} \frac{2q_{kx} \frac{a}{2} \sin\left(2q_{ky} \frac{a}{2}\right) - q_{ky} \frac{a}{2} (e^{2q_{kx} \frac{a}{2}} - e^{-2q_{kx} \frac{a}{2}})}{\left(\frac{q_{kx}^2 a^2}{4} + \frac{q_{ky}^2 a^2}{4}\right) \left[e^{2q_{kx} \frac{a}{2}} + e^{-2q_{kx} \frac{a}{2}} + 2\cos\left(2q_{ky} \frac{a}{2}\right)\right]} \quad (11)$$

$$P_{ey} = -\frac{4\omega\mu H_0^2 abh}{\pi^2} \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} \frac{2\gamma_{kx} \frac{a}{2} \sin\left(2\gamma_{ky} \frac{a}{2}\right) - \gamma_{ky} \frac{a}{2} (e^{2\gamma_{kx} \frac{a}{2}} - e^{-2\gamma_{kx} \frac{a}{2}})}{\left(\frac{\gamma_{kx}^2 a^2}{4} + \frac{\gamma_{ky}^2 a^2}{4}\right) \left[e^{2\gamma_{kx} \frac{a}{2}} + e^{-2\gamma_{kx} \frac{a}{2}} + 2\cos\left(2\gamma_{ky} \frac{a}{2}\right)\right]} \quad (12)$$

从式(10)~式(12)可知,除了材料的固有属性外,永磁体涡流损耗的大小主要与永磁体的尺寸、激励的频率和幅值有关,并与边界磁场强度 H_0 的平方成正比。

为了分析分块数对永磁体涡流损耗的影响,对式(10)~式(12)进行简化。

当 $a, b \gg 2\delta$, 且 $b \gg a$ 时, $q_{kx} \frac{a}{2}$ 、 $q_{ky} \frac{a}{2}$ 可近似表

示为

$$q_{kx} \frac{a}{2} \approx q_{ky} \frac{a}{2} \rightarrow \frac{a}{2\delta} \rightarrow +\infty \quad (13)$$

由式(11)得 x 方向磁场产生的涡流损耗为

$$P_{ex} = \frac{4\omega\mu H_0^2 h \delta}{\pi^2} b \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} \quad (14)$$

同理,当 $a, b \gg 2\delta$, 且 $a \gg b$ 时,由式(12)得 y 方向磁场产生的涡流损耗为

$$P_{ey} = \frac{4\omega\mu H_0^2 h \delta}{\pi^2} a \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} \quad (15)$$

故永磁体 x 、 y 方向涡流损耗可近似表示为

$$P_e = \frac{4\omega\mu H_0^2 h \delta}{\pi^2} (b+a) \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} \quad (16)$$

若永磁体周向和轴向分别分 m 、 n 块,则:

$$P_e = \frac{4\omega\mu H_0^2 h \delta}{\pi^2} mn \left(\frac{b}{n} + \frac{a}{m}\right) \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} = \frac{4\omega\mu H_0^2 h \delta}{\pi^2} (mb+na) \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} \quad (17)$$

从式(17)可知,当 $a, b \gg 2\delta$ 时,永磁体涡流损耗随分块数的增加而增加。

当 $a, b \ll 2\delta$, 且 $b \gg a$ 时, $q_{kx} \frac{a}{2}$ 、 $q_{ky} \frac{a}{2}$ 可近似

表示为

$$q_{kx} \frac{a}{2} \rightarrow \frac{k\pi a}{2b}, q_{ky} \frac{a}{2} \rightarrow \frac{ab}{2k\pi\delta^2} \rightarrow +0 \quad (18)$$

则由式(11)得 x 方向磁场产生的涡流损耗为

$$P_{ex} = \frac{2\omega\mu H_0^2 abh}{3\pi^2 \delta^2} \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} a^2 \quad (19)$$

同理,当 $a, b \gg 2\delta$, 且 $a \gg b$ 时,由式(12)得 y 方向磁场产生的涡流损耗为

$$P_{ey} = \frac{2\omega\mu H_0^2 abh}{3\pi^2 \delta^2} \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} b^2 \quad (20)$$

故简化后永磁体总的涡流损耗为

$$P_e = \frac{2\omega\mu H_0^2 abh}{3\pi^2 \delta^2} (a^2 + b^2) \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} \quad (21)$$

如永磁体周向分 m 段、轴向分 n 段,则:

$$P_e = \frac{2\omega\mu H_0^2 \frac{a}{m} \frac{b}{n} h}{3\pi^2 \delta^2} mn \left(\frac{a^2}{m^2} + \frac{b^2}{n^2}\right) \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} = \frac{2\omega\mu H_0^2 abh}{3\pi^2 \delta^2} \left(\frac{a^2}{m^2} + \frac{b^2}{n^2}\right) \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} \quad (22)$$

从式(22)可知,当 $a, b \ll 2\delta$ 时,永磁体涡流损耗随分块数的增加而较小;因此当 a, b 与 2δ 接近时,永磁体涡流损耗达到最大值。

1.2 理想模型的永磁体涡流损耗仿真分析

为了直观分析分块数、激励频率对永磁体涡流损耗的影响,本文建立了一个如图2所示的理想仿真模型,永磁体尺寸 a, b, h 分别为20、160、5 mm,绕组中分别通入5、10、12、15 kHz的正弦波电流,涡流损耗随轴向分块数的变化趋势如图3所示。

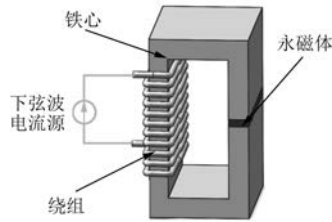


图2 涡流损耗仿真模型

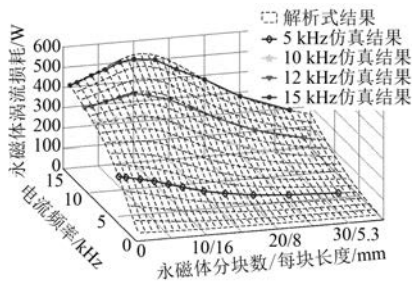


图3 涡流损耗随轴向分块数的变化趋势

由图3可见,有限元仿真数据(折线图)与解析式计算结果曲面图基本吻合。当频率为10、12、15 kHz时,随着永磁体分块数的增多,永磁体涡流损耗先增大后减小,存在极值点,且随着激励频率的增加,永磁体涡流损耗增加且极值点右移。当频率为5 kHz时,只存在 $a, b \ll 2\delta$ 的情况,随着永磁体分块数的增多,永磁体涡流损耗逐渐减小,与解析式得到的结论一致。

表1为不同激励频率下2倍透入深度的计算结果和涡流损耗最大时单块永磁体轴向长度的比较。由表1可知,当单块永磁体轴向长度接近透入深度的2倍时,永磁体涡流损耗达到最大值。

图4给出了永磁体不同频率时的电流密度云图。由图4可知,随着电流频率的增加,电流密度逐渐增大,且集中于永磁体表面。

表1 涡流损耗最大时单块永磁体轴向长度与 2δ 的比较

频率/kHz	10	12	15
2倍透入深度/mm	14.2	12.8	11.6
涡流损耗最大时单块永磁体轴向长度/mm	17.7	16	13.3

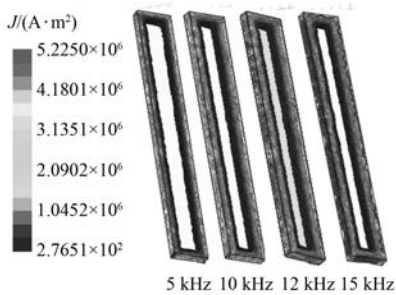


图4 不同频率时永磁体涡流密度仿真图

综上所述,在进行永磁体分块时,应先根据已知的激励频率,确定永磁体的分块数,使分块后的尺寸远离其2倍透入深度,以降低永磁体上的涡流损耗。

2 PMSM 永磁体涡流损耗仿真计算实例

2.1 电机仿真模型建立与谐波电流分析

为了更加准确地分析永磁体涡流损耗与分块数的关系,本文以1台PMSM为例,建立有限元仿真模型。PMSM主要参数如表2所示。电机1/8仿真模型如图5所示。

表2 永磁同步电机主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
轴向长度/mm	160	定子槽数	48
永磁体牌号	N35UH	极数	8
铁心材料	DW310-35	铁心外径/mm	230
额定转速/(r·min ⁻¹)	4 000	气隙长度/mm	0.6

在 MATLAB/Simulink 软件中搭建了 PMSM 性能仿真平台,采用开关频率为 10 kHz 的 SVPWM 控制方式,电流仿真波形及其傅里叶谐波分解结果如图6所示^[12]。

由图6可知,电流中含有大量谐波成分,其中2倍开关频率附近的谐波(19.7 kHz和20.3 kHz)分量最大,是产生涡流损耗的重要原因。

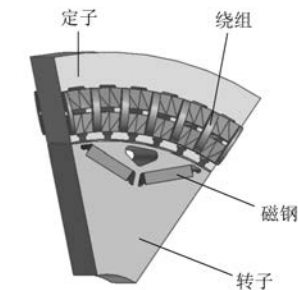
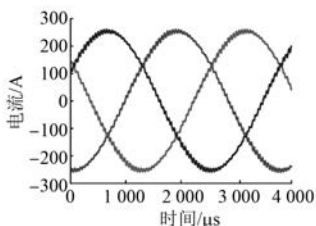
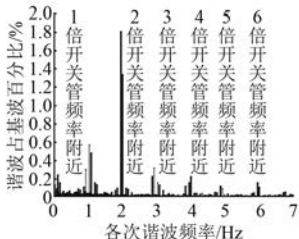


图5 电机 1/8 仿真模型



(a) SVPWM控制方式下的电流波形

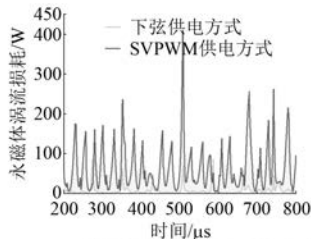


(b) SVPWM电流谐波成分

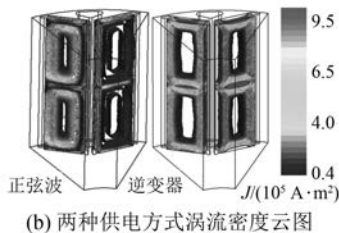
图6 SVPWM 控制方式下的电流波形及谐波分析

2.2 永磁体涡流损耗仿真计算与分析

为了与正弦波供电时的损耗作对比,图 7 给出了永磁体分两段时两种供电方式下的涡流损耗



(a) 两种供电方式涡流损耗变化曲线



(b) 两种供电方式涡流密度云图

图7 两种供电方式下涡流损耗比较

仿真结果。逆变器供电和正弦波供电的永磁体涡流损耗分别为 66.9 W 和 9.2 W,电流时间谐波使涡流损耗增加了 6.3 倍;逆变器供电的涡流密度明显大于正弦波供电。因此,电流时间谐波产生的永磁体涡流损耗是不容忽视的。

图 8 给出了激励频率 10 kHz 时永磁体不同分块数时涡流路径图(1/2 模型)。当永磁体分块数分别为 4、8 时,每段永磁体的轴向长度 b 远大于 2δ ,涡流路径变长,涡流趋于表面,集肤效应严重,使涡流损耗增加。当永磁体分块数为 20 时,每段永磁体的轴向长度 b 小于 2δ ,涡流分布趋于均匀,涡流密度减小,导致涡流损耗降低。

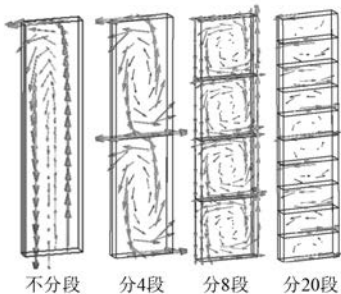


图8 不同永磁体分块涡流仿真结果

图 9 所示为永磁体不同分块时两种供电方式下的涡流损耗仿真结果。逆变器供电方式下随分块数的增加涡流损耗先增大后减小,在分块数 8 块(每块长度 20 mm)时损耗最大。正弦供电方式下,由于频率较低,透入深度较大,永磁体尺寸远小于 2δ ,故涡流损耗随分块数增加逐渐减小。

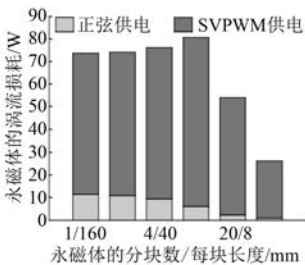


图9 不同供电方式下涡流损耗随分块数的变化趋势

3 结 语

逆变器供电的 PMSM 中存在大量高频电流谐波,导致永磁体涡流损耗大幅增加。本文给出了一种考虑电流时间谐波的永磁体涡流损耗计算的解析式,详细推导了永磁体尺寸和透入深度与

涡流损耗之间的关系,得出当永磁体轴向或周向尺寸为 2 倍透入深度时永磁体涡流损耗最大的结论,并通过仿真验证了解析式的正确性。

建立了 48 槽 8 极的 PMSM 3D 模型,对不同分块数永磁体涡流损耗进行仿真分析。仿真结果表明,在永磁体轴向或周向长度确定的情况下,正弦波供电时涡流损耗随着分块数的增加而逐渐减小;逆变器供电时涡流损耗与分块数并非正相关,当每块永磁体尺寸大于 2 倍透入深度时,涡流损耗随分块数的增加逐渐增大;当每块永磁体尺寸小于 2 倍透入深度时,涡流损耗随分块数的增加逐渐减小。因此在实际电机设计中,应根据供电方式合理选择永磁体的轴向和周向拼块数,使每块永磁体的尺寸远离 2 倍透入深度,以抑制永磁体涡流损耗。

【参考文献】

- [1] 朱卫光,张承宁,董玉刚.大功率永磁同步电机转子永磁体损耗研究[J].电机与控制学报,2014,18(1): 33-37.
- [2] 宋进金,赵静,李晓贝.高速永磁电机的永磁体和护套涡流损耗分析[J].智能电网,2015(4): 313-317.
- [3] YAMAZAKI K, ABE A. Loss investigation of interior permanent-magnet motors considering carrier harmonics and magnet eddy currents [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45 (2): 659-665.
- [4] 陈丽香,王雪斌,李敏.永磁体涡流损耗的分析[J].微电机,2015,48(6): 13-16.
- [5] 李洪凤,韩冰,崔忠宝.永磁电机永磁体涡流损耗的研究进展[J].微特电机,2017,45(4): 87-92.
- [6] BETTAYEB A, JANNOT X, VANNIER J C. Analytical calculation of rotor magnet eddy-current losses for high speed IPMSM [C] // XIX International Conference on Electrical Machines IEEE, 2010: 1-6.
- [7] BALAMURALI A, LAI C, MOLLAEIAN A, et al. Analytical investigation into magnet eddy current losses in interior permanent magnet motor using modified winding function theory accounting for pulsewidth modulation harmonics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 27 (3): 39-41.
- [8] 李洪凤,沈彦波.永磁球形电动机永磁体涡流损耗分析[J].电工技术学报,2015,30(12): 267-275.
- [9] 陈萍,唐任远,佟文明,等.高功率密度永磁同步电机永磁体涡流损耗分布规律及其影响[J].电工技术学报,2015,30(6): 1-9.
- [10] WILLS D A, KAMPER M J. Reducing PM eddy current rotor losses by partial magnet and rotor yoke segmentation [C] // XIX International Conference on Electrical Machines IEEE, 2010: 1-6.
- [11] WANG J, ATALLAH K, CHIN R, et al. Rotor eddy-current loss in permanent-magnet brushless AC machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46 (7): 2701-2707.
- [12] 何彪.逆变器供电变频永磁同步电机损耗和温度场的理论与计算 [D]. 上海: 上海大学, 2016.

收稿日期: 2017 - 11 - 15

(上接第 50 页)

- [4] CHANG C C, KUO S C, HUANG C K, et al. The investigation of motor cooling performance [J]. Proceedings of World Academy of Science Engineering & Technology, 2009 (40): 230-236.
- [5] 温嘉斌,唐跃,何金泽,等.高压异步电机外风扇流场数值计算及优化[J].电机与控制学报,2013,17(9): 79-85.
- [6] 江荧.自扇冷式电机冷却系统的数值模拟分析及风扇设计[J].机械设计与研究,2014,30(1): 115-119.
- [7] WOODARD J K, JOHNSON G E. Optimal design of cooling fans for industrial electric motors [J]. Journal of Mechanical Design, 1986, 108 (2): 224-225.
- [8] 沈阳机电学院电机系.三相异步电动机原理、设计与试验[M].北京:科学出版社,1977.
- [9] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [10] 刘夫乾,李志强,黄坚.一种超高效率电机新型风扇结构的考虑[J].电机与控制应用,2010,37(12): 18-20.

收稿日期: 2017 - 11 - 20