

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.02.001

## 两类多自由度开关磁阻电机原理与控制的类比

曹鑫, 陈化腾, 邓智泉

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 211106)

**摘要:** 多自由度(Multi-degree-of-freedom, MDOF)开关磁阻电机(Switched reluctance motor, SRM)中的电磁力具有多维分布特征,对其建模和主动控制可实现该类电机的多自由度运行。无轴承开关磁阻电机(Bearingless switched reluctance motor, BSRM)和直线旋转开关磁阻电机(Linear-rotary switched reluctance motor, LRSRM)均具有多自由度运动控制的特点,其电磁力的分布规律、建模方法和控制策略具有一定的相似性。通过对比这两类多自由度开关磁阻电机工作原理的相似性,将前期BSRM数学模型和控制方法的研究成果进一步应用于LRSRM中,实现了LRSRM的准确建模和高性能控制,为推动和加速LRSRM的研究提供参考,以期进一步完善多自由度开关磁阻电机的研究理论体系。

**关键词:** 多自由度开关磁阻电机;无轴承开关磁阻电机;直线旋转开关磁阻电机;数学模型;控制方法

**中图分类号:** V11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)02-0171-10

### Analogy Study of Two Types of Multi-Degree-of-Freedom Switched Reluctance Motors

CAO Xin, CHEN Huateng, DENG Zhiquan

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

**Abstract:** The electromagnetic force has the characteristics of multi-dimensional distribution in multi-degree-of-freedom (MDOF) switched reluctance motor (SRM), which can be modelled and actively controlled to achieve the MDOF motion of SRMs. Bearingless switched reluctance motor (BSRM) and linear-rotary switched reluctance motor (LRSRM) are both have the characteristics of MODF motion control, and they have similarities between the distributions, modelling methods and control strategies of their electromagnetic forces. Through comparing similarities between the operating principles of these two kinds of MDOF SRMs, the modelling and control methods of BSRMs obtained before are applied to LRSRM. Therefore, the accurate model and high-performance control of LRSRMs can be implemented more efficiently. The study of LRSRMs can be pushed forward and accelerated, and the research of MDOF SRMs can be further promoted as well. It is expected to promote and accelerate the research of LRSRM, and further improve the theoretical system of MDOF SRM.

**Key words:** multi-degree-of-freedom switched reluctance motor; bearingless switched reluctance motor (BSRM); linear-rotary switched reluctance motor(LRSRM); mathematical model; control method

开关磁阻电机(Switched reluctance motor, SRM)的定、转子采用双凸极结构,定子齿极上绕

**基金项目:** 国家自然科学基金(51877107, 51577087, 51477074)资助项目。

**收稿日期:** 2020-03-01; **修订日期:** 2020-03-25

**作者简介:** 曹鑫,男,教授,研究方向:多自由度电机、高速电机、新能源发电等。主持国家自然科学基金3项,发表论文70余篇,获IEEE国际会议最佳论文奖,授权发明专利20余项。

**通信作者:** 曹鑫, E-mail: caoxin@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 曹鑫,陈化腾,邓智泉. 两类多自由度开关磁阻电机原理与控制的类比[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(2): 171-180. CAO Xin, CHEN Huateng, DENG Zhiquan. Analogy study of two types of multi-degree-of-freedom switched reluctance motors[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(2): 171-180.

有集中式绕组,转子上无绕组和永磁体。当定子绕组按一定方式通电励磁后,通过定、转子齿极间的凸极效应产生磁阻转矩,从而驱动电机稳定旋转。其各相电流控制相互独立,控制参量多。因此,SRM具有结构简单坚固、控制灵活、容错性强、高速适应性好等优点,已在航空航天、电动汽车、纺织机械等军事、民用领域受到广泛关注<sup>[1-6]</sup>。

传统单自由度电机仅实现一种形式的运动,如旋转运动或直线运动。而在一些特定应用场合,如机器人控制、工业生产、舰船推进、火炮转台、航天飞行器等,需要驱动系统具有产生多维运动的能力。基于该需求的解决方案之一是通过机械传动机构将多台单自由度电机组合,从而实现多维驱动功能。然而该方法不仅导致系统体积和重量较大,且各传动机构间的间隙降低了系统的控制精度。因此,具有两自由度驱动功能的直线旋转电机(Linear-rotary motor,LRM)应运而生<sup>[7-14]</sup>。LRM不仅可在电机周向上实现旋转运动,而且可在电机轴向实现直线运动,故其具有两个运动自由度——轴向直线运动和周向旋转运动。由于将直线运动和旋转运动功能集于一体,因而LRM具有结构紧凑、控制精度高、动态响应快、系统可靠性好等优点。

从现有文献来看,最早实现的是感应电机式LRM,由波兰学者Mendrela于1976年提出,其后经过持续不断的深入研究和和其他学者的加入,在拓扑结构和控制方法等方面逐渐拓展了感应式LRM的研究领域<sup>[7-10]</sup>。同时,随着永磁电机的发展,韩国学者Jang于2003年提出了基于永磁结构的LRM,随后永磁式LRM得到了其他学者的广泛关注,成为LRM的研究热点之一<sup>[11]</sup>。基于永磁电机,各种不同的拓扑结构和控制方法被相继提出,极大丰富了LRM的研究与应用。永磁式LRM继承了永磁电机的功率密度高和动态性能好等优点,有力地拓宽了LRM的应用范围<sup>[11-14]</sup>。

将SRM与LRM相结合,研究直线旋转开关磁阻电机(Linear-rotary switched reluctance motor,LRSRM)的运行原理和控制规律,对于进一步拓宽两自由度LRM的应用范围和提高SRM在两自由度驱动领域的应用竞争力具有重要的理论和实践意义,有望进一步强化SRM和LRM在航空航天、舰船推进、电动汽车、卫星雷达驱动等领域的应用基础。

无轴承电机技术是利用电机与磁悬浮轴承结构的相似性,通过改变电机内原有的磁场分布,产生作用于转子上的可控的径向力来实时调节转轴的径向位置,从而实现转轴在高速旋转时脱离辅助轴承的支撑而实现悬浮运行。无轴承开关磁阻电机(Bearingless switched reluctance motor,BSRM)

将无轴承电机技术与SRM相结合,实现了开关磁阻电机在高速旋转时的悬浮运行,避免了轴承摩擦带来的发热和磨损等问题,是解决高速电机轴承瓶颈问题的可行方案之一<sup>[15-22]</sup>。

本质上,BSRM属于三自由度电机,即单自由度旋转和两自由度径向悬浮。其中,由于悬浮属于二维平面内的径向力控制,因而又称为两自由度悬浮。所以,传统的BSRM可实现三自由度运动。本文通过分析LRSRM和BSRM的运行原理,全面类比这两类多自由度开关磁阻电机的控制特点,借鉴BSRM转矩和悬浮力协调控制的研究成果,提出了LRSRM转矩和轴向力的独立控制方法,直接转矩和直接轴向力控制方法,以及直接瞬时转矩和直接轴向力控制方法。仿真结果验证了理论分析的准确性和所提控制方法的有效性。

## 1 原理分析

### 1.1 LRSRM的结构与工作原理

本文研究的LRSRM结构和绕组示意图如图1—3所示。

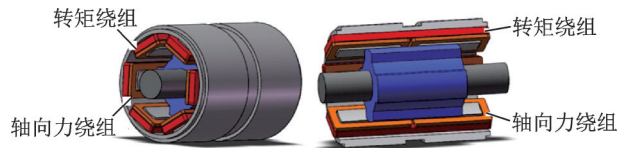


图1 LRSRM结构示意图

Fig.1 Structure of LRSRM

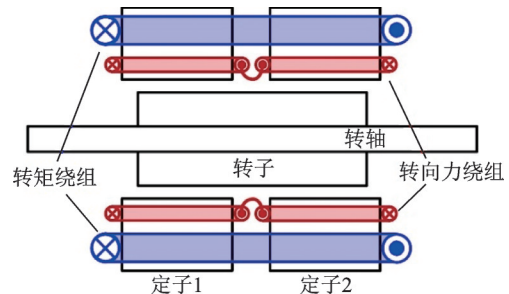
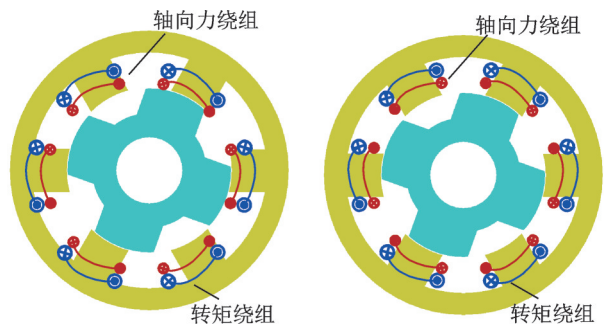


图2 LRSRM绕组示意图

Fig.2 Schematic view of LRSRM windings



(a) Windings of stator 1

(b) Windings of stator 2

图3 两台并列定子的绕组分布示意图

Fig.3 Schematic view of phase windings of the two parallel-installed stators

如图1,2所示,转矩绕组横跨在两台定子齿上,而轴向力绕组在定子1上顺向绕制安装、而在定子2上反向绕制安装。从而在定义电流正方向后,各齿极上的绕组电流方向如图3所示。其中,三相转矩绕组引出6个出线端接于三相不对称半桥功率电路,导通单方向电流;三相轴向力绕组采用星形连接,引出4个出线端接于三相四桥臂全桥拓扑功率电路,导通双向电流。由图可知,当轴向力绕组通以正向电流时,定子1端气隙磁密增强,定子2端气隙磁密减弱,因而将产生方向指向定子1端的合成轴向力;反之,将产生指向定子2端的合成轴向力。通过对轴向力的主动控制,结合转子轴向位移闭环控制,可实现LRSRM在轴向上的高性能直线运动控制。

图3中的绕组电流方向仅是用来示意轴向力绕组在定子1和定子2中正、反串的连接方式。该电机具有两个定子铁心和一个转子铁心,共有两套集中式绕组安装在两个定子齿极上,其中一套绕组横跨在两个定子的齿极上,主要用于控制转矩,称为转矩绕组;另外一套绕组先与转矩绕组同向绕制安装在定子1齿极上,然后再反向绕制安装在定子2齿极上,主要用于控制轴向力,称为轴向力绕组,具体的绕组示意图如图2,3所示。

### 1.2 BSRM的结构与工作原理

通过对LRSRM分析发现,双绕组LRSRM轴向力的产生原理与作者课题组长期致力研究的双绕组BSRM径向力的产生原理具有一定的相似性。图4所示为12/8极双绕组BSRM结构示意图,为说明径向悬浮力产生原理,图中仅以A相绕组为例,B相和C相绕组可类似得到。与双绕组LRSRM类似,双绕组BSRM每个定子齿极上也有两套绕组,称为主绕组和悬浮绕组<sup>[12-13]</sup>。每相4个齿极上的主绕组串联,通以单向电流;位于径向相对位置齿极上的悬浮绕组串联,且在一侧齿极正向

串联、另一侧齿极反向串联,如图4所示,悬浮绕组电流可正、负双方向流通。因此,当两套绕组通以图示正向电流时,在水平方向,气隙1处的磁密增强,气隙3处的磁密减弱,产生水平向右的径向力;同理,在竖直方向,气隙2处的磁密增强,气隙4处的磁密减弱,产生竖直向上的径向力。通过控制水平和竖直方向上的径向力的大小和方向,可产生作用于转子上任意方向的合成悬浮力。因此,可通过设计合理的主绕组和悬浮绕组电流控制算法,来产生电机旋转和悬浮所需的电磁转矩和径向悬浮力。

### 1.3 两类电机相似性讨论

由以上分析不难发现,双绕组LRSRM与双绕组BSRM的转矩和轴向力/径向力的产生和控制机理既有相似性又有区别。相似性在于两者均是通过转矩绕组/主绕组提供一个主磁场,轴向力绕组/悬浮绕组提供一个偏置磁场,通过两个磁场的叠加,构成电机内部气隙磁密的不平衡分布,即LRSRM中轴向上的转子两端气隙磁密不平衡和BSRM中径向平面内的转子两侧气隙磁密不平衡。区别在于BSRM中气隙磁密在周向上分布是不对称的,而在LRSRM中,每个定子中的气隙磁密在周向上是对称分布的,从而导致两者电磁转矩的产生及相应的控制方法又有区别。另外,从不同自由度运动的角度而言,在BSRM中包含转子的旋转运动和周向平面内的径向运动,其径向运动方向为周向平面内的任意方向,即 $360^\circ$ 范围内的任意方向;而在LRSRM中包含转子的旋转运动和轴向的直线运动,其直线运动方向为轴向的正、负两个方向。

## 2 数学模型

### 2.1 BSRM数学模型

12/8极双绕组BSRM不仅要控制电机的转矩,还要实现其稳定悬浮,这两者都是通过控制主绕组和悬浮绕组电流来实现的,因此有必要建立主绕组和悬浮绕组电流与电磁转矩、悬浮力之间的数学模型。传统BSRM建模主要有两种方法,即虚位移法和麦克斯韦应力法<sup>[17,20-22]</sup>。本文主要基于虚位移法来分析BSRM和LRSRM的建模过程。虚位移法首先通过分割磁路法得到定转子的气隙磁导表达式,再建立双相导通的等效磁路模型,根据等效磁路模型计算出电感矩阵,然后通过电感矩阵和电流得到磁场储能,最后再根据机电能量转换原理求得转矩和悬浮力表达式。

BSRM的气隙磁导随着定、转子位置的变化而变化。当转子齿位于与定子齿轴线重合位置时,

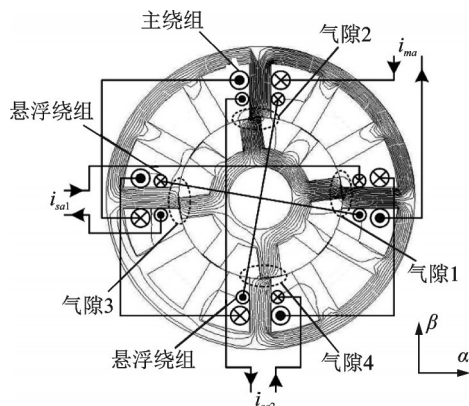


图4 双绕组BSRM悬浮原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of suspension principle of double-winding BSRM

平均气隙长度最小,因而磁导最大;而当转子齿位于与定子槽轴线重合位置时,平均气隙长度最大,因而磁导最小。当转子齿位于定子齿槽中间位置时,气隙磁导的计算就需要采用磁路分割法来进行,将气隙磁导分割成 $P_1, P_2, P_3$ 三个部分,其中 $P_1$ 为定、转子重合部分磁导, $P_2$ 和 $P_3$ 分别为边缘磁路磁导,如图5所示。

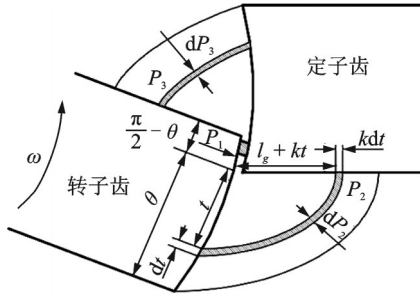


图5 气隙1磁路分割放大图

Fig.5 Enlarged map of magnetic circuit division of air gap

根据磁路的基尔霍夫定律可得磁路方程,然后可求得A相主绕组和悬浮绕组磁链,最后得到一个 $3 \times 3$ 电感矩阵。通过A相电感矩阵就可以计算得到磁场储能 $W$ ,再根据机电能量转换原理,对转子位置角 $\theta$ 求偏导就可以得到转矩表达式,对径向位移 $\alpha$ 和 $\beta$ 求偏导就可以得到悬浮力表达式,其表达式分别如下所示

$$T_a = J_s(\theta)(2N_m^2 i_{ma}^2 + N_b^2 i_{sa1}^2 + N_b^2 i_{sa2}^2) \quad (1)$$

$$F_\alpha = \frac{\partial W_a}{\partial \alpha} = N_m N_b \left\{ \frac{\mu_0 h r (\pi - 12\theta)}{6l_0^2} + \frac{32\mu_0 h r c \theta}{\pi [4rc\theta(l_0 + \alpha) + \pi l_0^2]} \right\} i_{ma} i_{sa1} \quad (2)$$

$$F_\beta = \frac{\partial W_a}{\partial \beta} = N_m N_b \left\{ \frac{\mu_0 h r (\pi - 12\theta)}{6l_0^2} + \frac{32\mu_0 h r c \theta}{\pi [4rc\theta(l_0 + \beta) + \pi l_0^2]} \right\} i_{ma} i_{sa2} \quad (3)$$

式中: $\mu_0$ 为真空磁导率; $c$ 为常数1.49; $h$ 为转子铁心轴向长度; $r$ 为转子半径; $l_0$ 为气隙长度; $N_m$ 和 $N_b$ 分别为主绕组和悬浮绕组匝数; $i_{ma}, i_{sa1}, i_{sa2}$ 分别为A相主绕组电流和两个径向悬浮绕组电流; $J_s(\theta)$ 为转矩系数,是电机的机械参数和转子位置角的函数。

因此,由数学模型可知,12/8极双绕组BSRM的电磁转矩和悬浮力均与转子位置角、主绕组电流、悬浮绕组电流相关,并且两者之间呈现强耦合的特性。

## 2.2 LRSRM数学模型的建立与有限元仿真验证

由于LRSRM中两个并列的定子下的磁场分布不仅会随着转子角度位置变化而变化,而且还会随着轴向位移的变化而发生变化,所以必须分

别求得两个定子上的磁路才能准确建立电机转矩和轴向力的表达式。假设指向气隙磁密较大的定子方向为轴向正方向,比如此时定子1下的气隙磁密较大,则转子将受到指向定子1的正方向轴向力。以定子1为例,可推导 $\theta \in (-30^\circ, 30^\circ)$ 时的转矩和轴向力表达式,而定子2下磁导的推导方法与定子1下的推导方法相同,区别仅是其关于轴向位置 $x$ 的符号为负。图6表示从轴向看(图2)转子从两个定子中间位置偏移 $x$ 的转子齿间磁导分割示意图。

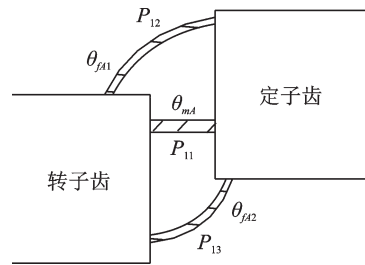


图6  $\theta \in (-30^\circ, 30^\circ)$ 的气隙磁导

Fig.6 Air-gap magnetic conductance when  $\theta \in (-30^\circ, 30^\circ)$

$$dP_{11} = \frac{u_0 r \theta_{mA}}{l_g} dh \quad (4)$$

$$dP_{12} = dP_{13} = \frac{2u_0}{\pi} \ln \left( \frac{4cr\theta_{fA1} + \pi l_g}{\pi l_g} \right) dh \quad (5)$$

式中: $c$ 为常数1.49; $\theta_{mA}, \theta_{fA1}, \theta_{fA2}$ 为三相对应定转子齿极重合面积。进一步可得

$$P_a = \frac{u_0 r \left( \frac{h_r - \delta}{2} + x \right) \left( \frac{\pi}{6} - |\theta| \right)}{l_g} + \frac{4u_0 \left( \frac{h_r - \delta}{2} + x \right)}{\pi} \ln \left( \frac{\pi l_g + 4cr|\theta|}{\pi l_g} \right) \quad (6)$$

根据图3中两个定子上绕组的连接方式和电流导通方向,以A相导通为例,可得磁通路径示意图如图7所示。

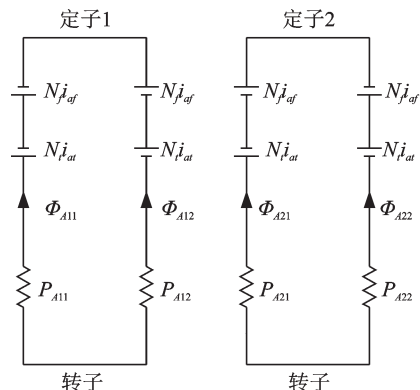


图7 两个并列定子的等效磁路示意图

Fig.7 Equivalent magnetic circuit diagram of the two stators

根据图 7 所示的等效磁路示意图列写磁路方程,再结合磁通连续性定律可以得到绕组的自感和互感,进而可得磁场储能。最后,将磁场储能分别对转子角度和轴向位移求偏导,从而得到轴向力和转矩表达式为

$$F_z = \frac{\partial W}{\partial x} = K_{fa}(\theta) N_i N_f i_{ai} i_{af} \quad (7)$$

$$T = \frac{\partial W}{\partial \theta} = K_{ta}(\theta) (N_i^2 i_{ai}^2 + N_f^2 i_{af}^2) + K_{ta}(\theta, x) N_i N_f i_{ai} i_{af} \quad (8)$$

式中: $k_{fa}(\theta)$ 为 A 相的转矩系数; $k_{ta}(\theta, x)$ 为 A 相在不同位移下的转矩系数,因为随着转子的移动,处于磁感应强度大的转子轴向长度不断变化,当转子处于中间位置或轴向力负载较轻时该项很小,近似为 0。 $K_{fa}(\theta)$ 为轴向力系数,其随着定转子齿极重合面积的增大而增大。当 $\theta \in (-30^\circ, 0^\circ)$ 时, $x \in (-0.02, 0.02)$ 时,有

$$K_{fa}(\theta) = \frac{\mu_0 r (\pi + 6\theta)}{6l_g} + \frac{4\mu_0}{\pi} \ln \left( \frac{\pi l_g - 4cr\theta}{\pi l_g} \right) \quad (9)$$

$$K_{ta}(\theta) = \frac{\mu_0 r (h_r - \delta)}{4l_g} - \frac{4\mu_0 cr (h_r - \delta)}{\pi (\pi l_g - 4cr\theta)} \quad (10)$$

$$K_{ta}(\theta, x) = x \left( \frac{\mu_0 r}{l_g} - \frac{16\mu_0 cr}{\pi (\pi l_g - 4cr\theta)} \right) \quad (11)$$

图 8 为 LRSRM 在有限元仿真结果和模型计算结果的对比如。由图 8 可知,所建模型能够较为准确地反映 LRSRM 的轴向力和转矩分布规律。

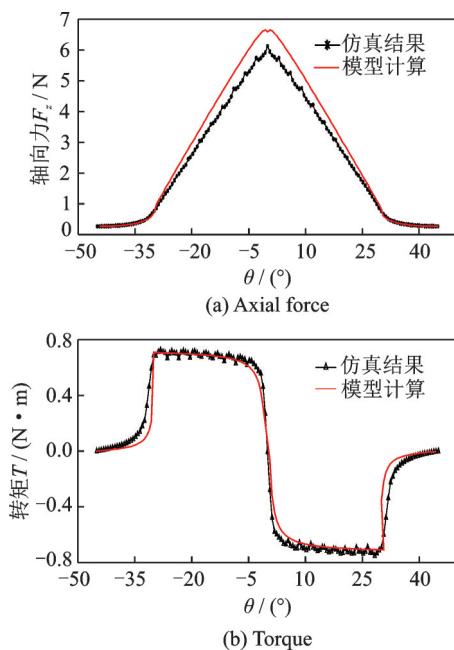


图 8 LRSRM 模型计算结果和有限元仿真结果对比验证  
Fig.8 Comparison and verification of LRSRM model calculation results and finite element simulation results

### 3 转矩和悬浮力独立控制方法

#### 3.1 BSRM 独立控制思想

图 9 所示为 BSRM 独立控制策略下的绕组电流工作区间示意图。对于双绕组 BSRM 任意一相,假设在一个导通周期的区间 II、III 内,产生的悬浮力和主绕组电流不变,则在这两个区间分别产生的正、负转矩的绝对值关于区间临界点对称相等。因此,在区间 II、III 内产生的平均转矩为零。所以,BSRM 的平均输出转矩仅由区间 I 内的主绕组电流决定,而径向悬浮力仅与区间 II、III 内的两个电流相关。因此,平均转矩和径向力可分别由不同的控制参数调节得到。所以,该控制策略被称为平均转矩和瞬时悬浮力的独立控制方法<sup>[23]</sup>。

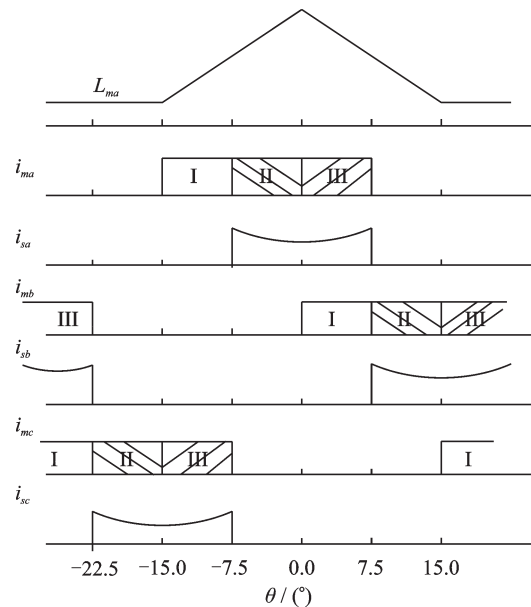


图 9 BSRM 独立控制方法电流导通区间示意图  
Fig.9 Current conduction stages of BSRMs with independent control method

#### 3.2 LRSRM 独立控制方法的提出与仿真实证

基于 BSRM 的独立控制思想,可类似设计 LRSRM 转矩和轴向力的独立控制方法。图 10 所示为 LRSRM 独立控制方法电流导通示意图,其中横坐标为 A 相的转子转角位置; $i_{at}, i_{bt}, i_{ct}$ 分别表示三相转矩绕组电流; $i_{af}, i_{bf}, i_{cf}$ 分别表示三相轴向力绕组电流。以 A 相为例,LRSRM 的正转矩产生区间为绕组电感的上升区,即图中的 $\theta \in [0^\circ, 37.5^\circ]$ 。相比而言,轴向力在整个周期内均可产生,若考虑到三相轮流提供轴向力和更大的轴向力电流比(相同励磁电流获得更大的轴向力)的因素,则可将轴向力产生区间设置为 $\theta \in [30^\circ, 60^\circ]$ 。

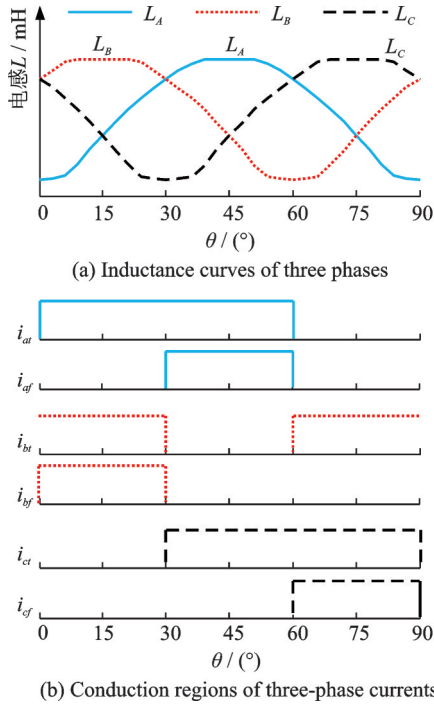


图10 LRSRM独立控制方法电流导通区间示意图

Fig.10 Current conduction stages of LRSRMs with independent control method

因此,综合转矩和轴向力的控制目标,可设置转矩绕组导通区间为 $\theta \in [0^\circ, 60^\circ]$ ,设置轴向力绕组导通区间为 $\theta \in [30^\circ, 60^\circ]$ ,称为轴向力区间。由于在一个相导通周期内给定轴向力通常保持恒定,因此在 $\theta \in [30^\circ, 60^\circ]$ 内,可控制转矩绕组和轴向力绕组的电流均关于 $\theta=45^\circ$ 的位置对称分布,即电机产生的转矩关于 $\theta=45^\circ$ 正负对称,因此电机在轴向力区间 $\theta \in [30^\circ, 60^\circ]$ 内产生的平均转矩为零。而在 $\theta \in [0^\circ, 30^\circ]$ 内,由于轴向力绕组不导通电流,因而A相不产生轴向力(此时电机轴向力由前一励磁相B相提供),全部产生转矩,称为转矩区间,因此电机转矩可通过调节该区间内的A相转矩绕组电流来进行主动控制。

图11所示为采用独立控制方法的LRSRM仿真结果,其中,轴向力给定值为5 N,转矩给定值为0.5 N·m。由仿真波形可知,LRSRM的输出转矩脉动较大,电机换相处的悬浮力有一定程度的跌落。

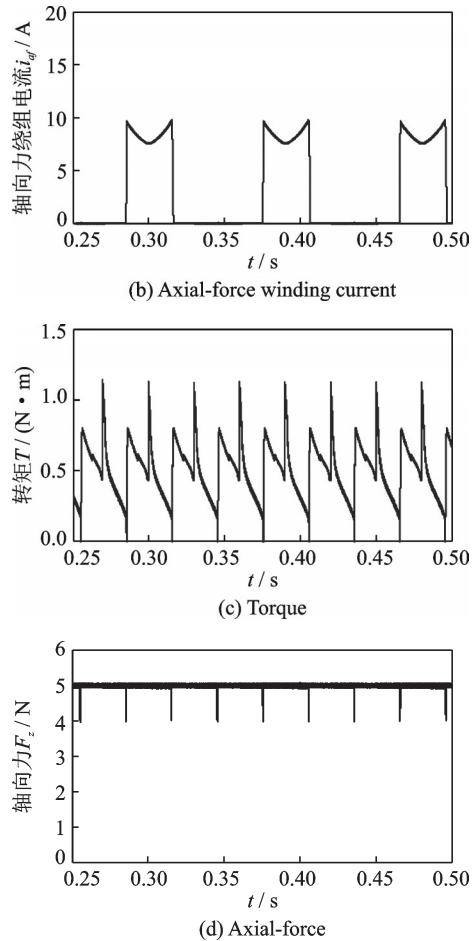
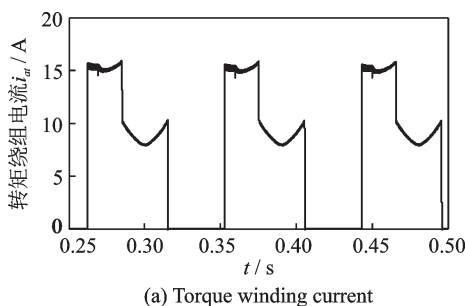


图11 LRSRM独立控制方法仿真结果

Fig.11 Simulation results of LRSRMs with independent control method

### 4 转矩和悬浮/轴向力直接控制方法

由于绕组电流脉冲式供电以及定、转子双凸极结构导致的电磁力脉动,使得传统SRM中存在转矩脉动大、振动噪声明显等问题,一定程度上限制了SRM的应用领域。在BSRM中,该脉动的电磁力使得电机转矩和悬浮力均存在脉动,影响了转矩和悬浮的控制效果。因此,基于传统交流电机的直接转矩控制思想,先后提出了直接转矩控制和直接悬浮力控制方法(Direct torque control and direct force control, DTC & DFC)和直接瞬时转矩控制和直接悬浮力控制方法(Direct instantaneous torque control and direct force control, DITC & DFC)。

在LRSRM两自由度驱动系统中,脉动的电磁力也使得电机不仅在旋转运动时存在转矩脉动,而且在直线运动时也存在轴向力脉动。因此,为了获得平稳的转矩和轴向力,提升驱动系统的控制精度和运行性能,必须研究能有效抑制LRSRM转矩和轴向力脉动的控制方法,而之前在BSRM研究中提出的DTC & DFC方法和DITC & DFC方法可

类似应用于LRSRM的研究中。

#### 4.1 BSRM直接转矩和直接悬浮力控制原理

基于电磁力原理经公式推导可知,双绕组BSRM的转矩和转子齿极所受到的径向力可分别表示为

$$T = i \frac{\partial \Psi(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (12)$$

$$F_r = \frac{\Psi^2}{2N^2 S \mu_0} \quad (13)$$

式中: $B$ 为气隙磁密; $S$ 为定、转子齿极重叠面积; $\mu_0$ 为真空磁导率; $\Psi$ 为气隙磁链; $N$ 为定子齿极绕组匝数。由此可知,每个转子齿极所受的径向力与对应的定子齿极绕组产生磁链的平方成正比,因而对转矩和悬浮力的控制均可统一为对磁链的控制<sup>[24]</sup>。

以A相为例来分析有效磁链的组成,为简化分析,忽略绕组间互感与相间互感,并假设单个齿极上的两套绕组磁链分别为 $\Psi_m$ 和 $\Psi_s$ 。由于气隙1处的两套绕组中的电流方向一致,故产生的磁链之和为

$$\Psi_1 = \Psi_m + \Psi_s \quad (14)$$

同理可得气隙2处的绕组产生的磁链 $\Psi_2$ 。

另外,由于齿极3和4上的两套绕组中的电流是反向的, $\Psi_3$ 和 $\Psi_4$ 均为两者之差。A相产生的总磁链可表示为

$$\Psi_A = \Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_3 + \Psi_4 = 4\Psi_m \quad (15)$$

由式(15)可知,一方面,A相总磁链仅与主绕组产生的磁链有关,而与悬浮绕组产生的磁链无关。所以,三相合成磁链仅与三相主绕组产生的磁链有关,而与悬浮绕组磁链无关。因而,对于电机的直接转矩控制而言,仅需直接控制三相主绕组产生的磁链即可<sup>[20]</sup>。

另一方面,悬浮绕组磁链是构成径向相对位置处的气隙磁通分布不对称的主要因素,因而可通过直接控制悬浮绕组磁链来控制产生悬浮力的大小<sup>[24]</sup>。

#### 4.2 BSRM直接瞬时转矩和直接悬浮力控制原理

双绕组BSRM的DITC & DFC控制策略省去了磁链滞环控制,将瞬时转矩和悬浮力作为直接被控对象进行滞环控制。设定主绕组的控制区间,由转矩滞环信号选择主绕组电压符号,确定主绕组主电路的开关信号,将输出转矩控制在给定的滞环范围内。设定悬浮绕组的控制区间,通过悬浮力滞环信号选择悬浮绕组电压符号,实现悬浮力的直接控制,避免了换相时悬浮力缺失的现象<sup>[21]</sup>。

当转子处于电感上升区,即此时主绕组控制区间处于 $\theta \in [-22.5^\circ, 0^\circ]$ ,转矩滞环信号的选择遵循图12(a)给出的控制规则,由转矩滞环信号确定主

绕组电压符号,实现闭环调节。当实际瞬时转矩小于参考转矩,且转矩偏差大于内部滞环的极限 $\Delta T_{\min}$ ,为增大瞬时转矩,绕组两端应施加正电压增大电流,选取电压符号为“+”;若转矩偏差小于内部滞环的极限 $-\Delta T_{\min}$ ,为减小瞬时转矩,选取电压符号为“-”,绕组进入零电压续流状态;若转矩偏差小于外部滞环的极限 $-\Delta T_{\max}$ ,应迅速降低瞬时转矩,绕组两端施加负电压,选取电压符号为“-”;若转矩偏差大于内部滞环的极限 $-\Delta T_{\min}$ ,重新选择电压符号为“0”,阻碍转矩的减小<sup>[25]</sup>。

而当转子处于电感下降区时,即主绕组控制区间处于 $\theta \in [0^\circ, 7.5^\circ]$ ,转矩滞环信号的选择遵循图12(b)给出的控制规则,增减转矩的逻辑与电感上升区相反。

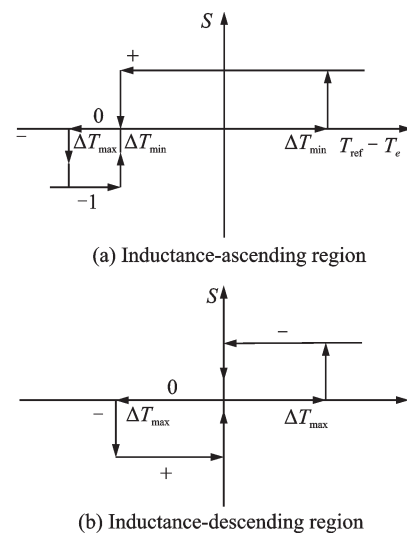


图12 DITC转矩滞环单元工作原理

Fig.12 Principle of torque hysteresis-loop unit of DITC

与BSRM的DTC & DFC的悬浮力控制方法类似,根据悬浮力滞环控制信号,选择悬浮绕组电流的导通方向和幅值增减信息,进而确定开通悬浮绕组主电路的开关信号,最终实现BSRM的直接悬浮力控制<sup>[25]</sup>。

#### 4.3 LRSRM转矩和轴向力的直接控制方法的提出与仿真验证

基于4.1和4.2节中BSRM的转矩和悬浮力的直接控制思想,可类似设计LRSRM的直接转矩和直接轴向力控制(Direct torque control and direct axial-force control, DTC & DAFC),以及直接瞬时转矩和直接轴向力控制(Direct instantaneous torque control and direct axial-force control, DITC & DAFC)。

在LRSRM的DTC & DAFC方法中,LRSRM的转矩绕组和轴向力绕组的控制思路分

别对应于BSRM中的主绕组和悬浮绕组。基于BSRM类似分析,可认为每相绕组产生的总磁链仅与转矩绕组磁链有关,而与轴向力绕组无关。因此,LRSRM的转矩控制可通过直接控制转矩绕组磁链来实现。而轴向力绕组磁链主要用来产生两台并列定子对应气隙磁密的不平衡度,所以可通过控制轴向力绕组磁链来直接控制轴向力的大小和方向。在LRSRM的DITC & DAFC方法中,转矩控制不再通过选择电压矢量来确定主电路开关信号的方式来实现,而是通过直接转矩滞环单元来确定电路的开关状态,从而达到控制直接转矩的目的,其中转矩滞环基本原理如图12所示。同时,根据轴向力滞环控制信号,确定轴向力

绕组电流的导通方向和幅值增减,从而控制轴向力绕组主电路的通断状态,最终实现LRSRM轴向力的直接控制。

图13和14分别为采用这两种方法的系统控制框图。这两种方法的主要区别在于是否将磁链作为被控量。其中,DTC方法将磁链控制成圆形,该思想继承于正弦交流电机DTC的控制思路;而DITC方法中关于转矩控制仅有转矩滞环控制部分,如图14中虚线框内所示,没有磁链估算及其滞环控制环节,为与传统DTC相区别,将该方法称为直接瞬时转矩控制。对于DTC而言,为将转矩控制成圆形轨迹,每相绕组产生了较多的负转矩,因而增加了铜损和开关损耗,降低了系统效率。

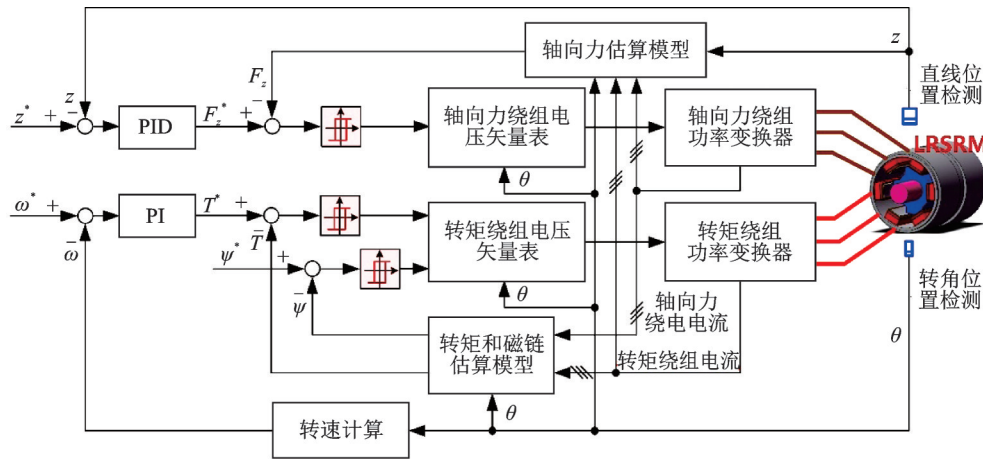


图13 采用DTC & DAFC方法的LRSRM系统控制框图

Fig.13 System control block of DTC & DAFC method for LRSRMS

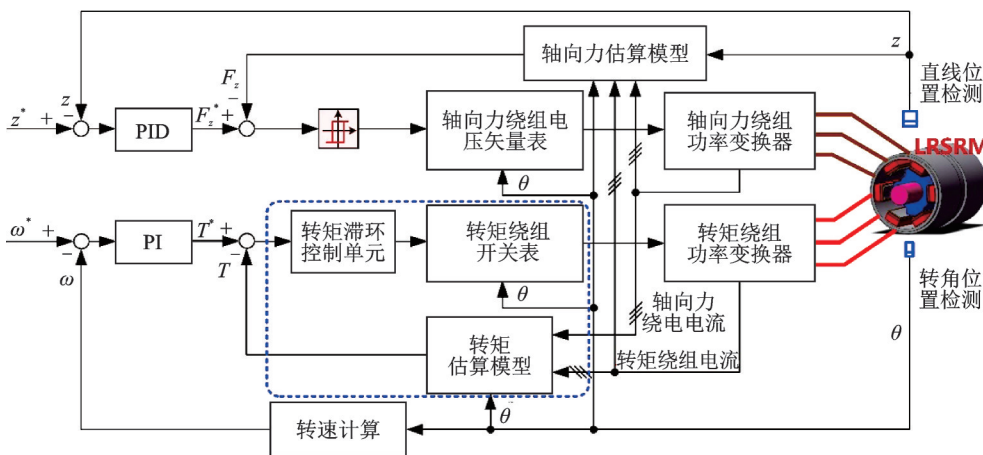


图14 采用DITC & DAFC方法的LRSRM系统控制框图

Fig.14 System control block of DITC & DAFC method for LRSRMS

图15为采用DTC & DAFC的LRSRM仿真结果,其中,轴向力给定值为5 N,转矩给定值为0.5 N·m。由仿真波形可知,相比独立控制方法,采用DTC & DAFC可明显降低转矩脉动。另外,由于重叠换相时刻的存在,电机换相处并未有明显的

悬浮力跌落现象。

图16为采用DITC & DAFC的LRSRM仿真结果,其中,轴向力给定值为5 N,转矩给定值为0.8 N·m。与DTC & DAFC类似,该方法的转矩脉动和悬浮力跌落也得到了明显的改善。



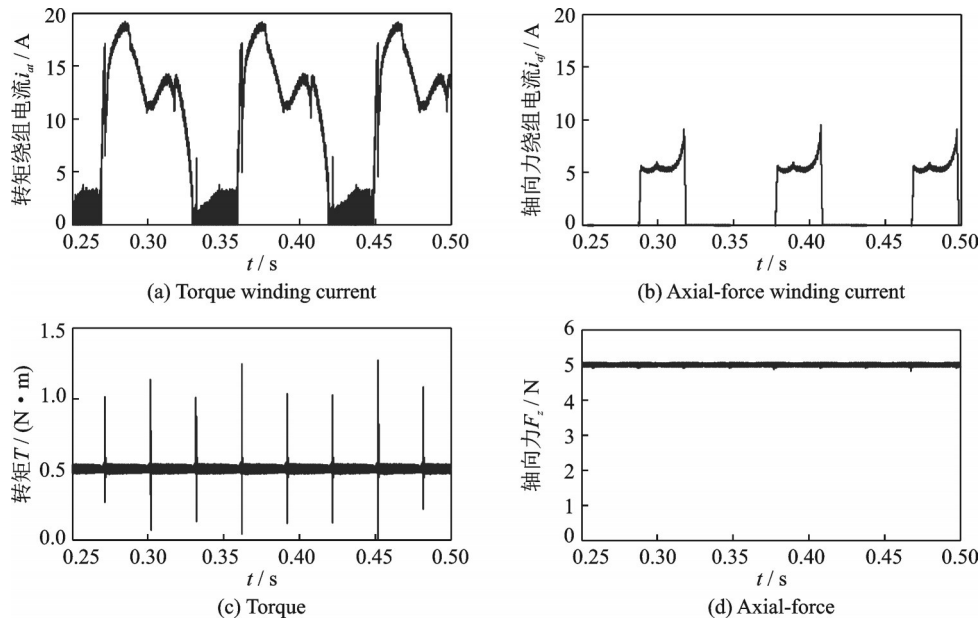


图 15 LRSRM 直接转矩和直接轴向力控制方法仿真结果

Fig.15 Simulation results of LRSRMs with DTC and DAFC method

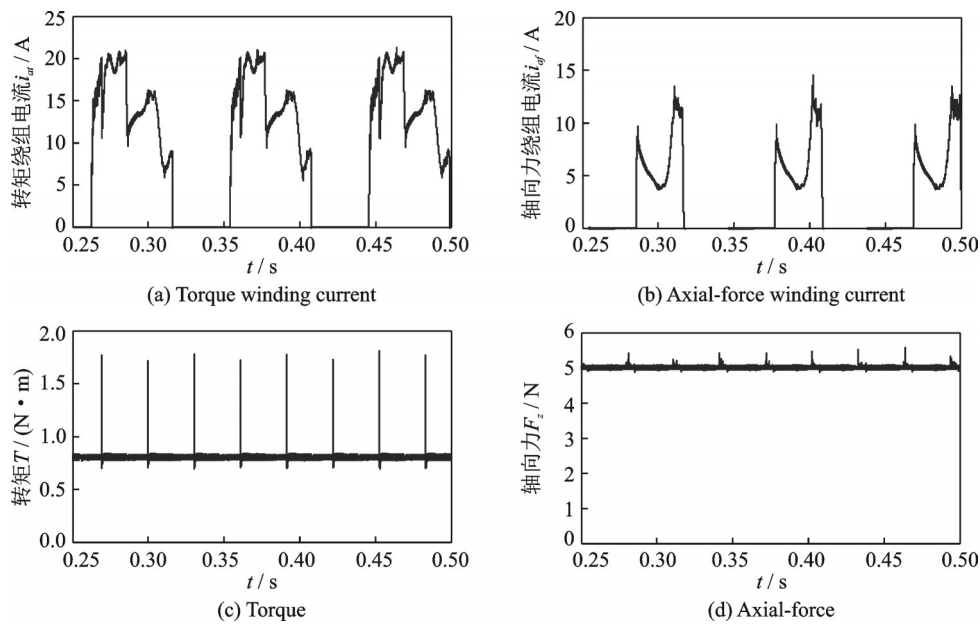


图 16 LRSRM 直接瞬时转矩和直接轴向力控制方法仿真结果

Fig.16 Simulation results of LRSRMs with DITC and DAFC method

## 5 结 论

本质上,多自由度开关磁阻电机通过构造作用于电机转子上的电磁力的三维分布特性,创造电机多自由度运动的可能性,再施以合理设计的电磁力协调控制策略,能够实现其高性能多自由度运行。本文通过对比双绕组 BSRM 和 LRSRM 的运行原理和控制规律,发现 LRSRM 的转矩和轴向力控制可借鉴双绕组 BSRM 的转矩和悬浮力协调控制方法,并分别将独立控制、直接转矩和直接悬浮力控制,以及直接瞬时转矩和直接悬浮力控制的思想应用于 LRSRM 中,通过 MATLAB/Simulink 建模仿

真,验证了 3 种控制方法的可行性,实现了 LRSRM 的转矩和轴向力的可控调节。

### 参考文献:

- [1] MILLER T. Electronic control of switched reluctance machines[M]. UK: Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 2001.
- [2] RADUN A, RICHTER E. A detail power inverter design for a 250 kW switched reluctance aircraft engine starter/generator[C]//Proceedings of Aerospace Atlantic Conference and Exposition. [S. l.]: SAE, 1993: 20-23.
- [3] OMEKANDA A. Switched reluctance machines for

- EV and HEV propulsion: State-of-the-art[C]//Proceedings of 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD). Paris, France:[s.n.], 2013: 1-5.
- [4] CHIBA A, KIYOTA K, HOSHI N, et al. Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(1): 175-182.
- [5] YAN N, CAO X, DENG Z. Direct torque control for switched reluctance motor to obtain high torque-ampere ratio[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5144-5152.
- [6] CHEN H, YANG H, CHEN Y, et al. Reliability assessment of the switched reluctance motor drive under single switch chopping strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2395-2408.
- [7] MENDRELA E. Rotary-linear induction motor with solid rotor[J]. Rozpr Electrotech, 1976, 2: 383-408. (in Polish)
- [8] 付兴贺,林明耀. 基于电磁感应原理的两自由度直线旋转电机研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 1-13.  
FU Xinghe, LIN Mingyao. Development of two-degrees-of-freedom linear-rotary motor based on the principle of electromagnetic induction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 1-13.
- [9] 司纪凯,司萌,封海潮,等. 两自由度直驱电机的研究现状及发展[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 97-106.  
SI Jikai, SI Meng, FENG Haichao, et al. Research status and development of two-degree-of-freedom direct drive motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 97-106.
- [10] 欧景,柴凤,毕云龙. 旋转-直线电机技术发展现状分析[J]. 微电机, 2013, 46(4): 88-92.  
OU JING, CHAI Feng, BI Yunlong. Analysis of rotary-linear motor technology development status[J]. Micromotors, 2013, 46(4): 88-92.
- [11] JANG S, LEE S, CHO H, et al. Design and analysis of helical motion permanent magnet motor with cylindrical Halbach array[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 3007-3009.
- [12] CHEN L, HOFMANN W. Design of one rotary-linear permanent magnet motor with two independently energized three phase windings[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. [S.l.]:IEEE, 2007: 1372-1376.
- [13] FANG S, GUO K, LIN H, et al. Electromagnetic analysis of a HTS linear-rotary permanent magnet actuator[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.
- [14] XU L, LIN M, FU X. End-effects analysis and experimental study of a double stator linear-rotary permanent magnet motor with long mover[J]. IET Electrical Power Applications, 2017, 11(9): 1601-1609.
- [15] 刘泽远,邓智泉,陈小元,等. 无轴承开关磁阻电机拓扑及解耦机理分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 731-743.  
LIU Zeyuan, DENG Zhiquan, CHEN Xiaoyuan, et al. Topology and decoupling principle and analysis on bearingless switched reluctance motor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(5): 731-743.
- [16] TAKEMOTO M, CHIBA A, FUKAO T. A method of determining advanced angle of square-wave currents in a bearingless switched motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2001, 37(6): 1702-1709.
- [17] TAKEMOTO M, SUZUKI H, CHIBA A, et al. Improved analysis of a bearingless switched reluctance motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2001, 37(1): 26-34.
- [18] CAO X, YANG H, DENG Z, et al. Equivalent transformation and control for single-winding bearingless switched reluctance motors[J]. Electric Power Components and Systems, 2015, 44(9): 1040-1050.
- [19] CAO X, YANG H, ZHANG L, et al. Compensation strategy of levitation forces for single-winding bearingless switched reluctance motor with one winding total short circuited[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5534-5546.
- [20] 曹鑫,邓智泉,杨钢,等. 无轴承开关磁阻电机麦克斯韦应力法数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 78-83.  
CAO Xin, DENG Zhiquan, YANG Gang, et al. Mathematical model of bearingless switched reluctance motors based on Maxwell stress tensor method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 78-83.
- [21] 曹鑫. 12/8极无轴承开关磁阻电机的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.  
CAO Xin. Research on 12/8 bearingless switched reluctance machine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [22] 孙玉坤,刘羨飞,王德明,等. 基于有限元分析的磁悬浮开关磁阻电机数学模型的全角度拓展[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 34-39.  
SUN Yukun, LIU Xianfei, WANG Deming, et al. Extension of mathematical model to full angle for bearingless switched reluctance motors based on finite-element analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 34-39.
- [23] CAO X, DENG Z Q, YANG G, et al. Independent control of average torque and radial force in bearingless switched-reluctance motors with hybrid excitations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1376-1385.
- [24] CAO X, SUN Q, LIU C, et al. Direct control of torque and levitation force for dual-winding bearingless switched reluctance motor[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 145: 214-222.
- [25] 张蕾. 无轴承开关磁阻电机直接瞬时转矩控制方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.  
ZHANG Lei. The research of direct instantaneous torque control for bearingless switched reluctance motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.