

新型外转子磁齿轮复合电机的设计与研究

张东¹, 邹国棠², 江建中¹, 包广清³, 蹇琳旒², 王建宽¹

(1. 上海大学, 上海市 闸北区 200072; 2. 香港大学, 中国香港特别行政区;
3. 兰州理工大学, 甘肃省 兰州市 730050)

Design and Research of a Novel Magnetic-geared Outer-rotor Compact Machine

ZHANG Dong¹, K. T. Chau², JIANG Jian-zhong¹, BAO Guang-qing³, JIAN Lin-ni², WANG Jian-kuan¹

(1. Shanghai University, Zhabei District, Shanghai 200072, China; 2. The University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China;
3. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu Province, China)

ABSTRACT: A novel magnetic-geared outer-rotor compact machine is proposed, which integrates a magnetic gear into a brushless DC motor (BLDCM), so that they can share a common cup rotor, then the inner space of the magnetic gear is utilized adequately, thus the low-speed and high-torque is achieved in direct driving, and the high efficiency of the whole system is gained simultaneously. The time-stepping FEM is employed in the analysis of the compact machine for the first time. The coupling of the harmonic magnetic field in the machine is taken into account, thus the dynamic performances of the compact machine are obtained, then discover that the compact machine driving system is suitable for low speed high torque direct driving system with unsuitability of the comfort and precise applications. A prototype machine is tested. The experimental result confirmed the analysis results.

KEY WORDS: magnetic gear; compacted machine; time-stepping finite element method; brushless DC motor; dynamic performance

摘要: 提出一种新型外转子磁齿轮复合电机, 该电机将磁齿轮和无刷直流电机进行整合, 电机的外转子和磁齿轮的内转子共同构成复合电机的内转子, 实现了低速大转矩的直接驱动方式, 同时充分利用了磁齿轮的内部空间, 从而提高了整个传动系统的效率。采用时步有限元法对复合电机的磁场进行分析, 充分考虑了谐波磁场的相互耦合问题, 并得出复合电机的相关动态特性。这些特性揭示了复合电机非常适合与低速大转矩的直接驱动场合, 但是不适合于对舒适度和位置精度要求较高的场合。制造了一台 1 200 W 原型机, 并对原型机进行试验, 验证了电磁理论分析结果的正确性。

关键词: 磁齿轮; 复合电机; 时步有限元法; 无刷直流电机; 动态特性

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(3ZS061-A25-050)。

0 引言

现代驱动系统一直倾向于直接驱动, 这样可以省去机械齿轮传动系统, 消除机械齿轮的振动噪声, 减少机械损耗, 获得更高的系统效率, 节约能源。但是用于直接驱动电机为了输出更大的转矩, 一般体积较大, 且负载运行时, 电流较大, 增加了控制电路元器件的成本。

磁齿轮具有低噪音、高效率、便于维护、高可靠性以及过载保护等优点^[1], 引起了大家的普遍关注。为了获得更高的传动性能, 文献[2]提出一种新型的同心式结构磁齿轮。为了更好的利用磁齿轮的内部空间, 本文将一台外转子高速无刷直流电机和一台磁齿轮整合在一起构成复合电机。将磁齿轮的内转子设计成高速转子, 使无刷直流电机的外转子和磁齿轮的内转子实现同步高速旋转, 同时经过磁齿轮的调磁铁块的调制作用, 在磁齿轮的外转子上获得低速大转矩。复合电机是磁齿轮传动系统的发展, 仍属于磁齿轮传动系统的范畴, 因此复合电机同时实现了高速电机的控制和系统的低速大转矩输出。

复合电机具有 3 层气隙, 结构复杂; 其磁场相互耦合, 磁场分布也比较复杂, 这给复合电机的分析带来了一定的困难。普通的静态电磁场^[3]只能计算复合电机的静态特性, 没有办法分析复合电机的动态特性^[4]。由于复合电机的内外转子不是直接接触的刚性连接, 因此外转子是一个随动转子, 所以对其动态分析就显得更加重要。为了获得更加精确的复合电机动态性能, 充分考虑磁齿轮磁场和电机磁场的耦合问题, 笔者采用了时步有限元^[5-6]对复合电机进行分析。由于商业软件使用时受到一定的限

制,采用 Fortran 编制了一套时步有限元法软件(630)对复合电机的动态性能进行了分析,分析结果得到了试验的验证。

1 电机设计

图 1 给出了采用磁齿轮作为传动系统的结构图。独立磁齿轮和独立电机构成的传统驱动系统的结构图,如图 1(a)所示,这样的传动系统与传统的机械齿轮传动系统相比仍然具有很庞大的体积和重量。将图 1(a)中的电机和磁齿轮整合得到了复合电机的结构图如图 1(b)所示。图 1(b)表示的复合电机是把电机的外转子和磁齿轮的内转子整合在一起,电机的定子填充了磁齿轮内转子留下的空间,构成轮毂式外转子复合电机。从图中可以看出整合后的复合电机比整合前的独立驱动系统大大节省了空间,减少了传动系统的重量,而且它的驱动能力得到了延续,提高了传动系统的传动功率密度。同时复合电机具有 3 层气隙,这使其结构变得更加复杂,为生产加工带来了困难。

轮毂外转子复合电机的详细结构如图 2 所示。文献[4]中已经详细的给出了复合电机的静态传动特性,由此可以看出文献[1-2, 7]中描述的磁齿轮的良好传动特性被复合电机很好的继承下来。因此可以分别设计磁齿轮和电机,并且考虑到磁路设计和永磁体的利用率,电机外转子的极对数和磁齿轮内转子的极对数要相等。

根据文献[1, 4]中的结论,可以得到复合电机的极对数、调磁铁块数和内外转子转速之间的关系:

$$p' = |ap + bs| \tag{1}$$

$$\omega_3 = (ap / |ap + bs|) \omega_1 \tag{2}$$

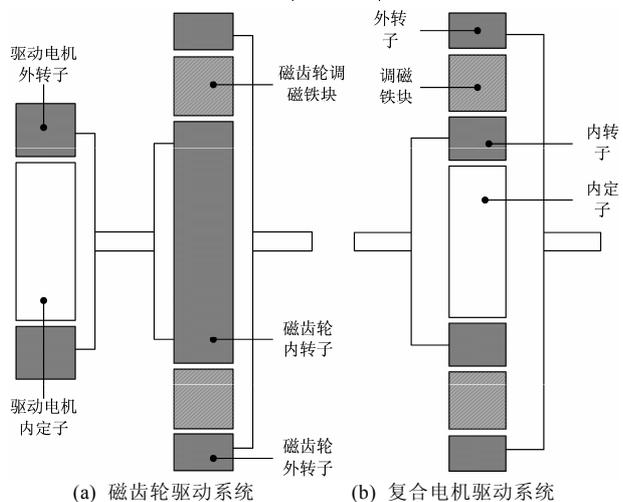


图 1 传动系统的结构图
Fig. 1 Structure of transmission system

式中: $a = 1, 3, 5, \dots, \infty$; $b = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty$; p' 为磁齿轮内转子极对数(等于电机外转子极对数); p 为磁齿轮外转子极对数; s 为调磁铁块数目; ω_3 为磁齿轮外转子的机械角速度; ω_1 为内转子机械角速度。当 $a = 1$ 和 $b = -1$ 时,由调磁铁块调整后得到的谐波磁场最强。调磁铁块两侧主要传递转矩的谐波磁场,具有相同的电角速度,所以内外转子按照一定的转速比例运转。因此可得到磁齿轮内外转子的调速比:

$$G_b = (s - p) / p \tag{3}$$

由于磁齿轮内转子需要跟高速电机外转子整合为高速转子,所以设计的极对数要少,磁齿轮外转子为低速转子,设计的极对数要多。选择内转子极对数 $p = 3$, 调磁铁块数 $s = 25$, 这样就可以得到外转子的极对数 $p' = 22$, 实现调速比 $22/3$, 且内转子极对数和调磁铁块数之间最小公倍数是一个比较大的数,可有效降低磁齿轮内转子和调磁铁块之间的齿槽定位转矩^[8], 进一步减少传动系统的转矩脉动。

根据磁齿轮内转子的极对数,可以确定整合在磁齿轮内部的无刷直流电机的极对数为 3, 选择定子槽数为 27, 这样可以得到每极每相槽数为分数槽的设计,减少了电机侧的自定位转矩,更进一步减少传动系统的转矩脉动。

最后把磁齿轮的内转子和高速电机的外转子整合在一起,做成一个杯形转子。杯形转子的中间是一个导磁的钢筒,其内侧和外侧都贴上永磁体,这种结构可以大大减少转子的转动惯量,比图 1(a)所示传动系统更加有利于电机的起停加速。

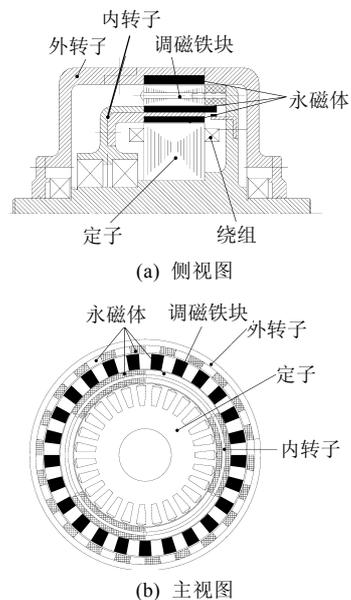


图 2 复合电机的结构图
Fig. 2 Structure of compact motor

2 研究方法和结果

复合电机具有 3 层气隙, 外转子、内转子和定子之间的磁场相互耦合; 而且电机传动的磁齿轮部分是靠谐波磁场来传递转矩的, 这些都给精确分析电机的性能带来了困难。传统的磁路法分析是非常困难的, 采用电磁场有限元进行分析是一个很好的方法。

文献[1-2, 7]采用静态电磁场对磁齿轮进行了分析, 只是得出了一些磁齿轮的静磁场分布和静态特性, 文献[4]采用静态电磁场对复合电机进行分析, 同样只能得到电机的静态特性。磁齿轮传递转矩的大小与内外转子之间的相对位置角度有关系, 并且随着相对位置角度变化呈现出正弦变化^[7]。作为复合电机也具有这样的静态转矩传递特性^[4], 但是在控制电机运行时, 只能对内转子进行控制, 外转子是跟随内转子按照其转矩传递特性来运行的一个随动部分, 即外转子的运行受内转子影响, 但是不可控。在这种情况下, 计算复合电机的负载磁场就比较困难。首先要确定出电机外转子加载的负载转矩, 然后调整内外转子之间的相对位置角度, 使内转子上的合成转矩为零, 这时进行静态磁场计算得到当前一个状态的负载特性。整个特性的计算需要不断重复前面的过程, 因此计算过程相当麻烦, 而且反应不出外转子的随动运行特性。

为了更精确的分析复合电机的运行特性, 选择时步有限元法, 能够很好的考虑复合电机的各次谐波磁场的影响、涡流磁场的影响以及不同组件间磁场的相互耦合。经过计算可以得到整个复合电机从起动到稳定运行的整个动态特性结果。

复合电机的时步有限元方程与传统永磁电机的时步有限元方程是相同的, 同样分为场域方程、电路方程和运动方程, 文献[9-13]对前 2 种方程和方程的离散求解处理进行了详细的分析。最终得到 Newton-Raphson 形式的矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11}^{t+\Delta t} + \frac{\mathbf{D}_{11}^{t+\Delta t}}{\Delta t} & \mathbf{C}_{12}^{t+\Delta t} \\ \frac{\mathbf{D}_{21}^{t+\Delta t}}{\Delta t} & \mathbf{C}_{22}^{t+\Delta t} + \frac{\mathbf{D}_{22}^{t+\Delta t}}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_z^{t+\Delta t} \\ \mathbf{i}^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1^{t+\Delta t} \\ \mathbf{P}_2^{t+\Delta t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{D}_{11}^{t+\Delta t}}{\Delta t} & 0 \\ \frac{\mathbf{D}_{21}^{t+\Delta t}}{\Delta t} & \frac{\mathbf{D}_{22}^{t+\Delta t}}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_z^t \\ \mathbf{i}^t \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \mathbf{C}_{11} 、 \mathbf{D}_{11} 为场域部分的系数; \mathbf{C}_{12} 、 \mathbf{D}_{21} 为场

和电路耦合部分的系数; \mathbf{C}_{22} 、 \mathbf{D}_{22} 为电路部分的系数; \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 为永磁体和外电路电压对方程的贡献。

对于处理模型的运动问题, 复合电机的时步法有限元剖分模型有 2 个旋转的部分和 3 个运动边界, 这些都是当前商业软件无法处理的。由于复合电机的结构独特, 所以其运动方程变化很大。为了准确的模拟复合电机的运动特性, 首先, 要在 3 层气隙中的单元, 使用 Maxwell stress tensor 方法分别计算出 3 个电磁转矩: 内层气隙单元计算出的电磁转矩 T_1 、中间层气隙单元计算出的电磁转矩 T_2 和外层气隙单元计算出的电磁转矩 T_3 。于是得到内转子的运动方程为

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + R_1 \omega_1 = T_1 - T_2 \quad (5)$$

式中: J_1 为内转子的转动惯量; R_1 为内转子的运动阻尼系数。外转子的运动方程为

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} + R_3 \omega_3 = T_3 - T_L \quad (6)$$

式中: J_3 为外转子和负载的转动惯量; R_3 为外转子和负载的运动阻尼系数; ω_3 为外转子的角速度; T_L 为负载转矩。对式(5)和式(6)时间离散后得

$$\omega_1^{t+\Delta t} = \omega_1^t + \frac{T_1 - T_2 - R_1 \omega_1^t}{J_1} \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$\omega_3^{t+\Delta t} = \omega_3^t + \frac{T_3 - T_L - R_3 \omega_3^t}{J_3} \cdot \Delta t \quad (8)$$

可以得到内外转子的旋转角度:

$$\theta_1^{t+\Delta t} = \theta_1^t + \omega_1^{t+\Delta t} \cdot \Delta t \quad (9)$$

$$\theta_3^{t+\Delta t} = \theta_3^t + \omega_3^{t+\Delta t} \cdot \Delta t \quad (10)$$

式中: θ_1 为内转子转过的机械角度; θ_3 为外转子转过的机械角度。

经过式(5)、(6)的处理, 可以得到模型运动部分任意时刻的位置。考虑到复合电机采用无刷直流电机的控制策略^[14-15], 这样从静止开始, 一直计算到电机稳定运行, 就可以得到复合电机的起动动态特性。

设计的复合电机的参数如表 1 所示, 根据表 1 的参数建立时步有限元模型, 对电机的性能进行计算。图 3 为某一时刻的磁力线分布图。图 4 给出了内外转子按额定速度运行时的定子一相绕组的反电势波形。

在分析复合电机运动时, 规定逆时针为正, 内转子的转动方向为逆时针方向。整个计算过程为复合电机带 20 N·m 负载起动到稳定运行, 然后分别突加到 50 N·m 负载和 80 N·m 负载。图 5 给出了在整

个过程内转子的速度变化曲线, 它的转速为正值, 图6给出了外转子的速度变化曲线, 它的转速为负值。从图5、6可以看出, 电机起动到稳定时的内转子转速为1200 r/min, 外转子转速为163 r/min; 在电机突加到50N·m负载运行到稳定时, 内转子的转速为1100 r/min, 外转子的转速为150 r/min; 当再突加到80 N·m负载时, 内转子为1000 r/min, 外转子为136 r/min; 磁齿轮的速度调节能力基本为7.333, 这与设计完全吻合。从图中还可以看出, 内转子和外转子的转动方向相反, 这也与文献[4]中静态分析相吻合; 起动过程由于内外转子中间不是刚性接触连接, 外转子是随动的。为了内外转子要保持同步电角速度运行, 起动过程的转速都有抖动; 因此复合电机适合一些对起动的舒适性和位置精度要求不高的驱动场合。

图7给出了内转子内侧的电磁转矩变化曲线, 图8给出了内转子外侧的电磁转矩变化, 图9给出了内转子上的合成转矩变化, 图10给出了外转子内侧的转矩变化。由图7可以看到, 整个加速过程中, 内转子内侧转矩的变化: 在启动过程中, 转矩最大; 当外转子突加负载时, 内转子内侧转矩也会相应的变化来平衡内转子齿轮侧的电磁转矩。图8和图10反映出复合电机继承了磁齿轮力矩传递的特性。图9转矩的变化与图5转速的变化相对应。图11给出了复合电机内定子相电流在整个过程的变化, 与图7的转矩变化相对应。从计算结果可以看出, 尽管内外转子中间不是刚性连接, 复合电机起动可以在0.2 s内完成, 而且在负载突变时, 复合电机仍能做到很好的响应能力, 可以满足很多领域对低速大转矩驱动的要求。图12为负载60 N·m时, 一相电流的变化曲线, 由于复合电机外侧磁齿轮的磁场对内部整合电机磁场的影响, 使复合电机一相电流波形的顶部产生了很多明显的微小波动。

表1 复合电机的设计数据
Tab. 1 Specifications of the compact machine

参数	数值	参数	数值
相数	3	外转子内径/mm	172.0
额定功率/W	1200	内转子外径/mm	142.8
额定转速/(r/min)	1100	定子外径/mm	120
直流侧电压/V	36	铁心长度/mm	40.0
定子槽数	27	内气隙长度/mm	0.6
内转子极对数	3	中间气隙长度/mm	0.6
外转子极对数	22	外气隙长度/mm	1.0
调磁铁块数	25	永磁体剩磁/T	1.1
外转子外径/mm	194.0	—	—

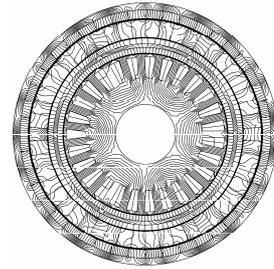


图3 磁力线分布图
Fig. 3 Flux distribution

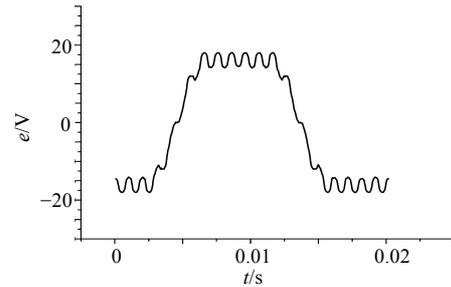


图4 计算反电势波形
Fig. 4 Simulated EMF waveform

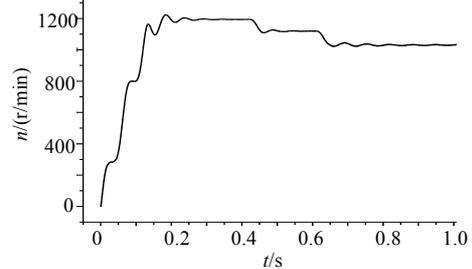


图5 内转子转速变化计算曲线
Fig. 5 Simulated speed curve of inner rotor

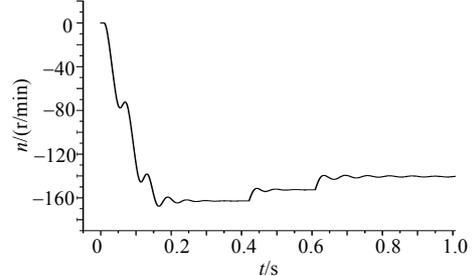


图6 外转子转速变化计算曲线
Fig. 6 Simulated speed curve of outer rotor

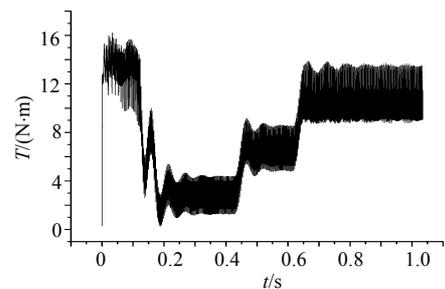


图7 内转子内侧的电磁转矩变化计算曲线
Fig. 7 Simulated electric-magnetic torque curve on the inner side of the inner rotor

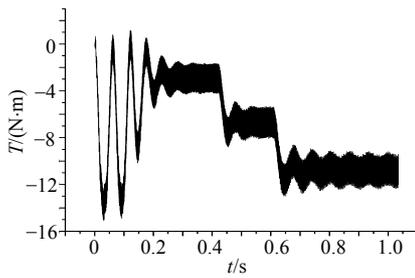


图 8 内转子外侧电磁转矩变化计算曲线
Fig. 8 Simulated electric-magnetic torque curve on the outer side of the inner rotor

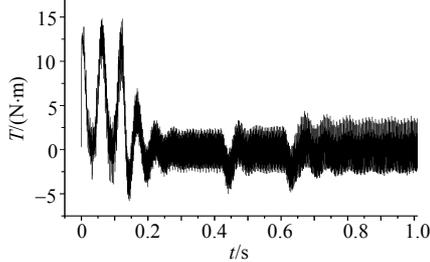


图 9 内转子上受到的合成转矩变化计算曲线
Fig. 9 Simulated total torque curve on the inner rotor

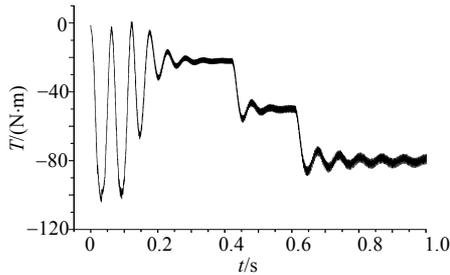


图 10 外转子内侧的电磁转矩变化计算曲线
Fig. 10 Simulated electric-magnetic torque curve on the outer rotor

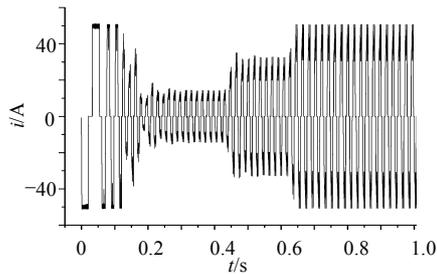


图 11 定子一相电流变化计算曲线
Fig. 11 Simulated phase current waveform

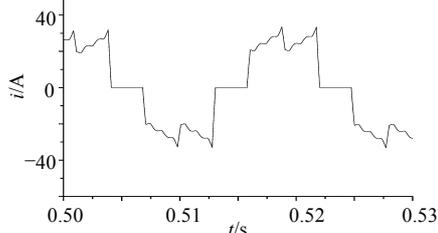


图 12 60 N·m 负载情况下的计算电流波形
Fig. 12 Simulated phase current waveform when load is 60 N·m on the outer rotor

3 试验

图 13 给出了原型机的结构和在工作台上做实验的照片。图 14 给出了电机额定转速的反电势实测波形，与计算波形基本吻合。图 15 给出了负载 60 N·m 时的一相电流的试验波形，从图中可以看出电流波形的顶部有一些抖动，这与图 12 的仿真结果相符合；试验电流波形的毛刺是由于载波导致的，时步法仿真没有采用载波控制，所以电流波形比较光滑。通过试验验证了研究方法是合理的。

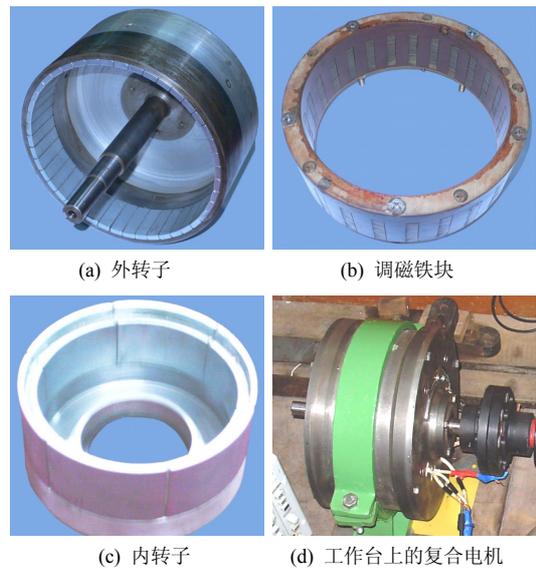


图 13 复合电机及其组件
Fig. 13 Proposed machine prototype

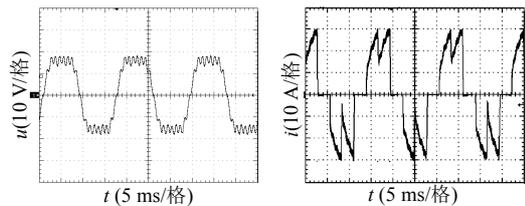


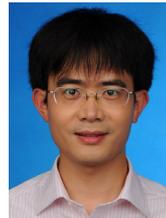
图 14 反电势的试验波形(1 100 r/min)
Fig. 14 Tested waveform of the EMF (1 100 r/min)

4 结论

设计了一台轮毂式外转子复合电机，并给出设计方法和原则。复合电机的结构比较复杂，主要靠谐波磁场进行内外转子转矩的传递，因此其内外转子之间不是刚性连接，即复合电机本身是一个随动系统，要想准确地分析复合电机的运动特性只能采用时步有限元法。采用时步有限元法对复合电机进行分析，得出了复合电机运行的动态特性，其正确性得到了试验验证，说明该电机值得在一些对舒适性和位置精度要求不高的直接驱动场合应用推广。

参考文献

- [1] Atallah K, Calverley SD, Howe D. Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear[J]. IEE Proc. Electric Power Applications, 2004, 151(2): 135-143.
- [2] Atallah K, Howe D. A novel high performance magnetic gear [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2001, 37(4): 2844-2846.
- [3] 王兴华, 励庆孚, 王曙鸿. 无刷直流电动机负载磁场及其电磁转矩计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 140-144.
Wang Xinghua, Li Qingfu, Wang Shuhong. Analytical calculation of loaded magnetic field and electrical magnetic torque in brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 140-144(in Chinese).
- [4] Chau K T, Zhang Dong, Jiang J Z, et al. Design of a magnetic-gear outer-rotor permanent-magnet brushless motor for electric vehicles [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2007, 43(6): 2504-2506.
- [5] 刘瑞芳, 严登俊, 胡敏强. 永磁无刷直流电动机场路耦合运动时步有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 59-64.
Yang Guijie, Li Yong. Field circuit and movement coupled time stepping finite element analysis on permanent magnet brushless DC motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 59-64(in Chinese).
- [6] 严登俊, 刘瑞芳, 胡敏强, 等. 处理电磁场有限元运动问题的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 163-167.
Yan Dengjun, Liu Ruifang, Hu Minqiang, et al. A new method to deal with the motion problem in electromagnetic field finite element analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 163-167(in Chinese).
- [7] Rasmussen P O, Andersen T Oe, Jørgensen F T, et al. Development of a high-performance magnetic gear[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, 41(3): 764-770.
- [8] Zhu Z Q, Howe D. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2000, 15(5): 407-412.
- [9] Jabbar M A, Hla Nu Phyu, Liu Zhejie, et al. Modeling and numerical simulation of a brushless permanent-magnet DC motor in dynamic conditions by time-stepping technique[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2004, 40(3): 763-770.
- [10] Wang Y, Chau K T, Chan C C, et al. Transient analysis of a new outer-rotor permanent-magnet brushless DC drive using circuit-field-torque time-stepping finite element method[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2002, 38(2): 1297-1300.
- [11] Salon S J. Finite element analysis of electrical machines [M]. Norwell, MA: Kluwer, 1995: 292-368.
- [12] 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: 88-92.
- [13] 胡敏强, 黄学良. 电机运行性能数值计算方法及其应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003: 105-167.
- [14] 夏长亮, 郭培健, 史婷娜, 等. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 129-133.
Xia Changliang, Guo Peijian, Shui Tingna, et al. Control of brushless DC motor using genetic algorithm based fuzzy controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 129-133(in Chinese).
- [15] 杨贵杰, 李勇. 永磁感应子式无刷直流电动机的模型及控制 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 122-127.
Yang Guijie, Li Yong. Model and control of permanent magnet inductor type synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 122-127(in Chinese).



张东

收稿日期: 2007-12-26。

作者简介:

张东(1975—), 男, 博士研究生, 主要从事特种电机及其控制和电机电磁场有限元分析研究, zdnet.zhang@gmail.com;

江建中(1939—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事直线电机、磁性悬浮技术、电动车用高功率密度永磁电机及其控制系统及电机电磁场计算方面的研究工作。

(责任编辑 王剑乔)