

基于转子形状优化设计的三次谐波注入式五相 IPMSM 气隙磁场优化*

李 渊, 王旭平, 白崧儒, 景少勇

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 五相永磁同步电机(PMSM)可通过注入三次谐波电流来提高电机的转矩密度。除三次谐波外,削弱永磁体产生的其他次空间谐波可以降低电机的转矩脉动、减小电机的振动和噪声。因此,针对三次谐波注入式五相内嵌式永磁同步电机(IPMSM),提出一种转子铁心形状优化设计方法。理论推导转子铁心形状的解析表达式,根据电机参数进行有限元建模,得到优化后的电机模型气隙磁密谐波含量及转矩脉动。与优化前的电机模型进行仿真对比,得到的结果与理论分析吻合,气隙磁场优化效果显著。

关键词: 五相内嵌式永磁同步电机; 三次谐波注入; 转子形状; 磁场优化

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)06-0057-06

doi: 10.12177/emca.2021.027

Optimization of Air-Gap Magnetic Field of Five-Phase IPMSM with Third Harmonic Injection Based on Rotor Shape Optimization Design*

LI Yuan, WANG Xuping, BAI Yinru, JING Shaoyong

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The torque density of five-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM) can be increased by injecting the third harmonic current. Besides the third harmonic, weakening the other spatial harmonics generated by the permanent magnet can reduce the torque ripple, vibration and noise of the motor. Therefore, an optimization design method of rotor shape is proposed for the third harmonic injection five-phase interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM). The analytical expression of the rotor core shape is deduced theoretically, and the finite element model is built according to the motor parameters. The air-gap flux density harmonic content and torque ripple of the optimized motor model are obtained. The motor models before and after optimization are compared in simulation, and the simulation results are consistent with the theoretical analysis, proving the significant optimization effect of air-gap magnetic field.

Key words: five-phase interior permanent magnetic synchronous motor (IPMSM); third harmonic injection; rotor shape; magnetic field optimization

0 引 言

五相永磁同步电机(PMSM)具有体积小、转

矩密度大、控制策略丰富等优点,是多相电机的典型代表之一^[1-3]。五相 PMSM 定子绕组中注入的特定比例三次谐波电流所产生的磁场与永磁体的

收稿日期: 2021-01-21; 收到修改稿日期: 2021-04-12

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51477110); 中国博士后科学基金项目(2018M640250)

作者简介: 李 渊(1995—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机理论与控制技术。

王旭平(1976—),女,副教授,硕士生导师,研究方向为特种电机理论与控制技术。

白崧儒(1983—),男,副教授,硕士生导师,研究方向为特种电机理论与控制技术。

三次谐波磁场作用可以增加电机的输出转矩,进而提升电机的转矩密度,因而受到国内外大量学者的关注^[4]。除了基波和三次谐波外,永磁体还会产生其他级数的高次谐波,这些高次谐波会使电机产生转矩脉动,增大电机的振动和噪声,同时还会增加谐波损耗。因此,有必要削弱永磁体产生的除基波和三次谐波以外其他级数的空间谐波。

转子磁极优化技术是 PMSM 气隙磁场优化的主要途径。文献[5-6]分别通过优化永磁体的外弧和内弧,分析了偏心距对气隙磁密中谐波含量的影响,有限元分析表明,优化偏心距可以提高气隙磁密的正弦度。文献[7]采用不同厚度相同材料的永磁体,通过极弧宽度和永磁体材料的不同组合削弱气隙磁密中的谐波。以上研究均是针对三相 PMSM 气隙磁场的优化。文献[8-9]通过改变永磁体的形状对表贴式五相 PMSM 的磁场优化进行了研究,但未涉及内嵌式结构。由于永磁体材料脆且硬,可加工性较差^[10],与采用永磁体形状优化相比,内嵌式永磁同步电机(IPMSM)更宜通过转子形状优化来实现气隙磁场的优化。综上所述,基于转子形状优化设计的三次谐波注入式五相 IPMSM 的气隙磁场优化,未见相关研究。

本文针对三次谐波注入式五相 IPMSM 的气隙磁场优化,提出一种转子形状的优化设计方法。首先不考虑由于定子开槽引起的气隙磁密畸变,根据拉普拉斯方程推导出一个极距下,使气隙磁密中仅含有基波和三次谐波的转子形状的解析表达式。然后通过电机参数进行有限元仿真建模。最后得到优化后电机模型的气隙磁密谐波含量以及转矩脉动。与优化前的电机模型仿真对比,得到的仿真结果与理论分析吻合,气隙磁场优化效果显著。

1 转子铁心形状优化

求解转子铁心形状的坐标系如图1所示。为简化计算,做如下假设:(1)电枢表面光滑,不考虑电枢表面曲率,电枢表面近似作为平面,故可采用直角坐标系求解;(2)不考虑由定子开槽引起的气隙磁密的畸变;(3)忽略电机的端部影响。

IPMSM 的气隙区域属于无旋场,在分析和计算气隙磁密 B 和电流密度 J 之间的关系时采用标

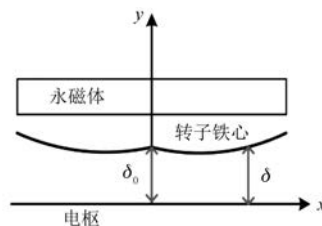


图1 求解坐标系

量位函数 φ_m 。直角坐标系下气隙磁位 φ_m 的拉普拉斯方程为

$$\frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

利用分离变量法求解式(1),并且 φ_m 是 x 的周期函数,由此得到上式的通解:

$$\begin{aligned} \varphi_m = & \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos k_n x + B_n \sin k_n x) \times \\ & (C_n \cosh k_n y + D_n \sinh k_n y) + \\ & (A_0 x + B_0)(C_0 y + D_0) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A_n, B_n, C_n, D_n, k_n 为任意常数,其值由定解条件确定; A_0, B_0, C_0, D_0 为 $k_n = 0$ 时通解的各项系数。

边界条件为,(1)电枢、转子铁心表面均为等磁位面,设电枢表面的磁位为零,转子铁心表面的磁位设为 $\varphi_{m\delta}$;(2)电枢表面气隙磁密径向分量为

$$B_y = -\mu_0 \frac{\partial \varphi_m}{\partial y} \quad (3)$$

为了得到基波和三次谐波磁场,电枢表面气隙磁密的表达式需满足:

$$B_y = -B_{m1} \cos \frac{\pi}{\tau} x + B_{m3} \cos \frac{3\pi}{\tau} x \quad (4)$$

式中: B_y 为电枢表面气隙磁密的径向分量; B_{m1} 、 B_{m3} 分别为电枢表面气隙磁密基波和三次谐波幅值的设计值; τ 为电机的极距。

通过上述边界条件求得式(2)中的各项系数并代回通解,得到转子铁心表面任一位置磁位的表达式:

$$\begin{aligned} \varphi_{m\delta} = & \frac{B_{m1} \tau}{\mu_0 \pi} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x \right) \sinh \left(\frac{\pi}{\tau} \delta \right) - \\ & \frac{B_{m3} \tau}{3\mu_0 \pi} \cos \left(\frac{3\pi}{\tau} x \right) \sinh \left(\frac{3\pi}{\tau} \delta \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: δ 为转子表面任一位置的气隙长度; μ_0 为真空的磁导率。

将 $x=0, \delta=\delta_0$ 代入式(5)可得:

$$\varphi_m \delta_0 = \frac{B_{m1} \tau}{\mu_0 \pi} \sinh\left(\frac{\pi}{\tau} \delta_0\right) - \frac{B_{m3} \tau}{3\mu_0 \pi} \sinh\left(\frac{3\pi}{\tau} \delta_0\right) \quad (6)$$

令式(5)与式(6)右边相等,由于气隙长度较小,结合双曲函数的近似可以得到转子铁心表面任一位置气隙长度的表达式:

$$\delta = \frac{(B_{m1} - B_{m3}) \delta_0}{B_{m1} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) - B_{m3} \cos\left(\frac{3\pi}{\tau} x\right)} \quad (7)$$

不考虑定子开槽带来的齿谐波,按照式(7)对转子铁心形状进行设计,可削弱气隙磁密中除基波和三次谐波外的其他次谐波。

将永磁体等效成磁动势源,空载时电机的等效磁路如图2所示。

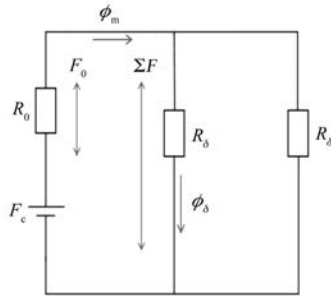


图2 等效磁路

图2中 R_0, R_δ, R_σ 分别为永磁体的磁阻、主磁路的磁阻和漏磁路的磁阻; Φ_m 和 Φ_δ 分别为永磁体提供的每极总磁通和外磁路的主磁通; $F_c, F_0, \Sigma F$ 分别为永磁体的计算磁动势、永磁体的磁位差、外磁路总磁位差。其中, ΣF 包括定子齿磁位差 F_{i1} 、定子轭磁位差 F_{j1} 、转子铁心磁位差 F_2 以及气隙磁位差 F_δ 。 F_{i1}, F_{j1}, F_2 由电机设计求得, 定子采用梨形槽。由图2可得:

$$F_c = F_0 + \Sigma F + F_\delta \quad (8)$$

$$F_c = H_c h_m \quad (9)$$

$$F_0 = \frac{h_m}{\mu_0 \mu_r b_m l} \sigma \left(\frac{2\tau}{\pi} B_{m1} + \frac{2\tau}{3\pi} B_{m3} \right) l \quad (10)$$

式中: H_c 为永磁体的矫顽力; h_m 为永磁体磁化方向长度; b_m 为永磁体宽度; μ_r 为永磁体的相对磁导率; l 为定转子铁心的轴向长度; σ 为空载漏磁系数。

将式(7)代入式(5)即可求得气隙磁位差 F_δ :

$$F_\delta = \frac{(B_{m1} - B_{m3}) \delta_0}{\mu_0} \quad (11)$$

由式(8)~式(11)可求得 δ_0 的表达式:

$$\delta_0 = \frac{\mu_0 H_c h_m - \sigma \left(\frac{2\tau}{\pi} B_{m1} + \frac{2\tau}{3\pi} B_{m3} \right) \frac{h_m}{b_m \mu_r} - \mu_0 (F_{i1} + F_{j1} + F_2)}{(B_{m1} - B_{m3})} \quad (12)$$

现代交流电机定子铁心通常有开口槽或半开口槽,使定子齿部的气隙小,单位面积下的磁导较大。定子槽的位置气隙大,单位面积下的磁导较小,这就造成了气隙磁密的畸变。上述转子形状的设计无法考虑定子开槽的影响,但开槽引起的等效气隙长度增加可由卡特系数 k_c 来修正。文献[11]给出了卡特系数的计算公式:

$$k_c = \frac{1}{1 - \frac{b_0^2}{\varepsilon(4.4 \times \delta + 0.75b_0)}} \quad (13)$$

式中: b_0 为定子槽口宽; ε 为槽阻。

转子形状优化使气隙不均匀,即式(13)中气隙长度 δ 不是定值,需要用等效平均气隙长度来代替式(13)中的 δ 。由式(7)可知,一个极距下,当 $x = \pm \frac{\tau}{2}$ 时,分母为零,等式右边无穷大,不符合实际情况,且考虑到加工工艺以及漏磁影响,故用式(7)确定转子形状时,实际到永磁体末端为止,如图3的A点所示。因此用式(13)计算卡特系数时,需要先用式(12)计算出 δ_0 ,代入式(7)得到转子形状的表达式,进而可求得等效平均气隙长度,然后通过卡特系数修正,使得 $\delta_0 = k_c \delta'_0$,最后用 δ'_0 代替式(7)中的 δ_0 ,即可求得考虑卡特系数时转子形状的表达式。

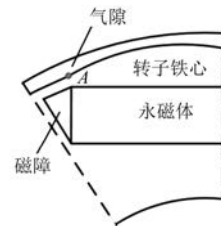


图3 永磁体末端处理

以上转子形状优化设计流程如图4所示。

若仿真结果的 σ' 大于式(12)中初步确定的

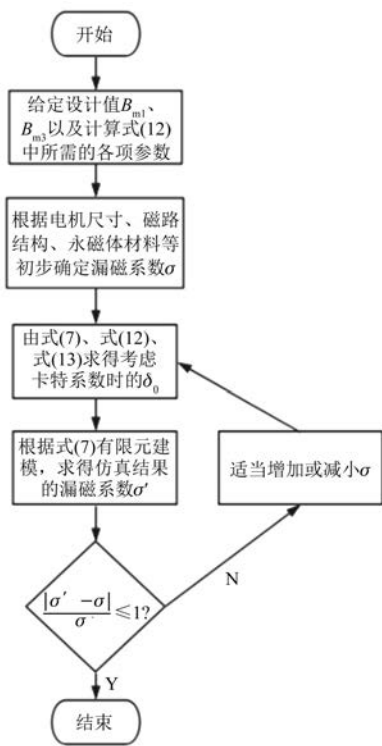


图4 转子形状优化设计流程

σ ,此时增大 σ ;若仿真结果的 σ' 小于式(12)中初步确定的 σ ,此时减小 σ ,并代入式(12)重新求取 δ_0 的值。然后根据式(7)有限元建模仿真,直到漏磁系数满足精度要求。因为根据电机尺寸、磁路结构、永磁体材料等初步确定的漏磁系数与实际的漏磁系数相差不远,所以上述的仿真过程进行次数少。

2 有限元分析

2.1 空载仿真

本文所选电机模型的主要参数如表1所示。

表1 有限元模型的主要参数

参数名称	参数值
B_{m1}/T	0.904
B_{m3}/T	0.217
定子外径/mm	155.0
定子内径/mm	98.0
定子轭高/mm	14.1
定子齿宽/mm	3.6
$h_m、b_m/mm$	4.0,30.6
δ_0	1.1
σ	1.235
转子内径/mm	19.0

根据图1的坐标系,表2给出一个极距下电枢表面不同位置的气隙长度以及相对应的转子铁心半径。由于转子铁心的形状关于 y 轴对称,故只给出 $x>0$ 时的数据。

表2 转子铁心数据

x	δ/mm	转子铁心半径/mm
0	1.1	47.90
$\tau/9$	1.02	47.98
$2\tau/9$	0.94	48.06
$3\tau/9$	1.13	47.87

按照表1、表2设计参数利用有限元软件Flux进行建模,其中 B_{m1} 和 B_{m3} 为优化前电机的空载气隙磁密基波和三次谐波幅值,槽数 Q 为40,极对数 p 为4,电机有限元模型如图5所示。

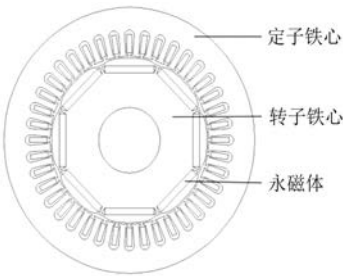


图5 电机有限元模型

有限元分析结果表明,优化后电机的气隙磁密基波含量为0.901 T,三次谐波含量为0.217 T,与理论分析吻合;空载漏磁系数为1.231,误差小于1%,满足精度要求。为了削弱由于定子开槽带来的齿谐波,本文对优化前后电机的定子齿上均开辅助槽,如图6(a)、图6(b)所示。优化前的电机为均匀气隙,优化前后的电机仅转子形状不同。图7(a)、图7(b)分别为优化前后电机的气隙磁密分布。图8为优化前后电机气隙磁密的谐波分布。

由图8可知,当转子形状优化后,不考虑三次谐波时,电机空载气隙磁密总谐波畸变率从12.4%减小到3.5%,优化效果明显。

2.2 负载仿真

五相绕组采用Y型连接,为了准确对比优化前后的转矩脉动量,注入的三次谐波电流不能增加逆变器的容量。因此在保证相电流有效值不变的情况下,电枢绕组中基波电流幅值 I_1 和三次谐

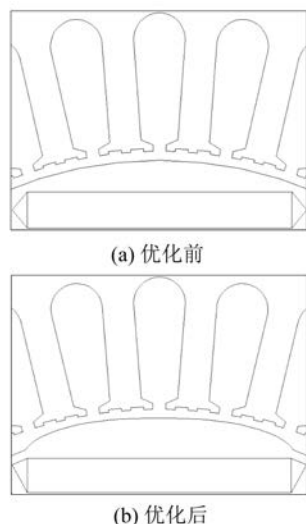


图6 优化前后的定子齿模型

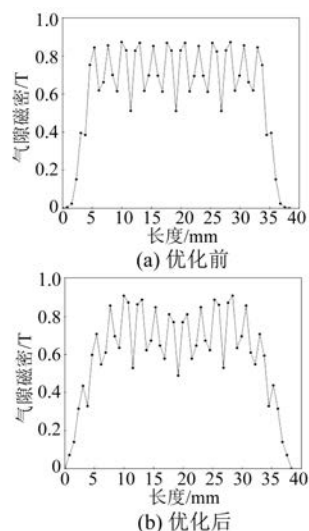


图7 优化前后电机的气隙磁密分布

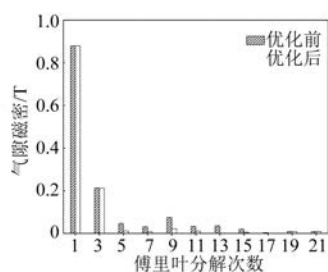


图8 优化前后电机气隙磁密的谐波分布

波电流幅值 I_3 需满足下式:

$$I_1^2 + I_3^2 = I^2 \quad (14)$$

式中: I 为正弦波供电时的电流幅值。设 $I_3 = kI_1$, k

为三次谐波电流的最优注入比,且当 $k = 0.21$ 时,电机的输出转矩最大。

图9(a)和图9(b)分别为优化前和优化后电机的转矩脉动。

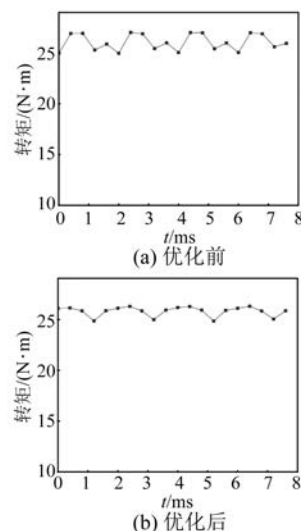


图9 优化前后电机的转矩脉动

优化前电机的平均转矩为 $26.04 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转矩脉动为 5.06% ; 优化后电机的平均转矩为 $25.78 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转矩脉动为 3.86% 。优化后电机的平均转矩较优化前的电机减小了不到 1% , 而转矩脉动较优化前的电机减小了 23.7% 。

3 结 语

基于三次谐波注入式五相 IPMSM 的气隙磁场优化, 本文提出一种转子铁心形状的优化设计方法, 优化前后的电机仅转子铁心形状不同。通过有限元仿真验证了设计的合理性。仿真结果表明不考虑三次谐波时, 优化后电机的空载气隙磁密总谐波畸变率仅为 3.5% , 比优化前的 12.4% 有明显的降低, 并且负载时的转矩脉动较优化前的电机降低了 23.7% 。综上, 本文所提出的转子形状优化方法削弱了永磁体产生的高次谐波, 降低了电机的转矩脉动以及谐波损耗, 提升了电机的性能, 有利于电机的平稳运行。

【参考文献】

- [1] 余彬, 宋文胜, 薛诚, 等. 一种基于优化占空比的五相永磁同步电机直接转矩控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5857.

- [2] 闫震,周扬忠. 三次谐波注入式五相永磁同步电机 DTC[J]. 电力电子技术,2018,52(7): 16.
- [3] 陶涛,花良浩,马小燕,等. 五相永磁同步电机与传统三相永磁同步电机对比分析[J]. 微特电机,2017,45(11): 45.
- [4] 高宏伟,杨贵杰,刘剑. 三次谐波注入式五相永磁同步电机矢量控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(24): 4101.
- [5] ZHOU Y, LI H S, MENG G, et al. Analytical calculation of magnetic field and cogging torque in surface-mounted permanent-magnet machines accounting for any eccentric rotor shape[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,62(6): 3438.
- [6] PANG Y, ZHU Z Q, FENG Z J. Cogging torque in cost-effective surface-mounted permanent-magnet machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011,47(9): 2269.
- [7] 杨玉波,王秀和,朱常青. 组合磁极削弱永磁同步电动机转矩脉动方法研究[J]. 电机与控制学报,2013,17(2): 34.
- [8] 彭兵,王成元,夏加宽,等. 磁动势法五相永磁力矩电机转矩分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(21): 105.
- [9] SCUILLER F. Magnet shape optimization to reduce pulsating torque for a five-phase permanent-magnet low-speed machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014,50(4): 8100709.
- [10] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [11] 黄克峰,王金全,徐晔,等. 径向充磁永磁同步电机空载气隙磁场研究[J]. 防爆电机,2015,50(3): 1.

(上接第 56 页)

- [5] BIAN Z, ZHANG Z, YU L, et al. Synchronous commutation control of doubly salient motor drive with adaptive angle optimization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(6):6070.
- [6] 王寅. 电励磁双凸极电机转矩特性与控制方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [7] 刘竹娟,肖岚,贾宛英,等. 基于滑模变结构控制的 DSEM 驱动系统研究[J]. 电力电子技术,2019,53(4): 52.
- [8] 陈冉,陈志辉,段晴晴,等. 电励磁双凸极发电机的电枢反应对外特性的影响分析[J]. 电机与控制学报,2013,17(4): 86.
- [9] 周波,相蓉,王川云,等. 电磁式双凸极电机电磁特性的理论分析[J]. 航空学报,2003,24(4): 355.
- [10] 周波,任立立,韦海荣. 基于等效电感法的电磁式双凸极电机系统简化控制模型[J]. 中国电机工程学报,2005,25(14): 109.
- [11] 张乐,周波,程方舜,等. 新型电励磁双凸极风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报,2011,31(24): 90.
- [12] 孙强,程明. 基于模糊神经网络的双凸极永磁电机非线性建模[J]. 控制理论与应用,2007,24(4): 601.
- [13] 王莉,孟小利,曹小庆,等. 电励磁双凸极发电机的非线性模型[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10): 137.
- [14] 朱晓虹,张广明,梅磊. 新型轴向磁通双凸极永磁电机设计与建模仿真[J]. 电机与控制应用,2015,42(7): 6.
- [15] 王逸洲,王慧贞,刘伟峰,等. 新型电励磁双凸极电机发电系统建模研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(17): 5162.
- [16] 马文博,张广明,梅磊. 新型结构电励磁双凸极发电机设计仿真[J]. 计算机仿真,2019,36(6): 226.
- [17] 史立伟,韩震,周晓宇,等. 短磁路 E 型定子铁心电励磁双凸极发电机电磁特性分析[J]. 电机与控制学报,2020,24(10): 109.
- [18] 李爽,梅磊. 轴向磁通电励磁双凸极发电机仿真分析[J]. 微特电机,2018,46(6): 35.