

文章编号:1000-6893(2008)01-0110-07

# 适用于无轴承开关磁阻电机的功率变换器设计

杨钢, 邓智泉, 曹鑫, 罗建震, 王晓琳

(南京航空航天大学 自动化学院 航空电源与航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

## Design of Power Converters Applied to Bearingless Switched Reluctance Motors

Yang Gang, Deng Zhiquan, Cao Xin, Luo Jianzhen, Wang Xiaolin

(Aero-Power Sci-Tech Center, College of Automation and Engineering, Nanjing University of  
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**摘要:** 无轴承开关磁阻电机不仅具有开关磁阻电机的优点,而且拓宽了无轴承技术的应用范围。而功率变换器是无轴承开关磁阻电机的重要组成部分,其向电机绕组提供电流,以产生所需转矩和悬浮力,对电机旋转和悬浮性能有重要影响。根据无轴承开关磁阻电机电磁转矩和悬浮力控制原理,详细分析了其对功率变换器的要求,提出了主绕组功率变换器和悬浮绕组功率变换器的设计原则,并分析了其各种工作模式和数学模型。最后通过对实验样机的调试,给出了实验结果,实现了无轴承开关磁阻电机的稳定悬浮。

**关键词:** 开关磁阻电机; 无轴承; 功率变换器; 悬浮绕组; 反电势

**中图分类号:** TM301.2      **文献标识码:** A

**Abstract:** Bearingless switched reluctance motors, which have characteristics of a switched reluctance motor, broaden in the applications of the bearingless technology. The converter is one of the important components in bearingless switched reluctance motors. They provide motor's windings with the needed currents to satisfy the requirements of the torque and levitated forces. Therefore they mostly influence the rotation and levitation of bearingless motor. In view of the control characteristics of electromagnetic torque and radial force, the requirements of the converter are analyzed. The designed principles of the converters of both main winding and levitated winding are presented. The mathematical model and all work modes of the converter are introduced. Test results of an experimental prototype show the good performance of the suspension.

**Key words:** switched reluctance motor; bearingless; power converter; levitation winding; back electromotive force

无轴承电机是 20 世纪末发展起来的一种新型电机。研究开关磁阻电机的无轴承技术,不仅拓展了无轴承电机的理论和应用范围,而且可充分发挥开关磁阻电机自身的高速适应性、结构简单、坚固、成本低、工作可靠、控制灵活、运行效率高、容错能力强及制造维护方便等优越特性<sup>[1-5]</sup>。由于无轴承开关磁阻电机对转子径向位置的控制,而为改善因不对称磁拉力造成的振动和噪声问题提供了一种新的研究思路<sup>[6-9]</sup>。由于上述诸多优点,使无轴承开关磁阻电机在航空高速、超高速起动发电机领域有较大优势,合乎未来多电全电飞机强生命力、低维修的发展要求<sup>[1,4]</sup>。

功率变换器是无轴承开关磁阻电机的重要组成部分,其向电机绕组提供电流,以产生所需转矩

和悬浮力来驱动电机运行,对电机旋转和悬浮性能有重要影响。功率变换器的设计要求与普通开关磁阻电机功率变换器有相似性也有特殊性。本文以无轴承开关磁阻电机为研究对象,简要介绍了其磁悬浮机理和数学模型后,根据电磁转矩和悬浮力的控制原理,详细分析了其对功率变换器的要求,设计了主绕组功率变换器和悬浮绕组功率变换器。并且分析了其各种工作模式,最后通过对实验样机的调试,给出了实验结果,实现了实验样机的稳定悬浮。

## 1 无轴承开关磁阻电机的基本原理

无轴承开关磁阻电机是利用磁轴承和电机在结构上的相似性,将悬浮力绕组叠绕在电机定子中,利用该绕组有目的地改变原电机气隙磁场的分布,从而控制作用在转轴上的麦克斯韦磁力大小和方向,使电机同时实现驱动和自悬浮功能于一体。本文所采用的电机为 12/8 结构,每个定子

收稿日期:2007-01-09; 修订日期:2007-07-09

基金项目:航空基础科学基金(05F52040);教育部博士点科学基金(20060287010);南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ05-04);新世纪优秀人才支持计划

通讯作者:杨钢 E-mail: sdzbyg@yahoo.com.cn

凸极上有两套绕组,一是主绕组  $N_{ma}$ ,由 4 个正对凸极上的主绕组串联而成;二是悬浮绕组,分为  $\alpha$  方向悬浮绕组  $N_{sa1}$  和  $\beta$  方向悬浮绕组  $N_{sa2}$ ,分别由各自方向 2 个正对凸极上的悬浮绕组串联而成,电流分别为  $i_{ma}$ ,  $i_{sa1}$  和  $i_{sa2}$ 。

文献[5-9]对无轴承开关磁阻电机的数学模型进行了推导分析,其主要思路为:首先用有限元法和分割磁导法得到气隙磁导的解析表达式,然后根据等效磁路的原理推导出用气隙磁导表示的绕组电感矩阵,进而得出磁场储能的表达式,最后根据机电能量转换原理得出悬浮力和转矩的表达式。悬浮力  $F_\alpha$  和  $F_\beta$  表达式为

$$\begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \end{bmatrix} \approx i_{ma} \begin{bmatrix} K_f(\theta) & 0 \\ 0 & K_f(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa1} \\ i_{sa2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\theta$  为转子位置角; $K_f(\theta)$  为转子位置角和电机参数的函数<sup>[6-7]</sup>。无轴承开关磁阻电机中定义  $\theta=0^\circ$  的位置为定转子齿轴线重合的位置。

瞬时转矩可通过磁场储能对转子位置角  $\theta$  求偏导得到。A 相绕组产生的瞬时转矩可以表示为

$$T_a = J_t(\theta)(2N_m^2 i_{ma}^2 + N_b^2 i_{sa1}^2 + N_b^2 i_{sa2}^2) \quad (2)$$

式中: $N_m$  为主绕组匝数; $N_b$  为  $\alpha$  方向和  $\beta$  方向悬浮绕组匝数;系数  $J_t(\theta)$  为转子位置角和电机参数的函数<sup>[6-7]</sup>。

根据上述数学模型,可以看出电磁转矩是绕组电流、开通角以及电机参数的函数,悬浮力与主绕组电流和悬浮绕组电流的乘积成比例,确定控制原理如下:

由位移反馈经比例积分微分(PID)调节得到悬浮力;由转速反馈经比例积分(PI)调节得到转矩。根据所需悬浮力和转矩,由转矩脉动最小原则确定开通角<sup>[6-7]</sup>,求得主绕组电流,再由式(1)求得悬浮绕组电流。然后通过相应的逆变器去控制绕组实际电流,进而控制所需悬浮力和转矩,如图 1 所示。

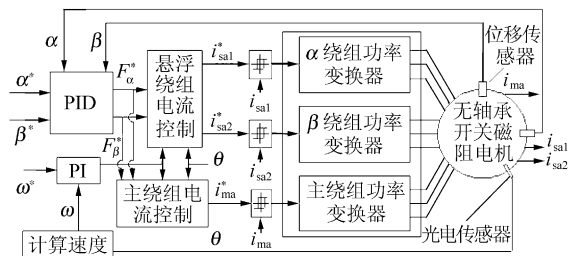


图 1 无轴承开关磁阻电机控制原理框图

Fig. 1 Control block diagram of a bearingless switched reluctance motor

由于本系统实验样机定转子为 12/8 结构,则绕组电感曲线的周期为  $T=45^\circ$ ,所以三相绕组导

通宽度必须大于等于  $15^\circ$  才能保证任何时刻至少有一相绕组在工作。但若导通宽度大于  $15^\circ$ ,则必会在某些时刻有两相同时工作,虽可增大悬浮力,但会带来负转矩,增加负面效应,并且还得考虑悬浮力如何在两相中分配的问题,加大控制难度,所以最终选择单拍工作方式,每相导通  $15^\circ$  的控制策略。

## 2 无轴承开关磁阻电机功率变换器

### 2.1 设计原则

无轴承开关磁阻电机功率变换器是电机的重要组成部分,分为主绕组功率变换器和悬浮绕组功率变换器。两种功率变换器除遵循一般功率变换器的基本设计原则外<sup>[10]</sup>,其要求与普通开关磁阻电机功率变换器有相似性也有特殊性。

根据无轴承开关磁阻电机的基本工作原理知道,主绕组既提供产生悬浮力的偏置磁场,与悬浮绕组产生的磁场相互作用产生麦克斯韦力,使转子轴悬浮,又产生旋转转矩,使电机旋转。可以看出所要控制的悬浮力和转矩与主绕组电流和悬浮绕组电流均有关,因此在设计两种功率变换器时必须综合考虑。从理论上说,电流控制组合方式有多种形式,大小控制可按照上述控制策略进行控制,即要求两种变换器均能提供大小可调的电流。

在方向控制上,转矩和悬浮力的控制方法有所不同:由式(2)可以看出,转矩是与电流的平方成正比,其方向与电流流向无关。根据开关磁阻电机的运行原理,要改变电机转向只要合理地改变导通相顺序即可。由式(1)可以看出悬浮力的方向与主绕组电流流向和悬浮绕组电流流向均有关,其组合方式有以下 3 种:

- ① 保持悬浮绕组电流流向不变,通过调节主绕组电流流向来调节悬浮力方向。
- ② 保持主绕组电流流向不变,通过调节悬浮绕组电流流向来调节悬浮力方向。
- ③ 同时调节主绕组和悬浮绕组电流流向来调节悬浮力方向。

从以上 3 种控制方案来看,由于主绕组和悬浮绕组结构的差异,方案①会给两个方向轴上力的控制带来一定的耦合,原因如下:要改变力(如  $F_\alpha$ )的方向时,只有改变主绕组电流流向,而电机一相主绕组是由定子 4 个正对凸极上的主绕组顺序串联而成,当改变一个方向轴( $\alpha$  方向)上的主绕组电流流向时,势必会改变另外一个方向轴( $\beta$  方向)上的主绕组电流流向,这样以来会使两个方向轴( $\alpha$  和

$\beta$ )上力( $F_\alpha$ 和 $F_\beta$ )的方向(此时 $\beta$ 方向悬浮绕组电流流向不变)同时改变,给控制带来很大的不便。

在方案②中,改变力(如 $F_\alpha$ )的方向时,可以通过保持主绕组电流流向不变,调节悬浮绕组( $\alpha$ )电流流向即可。由于两个方向轴 $\alpha$ 和 $\beta$ 上的悬浮绕组各自独立,相互之间没有物理上的连接,且在空间上彼此垂直,所以此时不会影响另外一个方向轴( $\beta$ )上力( $F_\beta$ )的方向。方案③也可实现悬浮力方向的调节,两种绕组电流的流向和大小都要可控,显然其复杂度要比方案②大。

通过对以上控制方案的比较,悬浮力的方向控制方案选择方案②,即主绕组电流流向不变,通过调节悬浮绕组电流流向来改变悬浮力方向。由以上分析可知,主绕组和悬浮绕组功率变换器除满足一般功率变换器的设计原则之外,还要满足如下原则:主绕组功率变换器提供的电流大小可控,方向单向;悬浮绕组功率变换器提供的电流大小可控,方向可控。

按照上面控制策略结合普通开关磁阻电机控制方式,在控制转矩和悬浮力时,主绕组采用方波电流控制方式,这样以来,在一个相导通周期内,悬浮绕组电流可由式(1)方便地计算得出。图2为开通角 $\theta_{on} = -15^\circ$ ,在力为恒值时,A相导通时电感电流示意图。可以看出,由于本系统电流控制要求的特殊性,悬浮绕组电流不同于异步机或同步机的正弦信号,所以其采用滞环控制方式。本系统中,由于主绕组电流的控制要求和普通开关磁阻电机绕组电流相近,所以普通开关磁阻电机绕组电流的控制方式均可用于此。为和悬浮绕组功率变换器相一致,本文采用电流滞环控制。

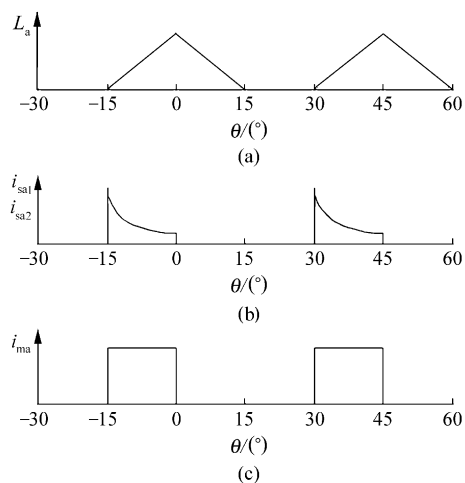


图 2 A 相电感和电流示意图

Fig. 2 Sketch map of inductance and current

## 2.2 电路拓扑及其工作模式

### (1) 主绕组功率变换器

由以上主绕组功率变换器的设计原则可以看出,其与普通开关磁阻电机功率变换器的要求相似。由于转矩和悬浮力的控制复杂性,所以要求功率变换器的控制越简单越好。普通开关磁阻电机功率变换器主电路拓扑有多种形式<sup>[10-11]</sup>,如不对称半桥、最少开关器件等,综合比较各种电路拓扑后,选择不对称半桥电路。虽然开关管数目较多,但其控制方式最为简单,特点是:每相有两个主开关管和两个续流二极管,上下管可用同一控制信号,同时开通或关断;全压控制相绕组电流,开关管的电压定额为母线电压 $U_m$ ;桥臂不存在直通现象,控制简单可靠;相与相之间完全独立,对绕组相数没有限制等<sup>[10-11]</sup>。

从以上控制策略可以看出,无轴承开关磁阻电机主绕组功率变换器与普通开关磁阻电机功率变换器控制方案相似,可实现 3 态控制。主绕组功率变换器虽有 3 种工作模式,但是由于增加了悬浮绕组,其数学模型与普通开关磁阻电机有所不同。下面以 A 相为例说明变换器工作模式和数学模型。以下分析忽略电机的漏磁与磁饱和影响。

① +1 态。如图 3 所示, $T_1$  和  $T_2$  同时导通,绕组通入如图所示方向电流,端电压为正母线电压。电路方程为

$$U_m - 2U_{Tm} = R_{ma} i_{ma} + L_{ma} \frac{di_{ma}}{dt} + M_{sma1} \frac{di_{sa1}}{dt} + M_{sma2} \frac{di_{sa2}}{dt} + \omega \left( i_{ma} \frac{\partial L_{ma}}{\partial \theta} + i_{sa1} \frac{\partial M_{sma1}}{\partial \theta} + i_{sa2} \frac{\partial M_{sma2}}{\partial \theta} \right) \quad (3)$$

式中: $U_m$ 为母线电压; $U_{Tm}$ 为开关管压降; $R_{ma}$ 为 A 相主绕组电阻; $L_{ma}$ 为 A 相主绕组自感; $M_{sma1}$ 为 A 相主绕组和  $\alpha$  悬浮绕组间的互感; $M_{sma2}$ 为 A 相主绕组和  $\beta$  悬浮绕组间的互感<sup>[5-9]</sup>; $\omega$ 为电机转速。

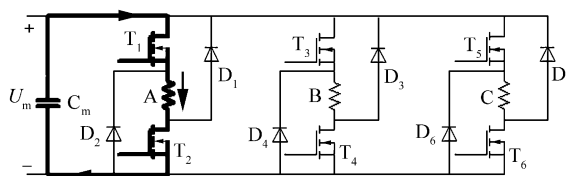


图 3 主绕组功率变换器模式 1

Fig. 3 Mode 1 of main winding power converter

② -1 态。如图 4 所示,  $T_1$  和  $T_2$  同时关断, 绕组电流经  $D_1, C_m$  和  $D_2$  构成回路, 端电压为负母线电压。电路方程为

$$-U_m - 2U_{Dm} = R_{ma} i_{ma} + L_{ma} \frac{di_{ma}}{dt} + M_{sma1} \frac{di_{sa1}}{dt} + M_{sma2} \frac{di_{sa2}}{dt} + \omega \left( i_{ma} \frac{\partial L_{ma}}{\partial \theta} + i_{sa1} \frac{\partial M_{sma1}}{\partial \theta} + i_{sa2} \frac{\partial M_{sma2}}{\partial \theta} \right) \quad (4)$$

式中:  $U_{Dm}$  为续流二极管压降。

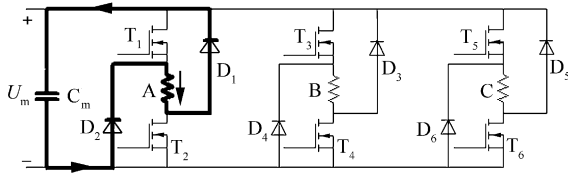


图 4 主绕组功率变换器模式 2

Fig. 4 Mode 2 of main winding power converter

③ 0 态。如图 5 所示,  $T_2$  (或  $T_1$ ) 单独开通, 此时绕组电流经  $T_2$  和  $D_2$  构成回路, 端电压为开关管压降, 近似为 0 V。电路方程为

$$-U_{Tm} - U_{Dm} = R_{ma} i_{ma} + L_{ma} \frac{di_{ma}}{dt} + M_{sma1} \frac{di_{sa1}}{dt} + M_{sma2} \frac{di_{sa2}}{dt} + \omega \left( i_{ma} \frac{\partial L_{ma}}{\partial \theta} + i_{sa1} \frac{\partial M_{sma1}}{\partial \theta} + i_{sa2} \frac{\partial M_{sma2}}{\partial \theta} \right) \quad (5)$$

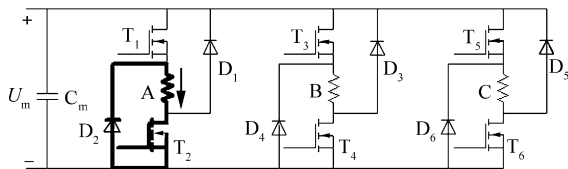


图 5 主绕组功率变换器模式 3

Fig. 5 Mode 3 of main winding power converter

通过式(3)~式(5)可以看出, 无轴承开关磁阻电机由于增加了悬浮绕组, 在主绕组电路网络中使变压器电动势和运动电动势与普通开关电机有所不同。其中变压器电动势增加了  $M_{sma1} \cdot (di_{sa1}/dt) + M_{sma2} (di_{sa2}/dt)$ , 运动电动势增加了  $\omega [i_{sa1} (\partial M_{sma1} / \partial \theta) + i_{sa2} (\partial M_{sma2} / \partial \theta)]$ 。图 6 为主绕组与悬浮绕组间互感的示意图。

根据控制策略, 电机的工作区域在电感上升和下降区域均有。在整个工作区间内, 主绕组和悬浮绕组间的互感为正, 所以主绕组电路方程中的变压器电动势  $M_{sma1} (di_{sa1}/dt) + M_{sma2} (di_{sa2}/dt)$  方向取决于悬浮绕组电流的变化率。

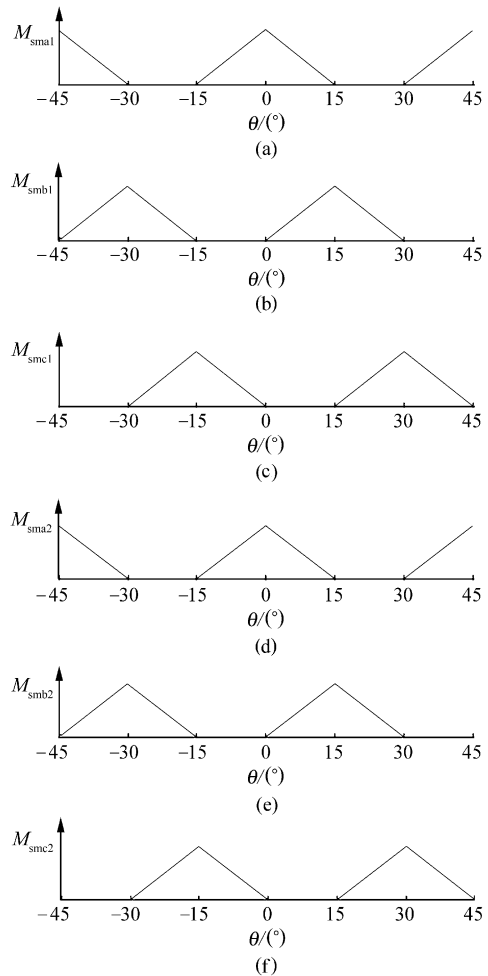


图 6 主绕组和悬浮绕组互感示意图

Fig. 6 Sketch map of multiductance between main winding and levitation winding

而在主绕组电路方程中多增加的运动电动势  $\omega [i_{sa1} (\partial M_{sma1} / \partial \theta) + i_{sa2} (\partial M_{sma2} / \partial \theta)]$ , 其方向不仅与悬浮绕组电流方向有关, 而且和互感对位置角的偏导有关。在电感上升区, 互感及其对位置角的偏导数为正, 运动电动势方向和悬浮绕组电流方向相同; 电感下降区, 互感对位置角的偏导数为负, 运动电动势方向和悬浮绕组电流方向相反。

功率器件定额的选取和隔离驱动设计在多篇文献中已经介绍过, 这里就不再赘述。只是由于悬浮绕组的影响, 使变换器功率器件的应力增加, 设计时应加以注意。主绕组和悬浮绕组的互感虽然给电路分析增加了难度, 但正是由于互感的存在, 当无轴承开关磁阻电机的转子轴发生偏移的时候, 才产生作用于转子的径向力, 从而使转子悬浮成为可能。

### (2) 悬浮绕组功率变换器

根据以上设计原则和数学模型知道, 主绕组电流一定时, 通过控制悬浮绕组电流就可控制径向悬浮力。为实现稳定悬浮, 悬浮绕组功率变换器必须

能提供大小可调,方向可变的电流。这样的功率电路拓扑通常有:三相全桥电路、三相半桥电路和三单相全桥电路等<sup>[12]</sup>。三相全桥电路简单,但若同时要同时控制绕组电流大小和方向,需两相同时工作,这使其应用于本系统时受到很大限制;三单相全桥虽控制灵活,但是需 12 个开关管,数量较多,器件成本太高;三相半桥电路,其特点是控制灵活,每相可以独立控制,通过对主开关管的导通和关断,可同时控制负载电流大小和方向,所需开关器件为 6 个,但是需要两个大的分裂电容。综合以上几种电路特点及悬浮绕组功率变换器要求,在尽量减少器件的情况下,悬浮绕组功率变换器电路拓扑采用三相半桥电路。本系统中,无轴承开关磁阻电机采用单相轮流导通工作方式,各相之间相互独立。 $\alpha$  绕组和  $\beta$  绕组分别采用一套功率逆变器,结构相同,控制信号均由数字信号处理器(DSP)给出。

由于无轴承开关磁阻电机采用单相导通策略和悬浮绕组功率变换器电路的拓扑形式,悬浮绕组功率变换器有两种工作模式。

① +1 态。此时绕组端电压为母线电压一半,绕组电流增加,电源向绕组提供能量。绕组通正向电流时闭合  $Q_{11}$ ,通反向电流时闭合  $Q_{12}$ ,如图 7 所示。电路方程为

$$U_s - U_{Ts} = R_{sa1} i_{sa1} + L_{sa1} \frac{di_{sa1}}{dt} + M_{sma1} \frac{di_{ma}}{dt} + \omega \left( i_{sa1} \frac{\partial L_{sa1}}{\partial \theta} + i_{ma} \frac{\partial M_{sma1}}{\partial \theta} \right) \quad (6)$$

式中: $U_s$  为母线电压的 1/2; $U_{Ts}$  为开关管压降; $R_{sa1}$  为 A 相  $\alpha$  悬浮绕组电阻; $L_{sa1}$  为 A 相  $\alpha$  悬浮绕组自感。

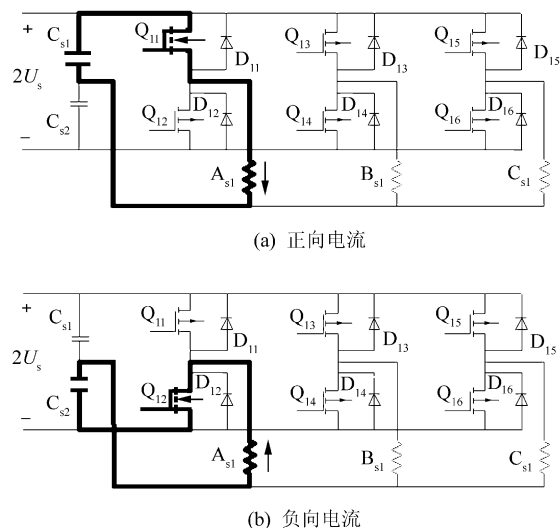


图 7 悬浮绕组功率变换器模式 1

Fig. 7 Mode 1 of the levitation winding power converter

② -1 态。此时绕组电压为母线电压一半,绕组电流减小,处于续流状态,向电容回馈能量。绕组为正向电流时,续流经  $D_{12}$ ;反向电流时,续流经  $D_{11}$ ,如图 8 所示。电路方程为

$$-U_s - U_{Ds} = R_{sa1} i_{sa1} + L_{sa1} \frac{di_{sa1}}{dt} + M_{sma1} \frac{di_{ma}}{dt} + \omega \left( i_{sa1} \frac{\partial L_{sa1}}{\partial \theta} + i_{ma} \frac{\partial M_{sma1}}{\partial \theta} \right) \quad (7)$$

式中: $U_{Ds}$  为续流二极管压降。

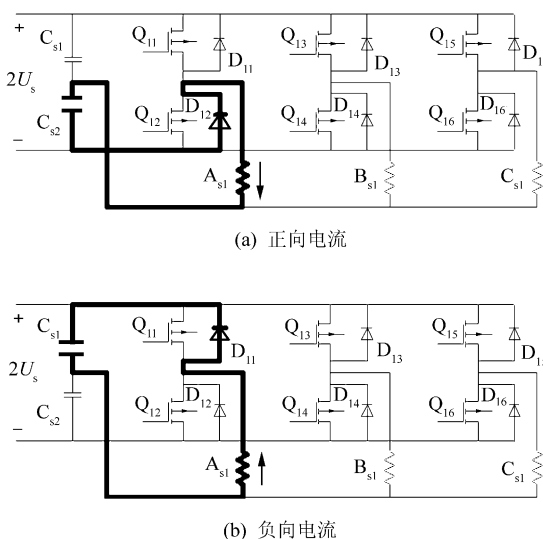


图 8 悬浮绕组功率变换器模式 2

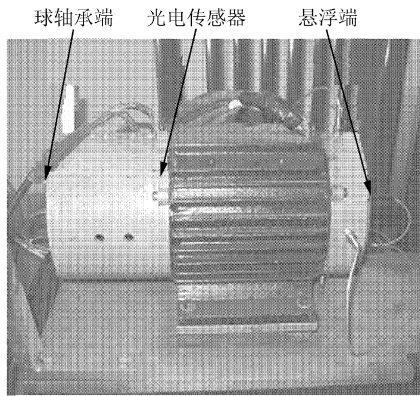
Fig. 8 Mode 2 of the levitation winding power converter

由式(6)和式(7)可见,同样由于主绕组和悬浮绕组间互感的存在,使悬浮绕组中的变压器电动势和运动电动势相对于单绕组都发生了变化。变压器电动势增加了  $M_{sma1} (di_{ma}/dt)$ ,由图 6 可知,互感总为正,所以其方向取决于主绕组电流的变化率,而与电流方向无关。运动电动势增加了  $\omega i_{ma} (\partial M_{sma1}/\partial \theta)$ ,由于主绕组电流为单向,因此其方向只与互感对位置角偏导的正负有关,这与主绕组有所不同。

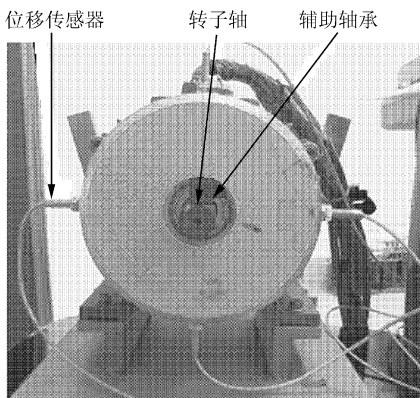
### 3 实验结果

根据以上分析,本文设计了无轴承开关磁阻电机功率变换器,并在实验样机上进行了调试,图 9 为电机样机。电机样机参数如下:定子铁心外径 145 mm,定子铁心内径 77 mm,转子极半径 38.25 mm,转子轭部直径 46 mm,转轴直径 30 mm,轴向长度 95 mm,定、转子极弧 15°,平均气隙长度 0.25 mm。主绕组:4 极串联,22 匝,额定电压 90 V;悬浮绕组:2 极串联,18 匝,额定电压 180 V。无轴承开关磁阻电机功率变换器开关管采用功率场效应

管(MOSFET),参数如下:主绕组功率变换器开关管为 IXYS52N30,悬浮绕组功率变换器开关管为 IXYS26N50。驱动芯片均为 IR2110。



(a) 电机侧向图

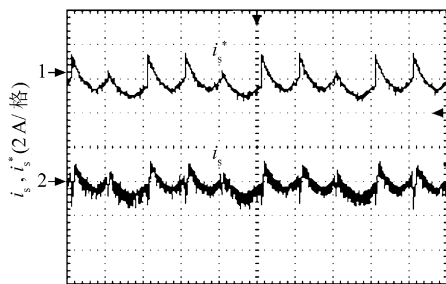


(b) 电机轴向图

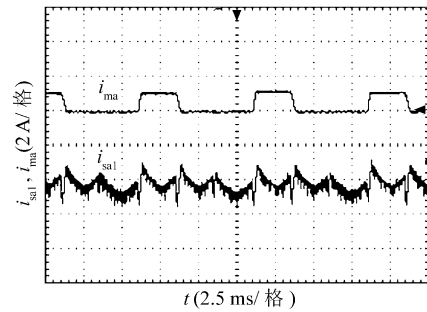
图 9 电机外观图

Fig. 9 Photographs of the motor

图 10 为给定  $\alpha(x)$  正方向力时电流波形,图 10(a)中通道 1 为  $\alpha$  悬浮绕组给定电流,通道 2 为悬浮绕组反馈电流。图 10(b)为主绕组和悬浮绕组反馈电流波形。可以看出悬浮功率变换器较好地跟踪了给定电流。由于本系统采用单拍控制方式,一套悬浮绕组 A,B,C 三相时复用一個电流传感器,所以悬浮绕组电流波形是  $\alpha$  三相悬浮绕组电流波形的合成。而主绕组每相有一个单独的电流传感器,所以主绕组电流波形为一相(A 相)的电流。



(a) 悬浮绕组电流波形

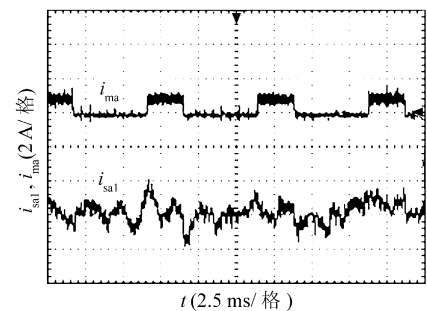


(b) 主绕组电流

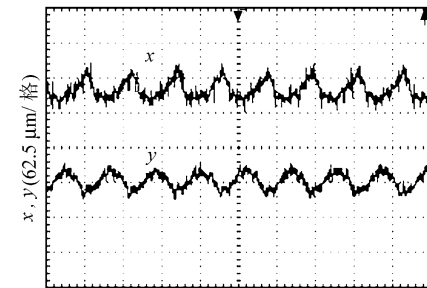
图 10 悬浮绕组和主绕组电流波形

Fig. 10 Waveforms of current of levitation winding and main winding

图 11 为无轴承开关磁阻电机空载 1 000 r/min 时,绕组电流和转子径向位移波形。图 11(a)为转子悬浮时主绕组(A 相)和  $\alpha$  悬浮绕组电流波形。此时悬浮绕组电流随悬浮力的变化而变化,系统控制周期为  $100 \mu\text{s}$ 。由于悬浮力非人为控制,所以此时悬浮绕组电流波形不像力为定值时有规律。图 11(b)为转子径向位移波形,从位移波形可以看出,转轴在  $\alpha(x)$  和  $\beta(y)$  方向上总的位移跳动范围均小于  $100 \mu\text{m}$ ,悬浮时观察辅助轴承一端,可以看到辅助轴承静止,不随转子的转动而转动,这说明转轴已与辅助轴承脱离,没有任何机械接触,平稳悬浮在空中。



(a) 绕组电流波形



(b) 位移波形

图 11 悬浮电流和位移波形

Fig. 11 Waveforms of displacements and current of levitation winding

## 4 结 论

提出了无轴承开关磁阻电机功率变换器的设计原则:主绕组功率变换器提供的电流大小可控,方向单向;悬浮绕组功率变换器提供的电流大小可控,方向可控。在此基础上分析了功率变换器的数学模型和工作状态,并对其与普通开关磁阻功率变换器的不同之处做了分析。经实验验证,功率变换器较好地跟踪了给定电流,满足了无轴承开关磁阻电机的要求,实现电机转子的稳定悬浮。

## 致 谢

感谢叶霜、张媛、范冬给予本课题的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 邓智泉,严仰光. 无轴承交流电机的基本理论和研究现状[J]. 电工技术学报,2000,15(2):29-35.  
Deng Zhiquan, Yan Yangguang. The main theory and status of AC bearingless motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(2): 29-35. (in Chinese)
- [2] Bosch R. Development of a bearingless electric motor [C] // Proc Int Conf Electric Machines(ICEM'88). Pisa, Italy: [s. n.], 1988:373-375.
- [3] Bichsel J. The bearingless electrical machine[C]//Proc Int Symp Magnetic Suspension Technology. Washington, DC, USA: NASA, 1991:561-573.
- [4] 张媛,邓智泉. 无轴承开关磁阻电机控制系统的设计与实现[J]. 航空学报,2006,27(1):77-81.  
Zhang Yuan, Deng Zhiquan. Design and realization of bearingless switched reluctance motor control system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(1): 77-81. (in Chinese)
- [5] Takemoto M, Shimada K, Chiba A, et al. A design and characteristics of switched reluctance type bearingless motors[C]// Proc NASA/CP-1998-207654. Gifu, Japan: [s. n.], 1998:49-63.
- [6] Takemoto M, Chiba A, Fukao T. A method of determining advanced angle of square-wave currents in a bearingless switched motor [J]. IEEE Trans on Industry Application, 2001, 37(6):1702-1709.
- [7] Takemoto M, Chiba A, Fukao T. A new control method of bearingless switched reluctance motors using square-wave currents [C]//Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore: [s. n.], 2000: 375-380.
- [8] Takemoto M, Suzuki H, Chiba A, et al. Improved analysis of a bearingless switched reluctance motor[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2001, 37(1):26-34.
- [9] 邓智泉,杨钢,张媛,等. 一种新型的无轴承开关磁阻电机数学模型[J]. 中国电机工程学报,2005,25(9):139-146.  
Deng Zhiquan, Yang Gang, Zhang Yuan, et al. An innovative mathematical model for bearingless switched reluctance motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 139-146. (in Chinese)
- [10] Barnes M, Pollock C. Power electronic converters for switched reluctance drives[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13(6):1100-1111.
- [11] 陈昊,谢桂林. 开关磁阻调速电动机的功率变换器设计[J]. 中国矿业大学学报,1998,27(2):158-161.  
Chen Hao, Xie Guilin. Design of power converter of switched reluctance motor[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1998, 27(2): 158-161. (in Chinese)
- [12] 王川云. 双凸极无刷直流起动发电系统起动控制的研究与实现[D]. 南京:南京航空航天大学,2002.  
Wang Chuanyun. Study on starting operation of doubly salient brushless DC starter/generator system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)

### 作者简介:

**杨钢**(1975—) 男,博士研究生。主要研究方向:无轴承开关磁阻电机、高速电机。

Tel: 025-84892714

E-mail: sdzbyg@yahoo.com.cn

**邓智泉**(1969—) 男,教授。主要研究方向:高速电机、无轴承电机。

Tel: 025-84892714

E-mail: dzq@nuaa.edu.cn

**曹鑫**(1981—) 男,博士研究生。主要研究方向:无轴承开关磁阻电机。

**王晓琳**(1976—) 男,讲师。主要研究方向:无轴承电机及其控制系统设计,电机调速。

(责任编辑:张利平,鲍亚平)