

双定子开关磁阻电机的磁场分析及转矩计算

李争¹,王鑫¹,张丽平¹,薛智宏¹,王群京²

(1. 河北科技大学 电气工程学院,河北 石家庄 050018;2. 安徽大学 高节能电机及控制技术国家地方联合工程实验室,安徽 合肥 230601)

摘要:在普通开关磁阻电机的基础上提出了一种新型双定子开关磁阻电动机结构并介绍了其工作原理和控制机理。该电机采用内、外双定子结构并且在轴线方向上定子、转子均为三段式设计,提高了电动机的输出转矩。此外,为了减小输出转矩脉动,增加了电动机定、转子的齿极数。通过建立该电动机的数学模型,计算出电机的电感、磁链、电流和转矩特性,采用有限元法对各物理量以及电机气隙磁场特性分布情况进行分析,对比了双定子结构与普通开关磁阻电动机的输出转矩和相电流,验证了双定子结构电机的优良性能。

关键词:开关磁阻电动机;双定子;磁场分析;转矩

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20360

Magnetic Field Analysis and Torque Calculation of Double Stator Switched Reluctance Motor

LI Zheng¹, WANG Xin¹, ZHANG Liping¹, XUE Zhihong¹, WANG Qunjing²

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 2. National Engineering Laboratory of Energy-saving Motor & Control Technique, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: A new structure of dual-stator switched reluctance motor was proposed on the basis of conventional switched reluctance motor, and its working principle and control mechanism were introduced. The motor adopted double stator structure inside and outside, and the stator and rotor were three-stage design in the direction of the center axis. The output torque of the motor was improved. In addition, the number of teeth of the motor stator and rotor was increased in order to reduce the output torque ripple. Through establishing a mathematical model of the motor, the characteristics of the inductance, flux, torque and current of the motor were calculated. The finite element method was used to analyze the physical quantities and the magnetic field distribution of the motor air gap. The output torque and phase current of the dual stator structure and ordinary structure were compared, and the excellent performance of the dual stator motor was verified.

Key words: switched reluctance motor; double stator; magnetic field analysis; torque

开关磁阻电动机作为一种新型电动机具有结构简单、启动电流小、启动力矩大、成本低、调速性能好、效率较高、可靠性较好等优良性能,在飞机、电动汽车、风力发电等军用、民用领域具有广阔的应用前景和巨大的发展潜力^[1]。双定子结构的电动机具有精度高、响应快、加速度大、转矩波动小、过载能力高、机械集成度高、材料利用率高和驱动系统灵活多样等优点,在有限的空间条件下,可以大大减小机械系统的体积和重量,提

高系统的精度和动态性能^[2]。

根据开关磁阻电动机的特性提出了一种双定子开关磁阻电动机新型结构。该电动机由内、外双定子构成,定子和转子沿中轴线方向包括三段结构,相邻两段之间齿槽均相互错开半个极距角度,电动机内定子外侧和外定子内侧均为凹面球状,转子能实现一定的角度偏转范围。较传统电动机相比,具有电动机结构简单紧凑、占用空间体积小、输出转矩大、转矩脉动小等优良性

基金项目:国家自然科学基金(51577048,51877070,51637001);河北省自然科学基金(E2018208155);河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2018228);高节能电机及控制技术国家地方联合工程实验室开放课题基金(KFKT201804)

作者简介:李争(1980—),男,博士,教授,Email:Lzhfgd@163.com

能^[3]。本文针对该电动机的电感、转矩、磁链和电流进行了解析法建模分析与有限元法建模分析,并采用有限元法分析了该电动机的气隙磁场特性。

1 双定子开关磁阻电动机的结构模型和控制原理

双定子开关磁阻电动机的主要特征为双定子结构,双定子结构分为外定子和内定子。电动机整体结构图如图1所示。

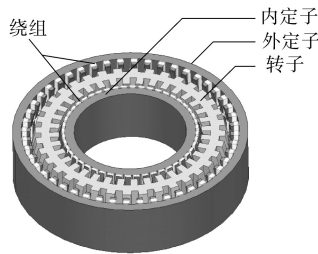


图1 双定子开关磁阻电动机整体结构图
Fig.1 Overall structure of double stator switched reluctance motor

图2所示为电动机的定子和转子部分,其中外定子的铁心内侧轮廓为凹面球状,内定子的铁心外侧轮廓为凸面球状,且为齿槽式结构,外定子和内定子的齿极上采用集中式绕组分布,其轭部均设有48个定子齿极。转子位于外定子和内定子之间,同样两侧为齿槽式结构,在转子的轭

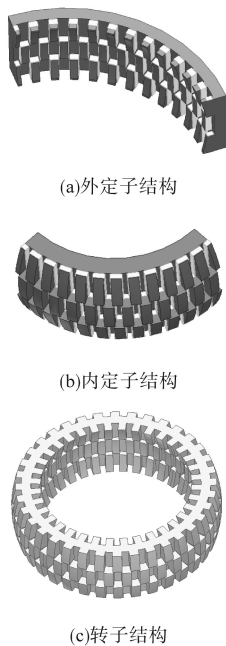


图2 电动机的定子和转子结构
Fig.2 Stator structure and rotor structure of the motor

部内、外表面均设有36个转子齿极,转子上既无永磁体也无分布绕组。此外,外定子、内定子和转子沿中轴线方向为三段式结构,相邻两段之间均相互错开半个极距角度。双定子开关磁阻电机的主要结构参数如下:外定子外径180 mm,内定子内径40 mm,内、外气隙0.5 mm,定子齿极数48,转子齿极数36,外定子轭高20 mm,内定子轭高15 mm,转子轭高25 mm,铁心长度60 mm。

该电动机的驱动外电路如图3所示,根据电动机的结构,将其分为4相,依次按照A—B—C—D—A的顺序给各相绕组通电,遵循“磁阻最小化原理”,将会产生磁阻电磁转矩,从而可以实现转子逆时针旋转的自转运动。相反,改变电动机各相的通电顺序,电动机转子将沿顺时针方向运动。各相分别有一个独立的变换器电路单独进行供电,每相之间相互独立,具有一定的容错能力。采用直流源供电方式给电动机外定子和内定子上集中式分布的线圈通电,以A相为例,控制电压电路A相导通,开关管 S_1, S_2 导通,电源经过 D_1, S_1, D_2, S_2 给A相绕组供电,A相线圈产生磁通,在磁力的牵引下转子会发生转动,直到转子转到磁阻最小的位置,为使转子能够连续转动,在转子到达磁阻最小位置之前将A相控制电压电路关断,然后B、C、D三相轮流导通^[4]。

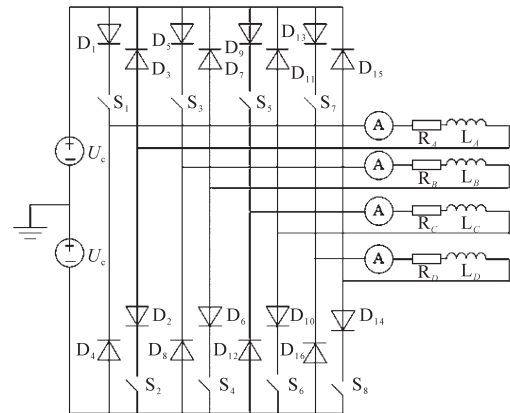


图3 电动机控制电路示意图
Fig.3 Motor control circuit diagram

2 双定子开关磁阻电动机的数学模型

双定子开关磁阻电动机作为磁阻类电机,电机的定子和转子均为凸极结构,由于其自身的工作原理和电动机结构,导致电动机在运行的过程中存在着磁路饱和和非线性的情况,从而会使电动机的电感、相电流等其它各个物理量随着转子

位置角的变化作周期性变化,四相绕组轮流通电决定了电动机存在着气隙磁密和转矩都是脉动性质的、波形不规则等问题。鉴于电动机可控变量多,工作状态复杂多变,因此通过建立线性数学模型对电动机进行简单的分析计算。

2.1 双定子开关磁阻电动机电感的线性分析

根据电动机转子的位置角将电感曲线进行区域划分,在每个区间内用线性化的曲线近似代替原曲线,从而使电动机的转矩和电流分析简化。

该电动机1个导电周期内的电感线性曲线如图4所示。

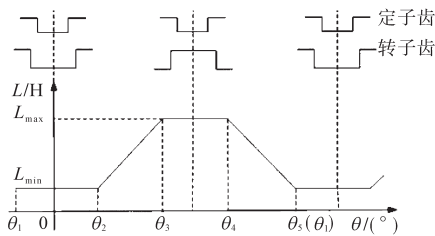


图4 线性模型下电感与转子位置角的关系图

Fig.4 The relationship between inductance and rotor position angle in linear model

以电动机转子凹槽中心线与定子凸极中心线重合的位置作为 0° 起始点, θ_2 为转子齿极前沿与定子齿极前沿重合时的转子位置角,此时电感由最小值开始上升,上升到电动机转子的前沿与定子的后沿重合时,即 θ_3 位置角,此时电达到最大值 L_{\max} ,停止上升^[5]; θ_4 为转子后沿与定子前沿重合时的转子位置角,之后电感开始下降;在 $\theta_3\sim\theta_4$ 区间内,电动机转子与定子齿极部分始终重合,磁阻最小,电感保持最大值 L_{\max} 不变; θ_5 为转子齿极后沿与定子齿极后沿重合时的转子位置角,电感下降到最小值 L_{\min} ,即下一周期 θ_1 的转子位置角;在 $\theta_1\sim\theta_2$ 区间,电动机转子齿极与定子齿极没有重合部分,磁阻最大,电感保持最小值 L_{\min} 不变,如此循环重复下去^[6]。因此得出电动机的电感 $L(\theta)$ 与转子位置角 θ 的关系式如下:

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min} & \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ K(\theta - \theta_2) + L_{\min} & \theta_2 \leq \theta \leq \theta_3 \\ L_{\max} & \theta_3 \leq \theta \leq \theta_4 \\ L_{\max} - K(\theta - \theta_4) & \theta_4 \leq \theta \leq \theta_5 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $K=(L_{\max}-L_{\min})/(\theta_3-\theta_2)$

式中: $L(\theta)$ 为定子齿与转子齿中变化的电感; L_{\min} , L_{\max} 分别为电感的最小值和最大值; θ 为转子位置角; K 为电感曲线上升或下降的斜率。

2.2 电动机的电压特性和转矩特性

根据该电动机结构和参数的对称性,以其中的A相为例对其进行分析,得到电动机的电压方程为

$$U_a = R_a i_a + d\Psi_a / dt \quad (2)$$

式中: U_a 为A相绕组端电压; R_a 为A相绕组电阻; i_a 为A相绕组电流; Ψ_a 为A相绕组磁链,是转子位置 θ 和A相绕组电流的函数,即 $\Psi_a = \Psi(\theta, i_a)$ ^[7]。

当电动机磁路结构处于不变的情况下,电感 L_a 为恒定值,此时的电压方程为

$$U_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (3)$$

当电动机的转子齿极与定子齿极发生交错时,即磁路结构发生变化,电感 L_a 处于线性上升或下降区间,此时的电压方程为

$$\begin{aligned} U_a &= R_a i_a + d\Psi_a / dt \\ &= R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{\partial L_a}{\partial \theta} \omega \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\omega = d\theta/dt$

式中: ω 为机械角速度。

将电压方程式(4)左右两边乘以A相绕组电流 i_a ,此时电压方程为

$$\begin{aligned} U_a i_a &= R_a i_a^2 + L_a i_a \frac{di_a}{dt} + i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} \omega \\ &= R_a i_a^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_a i_a^2 \right) + \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} \omega \end{aligned} \quad (5)$$

因此,A相产生的转矩为

$$T_a = \frac{1}{2} \frac{\partial L_a}{\partial \theta} i_a^2 \quad (6)$$

电动机的其它三相与A相原理相同,从而可以得到电动机总的转矩 T 的表达式为

$$T = \frac{1}{2} \frac{\partial L_a}{\partial \theta} i_a^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial L_b}{\partial \theta} i_b^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial L_c}{\partial \theta} i_c^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial L_d}{\partial \theta} i_d^2 \quad (7)$$

2.3 电动机的相绕组磁链特性和电流特性分析

根据前面得到的电压方程式(2),忽略电动机绕组上的电阻压降,可得:

$$U_a = \frac{d\Psi_a}{dt} = \frac{d\Psi_a}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\Psi_a}{d\theta} \omega \quad (8)$$

$$d\Psi_a = \frac{U_a}{\omega} d\theta \quad (9)$$

从式(9)中可以看出,在A相导通时,即 $U_a=U_s$ (U_s 为电动机外接电源电压),若保持电动机转子的角速度 ω 不变,则电动机相绕组磁链 Ψ_a 将会根据转子位置角 θ 的变化以恒定的比率变化。当控制开关管的脉冲电压源开通($\theta=\theta_{on}$),此时相绕组为正向电源电压,磁链从零开始逐渐上升;当脉冲

电压源关断($\theta=\theta_{\text{off}}$),此时相绕组为反向电源电压,磁链上升到最大值开始下降到零结束。

图5为在1个电感变化周期内的相绕组磁链曲线。

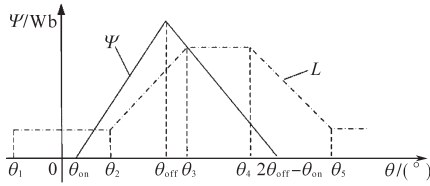


图5 电感变化周期内的相绕组磁链示意图
Fig.5 Diagram of phase winding flux linkage in the period of inductance change

图5中,当 $\theta=\theta_{\text{on}}$ 时, $\Psi_a=0, U_a=U_s$,从而可以得到该相导通期间的磁链方程为^[8-10]

$$\Psi(\theta) = \frac{U_s}{\omega}(\theta - \theta_{\text{on}}) \quad (10)$$

当 $\theta=\theta_{\text{off}}$ 时, $\Psi_a=\Psi_{\text{max}}, U_a=-U_s$,此时磁链方程为

$$\Psi(\theta) = \frac{U_s}{\omega}(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta) \quad (11)$$

当 $\theta=2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}}$ 时,相绕组磁链衰减至零直到下一个周期。

电感变化周期内的相绕组电流示意图如图6所示。

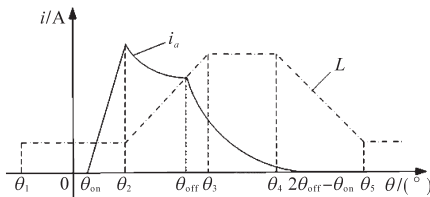


图6 电感变化周期内的相绕组电流示意图
Fig.6 Diagram of phase winding current in the period of inductance change

图6中, θ_{on} 和 θ_{off} 分别是脉冲电压源的开通角和关断角,当转子位置角 θ 位于 $\theta_1\sim\theta_2$ 之间时,电动机控制电路功率开关管导通,相绕组开始通电,此时电感处于最低值状态 L_{min} ,在 $\theta_1\sim\theta_2$ 区间内,电感值保持最小值不变, $\partial L/\partial\theta=0$,没有产生旋转电势,因此在此区间内相电流呈线性增长趋势,且上升速率较快^[11-13],相电流 i_a 表达式为

$$i_a(\theta) = \frac{U_a}{L_{\text{min}} \omega}(\theta - \theta_{\text{on}}) \quad (12)$$

当转子位置角 θ 位于 $\theta_2\sim\theta_{\text{off}}$ 之间时,在这段区间内,电感 L 值呈线性上升趋势,相绕组中产生旋转电势压降,因此绕组中的相电流不会再呈线性增长趋势,甚至出现下降情况,期间相电流 i_a 表达式为

$$i_a(\theta) = \frac{U_a(\theta - \theta_{\text{on}})}{\omega[L_{\text{min}} + K(\theta - \theta_2)]} \quad (13)$$

当转子位置角 θ 位于 $\theta_{\text{off}}\sim\theta_3$ 之间时,这时由反向电压源作用于电动机绕组回路中,电感 L 值仍然呈线性上升趋势,即 $\partial L/\partial\theta > 0$,续电流依然产生电动转矩,但是电动机中的相绕组磁链已达到峰值并开始下降,因此相电流 i_a 逐渐减小,并以较快速率下降^[14],相电流 i_a 表达式为

$$i_a(\theta) = \frac{U_a(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta)}{\omega[L_{\text{min}} + K(\theta - \theta_2)]} \quad (14)$$

当转子位置角 θ 位于 $\theta_3\sim\theta_4$ 之间时,在这段区间内电动机电感保持最大值 L_{max} 不变,即 $\partial L/\partial\theta=0$,此时同样没有旋转电势,不会产生电磁转矩,在反向电压的作用下,相电流 i_a 继续衰减,表达式为

$$i_a(\theta) = \frac{U_a(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta)}{\omega L_{\text{max}}} \quad (15)$$

当转子位置角 θ 位于 $\theta_4\sim\theta_5$ 之间时,此时电感呈线性下降趋势,即 $\partial L/\partial\theta < 0$ 会产生反向磁阻转矩,但在反向电压的作用下相电流 i_a 直至衰减为0^[15],其表达式为

$$i_a(\theta) = \frac{U_a(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta)}{\omega[L_{\text{max}} - K(\theta - \theta_4)]} \quad (16)$$

根据以上对电动机相电流的分析,可以得到电流与脉冲电压源的开通角 θ_{on} 、关断角 θ_{off} 、主电路的外加电压源 U_s 、电动机电感 L 和转子角速度 ω 等因素密切相关。其中外加电压源与相电流成正比关系,转子角速度与相电流成反比关系,因此可以通过调节相关参数控制电动机的相电流。

3 双定子开关磁阻电动机的有限元分析

前面建立了双定子开关磁阻电动机的数学模型,采用解析法主要对电动机的电压、转矩和相电流进行了理论推导,得到相应的解析式。下面利用电磁分析计算软件对其进行计算,验证解析法的分析结果。为进一步分析电动机的磁场性能,对电动机气隙磁场进行仿真,得到并分析了电动机二维磁场分布图和三维气隙磁密分布情况。

3.1 双定子开关磁阻电动机磁场特性分析

双定子开关磁阻电动机的磁路结构与单侧定子结构开关磁阻电动机磁路结构相比发生了一些变化。图7、图8所示分别为单侧定子结构电动机

和双定子结构电动机的某相导通时刻二维磁力线分布图。通过两图的比较可以发现,双定子结构电动机的磁力线从电动机外定子铁心出发,通过外定子齿极、外气隙到达转子外侧齿极部分,再流经转子铁心之后从转子的内侧齿极通过内气隙流向内定子,到达下一个A相再从内向外流出至电动机外定子铁心,形成闭合回路。而单侧电动机磁路结构相对简单,磁力线从定子齿极到转子齿极所形成的闭合回路只需经过一个气隙,无内外双定子结构的齿极错位问题。图9所示为双定子结构电动机二维磁通密度云图,定、转子齿极轴线重合之处,磁力线最密集,磁密最大,磁阻最小。

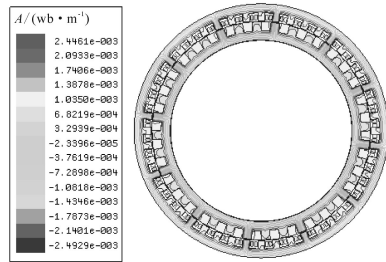


图7 单定子结构电动机磁力线分布图
Fig.7 Distribution diagram of magnetic field lines of single stator structure motor

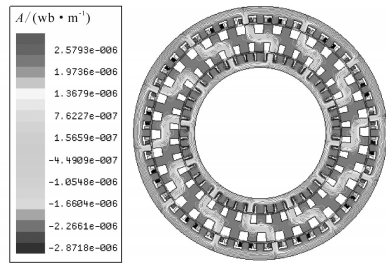


图8 双定子结构电动机磁力线分布图
Fig.8 Distribution diagram of magnetic field lines of double stator structure motor

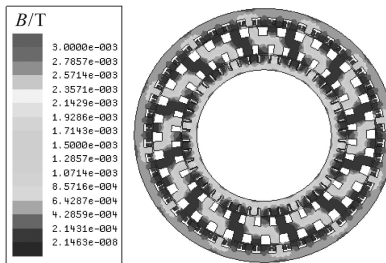


图9 双定子结构电动机磁密云图
Fig.9 Magnetic dense cloud diagram of double stator structure motor

图10为球坐标系下该电动机气隙磁密 B 随空间角 φ 和 θ 变化而变化的三维空间分布图。 φ 角取值范围为 $0^\circ\sim 360^\circ$,对应电动机自转1周, B 随 φ 角的变化周期为 180° ,最大值出现在 $\varphi=50^\circ$ 与

$\varphi=250^\circ$ 附近,最大值为 2 T ,随着 φ 角的变化,气隙磁密有规律波动,在小波动周期内极大值逐渐减小,趋于 0 。气隙磁密 B 随 θ 角的变化周期为 60° ,在1个变化周期内, B 的变化曲线呈凸弧分布,最大值位于 $\theta=40^\circ$ 与 $\theta=-40^\circ$ 附近,变化规律明显。

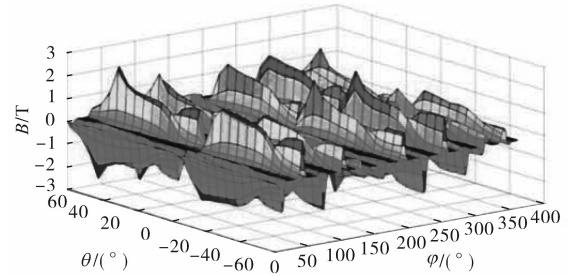
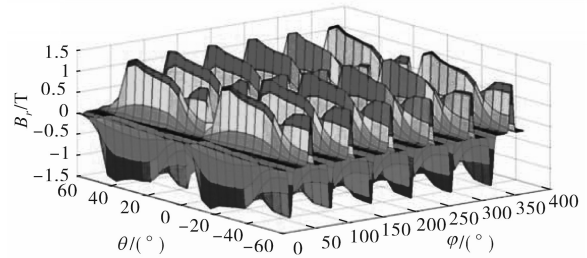
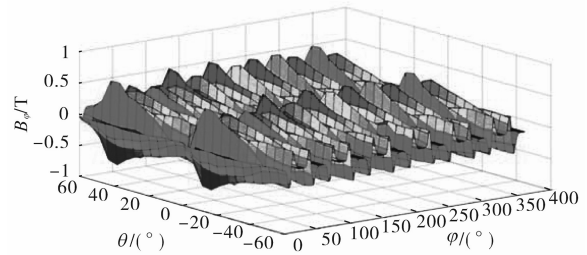


图10 气隙磁密的三维分布图
Fig.10 Three-dimensional distribution diagram of air gap magnetic density

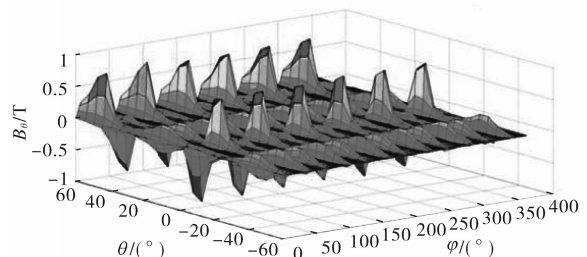
电动机外侧气隙磁场的径向 r 磁密 B_r 、 φ 向磁密分量 B_φ 和 θ 向磁密分量 B_θ 的三维分布图如图11所示。



(a) B_r 的空间分布图



(b) B_φ 的空间分布图



(c) B_θ 的空间分布图

图11 气隙磁密沿 r, φ, θ 分量空间三维分布图
Fig.11 Three-dimensional distribution diagram of air gap magnetic density along r, φ and θ components

从图 11a 可以看出,径向磁密 B_r 在 φ 角方向由 $0 \sim 360^\circ$ 的变化区间内呈现出 6 个小周期分布, 1 个小周期为 60° , 对应于该电动机为四相 48/36 极结构, 每个小周期内磁密的峰值角度即为电动机转子齿极与定子齿极重合时的角度, 峰值约为 1.2 T, 磁密最小值的角度即为电动机转子凹槽与定子凹槽重合时的角度, 最小值近似为 0 T; 在 θ 方向的正负 60° 的区间内呈现出相同的波形, 这与电动机的定、转子成球面结构相吻合, 磁密的最大值出现在 40° 附近是由电动机的双定子和转子沿中轴线方向为 3 段式分布结构决定的。图 11b、图 11c 所示的气隙磁场磁密 φ 向分量 B_φ 和 θ 向分量 B_θ 在 θ 方向的分布波形趋势与径向磁密 B_r 大致相同, 只是 B_θ 波形类似于尖波; 在 φ 角方向的变化 B_φ , B_θ 与 B_r 有相同的分布周期, 其中 B_φ 的浮动频率高, 峰值接近 0.5 T。

该电动机为空载状态, 转速为 2 000 r/min 的情况下, 电机定子绕组中的磁链曲线如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 磁链随时间变化曲线为三角波波形, A、B、C、D 四相磁链 1 个变化周期为 3 s, 在 1 个周期内, 每相磁链峰值接近 0.12 Wb, 最小值在 0 Wb 左右。

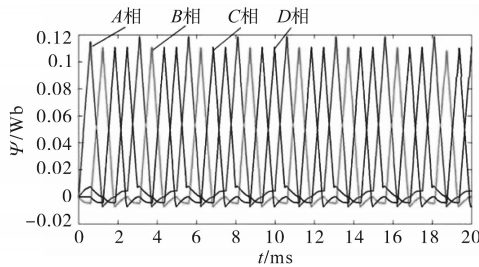


图 12 绕组磁链分布图

Fig.12 Distribution diagram of winding flux linkage

3.2 双定子开关磁阻电动机转矩和电流特性研究

双定子开关磁阻电动机采用内、外双定子结构, 内定子、外定子和转轴在中心轴的方向上为三段式结构, 给电动机控制电路的驱动主电路施加 200 V 电压, 在控制电压电路中对电压触发脉冲进行参数设置。根据电动机的结构四相 48/36 极, 计算可得电动机的步进角 $\theta_{step}=2.5^\circ$, 因此电动机控制开关管的脉冲电压源周期采用位置控制方式, 其导通周期为 10° , 每相导通角度为 2.5° , 在电动机转速为 2 000 r/min 时, 得到该电动机的转矩波形图和相电流波形图, 并将它们与单侧定子结构电动机的转矩和相电流进行了比较, 图 13 为该电动机的四相电流示意图。

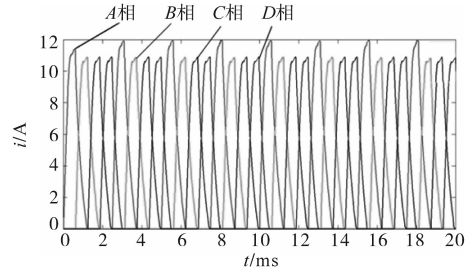


图 13 相电流示意图

Fig.13 Diagram of phase current

为了说明双定子电动机的优良性能, 给两种结构的电动机设置相同的参数如下: 起励电压 200 V, 定子外径 180 mm, 轴径 40 mm, 气隙 0.5 mm, 定子齿极数 48, 转子齿极数 36, 铁心长度 60 mm。两种结构的电机体积近似相等且均为 48/36 极, 采用他励模式控制电路, 得到了如图 14 所示的两种电动机结构的转矩对比图。从图 14 中可以看出, 单侧定子结构的转矩只能达到 $3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 左右, 而双定子电动机转矩最大幅值约 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 明显优于单侧定子电动机结构。图 15 给出的是两种电动机结构 A 相的相电流波形对比图。双定子结构电动机的相电流幅值近似为 12 A, 单侧定子结构电动机的相电流幅值约为 9 A。根据有限元法得到双定子结构电动机和单侧定子结构电动机的转矩和相电流波形, 通过他们的幅值比较得到双定子结构的性能优于单侧定子结构, 并且两种结构下

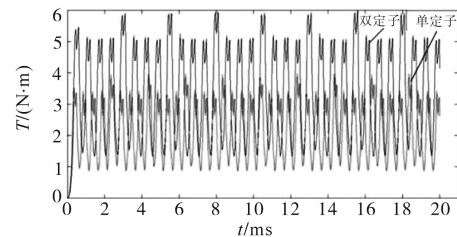


图 14 两种结构电动机输出转矩对比图

Fig.14 Contrast diagram of output torques of two kinds of structural motors

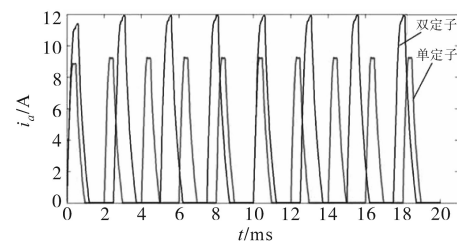


图 15 两种结构电动机相电流对比图

Fig.15 Contrast diagram of phase currents of two kinds of structural motors

电动机转矩的增量与相电流增量的关系验证了前面所建立的数学模型的准确性。

4 实验验证

图16为双定子开关磁阻电动机在2 000 r/min的转速下,实验测量与仿真波形的转矩对比图,在电机控制方面,调节开通角为 -0.34° ,关断角为 2.87° ,减小电动机输出转矩的脉动。从图16中可以看出,电动机的测量输出转矩与仿真结果基本吻合,峰值约在 $4 \text{ N}\cdot\text{m}$,验证了双定子开关磁阻电动机的有限元分析结果的准确性。

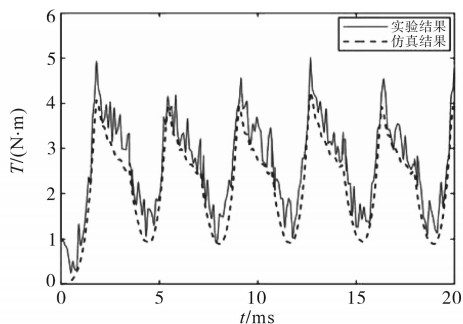


图16 转矩的仿真波形与实验测量结果

Fig.16 Torque simulation waveform and experimental measurement results

5 结论

本文提出了一种双定子开关磁阻电动机,该电动机的主要特点在于采用内外双定子结构,增加了定、转子的齿极数,有效地增大了电动机的输出转矩并降低了转矩脉动。系统阐述了该电动机的工作原理及控制机理,通过建立该电动机的数学模型,对电动机的电感变化做线性化处理,分析计算电动机的电感、电压、电流和转矩特性。同时,利用有限元法对双定子开关磁阻电动机运行时的磁力线以及电动机外侧气隙磁场的磁场特性进行了分析,在其它条件不变的情况下,将双定子结构电动机和单侧定子结构电动机的转矩和电流做了仿真计算,其各物理量的仿真结果与电动机数学模型分析的公式相对应,验证了数学模型的准确性。对比两种电动机结构的输出转矩和相电流,得到双定子结构的电动机在输出转矩上占绝对优势。由于该电动机为双定子结构,加工工艺稍复杂,成本较普通开关磁阻电机略高,但输出转矩在普通结构开关磁阻电机的基础上提高了50%,且能够实现内外电动机在输出转矩上的互补,性能明显优于普通开关磁阻

电机。此外,与永磁同步电机相比,开关磁阻电机的定子和转子上均无永磁体,大大减小了电机成本,在小型家电等适用场合可替代小型永磁同步电机。从而可以继续对该电动机的其他特性做相关研究。

参考文献

- [1] 刘勇智,周政,盛增津. 开关磁阻电机启动/发电状态切换控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(10): 57-63.
- [2] 柴凤,崔淑梅,程树康. 双定子电机的发展状况及展望[J]. 微特电机, 2001, 29(5): 23-26.
- [3] 陈凌,王宏华,谭超. 基于麦克斯韦应力法的双绕组无轴承开关磁阻电机新型数学模型[J]. 电机与控制学报, 2017, 11(3): 9-18.
- [4] 李争,张玥,王群京,等. 永磁转子偏转式三自由度电机磁场解析建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 219-225.
- [5] 张强. 基于DSP的开关磁阻电机控制系统及控制方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015.
- [6] 葛金龙. 基于自适应模糊神经网络的开关磁阻电机控制系统开发[D]. 淄博:山东理工大学, 2016.
- [7] Xu T, Yuan J, Wang Q, *et al.* Inductance Estimation Method for Linear Switched Reluctance Machines Considering Iron Losses[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(3): 181-188.
- [8] Ganji B, Heidarian M, Faiz J. Modeling and Analysis of Switched Reluctance Generator Using Finite Element Method [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2015, 6(1): 85-93.
- [9] 周云红,孙玉坤,袁野. 双定子磁悬浮开关磁阻电机的转子位置角自检测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 250-257.
- [10] Rahman K M, Gopalakrishnan S, Fahimi B, *et al.* Optimized Torque Control of Switched Reluctance Motor at All Operational Regimes Using Neural Network[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 37(3): 904-913.
- [11] 王喜莲,许振亮,王翠. 开关磁阻电机转矩脉动与铜耗最小化控制研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(7): 52-57.
- [12] 蒯松岩,汤锐智,马金洋,等. 基于电感模型的开关磁阻电机参数优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 97-104.
- [13] Gan C, Wu J, Yang S, *et al.* Phase Current Reconstruction of Switched Reluctance Motors from DC-link Current under Double High-frequency Pulses Injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3265-3276.
- [14] Zhang H, Wang S. Topology Optimization of Rotor Pole in Switched Reluctance Motor for Minimum Torque Ripple[J]. Electric Power Components&Systems, 2017, 45(8): 1-7.
- [15] 张鑫,王秀和,杨玉波. 基于改进磁场分割法的开关磁阻电机径向力波抑制能力解析计算[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 9-18.

收稿日期:2019-06-05

修改稿日期:2019-06-29