

基于新型定子极面结构的开关磁阻电机转矩脉动抑制研究^{*}

张向龙, 王 军, 杨燕翔, 范镇南, 刘占千
(西华大学 电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

摘 要: 为抑制开关磁阻电机(SRM)转矩脉动,提出了一种新型定子极面结构,将传统均匀气隙结构改成两段式的非均匀气隙结构。以一台 11 kW、1 000 r/min、12/8 极 SRM 为例,通过建立二维场路耦合时步有限元模型,对此类结构进行了验证与优化。结果表明:此类结构能够在保证电机效率基本不变的情况下,有效抑制转矩脉动,为进一步提升 SRM 的设计与运行水平,提供了有益的参考。

关键词: 开关磁阻电机;非均匀气隙;转矩脉动;定子极面

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0080-04

New Stator Pole Shape of Switched Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction^{*}

ZHANG Xianglong, WANG Jun, YANG Yanxiang, FAN Zhennan, LIU Zhanqian
(School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: In order to suppress the torque ripple in the switched reluctance motor, a new stator pole shape was proposed. It changed the traditional uniform air gap into non-uniform air gap of two sections. An 11 kW, 1 000 r/min, 12/8 SRM as the prototype, the structure was validated and optimized through establishing the two-dimensional field-circuit coupled time-stepping finite element model. The results showed that the structure could reduce the torque ripple effectively with ensuring the efficiency of the motor unchanged. A useful reference to promote the level of design and operation of switched reluctance motor was provided.

Key words: switched reluctance motor (SRM); non-uniform air gap; torque ripple; stator pole shape

0 引 言

作为一种新型调速驱动系统,开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)以其结构简单、起动转矩大、可靠性高等优点^[1-2],在煤炭、航空、石油等领域,具有广阔应用前景。但与此同时,由于其电磁结构尚不够成熟,致使其内部磁场分布不尽合理,进而对其运行控制品质产生了负面影响,以致其在实际运行中,常常面临转矩脉动过大的问题,对其进一步推广应用造成了极为不利的影响。因此,很有必要从其电磁结构优化设计入手,开展转矩脉动抑制的研究工作。

近年来,基于电机电磁结构优化来抑制 SRM 转矩脉动的研究越来越广泛。文献[3]通过在转子极身添加小孔来优化电机内部电磁场的分布,并且在定子磁极上添加楔形角,减小定转子接触时的转矩突变,从而减小转矩脉动。文献[4]通过在转子齿和轭中加入空气气隙,增大径向磁密,减小切向磁密,达到了减小转矩脉动的目的。文献[5]通过在转子齿一侧增加一个 V 型槽口,减小了边缘磁通的影响,有效抑制了转矩脉动。文献[6]采用整距绕组,通过改变定转子极端的形状,提高转矩曲线在上升阶段的斜率,取得了较为理想的转矩脉动抑制效果。但截至目前,通过优

^{*} 基金项目: 四川省教育厅重点科研项目(16ZA0155)

作者简介: 张向龙(1989—),男,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机结构优化。

化定子极面结构,改变气隙形状,进而优化磁场分布,抑制转矩脉动的研究工作,尚有待进一步开展。

为此,本文提出了一种 SRM 新型定子极面结构,通过构造不均匀气隙,在保证电机效率基本不变的前提下,实现对转矩脉动的有效抑制。

1 SRM 定子极面结构设计方案

根据电机电磁场与电机设计理论可知:单纯放大 SRM 气隙,虽然可以有效抑制其转矩脉动,但却会导致电机效率下降^[7-9]。为同时满足 SRM 转矩抑制与运行效率两方面的要求,本文通过改变其定子极面形状,将其气隙设计为两段式非均匀结构:前一部分沿着电机旋转方向气隙逐渐减小,后一部分气隙保持不变,即前一部分为非均匀气隙,后一部分为均匀气隙,如图 1 所示。图 1 中, d 表示非均匀气隙的偏心距离, W 表示定子极弧弧长, H 表示非均匀气隙极弧弧长。

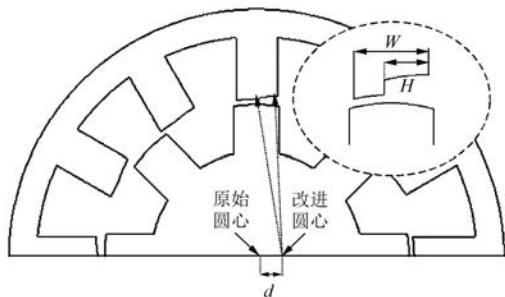


图 1 新型的定子极面结构

2 SRM 样机设计方案与场路耦合分析模型

2.1 样机设计方案

为验证上述结构对转矩脉动的抑制效果。以 1 台 11 kW、1 000 r/min、12/8 极 SRM 为例,建立其二维场路耦合时步有限元分析模型,分析其转矩状况。与此同时,为得出较优的两段气隙长度比例,对不同的两段气隙长度比对应的设计方案,进行了转矩状况对比分析。相关电机设计参数与结构方案如表 1、表 2 所示。

2.2 SRM 磁场数学模型

本文选取整个 SRM 的二维截面作为磁场求解区域,如图 2 所示。

表 1 样机的基本参数

基本参数名称	参数值
定子外径 D_s/mm	260
定子内径 D_{si}/mm	164
转子外径 D_r/mm	163
转子内径 D_{ri}/mm	108
定子极弧 $\beta_s/(\text{^\circ})$	15
转子极弧 $\beta_r/(\text{^\circ})$	16
铁心长度 L/mm	210
额定工作电压/V	520
开通角 $\theta_{on}/(\text{^\circ})$	0
关断角 $\theta_{off}/(\text{^\circ})$	15

表 2 结构设计方案

方案	H/W	d/mm
1	0	0~3.0
2	0.03~0.27	0~3.0

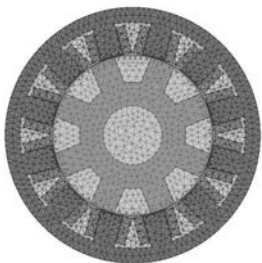


图 2 求解域与网格剖分

在求解区域内,忽略电机的涡流及端部效应,加入边界条件,则该电机在直角坐标系下的二维磁场边值问题可表述如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (1)$$
$$A_z|_{S_OUTER} = 0$$

式中: A_z ——矢量磁位的 z 轴分量;
 J_z ——绕组区域电流源密度;
 S_OUTER ——定子外径边界,满足第一类齐次边界条件。

为了研究此类结构 SRM 的稳态转矩特性,本文建立了三相绕组的控制电路,将外电路方程和磁场方程结合起来进行求解。控制电路采用三相不对称半桥拓扑结构,如图 3 所示。

根据图 3 可得,第 k 相绕组的电压平衡方程为

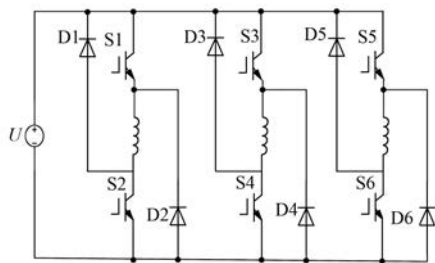


图3 控制电路

$$U = R_k i_k + \frac{d\Psi_k}{dt} \quad (2)$$

式中： U ——绕组端电压；

R_k 、 i_k ——绕组电阻和绕组电流；

Ψ_k ——相绕组磁链。

3 计算结果分析

定义转矩脉动系数 $k = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{av}}}$, $T_{\max}$ 为最大扭矩, $T_{\min}$ 为最小转矩, T_{av} 为平均转矩。相关结果如图4~图8所示。

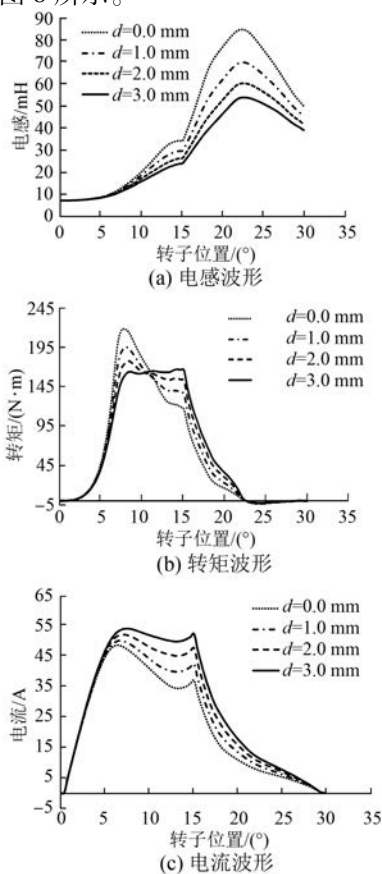
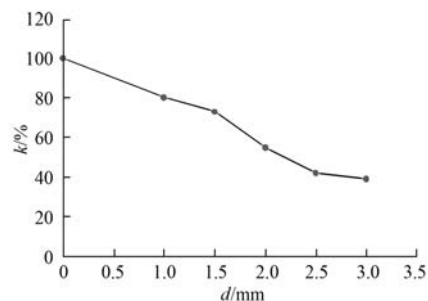
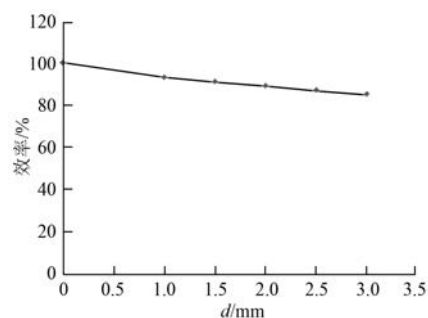
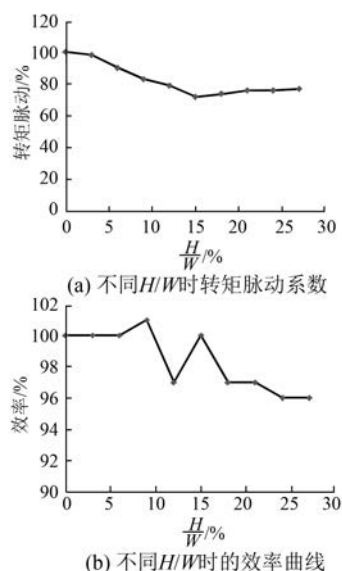
图4 不同 d 时的仿真结果

图4为 $H/W=0$, $d=0\sim 3.0$ mm 时单相电感、电流、转矩的波形曲线。由图4(b)可见,随着 d 的增加,转矩波形逐渐接近平顶波。当 $d=3.0$ mm 时,可以得到最优的转矩波形。转矩脉动系数曲线如图5所示。但另一方面,由图4(c)可见,随着 d 的增加,相应的相电流也会逐渐增大,将会导致电机效率下降。不同 d 时,电机的效率曲线如图6所示。

图5 不同 d 时转矩脉动系数图6 不同 d 时的效率曲线

上述结果表明,仅通过偏移定子极弧的圆心,使气隙沿着电机旋转方向逐渐减小,虽然可以获得较为理想的脉动抑制效果,但与此同时仍会导致电机效率的下降。因此,在方案1的基础上,将其改进为两段式的气隙结构,前半部分为非均匀气隙结构,后半部分为均匀气隙结构,即方案2。

由于气隙的增大会导致电机效率的下降,因此非均匀气隙部分应选取较小的偏心距离 d 。本文在方案2中选取 $d=1.0$ mm,对不同的 H/W 取值进行了二维有限元分析,如图7所示。由图7(a)可见,随着 H/W 的增大,转矩脉动先减小,然后逐渐变大,在 $H/W=15\%$ 时,可以获得最小的转矩脉动。由图7(b)可见,当 H/W 较小时,对效率影响很小,当 H/W 大于 15% 以后,随着 H

图7 不同 H/W 时的仿真结果

的增大,电机效率将会逐渐减小。因此当 $H/W=15\%$ 时,既可以保证电机效率基本不变,又能有效地抑制转矩脉动。

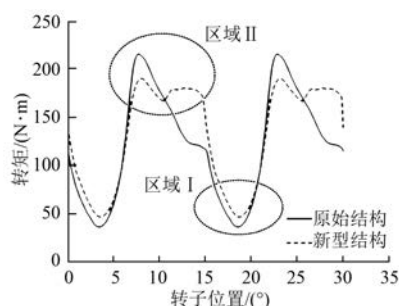


图8 原始结构与新型结构的转矩对比

图8为当 $H/W=15\%$ 时,原始结构和新型结构合成转矩的对比。一方面,在区域 I 中,新型结构提高了相邻两相转矩交叉点,起到了“填谷”的效应。另一方面,在区域 II 中,转矩波形得到了有效改善,接近于平顶波,起到了“削峰”的效应。相比于原始结构,该结构的转矩脉动下降了30%,对于转矩脉动的抑制起到了较好的作用。

4 结 语

本文提出了一种新型的定子极面结构,使气隙分为非均匀和均匀两个部分,通过有限元仿真分析,得到了最优的结构参数。该结构在保证电机效率基本不变的情况下,可以有效地抑制转矩脉动,对于 SRM 结构的优化具有较高的借鉴价值。

【参考文献】

- [1] 郑泽东,李永东.永磁同步电机控制系统综述[J].伺服控制,2011,12(4): 21-23.
- [2] 吴建华.开关磁阻电机设计及应用[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 王勉华,张朴.基于有限元法的开关磁阻电机结构优化[J].电机控制与应用,2015,42(4): 27-29.
- [4] HUR J, KANG G H. Design and optimization of high torque, low ripple switched reluctance motor with flux barrier for direct drive [C] // IEEE Proceedings: Industry Application Conference, 2004: 407.
- [5] JIN W L, HONG S K. New rotor shape design for minimum torque ripple of SRM using FEM[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 754-757.
- [6] GARIP M, OZOGLU Y. An approach torque ripple reduction in fully pitched switched reluctance motors by pole tip shaping [C] // IEEE Proceedings: Electrotechnical Conference, 2002: 157-161.
- [7] 张京军,张海军,王利利.开关磁阻电机非线性特性的有限元计算[J].电机与控制应用,2007,34(9): 31-34.
- [8] 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.
- [9] 宋受俊,葛乐飞,张蔓.开关磁阻电机多目标协同优化设计[J].电机与控制学报,2015,19(1): 68-75.

收稿日期: 2016 -08 -15

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态