

新型混合励磁磁悬浮开关磁阻电机基础研究^{*}

孙玉坤, 殷生晶, 袁 野, 荣 旺, 黄永红
(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 为了实现磁悬浮开关磁阻电机(BSRM)转矩和悬浮力的自然解耦,提出了一种新型混合励磁磁悬浮开关磁阻电机(HEBSRM)。新型 HEBSRM 由 12/14 极 BSRM、环形永磁体和径向磁轴承三部分组成。12/14 极 BSRM 的转矩极和悬浮极之间嵌有隔磁环,使转矩磁通路径完全独立于悬浮磁通路径,从而在结构上实现转矩与悬浮力解耦。此外,详细推导了电机径向悬浮力的数学模型,并且通过有限元分析验证了新型 HEBSRM 结构的合理性。

关键词: 磁悬浮开关磁阻电机; 永磁体; 解耦

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)10-0046-07

Basic Research on the Novel Hybrid Excitation Bearingless Switched Reluctance Motor^{*}

SUN Yukun, YIN Shengjing, YUAN Ye, RONG Wang, HUANG Yonghong
(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to realize the natural decoupling of the torque and suspending force of a bearingless switched reluctance motor (BSRM), a novel hybrid excitation bearingless switched reluctance motor (HEBSRM) was proposed. The new motor consists of a 12/14 BSRM, an annular permanent magnet and a radial magnetic bearing. The torque flux path was completely independent of the suspending force flux path, and the decoupling of torque and suspending force was realized in the structure. In addition, the mathematical model of the radial suspending force of the motor was deduced in detail and the rationality of the structure was verified by the finite element analysis.

Key words: bearingless switched reluctance motor (BSRM); permanent magnet (PM); decoupling

0 引 言

飞轮电池与蓄电池的有机结合可以满足电动汽车在高动力性能方面的要求,具有广阔的应用前景^[1-3]。由于飞轮电池内部的集成度较低及电机强耦合导致的较低可靠性严重阻碍了其发展与应用。因此,设计一种具有高速、高效率及高可靠性的飞轮电池尤为重要。

开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)是一种双凸极电机。其结构简单,转子上无绕组,定子上叠绕有集中绕组,具有良好的鲁棒性及耐高温能力等^[4-5]。磁悬浮开关磁阻电机

(Bearingless Switched Reluctance Motor, BSRM)不仅继承了 SRM 的优越性能,更充分发挥了磁轴承(Magnetic Bearing, MB)无摩擦、轴向利用率高的优点。

日本东京理工大学学者 M.Takemoto 在 20 世纪 90 年代首次提出了 12/8 极双绕组磁悬浮开关磁阻电机(Double Windings Bearingless Switched Reluctance Motor, DWBSRM)及其运行机理^[6-9]。文献[10]提出了一种新型 8/6 极单绕组磁悬浮开关磁阻电机(Single Winding Bearingless Switched Reluctance Motor, SWBSRM),在每 1 个换向周期内,给三相绕组通以不同的电流,从而分

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51707082, 51877101);江苏省自然科学基金项目(BK20170546)

作者简介: 孙玉坤(1958—),男,教授,博士生导师,研究方向为特种电机。

殷生晶(1993—),男,硕士研究生,研究方向为磁悬浮开关磁阻电机。

别产生不同方向的转矩和悬浮力。文献[11]提出了 12/8 极 SWBSRM, 电机结构与 12/8 极 DWBSRM 相同, 定子上只叠绕 1 套集中绕组, 通过控制绕组电流大小改变不同转子位置角下的磁拉力, 进而产生所需的转矩和悬浮力。基于已发表的文献可知, 以上电机的转矩和悬浮力存在强耦合问题, 不利于电机的高速旋转。

为了消除 BSRM 转矩和悬浮力的耦合, 文献[12-16]提出了一种新型混合定子极 BSRM。新型混合定子极 BSRM 定子的转矩极产生转矩, 悬浮极产生悬浮力。但是, 定子两极磁通的耦合仍然无法消除。因此, 本文提出了一种新型混合励磁磁悬浮开关磁阻电机 (Hybrid Excitation Bearingless Switched Reluctance Motor, HEBSRM), 详细介绍了其工作原理, 并推导了径向悬浮力的数学模型, 最终通过有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 验证了新型 HEBSRM 结构的合理性。

1 新型 HEBSRM

1.1 传统 12/8 极 BSRM

传统 12/8 极 BSRM 结构如图 1 所示。

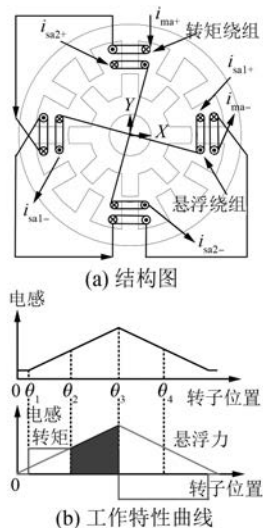


图 1 传统 12/8 极 BSRM 结构

由图 1 可知, SRM 有效转矩区间为电感的上半区域, 同时有效悬浮力区间为对齐区域, 所以转矩的有效区间为 $\theta_1 \sim \theta_3$, 悬浮力的有效区间为 $\theta_2 \sim \theta_4$, 因此转矩和悬浮力的重叠区间为 $\theta_2 \sim \theta_3$ 。电机在此区间的运行性能最佳, 如图 1 中的阴影部分所示。此部分可以同时产生转矩和悬浮力。

对于传统 12/8 极 BSRM, 一方面, 转矩和悬浮力不能够被充分利用, 必须通过增大绕组电流来实现电机的稳定悬浮与旋转, 会产生更多的热量和更大的损耗; 另一方面, 转矩与悬浮力之间的强耦合使得电机控制更为复杂。

1.2 新型 HEBSRM

图 2(a) 所示为本文提出的新型 HEBSRM 爆破图, 由 12/14 极 BSRM、环形永磁体和径向磁轴承 3 部分组成。图 2(b) 所示为电机正视图, 由转矩系统和悬浮 1 系统组成。图 2(c) 所示为电机后视图, 径向磁轴承由悬浮 2 系统构成。悬浮 1 系统和悬浮 2 系统分别产生 2 个径向自由度。环形永磁体采用轴向充磁, 提供产生悬浮力所需的偏置磁通。



图 2 新型 HEBSRM 结构图

图 3 所示为 12/14 极 BSRM 结构图。12/14 极 BSRM 有 2 种类型的定子极: 一种为转矩极, 如 $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4$, 其中 A 相绕组由 A_1, A_2, A_3, A_4 转矩极上的绕组串联而成, B 相绕组由 B_1, B_2, B_3, B_4 转矩极上的绕组串联而成。A 相、B 相绕组通以电流产生使电机旋转所需的转矩, 且磁通路径为转矩极 $\rightarrow$ 气隙 $\rightarrow$ 转子 $\rightarrow$ 气隙

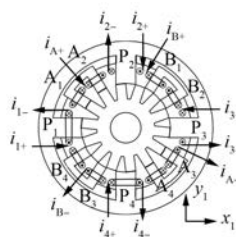


图 3 12/14 极 BSRM 结构图

→转矩极。另一种为悬浮极,如 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ,并通过非磁性材料与转矩极隔离。悬浮极 P_1 、 P_3 上的绕组产生 x_1 方向的悬浮磁通,悬浮极 P_2 、 P_4 上的绕组产生 y_1 方向的悬浮磁通,且磁通路径为悬浮极→气隙→转子→气隙→悬浮极。

图 4 所示为径向磁轴承结构图。径向磁轴承悬浮极 P_5 、 P_7 上的绕组产生 x_2 方向的悬浮磁通,悬浮极 P_6 、 P_8 上的绕组产生 y_2 方向的悬浮磁通,磁通路径为悬浮极→气隙→转子→气隙→悬浮极。

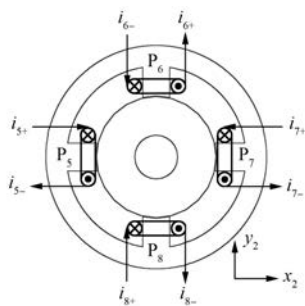


图 4 径向磁轴承结构图

图 5 所示为新型 HEBSRM 磁路图。环形永磁体轴向充磁,提供产生悬浮力所需的偏置磁通,且偏置磁通流经环形永磁体的 N 极→电机定子轭磁性材料→电机的悬浮极→气隙→电机的转子→转轴→磁轴承的转子→气隙→磁轴承的悬浮极→磁轴承定子轭磁性材料→永磁体的 S 极,所以偏置磁通为轴向磁通。当转子位置发生偏移时,悬浮 1 系统、悬浮 2 系统产生的悬浮磁通和永磁体产生的偏置磁通共同作用控制悬浮力的大小,从而使电机稳定悬浮。

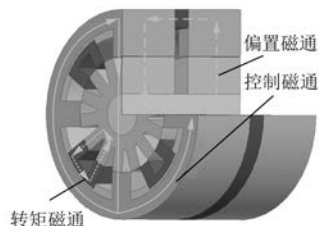


图 5 新型 HEBSRM 磁路图

2 数学模型

本文主要对新型 HEBSRM 的转矩和悬浮力进行分析。转矩系统和悬浮 2 系统的数学模型分别参考普通 SRM 和径向两自由度磁轴承的推导

过程。通过分析图 5 可知,悬浮磁通和偏置磁通的磁路可分别等效为图 6、图 7 所示的磁路图。

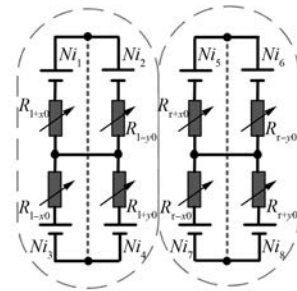


图 6 悬浮磁通磁路图

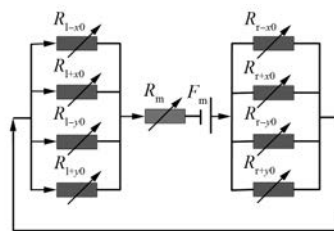


图 7 偏置磁通磁路图

图 6、图 7 中, R_m 为环形永磁体的磁阻, F_m 为环形永磁体的磁动势, N 为悬浮 1 系统每极的绕组匝数, i_1 、 i_3 和 i_2 、 i_4 分别为 x_1 和 y_1 方向的电流, i_5 、 i_7 和 i_6 、 i_8 分别为 x_2 和 y_2 方向的电流, Ni_1 、 Ni_3 和 Ni_2 、 Ni_4 分别为绕组在 x_1 和 y_1 方向的磁动势, Ni_5 、 Ni_7 和 Ni_6 、 Ni_8 分别为绕组在 x_2 和 y_2 方向的磁动势, R_{1-x0} 、 R_{1+x0} 、 R_{1-y0} 、 R_{1+y0} 为电机的气隙磁阻, R_{r-x0} 、 R_{r+x0} 、 R_{r-y0} 、 R_{r+y0} 为磁轴承的气隙磁阻。

电机稳定运行时,气隙 x_1 和 x_2 、 y_1 和 y_2 中的磁场分别产生幅值相等、方向相反的反电动势,从而感应电流为零。为方便公式推导,先作如下假设:(1)忽略铁心磁阻、漏磁;(2)铁心无磁饱和;(3)永磁体回复磁导率为 1;(4)以定子外圆和转子磁轭内圆为边界条件。根据悬浮绕组所在磁路的相似性,悬浮 1 系统等效磁路如图 8 所示。

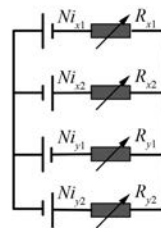


图 8 悬浮 1 系统等效磁路图

首先对永磁体进行分析。永磁体的磁阻 R_m 为

$$R_m = h_m / \mu_0 S \quad (1)$$

式中: h_m ——永磁体轴向充磁长度;

μ_0 ——真空磁导率;

S ——磁路的有效截面积。

$$S = (\theta_l / 360^\circ) \cdot 2\pi r L \quad (2)$$

式中: θ_l ——定子悬浮极的极弧角度。

环形永磁体的相对磁导率略大于 1, 可近似为 1, 则气隙 x_1, x_2, y_1, y_2 处的磁阻 $R_{m-x0}, R_{m+x0}, R_{m-y0}, R_{m+y0}$ 分别为

$$\begin{cases} R_{m-x0} = \frac{l - x_0}{\mu_0 S} \\ R_{m+x0} = \frac{l + x_0}{\mu_0 S} \\ R_{m-y0} = \frac{l - y_0}{\mu_0 S} \\ R_{m+y0} = \frac{l + y_0}{\mu_0 S} \end{cases} \quad (3)$$

式中: l ——气隙长度;

x_0, y_0 ——转子在 x, y 方向的偏心位移。

环形永磁体与外磁路等效时, 尽管磁动势对外磁路影响很大, 但由于本文忽略了漏磁且假设回复磁导率为 1, 所以将环形永磁体磁动势等效为恒定的磁通源^[17]。环形永磁体的虚拟内禀磁动势 $H_c = I_m / h_m$ 。根据假设(4), 回复线与退磁曲线重合, 因此 $H_c = B_r / \mu_0$, 可得:

$$I_m = \frac{B_r \cdot h_m}{\mu_0} \quad (4)$$

气隙处的磁通分别为

$$\begin{cases} \Phi_{x1} = \frac{N \cdot i_3 - I_m}{R_{m-x0} + R_m} = \frac{N \cdot i_3 - I_m}{\frac{l - x_0}{\mu_0 S} + h_m} = \frac{N \cdot i_{x1}}{R_{x1}} \\ \Phi_{x2} = \frac{N \cdot i_1 + I_m}{R_{m+x0} + R_m} = \frac{N \cdot i_1 + I_m}{\frac{l + x_0}{\mu_0 S} + h_m} = \frac{N \cdot i_{x2}}{R_{x2}} \\ \Phi_{y1} = \frac{N \cdot i_2 + I_m}{R_{m-y0} + R_m} = \frac{N \cdot i_2 + I_m}{\frac{l - y_0}{\mu_0 S} + h_m} = \frac{N \cdot i_{y1}}{R_{y1}} \\ \Phi_{y2} = \frac{N \cdot i_4 - I_m}{R_{m+y0} + R_m} = \frac{N \cdot i_4 - I_m}{\frac{l + y_0}{\mu_0 S} + h_m} = \frac{N \cdot i_{y2}}{R_{y2}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: N ——悬浮绕组匝数。

环形永磁体的磁动势可等效为悬浮极绕组中虚拟电流 I_m / N 产生的磁动势。此时, 绕组中电流分别为 $i_{x1}, i_{x2}, i_{y1}, i_{y2}$, 平均气隙长度分别为 $l - x_0, l + x_0, l - y_0, l + y_0$, 故图 8 所示的磁路可化简为如图 9 所示的等效磁路图。

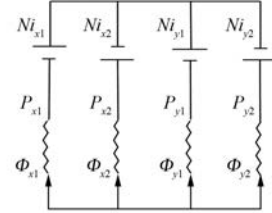


图 9 悬浮 1 系统等效磁路图

由于定子悬浮极与转子之间的对齐面积不随转子位置角的变化而变化, 所以悬浮极附近的气隙磁导可表示为

$$\begin{cases} P_{x1} = \frac{\mu_0 S}{l - x_0 + h_m} \\ P_{x2} = \frac{\mu_0 S}{l + x_0 + h_m} \\ P_{y1} = \frac{\mu_0 S}{l - y_0 + h_m} \\ P_{y2} = \frac{\mu_0 S}{l + y_0 + h_m} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{x1}, P_{x2}, P_{y1}, P_{y2}$ —— $+x, -x, +y, -y$ 方向的气隙磁导。

依据图 9 所示的等效磁路, 可获得各方向悬浮等效磁通的关系式:

$$\begin{cases} \frac{\Phi_{x2}}{P_{x2}} + N \cdot i_{x2} = \frac{\Phi_{x1}}{P_{x1}} - N \cdot i_{x1} \\ \frac{\Phi_{y1}}{P_{y1}} - N \cdot i_{y1} = \frac{\Phi_{x1}}{P_{x1}} - N \cdot i_{x1} \\ \frac{\Phi_{y2}}{P_{y2}} + N \cdot i_{y2} = \frac{\Phi_{x1}}{P_{x1}} - N \cdot i_{x1} \\ \Phi_{x1} + \Phi_{x2} + \Phi_{y1} + \Phi_{y2} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

可得气隙 x_1, x_2, y_1, y_2 处的磁通为

$$\begin{cases} \Phi_{x1} = N \frac{P_{x1}[(P - P_{x1})i_{x1} + P_{x2}i_{x2} - P_{y1}i_{y1} + P_{y2}i_{y2}]}{P} \\ \Phi_{x2} = -N \frac{P_{x2}[P_{x1}i_{x1} + (P - P_{x2})i_{x2} + P_{y1}i_{y1} - P_{y2}i_{y2}]}{P} \\ \Phi_{y1} = N \frac{P_{y1}[-P_{x1}i_{x1} + P_{x2}i_{x2} + (P - P_{y1})i_{y1} + P_{y2}i_{y2}]}{P} \\ \Phi_{y2} = -N \frac{P_{y2}[P_{x1}i_{x1} - P_{x2}i_{x2} + P_{y1}i_{y1} + (P - P_{y2})i_{y2}]}{P} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P ——悬浮极总气隙磁导, $P = P_{x1} + P_{x2} + P_{y1} + P_{y2}$ 。

由式(8)可得电感矩阵 $[L]$ 为

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{x1} & M_{(x1,x2)} & M_{(x1,y1)} & M_{(x1,y2)} \\ M_{(x2,x1)} & L_{x2} & M_{(x2,y1)} & M_{(x2,y2)} \\ M_{(y1,x1)} & M_{(y1,x2)} & L_{y1} & M_{(y1,y2)} \\ M_{(y2,x1)} & M_{(y2,x2)} & M_{(y2,y1)} & L_{y2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

悬浮子系统的磁贮能为

$$W_f = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{x1} & i_{x2} & i_{y1} & i_{y2} \end{bmatrix} [L] \begin{bmatrix} i_{x1} \\ i_{x2} \\ i_{y1} \\ i_{y2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

依据机电能量转换原理,悬浮子系统的磁贮能 W_f 对转子径向位移 x_0 求偏导可求得转子受到的径向悬浮力为

$$F_x = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{x1} & i_{x2} & i_{y1} & i_{y2} \end{bmatrix} \left[\frac{\partial L}{\partial x_0} \right] \begin{bmatrix} i_{x1} \\ i_{x2} \\ i_{y1} \\ i_{y2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (K_{x1}i_{x1}^2 + K_{x2}i_{x2}^2) + K_{x1y1}i_{x1}i_{y1} + K_{x1x2}i_{x1}i_{x2} + K_{x1y2}i_{x1}i_{y2} + K_{x2y1}i_{x2}i_{y1} + K_{x2y2}i_{x2}i_{y2} \quad (11)$$

3 性能分析

3.1 样机参数

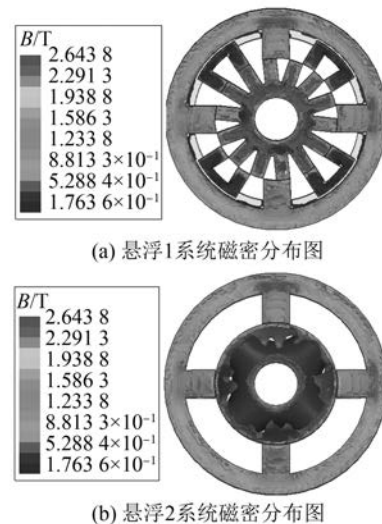
通过 Ansoft 仿真软件对本文提出的新型 HEBSRM 进行有限元仿真,从而分析新电机在转矩、悬浮力和耦合方面的性能。新型 HEBSRM 样机参数如表 1 所示。

表 1 新型 HEBSRM 样机参数

参数名称	参数值
转矩极弧/(°)	12.85
悬浮极弧/(°)	25.7
转子极距/(°)	12.85
轴向长度/mm	40
定子外径/mm	112
定子内径/mm	62
定子轭宽/mm	7.7
转子轭宽/mm	9.7
转轴直径/mm	18
永磁体充磁长度/mm	5
转矩绕组匝数	24
悬浮绕组匝数	36

3.2 悬浮特性

图 10 所示为定子转矩极绕组和悬浮极绕组不通电流情况下的磁密分布图。



(b) 悬浮2系统磁密分布图

图 10 磁密分布图

从图 10 中可以看出由永磁体产生的磁通均匀且对称地分布在悬浮 1 系统和悬浮 2 系统中。

图 11 所示为悬浮 1 系统的 P_2 极绕组通以电流 $i_2 = 2$ A 时的磁密分布图。

从图 11 中可以看出 y_1 正方向的磁密比 y_1 负方向和 x_1 方向的磁密大,所以在 y_1 正方向处产生相应的悬浮力,因此,通过改变悬浮 1 系统的 P_3 极绕组电流可以产生 x_1 方向的悬浮力。

图 12 所示为悬浮 2 系统中 P_6 极绕组通以电

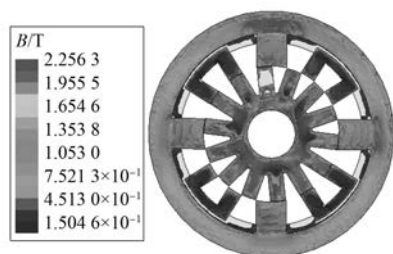


图 11 悬浮 1 系统磁密分布图

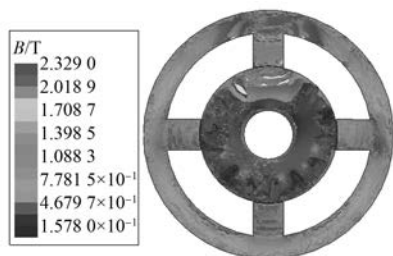


图 12 悬浮 2 系统磁密分布图

流 $i_6 = 2$ A 时的磁密分布图。

从图 12 中可以看出 y_2 正方向的磁密比 y_2 负方向和 x_2 方向的磁密大,所以在 y_2 正方向处产生相应的悬浮力。因此,通过改变悬浮 2 系统的 P_5 、 P_7 极绕组电流可以产生 x_2 方向的悬浮力。

综上所述,通过改变定子悬浮 1 系统和悬浮 2 系统的绕组电流大小,可以产生 4 自由度的径向悬浮力。

3.3 转矩特性

图 13 所示为转矩系统 B 相绕组通以电流 $i_B = 5$ A 时的磁密分布图。

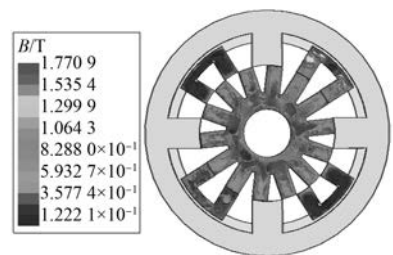


图 13 转矩系统磁密分布图

图 14 所示为转矩系统 A 相绕组通以电流 $i_A = 5$ A 时,转子旋转 25.7° 的转矩值,在转子对齐位置,转矩的大小几乎为零。

3.4 解耦特性

图 15 所示为只有转矩系统 A 相绕组通以电

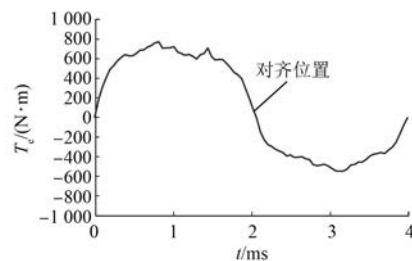


图 14 转矩大小

流 $i_A = 5$ A 时所产生的悬浮力大小。从图 15 中可以看出, x_1 、 x_2 、 y_1 、 y_2 方向悬浮力的最大值分别为 $-1\ 050$ 、 950 、 -20 、 -260 mN,都远小于电机稳定悬浮时的悬浮力,且悬浮力的平均值几乎为零。

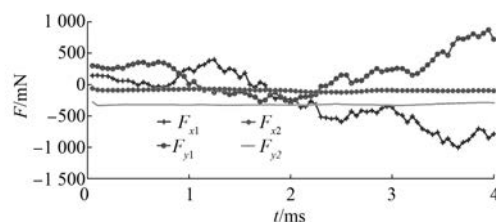


图 15 悬浮力大小

综上所述,新型 BSRM 在结构上实现了转矩和悬浮力的解耦。

4 结 语

本文提出了一种新型 HEBSRM,详细研究了悬浮特性、转矩特性及解耦特性。分析结果表明,本文所提新电机对比传统 BSRM 具有如下优点:

- (1) 新电机可以产生径向 4 自由度;
- (2) 新电机在结构上实现了转矩和悬浮力的解耦,提高了电机的综合性能。

【参考文献】

- [1] BITTERLY J G. Flywheel technology: past, present, and 21st century projections[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1998, 13(8): 13-16.
- [2] WEISSBACH R S, KARADY G G, FARMER R G. Dynamic voltage compensation on distribution feeders using flywheel energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 465-471.
- [3] YUAN Y, SUN Y, HUANG Y. Design and analysis of bearingless flywheel motor specially for flywheel energy storage[J]. Electronics Letters, 2015, 52(1): 66-68.

- [4] BILGIN B, EMADI A, KRISHNAMURTHY M. Design considerations for switched reluctance machines with a higher number of rotor poles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (10): 3745-3756.
- [5] YANG H Y, LIM Y C, KIM H C. Acoustic noise/vibration reduction of a single-phase SRM using skewed stator and rotor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4292-4300.
- [6] TAKEMOTO M, FUKAO T. A design and characteristics of switched reluctance type bearingless motors [C] // NASA Conference Publication, NASA, 1998: 49-66.
- [7] TAKEMOTO M, SUZUKI H, CHIBA A, et al. Improved analysis of a bearingless switched reluctance motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 26-34.
- [8] TAKEMOTO M, CHIBA A, AKAGI H, et al. Radial force and torque of a bearingless switched reluctance motor operating in a region of magnetic saturation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40 (1): 103-112.
- [9] TAKEMOTO M, CHIBA A, FUKAO T. A new control method of bearingless switched reluctance motors using square-wave currents [C] // Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 2000: 375-380.
- [10] CHEN L, HOFMANN W. Analytically computing winding currents to generate torque and levitation force of a new bearingless switched reluctance motor [C] // Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2006 12th International, IEEE, 2006: 1058-1063.
- [11] LIN F C, YANG S M. Self-bearing control of a switched reluctance motor using sinusoidal currents [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(6): 2518-2526.
- [12] WANG H, WANG Y, LIU X, et al. Design of novel bearingless switched reluctance motor [J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(2): 73.
- [13] XU Z, LEE D, ZHANG F, et al. Hybrid pole type bearingless switched reluctance motor with short flux path [C] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Yichang, 2011: 1-6.
- [14] XU Z, ZHANG F, AHN J. Design and analysis of a novel 12/14 hybrid pole type bearingless switched reluctance motor [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2012: 1922-1927.
- [15] PENG W, ZHANG F, AHN J. Design and control of a novel bearingless SRM with double stator [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2012: 1928-1933.
- [16] PENG W, LEE D, ZHAN F, et al. Design and characteristic analysis of a novel bearingless SRM with double stator [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011: 1-6.
- [17] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 38-43.

收稿日期: 2018-03-26

《电机与控制应用》杂志的读者包括电机与控制领域内从事科研、设计、生产的工程技术人员, 全国各大高等院校师生, 企业经营、管理、营销、采购人员, 各类产品代理分销渠道人员以及最终用户等, 遍及电力、石油、冶金、钢铁、交通、航

天、工控、医疗、机械、纺织、矿山等多个行业。

杂志读者群专业、稳定、层次高, 无论是交流前沿技术、实践经验, 还是传递行业信息, 开展企业及产品的广告宣传都能达到事半功倍的效果。