

一种混合励磁开关磁通永磁记忆电机设计与调磁性能分析*

姜春辉¹, 田玉冬^{1,2}

(1. 上海电机学院, 上海 201306; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 设计了一种混合励磁开关磁通永磁记忆电机, 利用 Ansoft Maxwell 2D 仿真软件建立了其电机模型, 分析了其电机运行原理。采用有限元分析方法, 对电机的调磁特性进行了探究, 给出了铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时的磁力线分布、相磁链曲线、反电动势曲线、磁通密度分布曲线和转矩波形曲线。仿真结果表明, 该电机相较于常规永磁同步电机具有良好的调磁性能。

关键词: 混合励磁; 开关磁通; 永磁记忆电机; 调磁

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0070-07

Design and Flux-Adjusting Performance Analysis of Switched Flux Hybrid Magnet Memory Motor*

JIANG Chunhui¹, TIAN Yudong^{1,2}

(1. Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200340, China)

Abstract: A switched flux hybrid magnet memory motor was designed. The simulation model was established in Ansoft Maxwell 2D software. The operation principle of the motor was analyzed. The flux adjusting of the motor was researched by using the finite element analysis method. The motor's flux_lines, fluxlinkage of winding A, reverse electromotive force curves, magnetic flux density curves and torque waveform curves under different magnetizing state of AlNiCo PMs were given. The simulation results showed that compared with the traditional permanent magnet synchronous moto, the motor had good flux adjusting ability.

Key words: hybrid magnet; switched flux machine; memory motor; flux adjusting

0 引言

近年来, 由于世界范围内对环境保护、节能减排的需求, 电动汽车受到越来越多研究学者的关注。在电动汽车中, 其电动机要求具有较高的转矩密度和效率, 较好的过载能力及较宽的调速范围。在现有电动机中, 永磁同步电机几乎可以满足以上所有要求。但是, 由于电动汽车电动机严格的运行温度要求, 传统永磁同步电机永磁体的不可逆退磁成为一个急需解决的问题。在传统永

磁同步电机中, 永磁体通常被安装在转子上, 为了防止高速运行时离心力对磁钢的影响, 通常在永磁体上装有不锈钢或非金属纤维材料制成的固定装置, 就会造成散热困难, 同时, 电机气隙对转子部分直接散发的热量具有热隔离作用, 导致永磁体的热条件恶化, 而温升最终会导致永磁体的不可逆退磁。

与传统永磁电机相比, 开关磁通永磁电机 (Switched Flux Permanent Magnet Motor, SFPMM) 可以有效解决上述问题。这种电机将永磁体安装

* 基金项目: 上海市产学研合作基金项目 (2015CXY44)

作者简介: 姜春辉 (1991—) 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机设计。

田玉冬 (1968—) 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂工业系统控制、电机设计和控制。

在定子上,其永磁体上产生的热可以通过安装在定子上的冷却管道散发,保证永磁体具有较好的散热条件。同时,该电机还具有正弦对称的反电动势,较高的转矩密度和功率密度等特点,适用于电动汽车用电动机。文献[1]以一台应用于电动汽车的 12/10 极 SFPMM 为例,研究了该电机电磁转矩、齿槽转矩、转矩波动的特点,利用有限元的方法,分析了采用不同定转子极性配合时电机转矩性能的差异,并将该电机与传统永磁同步电机进行比较,论证了 SFPMM 在输出转矩方面的优势。文献[2]设计了一种 E 型铁心 SFPMM,通过建立该电机的解析模型,计算了其绕组磁链、电动势和电磁转矩,分析了不同定转子极数组合对绕组电动势和齿槽转矩的影响,得到了合适的极数组合。文献[3]设计了一种外转子 SFPMM,并分析了其相比于内转子 SFPMM 的显著优势,以一台 6/22 极电机为例,给出了该类型电机的工作原理,并计算了该电机的相关性能参数。

但是,尽管 SFPMM 具有诸多优点,在其进行弱磁操作时,仍需要施加持续的直轴去磁电流,这会产生额外的铜耗,降低电机运行的效率。另一方面,可变磁通永磁记忆电机 (Variable Flux Permanent Magnet Memory Motor, VFMM) 由于采用直轴电流脉冲改变永磁体的磁化水平,在弱磁时不会产生持续的铜耗,受到越来越多研究学者的关注。文献[4]介绍了记忆电机的结构特征,其定子结构与传统永磁同步电机相同,转子永磁体采用具有低矫顽力和高剩磁密度的铝镍钴永磁材料,其形状为近似梯形。这种电机在弱磁运行时,在定子绕组施加一个直轴电流脉冲,改变永磁体的磁化水平,并将这个时刻的工作点记忆下来。相比传统永磁电机,该电机能在有效调节励磁的同时保持较高的功率密度。文献[5]给出了设计记忆电机需注意的一些要点,计算了该电机永磁体所允许的有效径向长度。文献[6]提出了一种混合励磁永磁记忆电机,其永磁体由近似梯形的铝镍钴永磁体和矩形的钕铁硼永磁体两部分构成,转子结构由永磁体、非磁性夹层和铁心交替排列而成。文献研究了电机工作在不同磁化水平下永磁体的静态特性,计算了不同永磁磁化状态下的气隙磁密、永磁磁链、反电动势及每极气隙磁通等电机主要参数。

本文将记忆电机的概念融入到 SEPMM 中,设计了一台混合励磁开关磁通永磁记忆电机 (Switched Flux Hybrid Magnet Memory Motor, SFHMMM), 分析了其工作原理^[7-9]。在 Ansoft Maxwell 2D 仿真软件下建立了仿真模型,给出了永磁体在不同磁化状态下的磁力线分布、相磁链曲线、反电动势曲线、气隙磁密曲线,分析了所设计电机的性能特点,论证了该电机在永磁电机弱磁增速领域的优点。

1 电机拓扑及工作原理分析

1.1 电机基本结构

本文所设计的 SFHMMM 采用 6/5 极结构,图 1 为电机截面结构图,其定转子均采用凸极齿槽结构,转子部分与开关磁阻电机较为相似,上面并未安装永磁体和线圈绕组。定子部分采用 U 型硅钢片叠压而成,相邻两个 U 型硅钢片之间镶嵌有切向充磁的钕铁硼永磁体,在 U 型硅钢片末端装设径向充磁的铝镍钴永磁体,铝镍钴永磁体外侧装有定子轭环。定子电枢绕组缠绕在相邻两个 U 型硅钢片的齿上。由于本文所设计的电机永磁磁路和电枢反应磁路不同,不能通过直轴电枢电流调节铝镍钴永磁体的磁化水平,因此在铝镍钴永磁体上装设专门的调磁线圈,通过调磁线圈施加电流可改变铝镍钴永磁体的磁化水平和极性。表 1 列出了仿真电机的相关结构及电气参数。

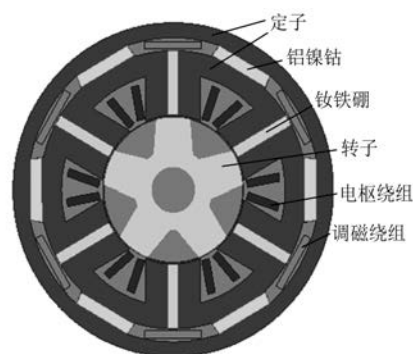


图 1 电机截面结构图

1.2 电机运行原理

本文所设计的 SFHMMM 转子部分与开关磁阻电机非常相似,其转矩与开关磁阻电机一样具有磁阻性质。电机运行时,产生的磁通总是沿

表 1 仿真电机的相关结构及电气参数表

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子极数	6	转子极数	5
定子外径/mm	90	定子内径/mm	40
电机轴长/mm	60	气隙长度/mm	0.5
定子极角度/(°)	45	转子极角度/(°)	29
定子轭环厚度/mm	5	每槽导体数	60
钕铁硼永磁体厚度/mm	3	钕铁硼永磁体长度/mm	17
铝镍钴永磁体厚度/mm	2.5	铝镍钴永磁体长度/mm	16
铝镍钴 B_r /T	1.05	铝镍钴 $H_c/(kA \cdot m^{-1})$	110
钕铁硼 B_r /T	1.2	钕铁硼 $H_c/(kA \cdot m^{-1})$	988
额定功率/kW	3	额定电压/V	380
额定转速/(r · min ⁻¹)	1 500	工作温度/°C	75

着磁阻最小的路径闭合,磁路中磁场发生扭曲的部分将会产生切向磁场力,形成电磁转矩。

本文所设计电机的一个定转子齿单元如图 2 所示。假设相邻两个转子极的中性线分别与一个定子硅钢片的左右两个铁心的中性线重合。当转子从一个位置移动到另一个位置时,电枢绕组里匝链的磁通在数量上保持不变,但方向反向,这就是开关磁通电机的一个磁通切换过程。本文所设计的 SFHMMM 每相永磁磁链为双极性,其每相永磁磁链及相应的反电势波形在一个转子极距内接近正弦分布,可采用正弦波电流供电运行。

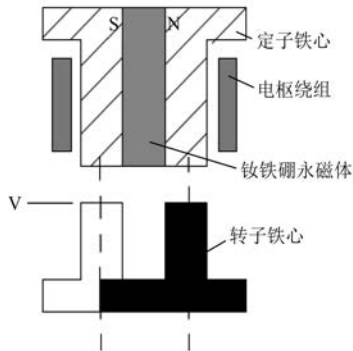


图 2 定转子齿单元结构示意图

本文所设计电机的简化永磁磁路模型如图 3 所示。图 3 中, F_{nfb} 和 F_{lcf} 分别为钕铁硼永磁体和铝镍钴永磁体产生的磁动势, Λ_{nfb} 和 Λ_{lcf} 分别为钕铁硼永磁体和铝镍钴永磁体所在定子磁通回路的磁导, Λ_g 和 Λ_r 分别为气隙磁通回路和转子磁通回路的磁导。由图 3 可知,钕铁硼和铝镍钴两种

永磁体磁路并联连接,因此研究两者之间的耦合效应是一个非常重要的问题。为了减少漏磁通,使两种永磁体都运行在较高的工作点,需要谨慎选择永磁体的厚度和长度。

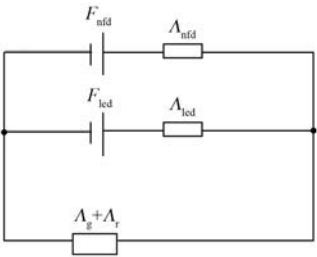


图 3 电机简化永磁磁路模型

1.3 电机数学模型

电机电周期频率和电角速度满足式(1)。

$$\omega = 2\pi f = p_r \Omega \tag{1}$$

- 式中: ω ——电角速度;
 f ——电周期频率;
 p_r ——转子极数,本文中取 5;
 Ω ——机械角速度。

忽略永磁体损耗、磁滞损耗和涡流损耗,忽略饱和。电机的电压方程为

$$U = Ri + \Omega \left(\frac{d\psi_{PM}}{d\theta} + \frac{d\psi_L}{d\theta} \right) \tag{2}$$

- 式中: U ——相电压列向量;
 R ——绕组电阻矩阵;
 i ——相电流列向量;
 θ ——转子位置角;
 ψ_{PM}, ψ_L ——永磁体磁链列向量和电枢磁链列向量。

$$\begin{cases} U = [U_a U_b U_c]^T \\ R = \text{diag}[R_a R_b R_c] \\ i = [i_a i_b i_c]^T \\ \psi_{PM} = [\psi_{PMa} \psi_{PMb} \psi_{PMc}]^T \\ \psi_L = [\psi_{La} \psi_{Lb} \psi_{Lc}]^T \end{cases} \tag{3}$$

其中,永磁体磁链 ψ_{PM} 为转子位置角 θ 的函数,即

$$\psi_{PMk} = \psi_k(\theta), k = a, b, c \tag{4}$$

电枢磁链 ψ_L 为相电流 i 和转子位置角 θ 的函数,即

$$\psi_{Lk} = \psi_k(i_a i_b i_c \theta), k = a, b, c \tag{5}$$

因此,电枢磁链 ψ_{Lk} 可表示为

$$\psi_{Lk} = Li_k \tag{6}$$

式中: L ——绕组电感矩阵。

$$L = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(7)代入式(2),可得到以相电流 i 为状态变量的电压方程:

$$\frac{di}{dt} = L^{-1} \left[U - Ri - \Omega \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} i + \frac{\partial \psi_{PM}}{\partial \theta} \right) \right] \quad (8)$$

1.4 电机调磁特性

本文所设计的 SFHMM 调磁绕组产生的磁通主要沿两条路径闭合,如图 4 所示。其中较长的一条穿过气隙两次(回路 1),较短的一条通过在钕铁硼永磁体后侧专门设计的磁桥闭合(回路 2)。假如没有设计磁桥,磁化电流产生的磁通只能通过回路 1 闭合,由于气隙和处于较为饱和状态的定子齿磁导率较小,回路 1 的总磁导较小,进行调磁操作时就需要施加较大的调磁电流。为了减小调磁时必须的调磁电流,需要通过设置专门的磁桥来建立如回路 2 所示的短磁通回路,以增大调磁磁通回路的总磁导。但是回路 2 同时也会增加漏磁通,减小相磁链,因此,在磁路设计中优化设计磁桥的宽度极为重要。

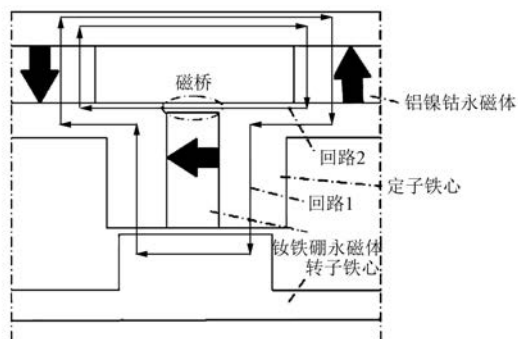


图 4 电机调磁磁通回路模型

为了减小调磁电流,调磁电流脉冲必须在定子极和转子极对齐时施加,如图 4 所示。对于定子极数为 6 的电机,每隔 60° 电角度就会有一个转子极与一个定子极对齐,因此,在一个完整的调磁过程中需要施加 6 个去磁电流脉冲。

2 有限元分析

本文采用 Ansoft Maxwell 2D 仿真软件对电机进行有限元分析。在有限元剖分时,对于不同转

子位置,模型的剖分网格保持不变。电机仿真模型的剖分图如图 5 所示。



图 5 电机有限元剖分图

2.1 电机调磁特性有限元分析

图 6 为铝镍钴永磁体处于不同磁化状态下 SFHMM 的空载磁力线分布图,图 6 中箭头表示各永磁体的充磁方向。

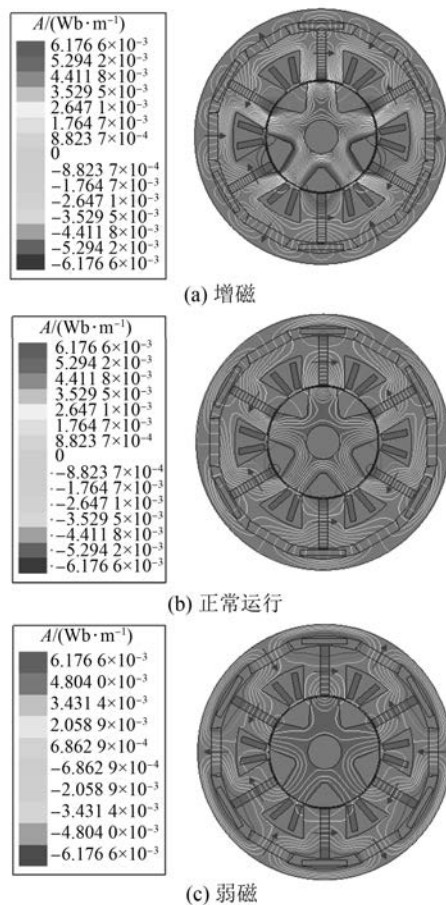


图 6 铝镍钴永磁体不同磁化状态下电机磁力线分布图

由图 6 可知,通过施加不同的调磁电流来改变铝镍钴永磁体的磁化状态,可以增强或减弱钕

铁硼永磁体永磁体产生的磁场,有效地进行调磁。当电机处于增磁状态时[如图6(a)所示],铝镍钴永磁体产生正的磁链以增强永磁体产生的磁场,此时电机磁通主要集中在主极部分,定子外部轭环上磁通较小,电机定转子极及气隙部分磁密较大。当铝镍钴永磁体处于非磁化状态时[对应图6(b)所示的正常运行状态],会有少部分的漏磁通穿过铝镍钴永磁体并通过定子轭环形成回路,此时主极磁通较增磁时较小。当电机处于弱磁状

态时[如图6(c)所示],钕铁硼永磁体永磁体产生的大部分磁通经过铝镍钴永磁体与定子轭环短路,此时主极磁通较小。需要指出,当电机增磁运行时,电机增磁过程趋于非线性,使得增磁操作相较于弱磁操作要困难得多。

2.2 相磁链和反电动势曲线分析

图7为电机正常运行时(铝镍钴永磁体处于非磁化状态,电机转速为1 500 r/min)的三相磁链曲线和三相反电动势曲线。

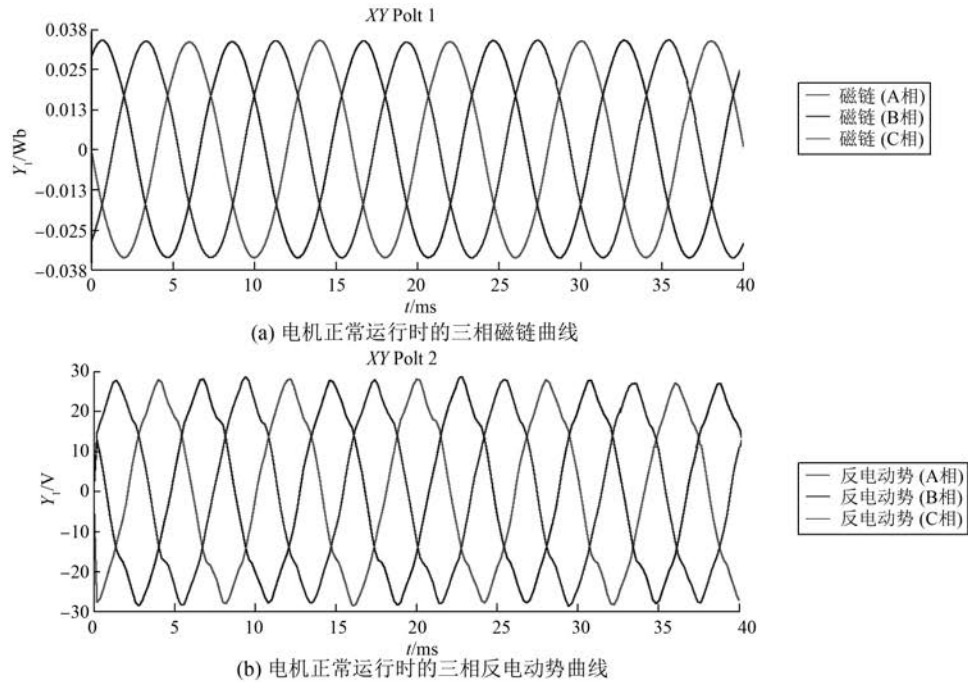


图7 电机三相磁链及反电动势曲线

由图7可知,本文所设计的SFHMMM正常运行时相磁链和反电动势的谐波分量较少,具有较好的正弦性。

图8为铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时电机的单相磁链和反电动势曲线。

由图8可知,通过在调磁线圈施加不同的调磁电流,改变铝镍钴永磁体的极性,可以有效地调节电机的单相磁链和反电动势的幅值,且在调磁过程中,单相磁链与反电动势曲线始终保持较好的正弦性。

2.3 气隙磁密分布分析

图9为铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时电机的气隙磁通密度分布曲线。表2记录了铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时电机的平均气隙磁密。

表2 铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时电机的平均气隙磁密

磁化状态	增磁	正常运行	弱磁
平均气隙磁密/T	0.743 3	0.629 8	0.495 6

由图9中波形曲线和表2中数据可知,通过施加调磁电流改变铝镍钴永磁体的极性,电机气隙磁密会发生显著变化,进一步说明本文所设计的电机具有良好的调磁性能。

2.4 电机转矩分析

图10为铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时电机的转矩波形。

由图10可知,当铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时,电机的转矩也发生显著变化。但观察其数值可知,与常规永磁同步电机相比,本文所设计

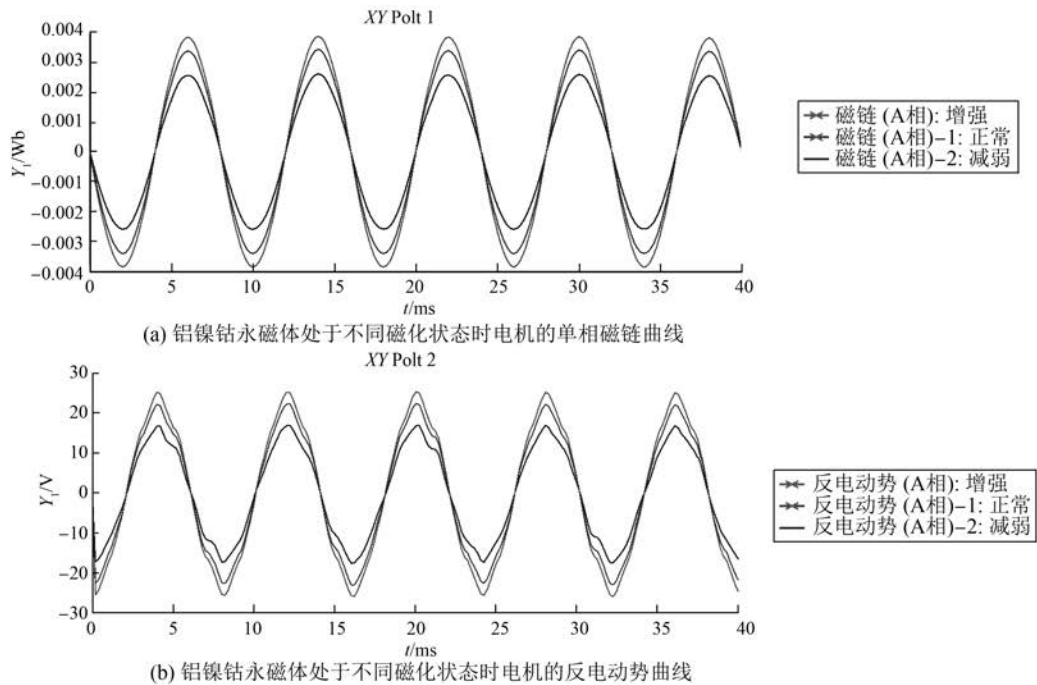


图8 铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时电机的单相磁链和反电动势曲线

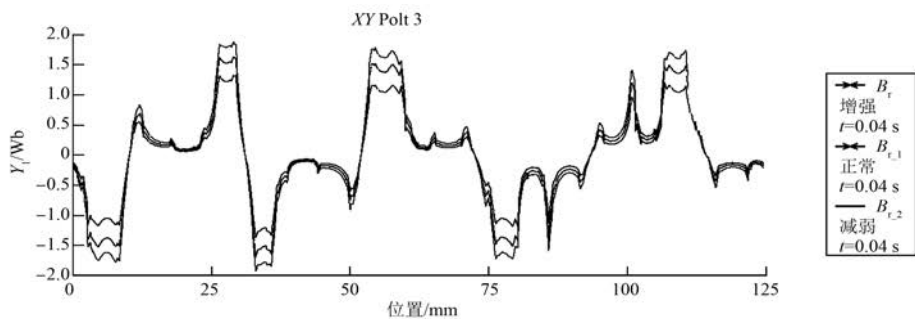


图9 铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时电机的气隙磁通密度分布曲线

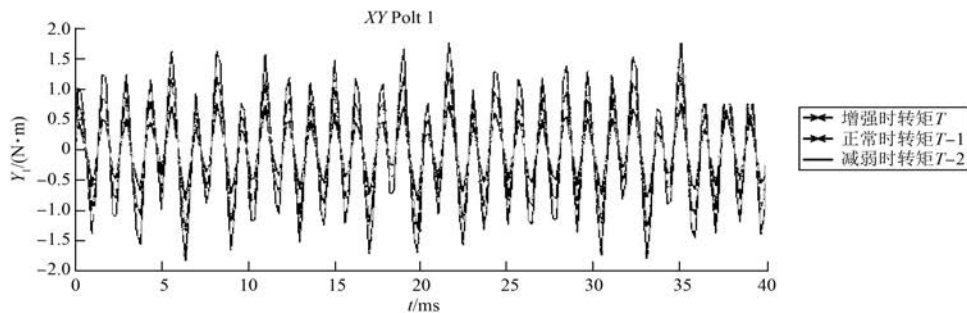


图10 铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时电机的转矩波形

的SFHMMM 转矩明显偏小。

根据电机设计的基本理论,任意电机的平均转矩均可用式(9)表示。

$$T \propto C_{AB} l_{ef} D_0^2 \lambda^2 \tag{9}$$

式中: C_{AB} ——与电磁负荷有关的常数;
 l_{ef} ——电机轴长;

D_0 ——电机外径;

λ ——电机裂比,表征定子内外径之比。

由式(9)可知,如果 2 台电机的几何尺寸相似,即有相似的轴长和外径,同时电磁负荷相近,则其转矩主要取决于裂比 λ 。对于本文所设计的 SFHMMM,由于其两种永磁体都设置在定子上,并且外部还装设了用以固定铝镍钴永磁体的轭环,使得电机裂比 λ 大大减小,从而限制了电机的转矩。这是本文所设计电机存在的不足之处。

3 结 语

本文设计了一种 SFHMMM,利用 Ansoft Maxwell 2D 仿真软件对该电机进行建模仿真,利用有限元的方法分析了该电机的性能,给出了铝镍钴永磁体处于不同磁化状态时的磁力线分布、相磁链曲线、反电动势曲线、磁通密度分布曲线和转矩波形曲线。仿真结果表明,本文所设计的 SFHMMM 具有良好的调磁性能,通过在调磁线圈施加不同的调磁电流脉冲,可以改变铝镍钴永磁体的磁化水平和极性,进而增强或减弱钕铁硼永磁体产生的主磁场。但是相较于常规永磁同步电机,本文所设计的电机由于将永磁体设置在定子上,减小了电机的裂比,导致转矩相应减小。这是本文所设计的 SFHMMM 有待改进的地方。

【参考文献】

- [1] 赵静,严雅霜,陈浩,等.转子齿形状对 10 极 12 槽开关磁通电机转矩特性的影响[J].电机与控制学

报,2016,20(3): 51-56.

- [2] 杨玉波,王宁,王秀和.E 型铁心开关磁通电机的电磁性能解析计算[J].电机与控制学报,2016,20(1): 67-72.
- [3] WU D, ZHU Z Q, LIU X. Novel external rotor switched flux memory motor with hybrid magnets[C] // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014: 3324-3300.
- [4] OSTOVIC V. Memory motors [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2003, 99(1): 52-61.
- [5] 孙建忠,白凤仙.新概念永磁电机—记忆电机的设计研究[J].大电机技术,2004(3): 9-12.
- [6] LIN H Y, LIU H C, HUANG Y K, et al. Characteristics analysis and experimental study of a hybrid permanent magnet variable flux memory motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(36): 71-76.
- [7] YANG H, LIN H, DONG J N, et al. Analysis of a novel switched-flux memory motor employing a time-divisional magnetization strategy [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 7021004.
- [8] GAUSSENS B, HOANG E, LECRIVAIN M, et al. A hybrid-excited flux-switching machine for high speed DC-alternator applications [J]. IEEE Trans Ind Electro, 2014, 61(6): 2976-2989.
- [9] ZJOU G, MIYAZAKI T, KAWAMATA S, et al. Development of variable magnetic flux motor suitable for electric vehicle [C] // Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, IEEE, 2010: 2171-2174.

收稿日期: 2016 -09 -19

(上接第 55 页)

【参考文献】

- [1] ZHU Y Y, WANG D F, ZHAO G F, et al. Research progress of switched reluctance motor drive system [C] // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2009: 784-789.
- [2] 李自强.开关磁阻电机的直接转矩控制研究[D].大连:大连海事大学,2011.
- [3] 尚万峰,赵升吨,申亚京.遗传优化的最小二乘支持向量机在开关磁阻电机建模中的应用[J].中国电机工程学报,2009,29(2): 65-69.
- [4] 项倩雯,孙玉坤,嵇小辅,等.一种开关磁阻电机模型参数的 LS-SVM 辨识方法[J].微电机,2013,46

(12): 30-34.

- [5] 余致廷.感应电机无速度传感器 DTC 参数辨识与控制方法的研究[D].长沙:湖南大学,2011.
- [6] 陈其工.一种新型的模糊神经网络电阻检测器[J].仪器仪表学报,1999(6): 589-592.
- [7] 李晓芳,李文,张继和.基于 BP 网络的感应电机定子电阻观测器[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(3): 25-28.
- [8] 吕伟杰,刘鲁源.小波网络在直接转矩控制定子电阻辨识中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(4): 116-119.
- [9] 刘国荣,周平.直接转矩控制中的定子电阻辨识方法研究[J].控制工程,2012,19(1): 41-43.
- [10] 刘天舒.BP 神经网络的改进研究及应用[D].哈尔滨:东北农业大学,2011.

收稿日期: 2016 -09 -20