

开关角对斜槽转子SRM稳态转矩的多目标优化

安治国,高尉

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院,重庆 400074)

摘要:开关磁阻电机转子斜槽结构可有效减小电磁径向力,但会导致转矩特性变化。针对该问题,给出了线性模型下斜槽转子开关磁阻电机稳态转矩的解析方法,然后建立了四相8/6极开关磁阻电机模型,采用三维有限元仿真方法,计及端部漏磁,以电流开通角、关断角和转子斜槽角度为优化参数,以平均转矩变化量最小和转矩脉动最小为优化目标,基于正交试验法设计试验方案,通过极差和方差分析确定了相应参数的优组合,并将优化前后的转矩特性进行了比较,结果表明:小的斜槽角度对转矩特性的影响并不大,优化后电机的平均转矩相比优化前只变化了16.01%,但其转矩脉动下降了23.63%。

关键词:开关磁阻电机;转子斜槽结构;正交试验法;稳态转矩特性

中图分类号:TM352 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19171

Multi-objective Optimization of Steady-state Torque of Switched Reluctance Motor with a Skewed Slots Rotor Based on Switching Angle

AN Zhiguo, GAO Wei

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The structure of switched reluctance motor with a skewed slots rotor can effectively reduce the electromagnetic radial force, but it will also lead to changes in torque characteristics. Aiming at this problem, the calculation method under linear model of steady-state torque of switched reluctance motor with skewed slots structure rotor was given. Then a four-phase 8/6 poles switched reluctance motor model was established. The three-dimensional finite element simulation method was used to account for the end leakage flux. The current turn-on angle, turn-off angle and skewed slots angle of rotor were used as optimization parameters. The minimum average torque variation and the minimum torque ripple were the optimization objectives. The test plan was designed based on the orthogonal test method. The excellent combination of the corresponding parameters were determined by range and variance analysis, and the motor torque characteristics before and after optimization were compared. The results shows that a small chute angle has little effect on the torque characteristics, after optimization, the average torque of the motor is only changed by 16.01%, but its torque ripple is decreased by 23.63%.

Key words: switched reluctance motor (SRM); rotor skewed slots structure; orthogonal test method; steady state torque characteristic

开关磁阻电机(SRM)具有结构简单紧凑、坚固耐高温、成本低、调速范围宽等优点,但是其双凸极结构和开关式的供电方式造成的转矩脉动也限制了它的发展和应用,同时转矩脉动还会引起噪声和特定频率下的谐振。因此,降低转矩脉动对于提升其运行性能十分重要^[1-3]。

目前,减小转矩脉动的方法包括电机控制策略优化^[4-6]和结构优化^[7-9],针对转子斜槽结构的

优化研究却并不多见。文献[10]采用三维有限元仿真方法比较了开关磁阻电机转子斜槽前后径向力及振动的变化情况,结果表明采用斜槽结构电机的径向力减小了23.3%;文献[11]通过二维有限元仿真采用模糊优化策略对一台8/6极开关磁阻电机进行多目标优化设计,分析了其静态特性,结果表明电机的平均转矩保持不变,但转矩脉动相比优化前减小了34%;文献[12]采用三

基金项目:重庆市科委基础科学与前沿技术研究(重要)项目(cstc2015jcyjB0333)

作者简介:安治国(1976-),男,博士,副教授,Email:azgcqu@163.com

维有限元法分析一台8/6极开关磁阻电机转子斜槽角度对静态特性参数的影响,结果表明斜槽角度为 5° 时,平均转矩减小了18.9%,但径向力减小了56.2%;文献[13]通过二维有限元方法进行分段斜槽等效计算,分析了转子斜槽结构对开关磁阻电机的静态特性的影响,结果表明转子斜槽结构可有效改善电机性能,并对转矩脉动具有一定的削弱作用;文献[14]设计了一种转子形状为直角梯形的斜槽结构,以二维有限元法分析了其静态特性,并用三维方法对设计进行验证,发现该结构提高了电机的功率密度,且效率更高;文献[15]将一台6/4极开关磁阻电机采用转子步斜结构,每一段相互错开一定角度并独立进行控制,实验证明该结构使电机的径向力和转矩脉动都有所减小,且电机最大效率超过90%,相比初始结构效率提高了10%以上;文献[16]结合直接转矩控制策略采用三维有限元法研究了一台转子结构为直角梯形的6/4极开关磁阻电机的瞬态转矩特性,结果表明转矩脉动相比原结构减小了34.33%,且具有更好的调速性能。以上文献表明转子斜极结构可减小径向力和转矩脉动,但大多集中在对静态转矩的研究,忽略了控制参数对其稳态转矩特性的影响。

本文采用三维有限元法,基于正交试验法设计试验方案,分析了不同开通角 θ_{on} 、关断角 θ_{off} 和斜槽角 θ 组合对转矩脉动和平均转矩变化量的影响,确定了相应参数的优组合,最后将优化前后的转矩特性和其他相关参数进行了对比,验证了优化方案的准确性。

1 转子斜槽结构

图1为转子斜槽前后示意图。

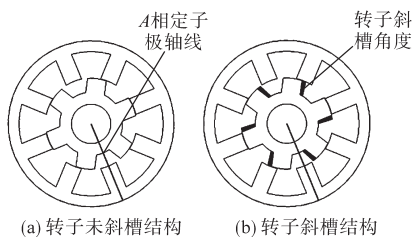


图1 $\theta=0^\circ$ 时的不同转子结构的开关磁阻电机示意图
Fig.1 Schematic of SRM with different structures when $\theta=0^\circ$

相比斜槽前,斜槽后的电机转子槽轴线沿轴向顺时针扭转了一个角度 θ ,因此定转子轴线间也不再平行,而是错开一个角度 θ 。图1中所示

时刻均为定、转子极完全未对齐位置,将此时的转子位置 θ 定义为 0° ,转子逆时针旋转。

2 数学解析方法及有限元模型

2.1 斜槽SRM稳态转矩解析方法

为了方便地定性分析斜槽电机的稳态转矩,首先作以下几点假设:1)不计磁路饱和的影响;2)忽略端部漏磁和磁通边缘效应;3)开关器件为理想开关,电流为理想的矩形波。通过以上假设,电机的电磁特性被简化为线性模型。下面将从相电压平衡方程式出发,依次推导单相电流导通时和多相同时导通时的转矩表达式,最后通过分段斜槽方法等效计算斜槽电机的转矩。

电机第 m 相电压平衡方程式为

$$U_m = R_m \cdot i_m + d\Psi_m(i_m, \theta)/dt \quad (1)$$

式中: U_m 为第 m 相绕组电压; R_m 为第 m 相绕组电阻; i_m 为第 m 相绕组电流; $\Psi_m(i_m, \theta)$ 为第 m 相绕组磁链,它是关于绕组电流 i_m 和转子位置角 θ 的函数。

$\Psi_m(i_m, \theta)$ 也可表示为

$$\Psi_m(i_m, \theta) = L_m(i_m, \theta) \cdot i_m \quad (2)$$

式中: $L_m(i_m, \theta)$ 为第 m 相绕组电感。

由式(1)可得:

$$\Psi_m(i_m, \theta) = \int U_m - R_m \cdot i_m dt \quad (3)$$

给定不同的 i_m 和 θ 代入式(3)计算则可得到不同电流值和转子位置时的磁链 $\Psi_m(i_m, \theta)$ 。再由式(2)即可计算出相应电流和转子位置的相电感。

转子在任意位置 θ 时所对应的相电流 i_m 所产生的瞬时转矩 T_m 可根据虚位移原理由磁共能求得,如下式:

$$T_m = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_m} \Psi(i_m, \theta) di \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)可得:

$$T_m = \frac{i_m^2}{2} \frac{\partial L(i_m, \theta)}{\partial \theta} \quad (5)$$

当存在多相同时导通时,转子在任意位置 θ 时所产生的合成瞬时转矩 T_c 可表示为

$$T_c = \sum_{m=1,2,3,\dots} T_m \quad (6)$$

斜槽电机常采用分段斜槽的方法进行等效处理^[17-18]。将电机沿轴向等分为 n 段,每段之间沿同一方向相互错开相同角度 $\Delta\theta$,即 $\Delta\theta=\theta/(n-1)$ 。分段等效斜槽示意图如图2所示。当第1段的转子处于位置 θ 时第 k 段所产生的合成瞬时转矩 T_k 可表示为

$$T_k = \sum_{k=1}^n \frac{i^2}{2} \frac{\partial L[i_m, \theta + (k-1) \cdot \Delta\theta]}{\partial [\theta + (k-1) \cdot \Delta\theta]} \quad (7)$$

整个斜槽电机所产生的瞬时转矩 T_θ 则可由下式计算:

$$T_\theta = \sum_{k=1}^n T_k \quad (8)$$

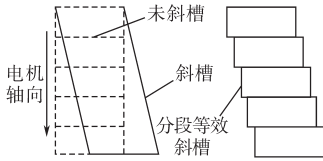


图2 分段等效斜槽示意图

Fig.2 Schematic of step-skewed slots

1个稳定电周期内的平均转矩 T_{avg} 和转矩脉动系数 K_T 如下式:

$$T_{avg} = \frac{N_r}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_\theta d\theta \quad (9)$$

$$K_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: N_r 为转子极数; T_{max} , T_{min} 分别为转矩的最大值和最小值。

实际上,由于开关磁阻电机的双凸极结构和运行机理的原因,其磁路往往饱和严重,磁链表现出高度的非线性,而且受绕组的互感、自感和电流存在上升期与续流期的影响,其电流和电感难以解析,再考虑到端部效应,采用解析法计算斜槽电机的稳态转矩不仅误差大,而且轴向分段数和计算步长的选择也对结果精度和计算量有很大影响^[19],但对于斜槽电机的定性分析,仍具有一定的理论意义。本文仅给出了斜槽结构开关磁阻电机的稳态转矩解析计算方法,而不对其进行结果求解。

2.2 三维有限元模型

斜槽电机的转矩计算过程相当复杂,通过三维有限元法进行求解,不仅可以计及端部漏磁,而且计算结果更加准确^[20]。

以某4相8/6极开关磁阻电机作为原型样机,建立样机有限元模型,并连接外电路,其结构参数为:定子外径210 mm,转子外径115 mm,气隙长度0.4 mm,转子内径50 mm,轴向长度50 mm,定子极角度21°,转子极角度24°,定子轭厚13.7 mm,转子轭厚14.9 mm,每相串联匝数300。

图3为转子位置 $\theta=0^\circ$ 时,离散化后的有限元模型。由于电机具有对称性,因此仅计算1/4模型即可,未斜槽电机经过离散化处理后共划分出19 799个单元。

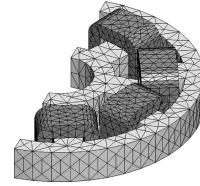


图3 未斜槽电机有限元模型

Fig.3 The finite element model of SRM with no skewed slots

3 正交试验方法

将未斜槽电机有限元模型与外电路联接,设定电压280 V,开通角 $\theta_{on}=0^\circ$,关断角 $\theta_{off}=18^\circ$,转速1 500 r/min,仿真结果如图4所示。

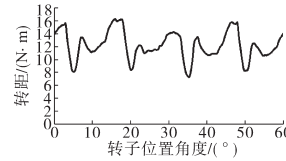


图4 未斜槽电机稳态转矩曲线图

Fig.4 Curve diagram of steady state torque of SRM with no skewed slots

由式(9)和式(10)计算可得未斜槽电机的平均转矩为12.74 N·m,转矩脉动系数为81.05%。

3.1 试验设计

为制定合理的试验方案,并尽可能减少试验次数,采用正交试验法对开通角 θ_{on} 、关断角 θ_{off} 和斜槽角 θ 进行优化设计。文献[12]表明当平均转矩作为优化目标时,应使用一个小的斜槽角度 ($\theta \leq 5^\circ$),因此确定3个因素和3个水平,如表1所示。

表1 正交设计因素和水平表

Tab.1 Table of orthogonal design factors and levels

因素	$\theta_{on}/(^\circ)$	$\theta_{off}/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$
水平1	-2	15	1
水平2	0	18	3
水平3	2	20	5

3.2 试验方案与结果

根据所确定的因素和水平,选择 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验,试验方案如表2所示,1~3列分别为

表2 正交试验方案与结果

Tab.2 Scheme and results of orthogonal test

因素	$\theta_{on}/(^\circ)$	$\theta_{off}/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$	空列	$T_{avg}/(N \cdot m)$	$K_T/\%$	$\Delta T/(N \cdot m)$
1	1(-2)	1(15)	1(1)	1	14.12	115.97	1.38
2	1	2(18)	2(3)	2	18.57	80.63	5.83
3	1	3(20)	3(5)	3	21.23	64.18	8.49
4	2(0)	1	2	3	10.86	139.74	-1.88
5	2	2	3	1	15.37	89.2	2.63
6	2	3	1	2	14.78	49.81	2.04
7	3(2)	1	3	2	11.49	83.72	-1.25
8	3	2	1	3	10.14	72.34	-2.6
9	3	3	2	1	12.03	54.74	-0.71

开通角、关断角、斜槽角,第4列为空列,用于考察实验误差,一共只需进行9次试验,而完全试验则需 3^3 即27次。定义平均转矩变化量 ΔT 为每次试验所得的平均转矩与未斜槽电机平均转矩差值。

3.3 试验结果分析

3.3.1 极差分析

T 值是指某一因素某一水平的 t 次试验的品质指标的和, T 值的大小可用来判断因素的优水平。极差则为任一列因素各水平的试验指标最大值与最小值之差,根据极差的大小可以确定不同因素对某一品质指标的影响程度。图5为优化参数对平均转矩变化量的影响。

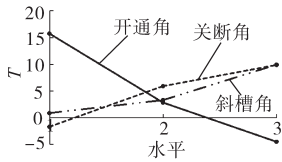


图5 优化参数对平均转矩变化量的影响

Fig.5 Effect of optimization parameters on average torque variation

从图5可以看出,若要使平均转矩接近未斜槽电机的平均转矩,需使变化量的绝对值最小,则优组合应为 $\theta_{on}=0^\circ, \theta_{off}=15^\circ, \theta_s=1^\circ$ 。三者的极差分别为22.27, 11.58, 9.06,说明平均转矩变化量对导通角的变化更为敏感,斜槽角和关断角次之。

通过对转矩脉动系数进行极差分析,结果如图6所示。由图6可以看出,当 $\theta_{on}=2^\circ, \theta_{off}=20^\circ, \theta_s=3^\circ$ 时,转矩脉动可以达到最小值。另外三者的极差分别为67.95, 170.7, 38.01,即对转矩脉动系数产生主要影响的参数是关断角,而斜槽角度影响最小。

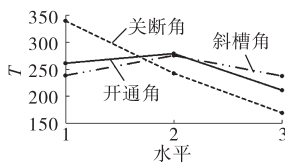


图6 优化参数对转矩脉动系数的影响

Fig.6 Effect of optimization parameters on torque ripple coefficient

虽然通过以上分析已选定了可使平均转矩变化量最小化和转矩脉动最小化的参数组合,但由于存在多目标优化的问题,因此需要通过方差分析精确地估计各因素对试验结果影响的重要程度,综合评估然后选定参数以使平均转矩变化量和转矩脉动系数都能得到优化。

3.3.2 方差分析

对平均转矩变化量进行方差分析所得结果如表3所示。结果表明,开通角对平均转矩的变化量

影响显著,而其他2个参数则影响不显著,其主要原因在于开通角对电流的作用十分明显,当开通角提前时,相电流峰值和电流波形的宽度会增大,可提高电机的输出转矩。而关断角一般情况下不影响电流的峰值,而只对电流波形宽度有影响,因此对输出转矩的影响作用有限。斜槽角由于取值并不大,因此对平均转矩的影响并不十分明显。

表3 平均转矩变化量方差分析数据表

Tab.3 Anova data table of average torque variation

因素	自由度	均方差	F值	F_{α}	显著性
θ_{on}	2	35.101 2	34.524 3	19;99	显著
θ_{off}	2	11.542 7	11.353 0	19;99	
θ_s	2	7.335 0	7.214 4	19;99	
空列	2	1.016 7	1.000 0	19;99	
误差	2	1.016 7			
总和	8				

对转矩脉动系数进行的方差分析如表4所示。

表4 转矩脉动系数方差分析数据表

Tab.4 Anova data table of torque ripple coefficient

因素	自由度	均方差	F值	F_{α}	显著性
θ_{on}	2	413.229 1	1.354 9	5.143 3;10.924 8	
θ_{off}	2	2 443.968 4	8.013 5	5.143 3;10.924 8	显著
θ_s	2	156.336 7	0.512 61	5.143 3;10.924 8	
空列	2	345.377 5	1.132 5	5.143 3;10.924 8	
误差	6	304.98			
总和	8				

结果表明,关断角对转矩脉动的影响显著,对平均转矩变化量不显著,因此为保证转矩脉动系数最小化,选定 $\theta_{off}=20^\circ$ 。同理,开通角的选定应以平均转矩变化量最小化为主,即 $\theta_{on}=0^\circ$;而对于斜槽角而言,对2个指标的影响都不显著,但由于斜槽角对平均转矩的影响比重远大于对转矩波动的影响比重,故选择 $\theta_s=1^\circ$ 。至此,综合权衡之后得到3个的优组合为 $\theta_{on}=0^\circ, \theta_{off}=20^\circ, \theta_s=1^\circ$ 。

4 优化方案验证与对比

根据确定的优化参数进行三维有限元仿真, $\theta_s=1^\circ$ 时的斜槽转子有限元模型如图7所示,1个电周期内的转矩波形如图8中实线所示。图8中,

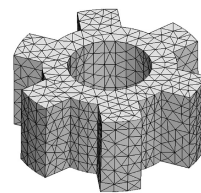


图7 $\theta_s=1^\circ$ 时的转子有限元模型

Fig.7 Rotor finite element model when $\theta_s=1^\circ$

虚线所示为电机只采用斜槽结构但保持原控制参数不变时的转矩波形,两者与未斜槽电机的参数和转矩特性的对比如表5所示。

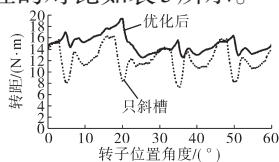


图8 稳态转矩对比图

Fig.8 Comparison of steady state torque

表5 优化参数与结果对比

Tab.5 Comparison of optimization parameters and results

参数	$\theta_{on}/(^{\circ})$	$\theta_{off}/(^{\circ})$	$\theta_s/(^{\circ})$	$T_{avg}/(N \cdot m)$	$K_T/\%$
未斜槽	0	18	0	12.74	73.44
优化后	0	20	1	14.78	49.81
只斜槽	0	18	1	13.28	77.56

相比未斜槽电机,优化后的斜槽电机的平均转矩增加了2.04 N·m,约占未斜槽电机平均转矩的16.01%,但其转矩脉动系数相比优化前减小了23.63%。而当保持开通角和关断角不变,只采用转子斜槽结构时的电机平均转矩为13.28 N·m,比未斜槽电机转矩增加了4.24%,但其转矩脉动也增加了4.12%,可见小的斜槽角度对电机转矩特性的影响并不大。

5 结论

1)采用正交试验法设计试验方案,通过对试验结果进行极差分析,明确了开通角、关断角、斜槽角对平均转矩和转矩脉动系数的影响及其主次关系,得到了两者各自的优组合。

2)通过方差分析明确了开通角、关断角和斜槽角对平均转矩和转矩脉动系数的影响程度,结果表明:开通角对平均转矩影响显著,关断角对转矩脉动系数影响显著。

3)根据方差分析进行多目标优化,综合权衡后选定了优组合,并进行了三维有限元验证,结果表明:优化后电机的平均转矩增加了16.01%,但其转矩脉动减小了23.63%。

参考文献

[1] 张超,张舒辉,王琨,等. 新型有源升压功率变换器及其在开关磁阻电机中的转矩脉动抑制[J]. 电工技术学报, 2017,32(5):113-123.

[2] 孙佃升. 基于时变参数自抗扰的开关磁阻电机控制系统[J]. 电气传动,2018,48(1):19-22

[3] Muthulakshmi S,Dhanasekaran R. A New Front End Capacitive Converter Fed Switched Reluctance Motor for Torque Ripple

Minimization[J]. Circuits & Systems,2016,07(5):585-595.

[4] 马铭遥,余发,杨晴晴,等. 基于注入分段谐波电流抑制开关磁阻电机转矩脉动的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1):285-291.

[5] 张云,王知学,付东山,等. 关断角优化的开关磁阻电机高速控制[J]. 电气传动,2017,47(3):27-31.

[6] 朱龙,吕晓波,徐东杰,等. 基于差分进化算法的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 电气传动,2016,46(10):17-20.

[7] 张鑫,王秀和,杨玉波,等. 基于转子齿两侧开槽的开关磁阻电机振动抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1508-1515.

[8] 蔡燕,张东学. 开关磁阻电机新型转子齿形对转矩脉动抑制的仿真研究[J]. 电工技术学报,2015,30(S2):64-70.

[9] Castellini L, Lucidi S, Villani M. Design Optimization of Switched Reluctance Motor for Aerospace Application[C]//Electric Machines & Drives Conference. IEEE,2016:1678-1682.

[10] Zhang H, Zhang J, Gao R. Radial Force Reduction for Switched Reluctance Motor with Skewed Slot Structure Based on FEM[J]. Journal Ofentific & Industrial Research, 2010, 69(8):594-599.

[11] Mousavi-Aghdam S R, Feyzi M R, Ebrahimi Y. A New Switched Reluctance Motor Design to Reduce Torque Ripple Using Finite Element Fuzzy Optimization[J]. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, 2012, 8(1):91-96.

[12] Zhang J, Zhang H, Ding G, et al. Analysis of Skewed Angle Effects of Rotor in Switched Reluctance Motor on Electromagnetic Parameters Using FEM[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2012, 40(2):149-163.

[13] 邱莹,张海军,高瑞贞,等. 开关磁阻电机转子斜槽结构的分析与设计[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2014,31(2):98-100.

[14] Mousaviaghdam S R, Feyzi M R. A New Skewed-rotor-pole Switched Reluctance Motor Design [J]. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, 2014, 10(3):238-243 .

[15] Ishihara Y, Sugiura M, Ishikawa H, et al. Improving the Efficiency of Switched Reluctance Motors Using a Step-skewed Rotor [J]. Ieee Journal Industry Applications, 2015, 4(4):445-453.

[16] Marcsa D, Kuczmann M. Design and Control for Torque Ripple Reduction of a 3-phase Switched Reluctance Motor[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2017, 74(1):89-95.

[17] Jin M, Fei W, Shen J. Investigation of Axial Magnetic Force in Permanent Magnet Synchronous Machines with Rotor Step Skewing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11):19-27.

[18] Blum J, Merwerth J, Herzog H G. Investigation of the Segment Order in Step-skewed Synchronous Machines on Noise and Vibration[C]//Electric Drives Production Conference. IEEE,2014:1-6.

[19] 梁文毅,陆天雄,张翔. 基于分段斜槽技术的电机斜槽特性分析[J]. 电工技术学报,2011,26(11):135-140.

[20] 周俊杰,范承志,叶云岳,等. 基于斜磁极的盘式永磁电机齿槽转矩削弱方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2010,44(8):1548-1552.

收稿日期:2018-06-07
修改稿日期:2018-07-16