

优化隔磁桥对永磁同步电机输出转矩的影响

辛沅栩, 汪旭东, 杨勇, 孙彦, 王书华
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘要: 转子分段斜极能有效降低永磁同步电机(PMSM)转矩脉动,但会使电机平均输出转矩降低。为了解决这一问题,在转子分段斜极的基础上优化隔磁桥提高平均输出转矩。分析了转子分段斜极对电机齿槽转矩、空载反电动势、转矩脉动和平均输出转矩的影响,选取出最优的转子分段数和斜极角。在转子分3段,斜极角为 5° 的基础上,以保持转矩脉动不变为前提,通过优化转子参数 $H_{r_{ib}}$ 和 D_{min} 找到最优的隔磁桥结构,平均输出转矩由 $138.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 提升到 $147.2\text{ N}\cdot\text{m}$,说明所提方法的有效性。优化后齿槽转矩峰值由 $0.24\text{ N}\cdot\text{m}$ 降低到 $0.18\text{ N}\cdot\text{m}$,空载反电动势基波幅值由 278.7 V 提升到 288.6 V 且谐波畸变率基本不变,说明隔磁桥优化后能提高电机的其他性能。

关键词: 永磁同步电机; 分段斜极; 平均输出转矩; 隔磁桥

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)01-0071-06

doi: 10.12177/emca.2022.143

Influence of Optimized Magnetic Isolation Bridge on Output Torque of Permanent Magnet Synchronous Motor

XIN Yuanxu, WANG Xudong, YANG Yong, SUN Yan, WANG Shuhua

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The rotor step skewing can effectively reduce the torque ripple of the permanent magnet synchronous motor (PMSM), but it will decrease the average output torque of the motor. In order to solve this problem, the magnetic isolation bridge is optimized on the basis of the rotor step skewing to improve the average output torque. Firstly, the influence of the rotor step skewing on the cogging torque, no-load back electromotive force (EMF), torque ripple and average output torque of the motor is analyzed, and the optimal number of rotor segments and step skewing angle are selected. The segments is 3, the step skewing angle is 5° , the torque ripple keeps unchanged. Under these conditions, the optimal magnetic isolation bridge structure is found by optimizing the rotor parameters $H_{r_{ib}}$ and D_{min} , and the average output torque increases from $138.5\text{ N}\cdot\text{m}$ to $147.2\text{ N}\cdot\text{m}$. The effectiveness of the method is verified. Meanwhile, the peak value of cogging torque decreases from $0.24\text{ N}\cdot\text{m}$ to $0.18\text{ N}\cdot\text{m}$, the amplitude of no-load back EMF fundamental wave increases from 278.7 V to 288.6 V , and the harmonic distortion rate is nearly unchanged. The results indicate that other performances of the motor can be improved after optimization of the magnetic isolation bridge.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); segmented sloping pole; average output torque; magnetic isolation bridge

0 引言

随着我国工业技术的快速发展,对工业技术

的要求越来越高。永磁电机作为工业领域不可或缺的一部分,对永磁电机性能的提高一直是研究的热点。定子铁心与转子永磁之间的相互作用,

收稿日期: 2022-09-26; 收到修改稿日期: 2022-10-25

作者简介: 辛沅栩(1993—),男,硕士研究生,研究方向为电机多物理场的仿真及设计。

汪旭东(1967—),男,教授,研究方向为直驱技术及集成应用、高品质电机设计及控制、新型电磁装备等。

会产生齿槽转矩,从而导致电机运行的波动与振荡,进而会影响电机的控制精度^[1-2]。电机转矩脉动过大会使电机在带负载运行过程中稳定性降低,电机能耗增加。转矩脉动^[3]作为衡量电机性能好坏的一个重要指标,如何抑制齿槽转矩,减少转矩脉动一直是相关科研人员关注的重点。

为了降低电机转矩脉动,常用的手段是通过改变定子与转子的结构参数来优化电机的转矩^[4]。文献[1,5]用解析法和有限元法结合的方法验证了优化定子槽口宽度能够抑制电机齿槽转矩。文献[6]分析定子斜槽结构对电机齿槽转矩的影响,发现定子斜槽数为 $1/N_p$ 或其整数倍时,可以减小齿槽转矩。但是,斜槽定子带来了电机绕线困难,加工难度大,制造成本高的问题。

与定子的优化过程相比,转子结构简单,更容易进行优化。转子分段是常用方法之一,且在工业上易于实现。应红亮等^[7]提出转子分段的选择原则和最佳斜极角的计算,并引入斜极系数、永磁转矩削弱系数和磁阻转矩削弱系数,系统地分析了转子分段会降低平均输出转矩的原因。Ge 等^[8]通过转子分段斜极降低了永磁电机齿槽转矩,但平均输出转矩由 $4.26\text{ N}\cdot\text{m}$ 降低到 $4.21\text{ N}\cdot\text{m}$ 。孙承旭等^[9]针对一台车用双层内嵌式永磁同步电机(PMSM),分析了转子分段对不能进一步降低转矩脉动的原因,通过优化转矩波形对称性进一步降低了转矩脉动,但平均转矩由 $666.3\text{ N}\cdot\text{m}$ 降低到了 $659.1\text{ N}\cdot\text{m}$ 。王群京等^[10]发现优化齿槽转矩对称性后结合转子分段降低了内置V型电机齿槽转矩和转矩脉动,但输出平均转矩由 $233.4\text{ N}\cdot\text{m}$ 降低到 $212.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。王晓远等^[11]通过转子分段降低电动汽车用永磁电机转矩脉动和振动噪声,但平均转矩由 $95.91\text{ N}\cdot\text{m}$ 降低到 $94.32\text{ N}\cdot\text{m}$ 。黄苏融等^[12]分析发现了转子分段数与齿谐波之间的关系,并发现了转子分段会对内置式永磁电机 d 轴电感增大, q 轴电感减小,从而使电机凸极率降低。优化隔磁桥主要集中在降低齿槽转矩^[13-16]和降低齿槽转矩^[17-19]等,尚未发现运用在提高电机平均输出转矩的场合。

综上所述,虽然转子分段会降低 PMSM 的转矩脉动,但同时会降低平均输出转矩。本文基于有限元计算的分析方法,在转子分段的基础上,通过改变转子参数 $H_{R_{ib}}$ 和 D_{min} 来优化隔磁桥,在转

矩脉动不变的基础上提高电机平均输出转矩。

1 电机主要参数

本文以某款常用电机为例,主要参数如表 1 所示,电机模型如图 1 所示。

表 1 电机主要参数	
参数名称	参数值
额定功率/kW	30
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
极数/槽数	8/48
定子内径/mm	161.90
转子外径/mm	160.40
铁心长度/mm	83.82
相邻隔磁桥最小距离 R_{ib} /mm	14.00
永磁体隔磁桥高度 $H_{R_{ib}}$ /mm	3.00
相邻永磁体最短距离 D_{min} /mm	4.50
气隙最小长度/mm	0.75
磁钢宽度/mm	32.00
磁钢厚度/mm	6.48

图 1 所示为 48 槽 8 极 PMSM 的 1/8 电机模型,有限元分析计算时通过主从边界设置可以大大缩短计算时间。

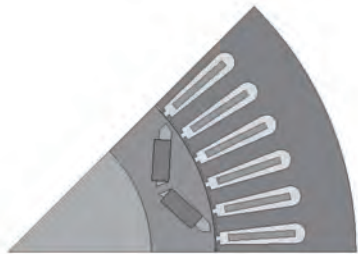


图 1 电机 1/8 模型

2 转子分段斜极分析

在不通电的情况下,永磁体与定子齿槽间产生相对转动而引起的力矩为齿槽转矩。采用分段斜极的方法可以有效地削弱齿槽转矩^[19]。根据现有的研究成果,在不考虑定子斜槽时的齿槽转矩可表示为

$$T_{\text{cog}} = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{\frac{m}{2p}} \sin(nz\alpha) \quad (1)$$

式中: z 为定子槽数; L_a 为转子的轴向长度; μ_0 为

气隙磁导率; R_1 、 R_2 分别为转子外半径和定子轭内半径; $B_{\frac{n\alpha}{2p}}$ 为永磁体产生的气隙磁密平方的傅里叶分解系数; p 为磁极对数; α 为某一个特定的定子齿中心线与特定转子中永磁体中心线夹角。

转子分段斜极如图 2 所示, 通过选择合适的分段数和斜极角, 可有效削弱由定子开槽引起的齿谐波, 从而降低齿槽转矩和转矩脉动。

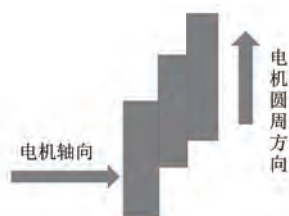


图 2 转子分段斜极

第 v 次谐波对应的转子分段斜极系数可以表示为

$$K = \frac{\sin\left[\frac{nv\alpha}{2(n-1)}\right]}{n \cdot \sin\left[\frac{v\alpha}{2(n-1)}\right]} \quad (2)$$

式中: n 为分段数; α 为斜极角(电角度)。

由式(2)可知, 转子分段数 n 和斜极角 α 的选取会影响斜极系数 K , 从而影响 v 次谐波。因此, 转子分段数 n 和斜极角 α 的选取至关重要。

一般情况下, 三相 PMSM 转子分段斜极时会选择倾斜一个齿距, 使得 $[LCM(Z, 2p)/p \pm 1]$ 次的齿谐波电动势和 $LCM(Z, 2p)/p$ 次齿槽转矩谐波得到大幅度降低, 其中 $LCM(Z, 2p)$ 为定子槽数和极数的最小公倍数, Z 为定子槽数, p 为磁极对数。从式(1)出发, 可得出:

$$\frac{n \cdot LCM(Z, 2p) \alpha}{p} = \pi \quad (3)$$

对式(2)进行变形, 可以得到最佳分段斜极角为

$$\alpha = \frac{2p\pi}{LCM(Z, 2p)} \cdot \frac{n-1}{n} \quad (4)$$

运用 Maxwell 2D 进行转子分段斜极仿真分析时, 输入为机械角度 β 。机械角度 β 与电角度 α 之间关系为

$$\beta = \frac{\alpha}{2p} \quad (5)$$

在对转子进行分段时, 分段数过多会增加工艺难度, 提高制造成本, 因此本文选择分 2 段、3 段、4 段进行分析。结合式(3)、式(4)可计算出转子分 2 段时, 最佳斜极角为 3.75° , 转子分 3 段时, 最佳斜极角为 5° , 转子分 4 段时, 最佳斜极角为 5.625° 。齿槽转矩是 PMSM 固有属性, 会影响电机平均输出转矩和转矩脉动。为了验证上述理论分析的正确性, 对本文所研究的电机进行有限元分析。图 3 为不同转子分段数的齿槽转矩波形。

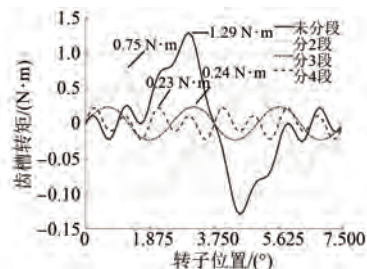


图 3 不同分段数齿槽转矩

由图 3 可知, 转子分段斜极能有效降低齿槽转矩。转子分段数越多, 齿槽转矩降低越明显。

图 4 为空载反电动势谐波分析。

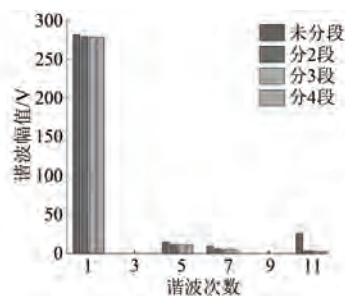


图 4 不同分段数反电势谐波

由图 4 可知, 随着转子分段数的增加, 基波幅值逐渐减小, 但其他次谐波也逐渐降低, 因此使谐波畸变率降低。未分段的反电动势波形, 畸变率为 11.1%, 分 2 段、3 段、4 段的反电动势畸变率为 4.9%、4.6%、4.4%。

图 5 和表 2 分别为转子不同分段数下输出转矩波形和不同转子分段数输出转矩相关参数对比。

表 2 不同分段数输出转矩参数

分段数	$T_{\text{Max}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$T_{\text{Min}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$T_{\text{avg}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$T_{\text{rip}}/\%$
1	155.7	120.2	139.2	25.5
2	151.0	130.9	138.7	14.5
3	149.5	131.6	138.5	13.0
4	149.8	132.0	138.2	12.9

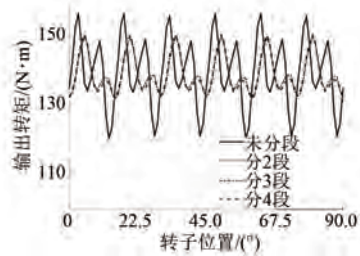


图5 不同分段数输出转矩

由图5和表3可知,转子分段斜极可降低PMSM 转矩脉动,但也会降低平均输出转矩,且分段数越多,平均输出转矩降低越多。由文献[2]可知,转子分段斜极会削弱PMSM 的永磁转矩和磁阻转矩。为了解决转子分段斜极后平均输出转矩下降的问题,综合上述对转子分段后齿槽转矩、空载反电动势和输出转矩的分析和工艺要求,选择在转子分3段,斜极角为5°的基础上,在转矩脉动不变的前提下,通过优化隔磁桥的方法提高电机的平均输出。

3 隔磁桥对输出转矩的影响

对于永磁体置于内部的情况而言,隔磁桥的存在可以改变磁路走向,增加永磁体利用率和减少极间漏磁,从而提高平均输出转矩,转子隔磁桥结构如图6所示。

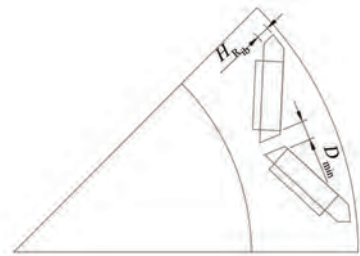


图6 转子隔磁桥结构

本文选择改变 $H_{R_{ib}}$ 和 D_{min} 来优化隔磁桥,其中 $H_{R_{ib}}$ 为隔磁桥最小高度, D_{min} 为一对磁极之间的最短距离。选择合适的 $H_{R_{ib}}$ 会减少漏磁和提高机械强度,同样,合适的 D_{min} 会提高永磁体利用率。选取参数优化范围是需要综合考虑电机电磁性能和机械强度,因此选取 $H_{R_{ib}}$ 和 D_{min} 取值范围如表3所示。在转子分段斜极的基础上,经过有限元仿真后不同隔磁桥结构平均输出转矩如表4所示。

表3 $H_{R_{ib}}$ 和 D_{min} 取值范围

参数名称	最小值	最大值	Step
$H_{R_{ib}}$	1	4	1
D_{min}	3	5	0.5

表4 不同隔磁桥结构平均输出转矩

结构	$H_{R_{ib}}/\text{mm}$	D_{min}/mm	$T_{avg}/(\text{N}\cdot\text{m})$
1	1	3.0	147.2
2	1	3.5	146.2
3	1	4.0	145.6
4	1	4.5	144.9
5	1	5.0	144.1
6	2	3.0	144.7
7	2	3.5	144.0
8	2	4.0	143.9
9	2	4.5	142.4
10	2	5.0	141.6
11	3	3.0	140.8
12	3	3.5	140.1
13	3	4.0	139.5
14	3	4.5	138.7
15	3	5.0	137.9
16	4	3.0	135.8
17	4	3.5	135.1
18	4	4.0	134.4
19	4	4.5	133.8
20	4	5.0	132.9

由表4可知,当 $H_{R_{ib}}$ 不变时, D_{min} 随着取值增加平均输出转矩减小;当 D_{min} 不变时, $H_{R_{ib}}$ 随着取值增加平均输出转矩减小,说明 $H_{R_{ib}}$ 和 D_{min} 均能对平均输出转矩影响。当 $H_{R_{ib}}=1\text{ mm}$, $D_{min}=3\text{ mm}$ 时的隔磁桥结构1平均输出转矩最优。

4 优化前后电机性能分析

采用ANSYS 软件进行2D 电磁场分析,样机的空载磁力线分布如图7所示。为了更好分析电机优化前后的性能,图8和表5分别为仅转子分段(优化前)和转子分段结合隔磁桥(优化后)输出转矩和输出转矩相关性能对比。



图7 空载磁力线

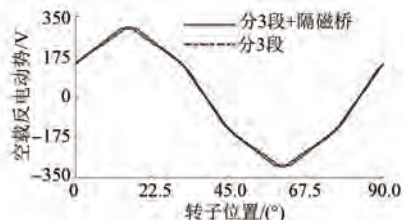


图10 空载反电动势波形

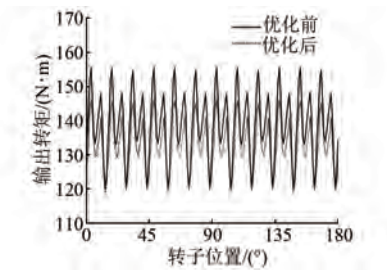


图8 优化前后输出转矩波形

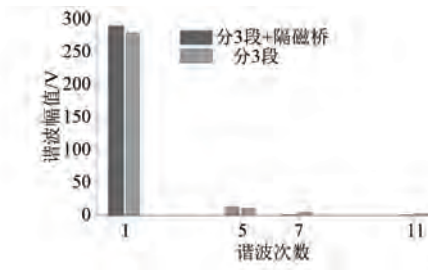


图11 反电动势谐波

表 5 输出转矩相关参数				
结构类型	$T_{Max}/$ (N·m)	$T_{Min}/$ (N·m)	$T_{avg}/$ (N·m)	$T_{rip}/\%$
分段	149.5	131.6	138.5	13.0
分段+隔磁桥	158.7	140.7	147.2	12.6

由图 8 和表 5 可知,在转子分段基础上优化隔磁桥平均输出转矩由 138.5 N·m 提高到 147.2 N·m,提高了 5.9%,且优化后转矩脉动并未下降。图 9 为仅转子分段和分段+隔磁桥优化后齿槽转矩波形。由图 9 可知,在转子分段的基础上,齿槽转矩峰值进一步降低,由 0.24 N·m 降低到 0.18 N·m,说明在转子分段基础上优化隔磁桥对降低齿槽转矩有利。

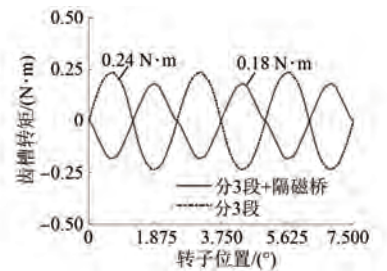


图9 齿槽转矩波形

图 10、图 11 分别为仅转子分段和分段+隔磁桥优化后空载反电动势波形和谐波分析。

由图 10、图 11 可知,在转子分段基础上优化隔磁桥空载反电动势基波幅值由 278.7 V 提升到

288.6 V,提高了 3.5%,这是平均输出转矩提高的原因之一。分 3 段+隔磁桥和分 3 段的总谐波畸变率分别为 4.7% 和 4.6%,总的谐波畸变率基本不变,说明在转子分段基础上优化隔磁桥对反电动势影响是正面的。

5 结 语

本文为了解决由转子分段斜极引起的平均输出转矩降低的问题。在转子分 3 段,斜极角为 5° 的基础上,保持转矩脉动不变的前提下,通过改变转子参数 $H_{R_{ib}}$ 和 D_{min} 来优化隔磁桥,提高 PMSM 平均输出转矩。优化结果表明,在转子分段斜极的基础上优化隔磁桥后平均输出转矩由 138.5 N·m 提高到 147.2 N·m,提高了 6.28%,且优化后会提高空载反电动势基波幅值和进一步降低齿槽转矩,说明所提方法能提高电机性能。

【参 考 文 献】

[1] HUSAIN T, HASAN I, SOZER Y, et al. Cogging torque minimization in transverse flux machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55 (1): 385.

[2] YANG Y, BIANCHI N, ZHANG C, et al. A method for evaluating the worst-case cogging torque under manufacturing uncertainties [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35 (4): 1837.

[3] BASNET B, PILLAY P. Torque pulsation reduction

- during magnetization in variable flux machines [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(2): 1703.
- [4] 高蒙真, 杨向宇, 蒋思远, 等. 基于极弧系数和分段斜极选择的五相永磁电机齿槽转矩削弱方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 2022. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221014.1510.006.html>.
- [5] 杨玉波, 王秀和, 朱常青. 电枢槽口宽度对内置式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(7): 21.
- [6] 唐旭, 王秀和, 孙淑敏, 等. 异步起动永磁同步电动机齿槽转矩的解析分析和削弱措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1395.
- [7] 应红亮, 张舟云, 曲家骥, 等. 转子分段斜极在永磁同步电动机中的应用分析[J]. 微特电机, 2009, 37(7): 10.
- [8] GE X, ZHU Z Q, KEMP G, et al. Optimal step-skew methods for cogging torque reduction accounting for three-dimensional effect of interior permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 222.
- [9] 孙承旭, 李琦, 范涛, 等. 车用双层内嵌式永磁同步电机转矩脉动抑制方法[J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2251.
- [10] 王群京, 周建, 钱喆, 等. 优化对称性降低 V 型内置式永磁电机齿槽转矩[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(11): 55.
- [11] 王晓远, 罗潇宇, 高鹏. 基于电动汽车驱动电机振动噪声优化的转子结构设计[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 2022. doi: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000979.
- [12] 黄苏融, 陈益辉, 张琪. 内置式同步电机转子分段移位的性能分析与参数计算[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(9): 11.
- [13] LIU Z, HU Y, WU J, et al. A novel modular permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor[J]. IEEE Access, 2021, 9: 19947.
- [14] KASHANI S A A. Design and optimization of coaxial reluctance magnetic gear with different rotor topologies [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 101.
- [15] 刘细平, 刘章麒, 李亚, 等. 电动汽车用双层永磁体 IPMSM 优化分析[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(10): 30.
- [16] 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研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4919.
- [17] 贺晓钰. 电动汽车驱动用 V 型磁钢转子永磁同步电机的电磁振动噪声分析与抑制[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [18] MAHMOUDITABAR F, VAHEDI A, TAKORABET N. Design and analysis of interior permanent magnet motor for electric vehicle application considering irreversible demagnetization [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 284.
- [19] 李卫民, 刘阳, 陈静, 等. 基于转子分段斜极的齿槽转矩优化设计[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2017, 37(5): 307.

[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