

基于磁场调制式磁齿轮传动的永磁同步风力发电系统*

包广清¹ 刘新华² 毛开富¹

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 上海电气集团输配电分公司, 上海 200050)

【摘要】 提出一种基于磁场调制的同心式磁齿轮设计, 将其引入风力发电系统代替传统机械齿轮, 既解决了风力机与发电机的转速匹配问题, 又减小了风电机组的总体积, 避免了机械齿轮的振动、噪声及润滑等自身无法避免的问题, 从而提高了整个风电系统的效率和工作可靠性。在对磁齿轮谐波磁场进行有限元分析的基础上, 以时步有限元法为基础, 实现了电动机有限元模型与磁齿轮有限元模型的联合动态仿真。设计了一台传动比为 6.75 的 1 kW 磁场调制式磁齿轮 (FMMG) 样机, 搭建了基于 FMMG 传动的风力发电系统试验平台, 发电机反电势计算波形与试验波形的一致性说明了电磁设计与分析结果的正确性。

关键词: 风力发电 磁齿轮 同步发电机 有限元分析 磁场调制

中图分类号: TM154.2; TH132.41; TM315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)05-0116-05

Characteristics of Field Modulated Magnetic Gear in Wind Turbine System

Bao Guangqing¹ Liu Xinhua² Mao Kaifu¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Shanghai Electric Power Transmission and Distribution Branch, Shanghai 200050, China)

Abstract

A novel field modulated magnetic gear (FMMG) with concentric configuration was proposed and introduced to the drive train for a wind turbine system, which eliminated the vibration, noise and lubrication problems of mechanical gearbox and avoided the size and weight issues of directly-driven wind turbines. And the efficiency and reliability were improved simultaneously. Based on the field computations by time-stepping finite element analysis, the co-simulation FEM model of synchronous generator and magnetic gear was established and the dynamic performance of the transmission system was studied. The electromagnetic design and simulation results were verified by the experiment of the 1 kW FMMG prototype.

Key words Wind power generation, Magnetic gear, Synchronous generator, Finite element analysis, Field modulated

引言

能源与环境问题已成为全球可持续发展所面临的主要问题, 风力发电以其无污染和可再生性将成为解决人类经济发展对矿物能源的依赖性和减少二氧化碳排放的重要途径之一。

目前, 作为大功率并网发电主流机型的双馈风电机组中齿轮箱造价高, 漏油问题很难妥善解决, 双馈电机的滑环、电刷需要定期检修, 维护工作量大, 可靠性低。直驱式永磁发电机组虽然省去了齿轮

箱、滑环等环节, 系统效率和功率控制的灵活性、可靠性显著提高, 但存在发电机体积大、全功率变流装置成本高的缺陷。随着电机制造技术、电力电子技术和计算机控制技术的快速发展, 新的电机拓扑结构与控制方式层出不穷, 并彻底打破了传统电机的设计方式和运行模式, 在风力发电系统中逐步得到应用。本文提出一种基于磁场调制的同心式磁齿轮设计, 并将永磁同步发电机和磁齿轮相结合, 组成一种基于磁场调制式磁齿轮传动的永磁同步发电机系统, 以达到兼顾“双馈”和“直驱”这两种机组优良特

收稿日期: 2010-07-15 修回日期: 2010-11-10

* 国家自然科学基金资助项目(50877034)

作者简介: 包广清, 教授, 博士, 主要从事电机电器的电磁设计与控制研究, E-mail: baogq03@163.com

性的目的,为研制具有我国自主知识产权的风力发电机组打下理论与试验基础。

1 磁齿轮结构设计

传统的径向式平行轴磁齿轮结构如图1所示^[1-2],其最大缺点是在齿轮工作时只有少数靠得最近的永磁体参与转矩传递,其余大部分永磁体并不参与转矩传递;同时,传动比越大永磁体的利用率越低,转矩密度也很低;另外,由于永磁体相互作用会产生径向磁拉力,这对支撑齿轮转轴的轴承也会产生一定负面影响。

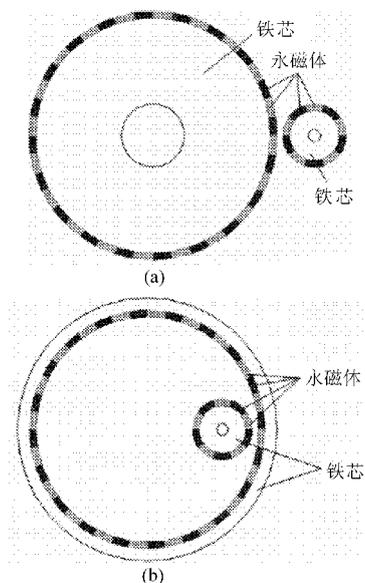


图1 传统平行轴磁齿轮

Fig.1 Traditional magnetic gear with paralleled axes

(a) 外啮合式结构 (b) 内啮合式结构

传统结构磁性齿轮转矩密度低,限制了磁性齿轮的推广应用。近年来随着永磁材料的发展和磁力机械结构设计的改进,磁齿轮性能得到进一步提高^[3]。在英国谢菲尔德大学 Atallah. K 等研究基础上,本文介绍一种基于磁场调制的新型磁齿轮设计^[4],如图2所示。它包括3部分:2个旋转部分分别是具有较少磁极的内转子(高速转子)和具有较多磁极的外转子(低速转子),内转子由转子铁芯、 $2N_1$ (N_1 为内转子磁极对数)块永磁体组成,其相邻永磁体极性相异;外转子由铁芯和 $2N_2$ (N_2 为外转子磁极对数)块永磁体组成,其相邻永磁体极性相同;中间调磁环固定不动,由 $N_1 + N_2$ 块铁芯和 $N_1 + N_2$ 块非导磁材料(如环氧等)交错组成,调磁环起到调制内、外转子磁场的作用,因此本文将其称为磁场调制式磁齿轮(field modulated magnetic gear,简称FMMG)。磁齿轮有两层气隙,内转子与调磁环之间为内气隙,外转子与调磁环之间是外气隙。从图2可以看到,这种新型磁齿轮内、外转子为同轴结构,

在转矩传递过程中所有的永磁体都参与转矩传递,有效地提高了永磁体的利用率。同时,永磁体直接安装在转子表面,加工方便,避免了机械齿轮的精密加工和热处理等复杂工艺。

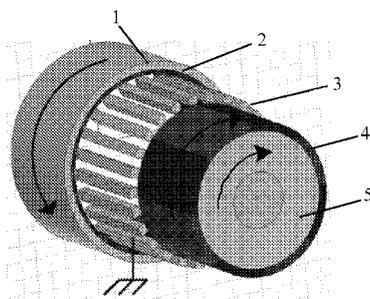


图2 磁场调制式同轴磁齿轮

Fig.2 Field modulated magnetic gear with concentric configuration

- 1. 外转子 2. 外转子永磁体 3. 调磁铁块 4. 内转子永磁体
- 5. 内转子

2 磁齿轮工作原理

2.1 气隙磁场

磁场调制式磁齿轮中调磁环起到至关重要的作用,是其能够工作的基础,具有 p 对永磁磁极的转子以速度 ω_r 旋转时,永磁体所产生的磁场经过静止的调磁环(假定调磁环调磁铁芯数为 n_s)调制后,在气隙中形成一个空间分布磁场,该磁场在半径为 r 、空间角度为 θ 处的磁感应强度径向分量 $B_r(r, \theta)$ 可表示为

$$B_r(r, \theta) \propto \left(\sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} b_{rm}(r) \cos(mp(\theta - \omega_r t) - mp\theta_0) \right) \times \left(\lambda_{r0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots}^{\infty} \lambda_{rj}(r) \cos(jn_s \theta) \right) \quad (1)$$

式中 b_{rm} ——没有调磁铁芯时气隙磁场磁感应强度径向分量的傅里叶系数
 t ——时间 θ_0 ——初始空间相位角
 λ_{r0} ——调磁环磁导平均值
 λ_{rj} ——引入调磁铁芯后,调磁铁芯对磁场径向分量调制函数的傅里叶分解系数
 通过计算,式(1)又可写成

$$B_r(r, \theta) = \lambda_{r0} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} b_{rm}(r) \cos(mp(\theta - \omega_r t) + mp\theta_0) + \frac{1}{2} \sum_{\substack{j=1,2,3,\dots \\ m=1,3,5,\dots}}^{\infty} \lambda_{rj}(r) b_{rm}(r) \cos \left((mp + jn_s) \left(\theta - \frac{mp\omega_r}{mp + jn_s} \right) + mp\theta_0 \right) + \frac{1}{2} \sum_{\substack{j=1,2,3,\dots \\ m=1,3,5,\dots}}^{\infty} \lambda_{rj}(r) b_{rm}(r) \cdot \cos \left((mp - jn_s) \left(\theta - \frac{mp\omega_r}{mp - jn_s} \right) + mp\theta_0 \right) \quad (2)$$

从谐波分析的角度看,式(2)中空间相位角 θ 的系数表征谐波次数,因此该气隙磁场所包含的谐波磁场次数可表示为

$$p_{m,k} = |mp + kn_s|$$

$$(m = 1, 3, 5, \dots, \infty; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty) \quad (3)$$

同理,式(2)中余弦函数内时间变量 t 的系数表征谐波磁场对应的旋转速度,因此该气隙磁场所包含的各次谐波磁场对应的旋转速度可表示为

$$\omega_{m,k} = \frac{mp}{|mp + kn_s|} \omega_r$$

$$(m = 1, 3, 5, \dots, \infty; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty) \quad (4)$$

综合式(3)和式(4),根据旋转速度,可以将气隙谐波磁场分为2类:一类是未调磁时,即 $k=0$ 时所对应的谐波磁场,其特点是谐波磁场转速与转子转速 ω_r 相同,因此称之为基本谐波磁场;另一类是由于调磁铁芯的引入,即 $k \neq 0$ 时所对应的谐波磁场,其特点是谐波磁场的转速与转子转速 ω_r 不同,因此称之为调制谐波磁场。根据文献[5],所有调制谐波磁场中 $m=1, k=-1$ 组合对应的 $p_{1,-1}$ 次调制谐波磁场幅值最大,即 $p_{1,-1}$ 次谐波磁场的次数及对应转速为

$$\begin{cases} p_{1,-1} = n_s - p \\ \omega_{1,-1} = \frac{p}{n_s - p} \omega_r \end{cases} \quad (5)$$

根据机电能量转换定律,2个磁场要进行稳定的能量传递,这2个磁场的磁极对数必须相同,因此在磁场调制式磁齿轮设计中,总是将另外一个转子磁极对数取为 $n_s - p$ 对,这样磁场调制作用产生的 $p_{1,-1}$ 次调制谐波磁场与另外一个转子主磁场相互作用才能产生同步转矩。已知 $p_{1,-1}$ 次调制谐波磁场的旋转速度为 $\omega_{1,-1}$,在此同步转矩作用下,另外一个转子也以同步转速 $\omega_{1,-1}$ 旋转,这样最终实现了一个转子以速度 ω_r 旋转,而另外一个转子以速度 $\omega_{1,-1}$ 旋转的转速变比功能,因此磁齿轮的传动比可表示为

$$G = \frac{\omega_r}{\frac{p}{n_s - p} \omega_r} = \frac{n_s - p}{p} \quad (6)$$

参考图2,样机磁齿轮内转子磁极对数 $p_i = 4$,调磁环铁芯数 $n_s = 31$,因此外转子磁极对数为 $p_o = 27$,根据式(6)可知该样机的传动比为6.75。磁齿轮具有双气隙结构,外转子、内转子和定子之间的磁场相互耦合,而且通过谐波磁场传递转矩,传统的磁路分析法很难适用,因此采用电磁场有限元法进行分析。图3和图4分别是内、外气隙磁场径向分量

及其傅里叶分析,结果表明当 $p_i = 4$ 时,所有调制谐波磁场中 $p_{1,-1} = 27$ 次调制谐波磁场幅值最大,磁齿轮获得最大的转矩传递能力,从而验证了以上分析的正确性。同时也应注意到,磁场调制式磁性齿轮中气隙磁场谐波复杂,除上述 $p_{1,-1}$ 次调制谐波磁场与另外一个转子主磁场相互作用产生转矩外,各次谐波磁场与另外一个转子磁场相互作用均会产生转矩,但由于其余各次谐波磁场幅值相对较小,这些转矩对平均转矩的影响较小。

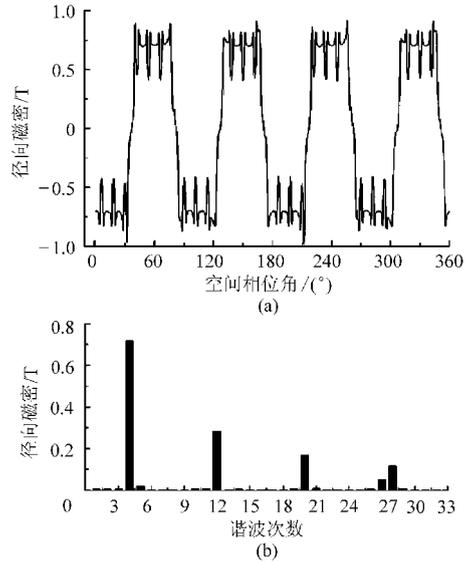


图3 内气隙磁场分析

Fig. 3 Field analysis of inner air-gap

(a) 径向分量波形 (b) 傅里叶分析结果

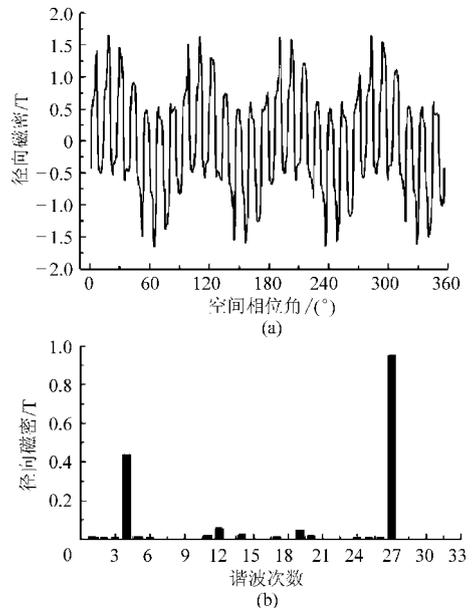


图4 外气隙磁场分析

Fig. 4 Field analysis of outer air-gap

(a) 径向分量波形 (b) 傅里叶分析结果

2.2 静特性

静态转矩特性是磁齿轮最重要的特性之一,图5是内转子转过一对磁极即 90° 空间角度,得到

转矩随转子相对位置的变化规律,内、外转子上的转矩近似为正弦波,这与同步电机中的矩角特性相类似。内、外转子的转矩比在任意位置都基本是-1:6.75(负号表示内外转子方向相反),这与磁齿轮传动比完全一致。磁齿轮的工作范围包括稳定运行区和非稳定运行区,磁齿轮只能在稳定运行区间传递转矩^[6-7]。磁齿轮不带任何负载时,齿轮静止在稳定区间的空载点处;当齿轮带动一定负载开始运转后,最终将在负载点处稳定运行;如果负载转矩增大,那么工作点将上移到新的负载点处;如果负载转矩继续增大并超过外转子最大静态转矩,外转子将由于驱动转矩小于负载转矩而减速至零,而内转子此时会振荡转动,因此磁齿轮具有“过载自保护”功能。

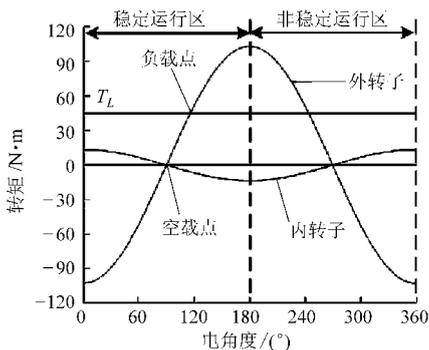


图5 磁齿轮矩角特性
Fig.5 Torque-angle curves

3 磁齿轮传动的风力发电机特性

3.1 系统运动方程

由于磁齿轮不具备自启动能力,其工作运行需要外部原动力的驱动,本文将磁齿轮引入风力发电系统代替传统机械齿轮,实现风力机与发电机的无接触转矩传递,既解决了风力机与发电机的转速匹配问题,又降低了机械损耗,减小了风电机组的总体积,从而提高了整个风电系统的效率和工作可靠性。如图6所示,将磁齿轮的外转子与低速风力机同轴安装,获得低速大转矩功率,再经过磁齿轮的调磁铁

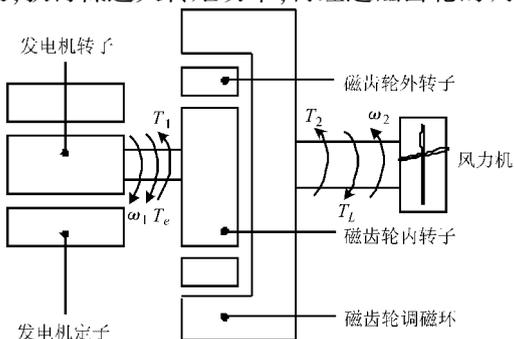


图6 磁齿轮传动的风力发电系统结构简图

Fig.6 Configuration of wind turbine system with FMMG

环调制作用,使发电机的转子和磁齿轮的内转子实现同步高速旋转。由于磁齿轮的内外转子不是直接接触的刚性连接,内转子是一个随动转子,因此对该系统的动态分析就显得尤为重要。

磁齿轮传动的风力发电系统内、外转子的转矩正向参考方向如图6所示。图中发电机的电磁转矩为 T_e ,磁齿轮内、外转子受到的转矩分别为 T_1 和 T_2 ,外转子得到的风机驱动力矩为 T_L 。

磁齿轮传动的风力发电机系统存在两个运动方程,即发电机转子与磁齿轮内转子建立的第一运动方程和磁齿轮外转子与风力机建立的第二运动方程^[7-8],分别为

$$T_e - T_1 = (J_e + J_1) \frac{d\omega_1}{dt} \quad (7)$$

$$T_2 - T_L = (J_2 + J_L) \frac{d\omega_2}{dt} \quad (8)$$

式中 J_e ——发电机转子的转动惯量
 J_1, J_2 ——磁性齿轮内、外转子的转动惯量
 J_L ——风机转动惯量
 ω_1 ——发电机与磁齿轮内转子转速
 ω_2 ——风机与磁齿轮外转子转速

式(7)和式(8)离散化后得

$$\omega_1^{t+\Delta t} = \omega_1^t + \frac{T_e - T_1}{J_e + J_1} \Delta t \quad (9)$$

$$\omega_2^{t+\Delta t} = \omega_2^t + \frac{T_2 - T_L}{J_2 + J_L} \Delta t \quad (10)$$

进而得到内外转子的旋转角度

$$\theta_1^{t+\Delta t} = \theta_1^t + \omega_1^{t+\Delta t} \Delta t \quad (11)$$

$$\theta_2^{t+\Delta t} = \theta_2^t + \omega_2^{t+\Delta t} \Delta t \quad (12)$$

式中 θ_1 ——内转子机械角位移

θ_2 ——外转子机械角位移

由此可以得到系统运动部分任意时刻的位置,最终得到磁齿轮动态特性。

3.2 仿真试验

图7是发电机反电势计算波形,磁齿轮主要参数如表1所示。这里用一台电动机模拟风机,以时步有限元法为基础进行仿真研究^[9-12]。试验过程中,驱动磁齿轮从静止状态启动,在 $t = 0.4$ s时将

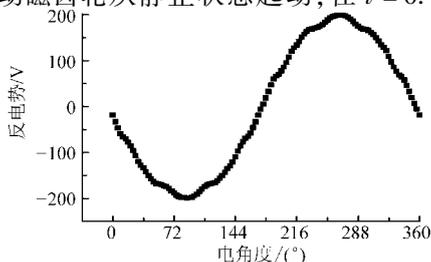


图7 发电机反电势计算波形

Fig.7 Simulated EMF waveform

电动机电磁转矩由 $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ 增加至 $60 \text{ N}\cdot\text{m}$, 在 $t = 0.7 \text{ s}$ 时再增加至 $120 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

表1 磁场调制磁齿轮主要设计参数

Tab. 1 Specification of FMMG

参数	数值
外转子极对数	27
内转子极对数	4
调磁铁块数	31
调速比	6.75
铁芯块宽度与基准宽度比例	0.85
外径/mm	120
永磁体剩磁/T	1.2
永磁体矫顽力/ $\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$	970
轴向长度/mm	40
外转子磁钢宽度与基准宽度比例	1.25

由图 8a 和 8c 的磁齿轮内、外转子转矩特性可知, $t = 0.7 \text{ s}$ 之前, 在电动机起动及其电磁转矩发生

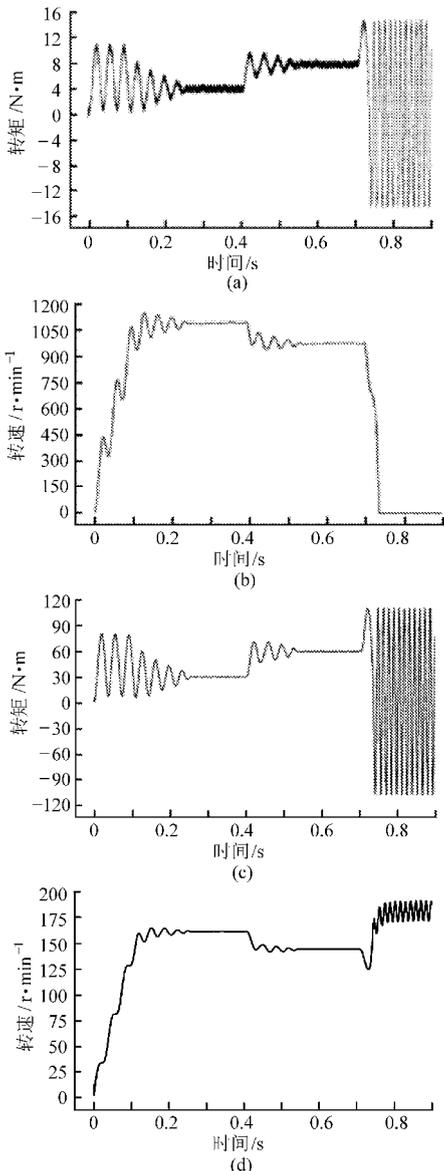


图8 动态特性仿真波形

Fig. 8 Dynamic characteristics of FMMG

- (a) 内转子转矩 (b) 内转子转速
(c) 外转子转矩 (d) 外转子转速

变化过程中, 磁齿轮内、外转子转矩随之发生变化, 且内转子转矩始终与外转子转矩符合齿轮传动比关系, 如当 $T_2 = 60 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时, T_1 平均值约为 $8.89 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。受自定位转矩的影响, 内转子转矩曲线中“毛刺”为明显。图 8b 和 8d 分别是内、外转子转速曲线, 当 $\omega_2 = 160 \text{ r}/\text{min}$ 时, ω_1 约是 $1080 \text{ r}/\text{min}$, 转速比亦符合齿轮的传动比。根据图 5 磁齿轮矩角特性, 外转子最大静态转矩为 $112 \text{ N}\cdot\text{m}$, 因此, 在 $t = 0.7 \text{ s}$ 以后, 由于外转子的输入转矩大于磁齿轮所能传递的最大转矩, 磁齿轮处于过载状态, 内转子转速很快下降到零, 外转子通过“打滑”实现自我过载保护, 内、外转子转矩不再符合磁齿轮的传动比关系。

4 试验验证

图 9 是磁齿轮风力发电系统试验平台, 图中从左至右依次为同步发电机、小量程转矩传感器、磁齿轮、大量程转矩传感器和直流电动机, 其中直流电动机作为原动机通过大量程转矩传感器与磁性齿轮外转子连接, 根据大量程转矩传感器的转矩和转速可以得到磁齿轮的输入功率; 发电机作为负载通过小量程转矩传感器与磁齿轮内转子连接。图 10 是发电机额定转速的反电势实测波形, 与计算波形基本吻合, 验证了以上研究方法的正确性。

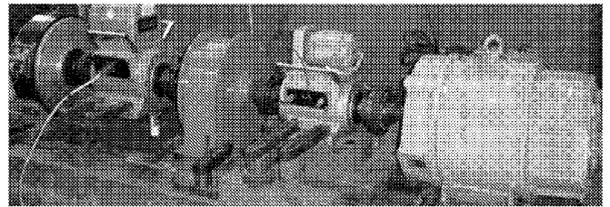


图9 磁齿轮传动的发电机系统试验平台

Fig. 9 Test rig of FMMG driven generator system

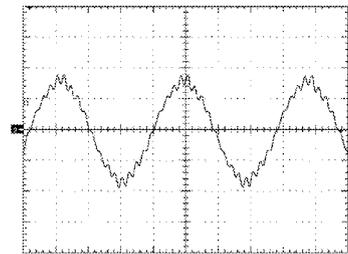


图10 反电势的试验波形(1000 r/min)

Fig. 10 Tested waveform of the EMF (1000 r/min)

5 结束语

磁齿轮依靠磁场调制作用传递转矩, 其输入与输出之间的非接触性传动特点使其在风电机组中较机械齿轮具有特殊的优势。由于磁齿轮不具有自启动能力, 其内外转子之间不是刚性连接, 因此磁齿轮

(下转第 150 页)

- 8 Muthuswamy S, Rupasinghe H P V, Stratton G W. Antimicrobial effect of cinnamon bark extract on *Escherichia coli* O157: H7, *Listeria innocua* and fresh-cut apple slices[J]. *Journal of Food Safety*, 2008, 28(4): 534 ~ 549.
- 9 Boziaris I S, Adams M R. Effect of chelators and nisin produced in situ on inhibition and inactivation of gram negatives[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1999, 53(2 ~ 3): 105 ~ 113.
- 10 Rhim J W. Physical and mechanical properties of water resistant sodium alginate films[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie-Food Science and Technology*, 2004, 37(3): 323 ~ 330.
- 11 Thatcher F S. Microorganisms in foods; 1. their significance and methods of enumeration [M]. 2nd edition. Toronto: International Commission on Microbiological Specifications of Foods (ICMSF), 1978.
- 12 Antonacopoulos N, Vyncke W. Determination of volatile basic nitrogen in fish; a third collaborative study by the West European Fish Technologists' Association (WEFTA) [J]. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A*, 1989, 189(4): 309 ~ 316.
- 13 Pearson D. The chemical analysis of foods [M]. 7th ed. . Edinburgh, New York: Churchill Livingstone, 1976.
- 14 Olafsdottir G, Martinsdottir E, Oehlenschlager J, et al. Methods to evaluate fish freshness in research and industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1997, 8(8): 258 ~ 265.
- 15 Chytiri S, Chouliara I, Savvaidis I N, et al. Microbiological, chemical and sensory assessment of iced whole and filleted aquacultured rainbow trout[J]. *Food Microbiology*, 2004, 21(2): 157 ~ 165.
- 16 Hebard C E, Flick G J, Martin R E. Chemistry and biochemistry of marine food products [M]. Westport, CO: AVI Publishing, 1982: 149 ~ 304.
- 17 Gill T. Objective analysis of seafood quality[J]. *Food Reviews International*, 1990, 6(4): 681 ~ 714.
- 18 Connell J. Control of fish quality: methods of assessing and selecting for quality [M]. Farnham, Surrey, England: Fishing News Books Ltd. , 1980.

(上接第 120 页)

传动的风电系统是一个随动系统。本文在二维有限元法对 FMMG 工作原理进行深入分析的基础上,以时步分析法为基础,建立了 FMMG 配合电动机系统的有限元联合仿真模型,明确了磁齿轮传动

的发电机反电势特性,其正确性得到了试验验证,为今后深入研究基于磁齿轮的发电机输出电压调制率等性能的深入研究打下了基础,同时也说明磁齿轮在风电领域的应用前景广阔。

参 考 文 献

- 1 Nagrial M H, Rizk J, Hellany A. Design and development of magnetic torque couplers and magnetic gears[C]//International Conference on Electrical Engineering, 2007.
- 2 Tsurumoto K, Kikuchi S. A new magnetic gear using permanent magnet [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1987, 23(5): 3 622 ~ 3 624.
- 3 Atallah K, Calverley S D, Howe D. Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear[J]. *IEE Proc. Electric Power Applications*, 2004, 151(2): 135 ~ 143.
- 4 江建中, 刘新华, 章跃进, 等. 磁场调制式磁性齿轮: 中国, 200810036390.2 [P]. 2008-09-17.
- 5 Atallah K, Howe D. A novel high performance magnetic gear [J]. *IEEE Trans. on Magnetics*, 2001, 37(4): 2 844 ~ 2 846.
- 6 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.
- 7 张东, 邹国棠, 江建中, 等. 新型外转子磁齿轮复合电机的设计与研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(30): 67 ~ 72. Zhang Dong, Zou Guotang, Jiang Jianzhong, et al. Design and research of a novel magnetic-gear outer-rotor compact machine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(30): 67 ~ 72. (in Chinese)
- 8 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)
- 9 Salon S J. Finite element analysis of electrical machines [M]. Norwell, MA: Kluwer, 1995.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 刘新华. 新型磁场调制式磁性齿轮的设计研究[D]. 上海: 上海大学, 2008. Liu Xinhua. Design and research on a novel field modulated magnetic gear[D]. Shanghai: Shanghai University, 2008. (in Chinese)