

# 单绕组无轴承永磁薄片电机短路容错运行

盛旺, 王晓琳, 邓智泉, 岳盛奏

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏省南京市 210016)

## Operation of Single Winding Bearingless PM Slice Motor at Short-circuit in Fault-tolerance

SHENG Wang, WANG Xiaolin, DENG Zhiquan, YUE Shengzou

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** There always exists a problem towards bearingless slice motor that the short-circuit of windings would lead to the motor's abnormal running. In order to solve the problem above, the short-circuit current of the fault winding was analyzed and a short-circuit fault-tolerance control strategy was presented based on the stator-current reconfiguration principle on a six-phase single-winding bearingless slice motor. In the strategy, levitation force compensation and torque compensation were added to the normal windings based on the mathematical model of motor's levitation force and torque, and a general stator-current mathematical model was put forward when each of the windings worked at short-circuit fault state. On the basis, the theory analysis and the stator-current mathematical model were verified by simulation and comparative analysis. Finally, by taking the experiment of the first phase working at short-circuit fault state for example, the validity of the fault-tolerance control strategy referred in the paper is fully proved.

**KEY WORDS:** bearingless; slice motor; single-winding; short-circuit; fault-tolerant control

**摘要:** 针对无轴承永磁薄片电机因相绕组出现短路故障, 导致电机无法正常工作的问题, 以六相单绕组无轴承永磁薄片电机为例, 具体分析了相绕组出现短路故障时的短路电流, 并提出基于定子电流重构原则的短路故障容错控制方法。该方法通过对非故障相定子电流加入悬浮力与转矩补偿, 满足了电机稳定运行所需的悬浮力与转矩, 并给出了各相绕组出现短路故障时的非故障相定子电流数学模型。在此基础上, 通过对理论短路电流与仿真短路电流的对比分析以及短路故障状态下的悬浮力、转矩脉动的分析, 验证了理论分析以及定子电流数学模型的正确性。最后, 以齿1相绕组端部短路为例, 通过实验验证了所提容错控制策略的正确性。

**关键词:** 无轴承; 薄片电机; 单绕组; 短路; 容错控制

## 0 引言

随着科学技术的发展, 电机在军事、民用的各个领域得到越来越广泛的应用。在航空航天等对连续运行有较高要求的领域, 电动装置的故障容错能力对保证系统安全非常关键, 因此, 电机的可靠性以及容错性能的研究成为一个重要课题。

无轴承永磁薄片电机是近年来兴起的一种新型磁悬浮电机。这种电机既具有无轴承永磁电机的轴向利用率高、结构简单、集成度高等特点<sup>[1-3]</sup>, 还具有可靠性高、漏磁系数小、成本低等优点。瑞士、奥地利、日本、美国以及我国的研究人员都在大力开展这项技术的研究和应用工作<sup>[4-6]</sup>。文献[7]首先提出了永磁容错(fault-tolerant permanent magnet, FTPM)电机的概念, 该电机采用集中式绕组结构, 实现了相与相之间电路、磁路以及温度的相对独立。文献[8]对永磁容错电机进行了深入研究, 并将其应用于飞机的机电作动系统。文献[9]利用有限元分析和线性分析法对单相开关磁阻发电机绕组开路 and 短路的故障进行研究, 提出一种基于新的功率变换器拓扑结构的容错方法。文献[10]从电机的损耗、控制复杂程度以及伏安要求等方面研究了各种多相无轴承电机在工业方面的应用前景, 但未涉及电机容错方面的研究。国内方面, 文献[11]提出一种新型定子永磁式容错电机结构——双凸极容错电机, 分析了电机在短路故障时的磁场特性, 验证了该电机的容错性能。文献[12]研究了无轴承薄片电机的悬浮机理, 设计了相应的矢量控制系统, 并实现了该电机的稳定悬浮运行。文献[13]依据故障前后磁动势相同的思路, 分析了六相无轴承电机和多相正弦、集中整距绕组电机定子缺相时的容错运

基金项目: 国家自然科学基金项目(50507008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50507008).

行策略。文献[14]研究了单绕组无轴承薄片电机的工作原理、控制策略以及数学模型,并实现了该电机缺一相容错运行。文献[15]在文献[14]的基础上总结了单绕组无轴承薄片电机的所有缺相故障状态,并实现了该电机缺两相容错运行。可以看出,已有文献对普通电机的容错运行有较深入的研究,但对于无轴承电机只分析了绕组缺相容错运行的情况,而对于绕组发生短路故障的情况研究还较少。

本文对六相单绕组无轴承永磁薄片电机的相绕组端部短路运行模式进行研究。首先,分析了相绕组出现短路故障时的短路电流,通过补偿悬浮力与转矩的方法对短路后的定子电流进行重构,给出了任意一相出现短路故障时的定子电流容错解耦控制模型。最后通过实验验证了该容错控制方案的正确性。

## 1 单绕组无轴承永磁薄片电机相绕组短路电流分析

单绕组无轴承永磁薄片电机的结构如图1所示。电机通过控制定子电流改变气隙磁场,以控制径向悬浮与转矩,当电机的某相绕组发生短路故障后,该相定子电流与电机正常工作时相比将发生变化且不可控。为了研究短路故障时的容错控制策略,本文根据短路相电压平衡式分析电机某相绕组发生短路时的短路电流。

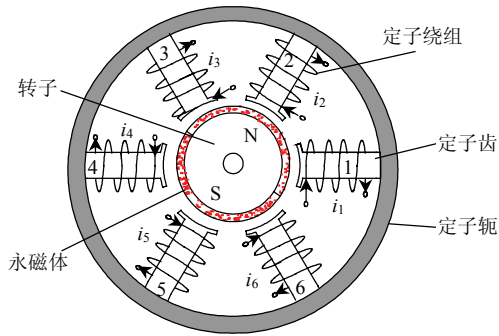


图1 单绕组无轴承永磁薄片电机基本结构图  
Fig. 1 Basic structure of single winding bearingless slice motor

电机的各定子绕组通入定子电流时,气隙中磁通密度的分布函数<sup>[15]</sup>为

$$B_g = \begin{cases} [W_1 i_n + a_{PM} \cos(\theta - \theta_r) - \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 i_n W_1] \frac{\mu_0}{l_{cg}}, \\ \quad -\frac{\alpha}{2} + \frac{2\pi(n-1)}{6} \leq \theta \leq \frac{\alpha}{2} + \frac{2\pi(n-1)}{6} \\ 0, \quad \frac{\alpha}{2} + \frac{2\pi(n-1)}{6} \leq \theta \text{ 或 } \theta \leq -\frac{\alpha}{2} + \frac{2\pi(n-1)}{6} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i_n$  为第  $n$  相电流,  $n=1,2,\dots,6$ ;  $\mu_0$  为空气相对磁导率;  $l_{cg}$  为气隙长度;  $\alpha$  为定子齿弧宽;  $W_1$  为线圈匝数;  $a_{PM}$  为磁势幅值;  $\theta_r$  为永磁体转子 N 极与定子齿 1 中心线的夹角;  $\theta$  为以定子齿 1 中心线为  $0^\circ$ , 沿圆周逆时针增加的定子机械角度。

短路相电压微分方程为

$$\frac{\partial \Psi_M}{\partial \theta_r} \omega + \frac{\partial \Psi_L}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial \theta_r} \omega + iR = 0 \quad (2)$$

式中:  $i$  为短路故障相定子短路电流;  $\Psi_M$  为短路齿极下气隙中永磁体以及其它非故障相定子电流产生的磁链总和;  $\Psi_L$  为短路故障相定子上短路电流在该极下产生的磁链;  $\omega$  为转子角速度;  $R$  为定子绕组线圈阻值。

根据磁链计算公式,可得第  $n$  齿短路时电机的  $\Psi_M$ 、 $\Psi_L$ :

$$\Psi_M = W_1 \int_{-\frac{\alpha}{2} + \frac{2\pi(n-1)}{6}}^{\frac{\alpha}{2} + \frac{2\pi(n-1)}{6}} [a_{PM} \cos(\theta - \theta_r) - \frac{1}{6} \sum_{m=1, m \neq n}^6 W_1 i_m] \cdot rh(\mu_0/l_{cg}) d\theta \quad (3)$$

$$\Psi_L = W_1 \int_{-\frac{\alpha}{2} + \frac{2\pi(n-1)}{6}}^{\frac{\alpha}{2} + \frac{2\pi(n-1)}{6}} \frac{5}{6} i W_1 rh \frac{\mu_0}{l_{cg}} d\theta \quad (4)$$

式中:  $h$  为永磁体厚度;  $r$  为永磁体半径。

定子电流产生的磁链与永磁磁链峰值之比为

$$\Psi_1 / \Psi_{PM} \leq \frac{1}{12} \alpha W_1 \sum_{m=1, m \neq n}^6 I_m / (a_{PM} \sin \frac{\alpha}{2}) \quad (5)$$

式中:  $\Psi_1$ 、 $\Psi_{PM}$  分别为定子电流和永磁产生的磁链大小;  $I_m$  为第  $m$  相定子电流峰值。在各相电流同相位时式(5)取等号。

由式(5)可以看出,一般情况下定子电流产生的磁链要远小于永磁磁链。如在本实验样机中,当非故障定子电流幅值均为 1 A(短路时定子电流亦小于此值,可参照文中实验数据)时,将各数据代入式(5)可得定子电流产生的磁链之和仅为永磁磁链的 10%。因此,为了方便计算,可记  $\Psi_M$  仅为永磁体在短路齿极下产生的磁链,得出第  $n$  齿短路时短路电流:

$$i = p_1 \cos[\theta_r - \frac{2\pi(n-1)}{6}] + p_2 \sin[\theta_r - \frac{2\pi(n-1)}{6}] + p_3 \{I_0 - p_1 \cos[\theta_0 - \frac{2\pi(n-1)}{6}] - p_2 \sin[\theta_0 - \frac{2\pi(n-1)}{6}]\} \quad (6)$$

式中:  $p_1$ 、 $p_2$  均为随  $\omega$  增大而增加的变量;  $p_3$  为随  $\theta_r$  增加而递减的变量(初值为 1)( $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  表达式见附录 A);  $\theta_0$  为电机初始位置角;  $I_0$  为短路前第  $n$  齿的电流值。

当不计定子电流产生的磁链时,可以得出短路电流由瞬态分量和稳态分量2部分组成,稳态短路电流为一正弦量,其大小随着电机转子角速度 $\omega$ 的增大而增加。

电机转速为800 r/min时,将该实验中原理样机的各参数代入式(6),可得当定子齿1发生短路故障时的理论短路电流的瞬态分量和稳态分量以及理论短路电流波形,如图2所示(设短路齿定子电流初始值 $I_0=0$  A,电机初始位置角为 $0^\circ$ )。

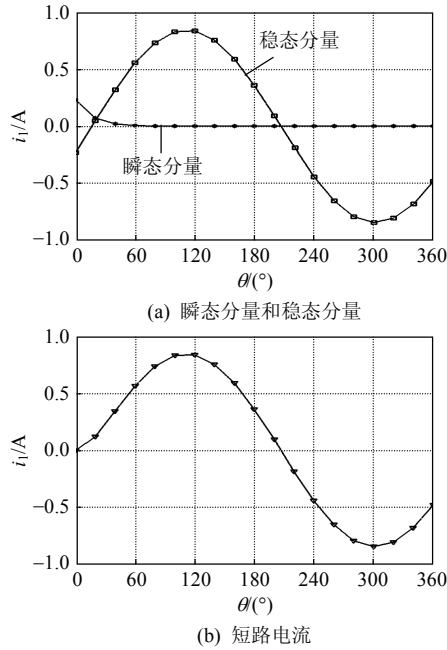


图2 短路电流瞬态分量、稳态分量及短路电流波形  
Fig.2 Short-circuit current and its two components

## 2 电机定子电流控制模型

对于单绕组无轴承永磁薄片电机,要使电机处于稳定悬浮运行状态,定子绕组上通入的电流必须能够提供电机稳定运行时所需要的悬浮力和转矩,即满足悬浮力和转矩表达式<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} F_x = \frac{k}{2}[(2i_1 - i_2 - i_3 + 2i_4 - i_5 - i_6)\cos\theta_r + \sqrt{3}(i_2 - i_3 + i_5 - i_6)\sin\theta_r] \\ F_y = \frac{k}{2}[\sqrt{3}(i_2 - i_3 + i_5 - i_6)\cos\theta_r + (-2i_1 + i_2 + i_3 - 2i_4 + i_5 + i_6)\sin\theta_r] \end{cases} \quad (7)$$

$$T = \frac{t}{2}[\sqrt{3}(i_2 + i_3 - i_5 - i_6)\cos\theta_r + (-2i_1 - i_2 + i_3 + 2i_4 + i_5 - i_6)\sin\theta_r] \quad (8)$$

式中: $F_x$ 、 $F_y$ 为电机转子 $x$ 和 $y$ 方向的悬浮力; $T$ 为转矩; $k$ 、 $t$ 为与电机各参数相关的系数(表达式见附录A)。

从控制角度出发,在已知给定悬浮力和转矩的前提下,利用式(7)和(8)以及附加条件可得到此时各相定子绕组电流的给定值;然而,当某相定子绕组发生短路故障时,该相定子绕组电流为一不可控量,如果非故障相定子电流沿用原有正常模式或断路模式下的给定电流,将无法提供电机稳定运行所需要的悬浮力和转矩。

由于单绕组无轴承永磁薄片电机各相定子电流可以独立控制,当出现短路故障时,其它相绕组仍然可以正常控制。因此,在满足所需悬浮力与转矩的条件下,对剩余非故障相定子电流进行重构控制,即可以实现该电机发生短路故障后的容错运行。

以定子齿1发生短路故障为例,此时其它五相定子电流产生的悬浮力和转矩表达式分别为

$$\begin{cases} F'_x = \frac{k}{2}[(-i_2 - i_3 + 2i_4 - i_5 - i_6)\cos\theta_r + \sqrt{3}(i_2 - i_3 + i_5 - i_6)\sin\theta_r] \\ F'_y = \frac{k}{2}[\sqrt{3}(i_2 - i_3 + i_5 - i_6)\cos\theta_r + (i_2 + i_3 - 2i_4 + i_5 + i_6)\sin\theta_r] \end{cases} \quad (9)$$

$$T' = \frac{t}{2}[\sqrt{3}(i_2 + i_3 - i_5 - i_6)\cos\theta_r + (-i_2 + i_3 + 2i_4 + i_5 - i_6)\sin\theta_r] \quad (10)$$

由式(9)可得到定子齿1短路时其它非故障相产生的悬浮力与实际所需悬浮力的关系:

$$F'_x = F_x - ki_1\cos\theta_r \quad (11)$$

$$F'_y = F_y + ki_1\sin\theta_r \quad (12)$$

式中 $i_1$ 为定子齿1上的短路电流。

按照文献[15]所述的齿1发生断路时的定子电流数学模型计算出齿4的电流 $i_4$ ,令齿4的电流变为 $i'_4 = i_4 - i_1$ ,便可以同时满足式(11)和(12)。对于转矩有:

$$T' = T + 2ti_1\sin\theta_r \quad (13)$$

由以上推导可知,当定子齿1发生短路时,只要将所需要的转矩加上补偿量 $2ti_1\sin\theta_r$ 得到 $T'$ ,根据所需悬浮力与 $T'$ ,按照定子齿1断路时的定子电流数学模型计算出其它五相电流<sup>[15]</sup>,并在此基础上通过改变定子齿4上的电流,添加悬浮力补偿,就可以使其它五相定子电流加上短路相电流共同产生的悬浮力与转矩满足所需的悬浮力与转矩。

同理,由式(14)可以得到第 $n$ 齿发生短路时需加入的转矩补偿:

$$T' = T + t(a_n i_n \sin\theta_r + b_n i_n \cos\theta_r) \quad (14)$$

式中当 $n$ 为1~6时, $(a_n, b_n)$ 分别为 $(2, 0)$ ,  $(1, -\sqrt{3})$ ,

$(-1, -\sqrt{3}), (-2, 0), (-1, \sqrt{3}), (1, \sqrt{3})$ 。

由文献[15]可知，功率最优约束下的各相定子电流表达式为

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{k}_m(\theta_r) \mathbf{Q} \quad (15)$$

$$\mathbf{k}_m(\theta_r) = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{M}^T (\mathbf{M} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{M}^T)^{-1} \quad (16)$$

式中： $\mathbf{Q} = [F_x, F_y, T]^T$ ； $\mathbf{R}$  为定子绕组上的电阻矩阵； $\mathbf{M}$  是与转子转角相关的矩阵。

当第  $n$  齿发生短路时，按照以上理论可以在第  $n$  齿发生断路时的数学模型基础上，计算各相定子电流，即令  $\mathbf{k}_m(\theta_r)$  中  $\mathbf{M}$  的第  $n$  列元素全为 0，即

$$\mathbf{k}_m(\theta_r) = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{M}^T (\mathbf{M} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{M}^T)^{-1} \quad (17)$$

式中  $\mathbf{M}' = \mathbf{M} \mathbf{A}_{6 \times 6}$ 。 $\mathbf{A}_{6 \times 6}$  为对角矩阵，对角上的元素为 0 或 1，该相定子绕组工作正常时相应的对角元素为 1，断路故障发生后相应的对角元素为 0。

各相定子电流表达式为

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{k}_m(\theta_r) \mathbf{Q}' \quad (18)$$

式中  $\mathbf{Q}' = [F_x, F_y, T]^T$ 。

在此基础上，将短路电流加入  $\mathbf{i}_s$ ，并在短路故障齿的相对齿上再加上反向的短路电流(短路电流由电流传感器实时测得)可以得到某相绕组发生短路时的各相定子电流数学模型，即

$$\mathbf{i}'_s = \mathbf{i}_s + [k_1 i_4, k_2 i_5, k_3 i_6, k_4 i_1, k_5 i_2, k_6 i_3]^T \quad (19)$$

式中：当任意齿发生短路故障时，该短路齿对应的系数  $k_n = 1$ ，相对齿对应的系数  $k_m = -1$ ，其它系数均为 0。例如齿 2 发生短路故障时，有  $k_2 = 1, k_5 = -1, k_1 = k_3 = k_4 = k_6 = 0$ 。

### 3 悬浮力及转矩补偿策略仿真验证

由以上分析可知，短路故障发生后通过对非故障相定子电流进行重构，可以实现电机的容错运行。本文以发生短路故障为例，利用 ANSYS 软件仿真验证该容错控制策略的可行性。

仿真步骤为：当定子齿 1 相绕组发生短路故障时，分析在未加入悬浮力、转矩补偿以及加入补偿后的电机定子绕组产生的悬浮力、转矩以及其脉动情况。

短路模式下的分析前提条件均为：给定  $F_x = 5 \text{ N}$ 、 $F_y = 5 \text{ N}$  以及  $T = 0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

当定子齿 1 相绕组发生短路故障时，齿 1 定子绕组上存在因交变的气隙磁场而形成的短路电流，该电流为不可控量。若其它五相定子电流仍沿用电机正常工作控制策略中的定子电流，电机产生的实际悬浮力与转矩如图 3 所示。由图可知，此时悬浮

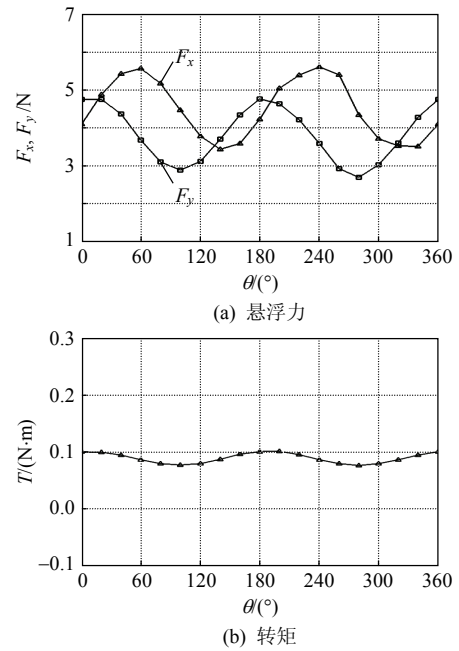


图 3 相绕组 1 短路故障模式下电机的悬浮力及转矩  
Fig. 3 Levitation force and torque when phase\_1 was at short-circuit fault state

力与转矩均有很大脉动，电机无法稳定悬浮运行。

当定子齿 1 发生短路故障时，按照本文的容错控制策略对其它非故障相定子电流添加悬浮力补偿与转矩补偿，电机产生的实际悬浮力与转矩如图 4 所示。由图可知，在同时添加悬浮力和转矩补偿的情况下，电机实际产生的悬浮力及转矩与给定值都基本相符。由于忽略了相电流 2 次项分量，悬浮力

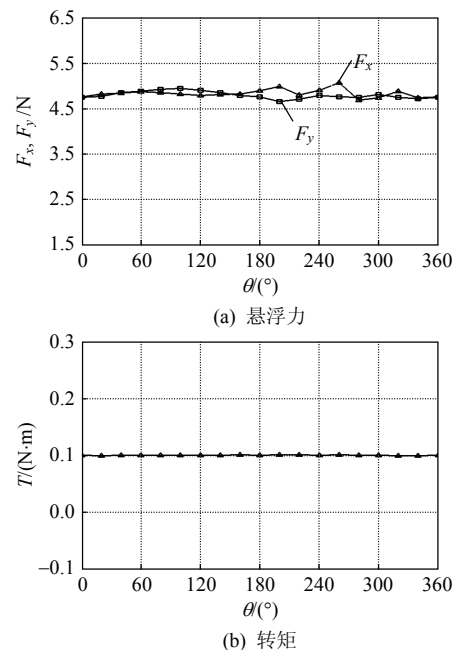


图 4 添加悬浮力和转矩补偿后的悬浮力及转矩  
Fig. 4 Levitation force and torque when compensations were added

同样有脉动<sup>[15]</sup>,但可以保证电机的稳定悬浮运行;转矩与给定值基本无偏差,没有脉动。

电机在正常工作时各相定子电流的仿真波形如图5(a)所示。当定子齿1发生短路故障时,采用本文所提容错控制策略后电机各相定子电流仿真波形如图5(b)所示。由图5可知,当电机处于短路故障时,短路故障相上的定子电流较正常工作时增大,且为一近似正弦波,与理论分析波形基本相符;另外不仅短路相绕组上的定子电流发生变化,由于容错控制策略中加入了悬浮力和转矩补偿,其它非故障相定子电流幅值也相应增大,且波形不规则。

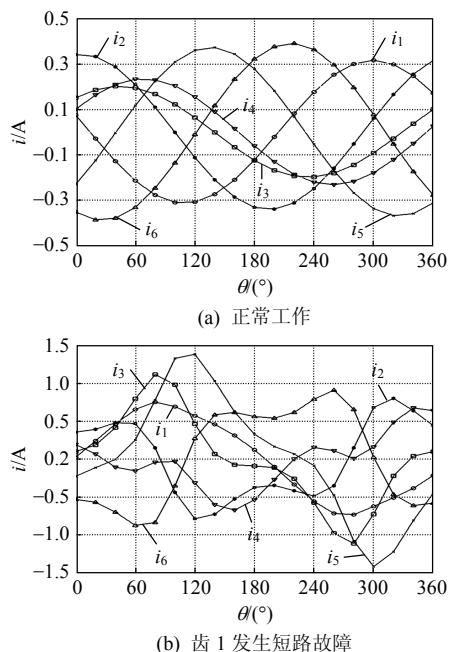


图5 正常工作和齿1相短路故障时各相定子电流仿真波形  
Fig. 5 Simulated current in each phase when phase\_1 was at normal and short-circuit fault state

通过仿真分析可知,当电机某相绕组发生短路故障时,通过添加悬浮力与转矩补偿,重构非故障相的定子电流,可以实现该电机的短路容错运行。

## 4 实验验证

### 4.1 硬件平台介绍

根据以上理论分析,设计了一套基于TMS320F2812DSP的数字控制系统平台,图6为该系统控制框图。

由位移和转子转角检测装置检测到的径向位移和转子转角信息,经闭环控制得到电机在该时刻的悬浮力和转矩,控制器将悬浮力、转矩以及电流传感器检测到的短路电流代入本文提出的容错控制策略,完成控制算法运算,并将计算得到的非故

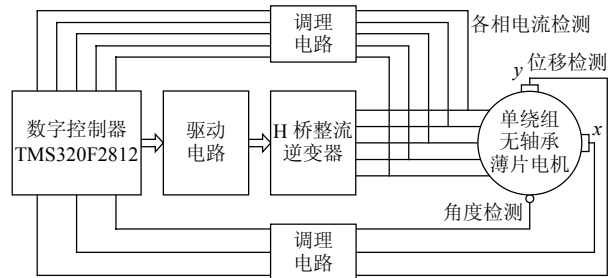


图6 系统控制框图

Fig. 6 System control block

障相给定电流与电流传感器检测到的反馈电流进行闭环控制,以得到PWM波,控制驱动电路驱动功率模块,再由功率模块提供电流驱动电机,实现电机的容错运行。

### 4.2 实验波形及分析

实验样机的参数为:定子为6齿集中式绕组,各绕组匝数450匝,绕组线径0.39mm,40°极靴;转子为一对极表贴式转子,外径80mm、内径50mm、轴向长10mm、永磁体最厚处2.5mm、铁磁材料采用钕铁硼,牌号韵升28EH,矫顽力780kA/m、气隙2.0mm。

实验中通过将定子齿1相绕组线圈端部两接头短接,模拟相绕组短路状态,实验过程转速为800r/min,以下短路实验波形均为将电机定子齿1相绕组线圈先短接,然后给实验平台上电,待电机稳定悬浮运行后各对应传感器测得的波形。

图7(a)、(b)分别为定子齿1相正常工作和发生短路故障时,齿1上的电流波形。由图可知,短路

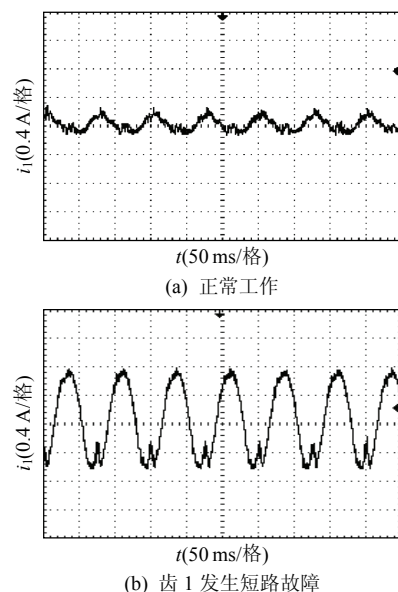


图7 正常工作和齿1相短路故障时齿1的定子电流波形  
Fig. 7 Current in phase\_1 when phase\_1 was at normal and short-circuit fault state

后齿 1 处于非正常工作状态，齿 1 电流为近似正弦电流，峰值约为 0.7 A，与理论值有所偏差是由于短路电流理论计算中忽略了其它相定子电流以及电机各参数理论值与实际值的误差所致。

图 8 和图 9 分别为电机在正常工作时和定子齿 1 发生短路故障时齿 3、齿 4 的电流波形。由图 8—9 可知，当齿 1 发生短路故障时，不仅故障相电流有突变其它非故障相也处于非正常工作状态。

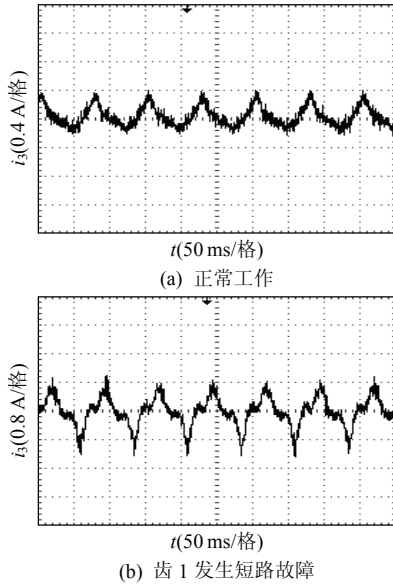


图 8 正常工作和齿 1 相短路故障时齿 3 的定子电流波形  
Fig. 8 Current in phase\_3 when phase\_1 was at normal and short-circuit fault state

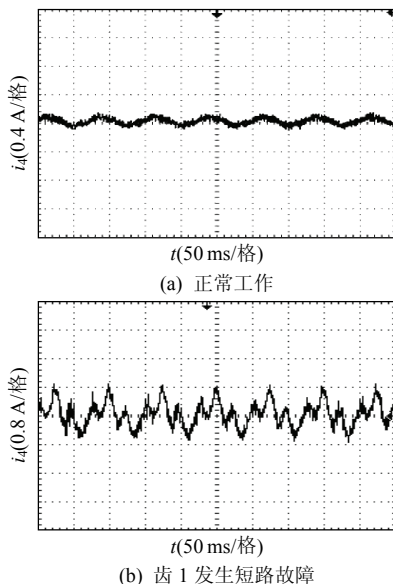


图 9 正常工作和齿 1 相短路故障时齿 4 的定子电流波形  
Fig. 9 Current in phase\_4 when phase\_1 was at normal and short-circuit fault state

当电机齿 1 发生短路故障时，分别沿用电机正常工作时的控制策略和采用本文所提短路容错控

制策略对样机进行控制，测量得到电机径向位移波形如图 10(a)、(b)所示。由图 10 可以看出，采用容错控制策略给电机添加悬浮力与转矩补偿后，其径向位移明显减小，维持在 312 μm，可保持电机稳定悬浮状态。

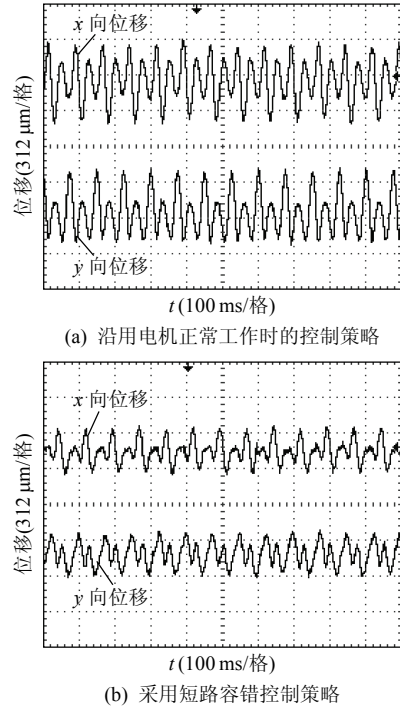


图 10 齿 1 相短路故障时电机径向位移  
Fig. 10 Radial displace when phase\_1 was at short-circuit fault state

### 5 结论

本文针对六相单绕组无轴承永磁薄片电机定子绕组发生短路故障后无法正常运行的问题，提出一种基于定子电流重构原则的短路容错控制方法。该方法根据电流传感器实时检测的短路电流，对非故障相定子电流添加悬浮力补偿和转矩补偿，从而满足电机所需的悬浮力与转矩，对无轴承电机在容错运行方面进行研究。以定子齿 1 发生短路故障为例，通过仿真验证了短路容错控制策略的正确性，实验结果证明，采用本文所提控制策略可以实现电机在一相绕组出现短路故障时的容错运行。

### 参考文献

[1] Bosch R . Development of a bearingless electric motor [C]//International Conference on Electrical Machines Electric Machines (ICEM'88). Pisa, Italy: IEEE, 1988: 373-375.  
[2] Salazar A O, Chiba A, Fukao A. A review of developments in bearingless motors[C]//7th International Symposium on Magnetic Bearings. Zurich, Switzerland: Kyushu University & National High Magnetic Field Laboratory, 2000: 335-340.

- [3] Amrhein W, Silber S, Nenninger K, et al. Developments on bearing drive technology[C]/8th International Symposium Magnetic Bearings. Mito, Japan: ASME & IEEE, 2002: 229-234.
- [4] Ooshima M, Chiba A, Rahman A, et al. An improved control method of buried-type IPM bearingless motors considering magnetic saturation and magnetic pull variation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 569-574.
- [5] Silber S, Amrhein W, Bosch P, et al. Design aspects of bearingless slice motors[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(6): 611-617.
- [6] 朱俊, 邓智泉, 王晓琳, 等. 单绕组无轴承永磁薄片电机的原理和实现[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 68-74.  
Zhu Jun, Deng Zhiqian, Wang Xiaolin, et al. Principle and realization of the single winding bearingless slice motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 68-74(in Chinese).
- [7] Mecrow B C, Jack A G, Atkinson D J, et al. Design and testing of a four-phase fault-tolerant permanent-magnet for an engine fuel pump [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 132-137.
- [8] Ishak D, Zhu Z Q, Howe D. Permanent-magnet brushless machines with unequal tooth widths and similar slot and pole numbers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(2): 584-590.
- [9] Sawata T, Kjaer P, Cossar C, et al. Fault-tolerant operation of single-phase switched reluctance generators[C]/Conference Proceedings of Twelfth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 1997: 553-558.
- [10] Bartholet M T, Nussbaumer T, Silber S, et al. Comparative evaluation of polyphase bearingless slice motor for fluid-handling applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1821-1830.
- [11] 吉敬华, 孙玉坤, 朱纪洪, 等. 新型定子永磁式容错电机的工作原理和性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 96-101.  
Ji Jinghua, Sun Yukun, Zhu Jihong, et al. Operating principle and performance analysis of a novel stator-PM fault tolerant machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 96-101(in Chinese).
- [12] Luo Jianzhao, Yong Weiliang. Study on control of bearingless slice motor[C]/7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China: IEEE, 2008: 8573-8578.
- [13] 康敏. 单绕组多相无轴承电机的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.  
Kang Min. Research on multiphase bearingless motors[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009(in Chinese).
- [14] 朱俊, 廖启新, 邓智泉, 等. 一种具有容错功能的无轴承薄片电

机的原理及其实现[J]. 电力电子, 2008(3): 33-37.

- Zhu Jun, Liao Qixin, Deng Zhiqian, et al. Control principle and realization of a type of error tolerant bearingless slice motor[J]. Power Electronics, 2008(3): 33-37(in Chinese).
- [15] 岳盛奏, 王晓琳, 邓智泉, 等. 单绕组无轴承永磁薄片电机缺相运行特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(23): 80-86.  
Yue Shengzou, Wang Xiaolin, Deng Zhiqian, et al. Operation characteristics analysis of the single winding bearingless PM slice motor at lacking-phase[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(23): 80-86(in Chinese).

## 附录 A

参数  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  的表达式分别为

$$p_1 = \frac{-2hr\omega \sin(\frac{\alpha}{2}) a_{PM} W_1 \mu_0 hr\alpha \omega W_1^2 \mu_0}{R^2 l_{eg}^2 + h^2 r^2 \alpha^2 \omega^2 W_1^4 \mu_0^2}$$

$$p_2 = \frac{2hr\omega \sin(\frac{\alpha}{2}) a_{PM} W_1 \mu_0 R l_{eg}}{R^2 l_{eg}^2 + h^2 r^2 \alpha^2 \omega^2 W_1^4 \mu_0^2}$$

$$p_3 = e^{\frac{R l_{eg} (\theta_0 - \theta_1)}{hr\alpha \omega W_1^2 \mu_0}}$$

系数  $k$ 、 $t$  的表达式分别为

$$k = \frac{rha_{PM} W_1 \mu_0 \sin \alpha}{2l_{eg}^2}$$

$$t = \frac{2rha_{PM} W_1 \mu_0 \sin \frac{\alpha}{2}}{l_{eg}}$$



盛旺

收稿日期: 2010-04-26。

作者简介:

盛旺(1988), 男, 硕士研究生, 研究方向为无轴承永磁薄片电机及其容错控制, 电机与电器及其控制技术, nicknevil@163.com;

王晓琳(1976), 男, 副教授, 研究方向为无轴承电机、交流电机控制;

邓智泉(1969), 男, 教授, 研究方向为无轴承电机、高速电机、交流电机控制;

岳盛奏(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为单绕组无轴承永磁薄片电机及其容错控制。

(编辑 李婧妍)