

# 聚磁式场调制永磁风力发电机工作原理与静态特性分析

李祥林<sup>1</sup>, 程 明<sup>1</sup>, 邹国棠<sup>2</sup>, 李 顺<sup>1</sup>

(1.东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2.香港大学电机电子工程系, 香港)

**摘 要:** 提出一种新型聚磁式场调制永磁(FCFMPM)电机, 该电机外转子采用聚磁式永磁体结构改善气隙磁密, 定子采用开口槽结构提高空间利用率。基于磁齿轮效应, 定子齿对转子永磁磁场进行调制, 产生极对数少、运行速度快的谐波磁场, 由该谐波磁场作为有效励磁的 FCFMPM 电机具有低速、大转矩密度的特点。在深入分析电机工作原理的基础上, 运用二维有限元方法计算了其静态特性, 包括空载永磁磁链、空载感应电势、电感、定位力矩和电磁转矩等。研制了一台 5kW 实验样机, 并与商业化小型永磁直驱风力发电机做比较。仿真和实验结果表明, 所提电机具有转矩密度大、定位力矩小、外特性硬等特点, 特别适用于如风力发电等低速、直驱系统。

**关键词:** 聚磁; 磁场调制; 永磁电机; 风力发电; 低速直驱

## 0 引言

随着能源危机和环境问题的日益凸显, 可再生能源的开发利用正呈现加速发展的趋势。风能作为一种清洁可再生能源, 近 20 年来得到了广泛应用。发电机是风力发电系统中最重要的能量转换装置, 它不仅影响输出电能的质量和效率, 也影响整个风力发电系统的结构和性能。长期以来, 国内外学者对风力发电机及其系统进行了广泛深入的研究, 先后提出了多种新结构<sup>[1-3]</sup>。一类是以机械式增速齿轮箱为中间环节的高速发电系统, 常用的结构有双馈变速恒频发电系统<sup>[4-5]</sup>、高速永磁发电系统<sup>[6-7]</sup>, 以及近年来出现的无刷双馈发电系统<sup>[8-9]</sup>、定子双绕组感应电机发电系统<sup>[10]</sup>等。然而, 齿轮箱的使用不但造成机械损耗大、功率密度低、维护费用高等缺点, 而且, 齿轮箱是整个风电系统中故障率较高的部件<sup>[2]</sup>。另一类是直驱式风力发电系统, 直接利用风力机驱动发电机发电, 取消了齿轮箱, 简化了结构, 从而系统的可靠性、效率和运行成本得到了相应改善。目前, 国内外学者对直驱式风力发电机的研究主要集中在开关磁阻电机<sup>[11-12]</sup>、双凸极永磁/电励磁电机<sup>[13-15]</sup>、横向磁通永磁电机<sup>[16-17]</sup>、磁通切换永磁电机<sup>[18]</sup>、双定子永磁电机<sup>[19]</sup>等。然而, 由于工作在较低转速, 直驱式风力发电机往往存在体积大、制造成本高、运输和安装困难等问题。因此, 研制适

合风能<sup>1</sup>高效转换利用、运行可靠、控制方便、供电质量优良、具有较高转矩密度的低速直驱发电机成为摆在我们面前紧迫而又影响深远的科学与技术问题。

相比机械式齿轮, 磁齿轮传动具有无接触、振动小、维护少、可靠性高的特点。文献[20-21]提出并分析了一种具有同轴结构的磁齿轮, 基于磁场调制原理, 该磁齿轮能够实现较高的转矩传递能力。在此基础上, 文献[22-23]将一台外转子高速无刷电机内嵌到同轴磁齿轮的内转子腔中, 构成磁齿轮复合永磁 (Magnetic-Gear Compact Permanent Magnet, MGCPM) 电机, 同时实现了电机的高速设计与控制和外转子的低速直驱要求。虽然 MGCPM 电机转矩密度和功率因数均较高, 但是三层气隙和两个旋转部件给电机设计和制造增加了难度。基于磁场调制原理, 文献[24], [25]对 MGCPM 电机进行了改进, 分别提出了具有两层气隙和一层气隙的磁齿轮复合电机。文献[26]对三种类型的磁齿轮复合电机进行了定量比较分析, 结果表明具有一层气隙的磁齿轮复合电机不但结构简单, 而且转矩密度高, 更适用于低速直驱场合。事实上, 具有一层气隙的磁齿轮复合电机与美国 Wisconsin-Madison 大学的 T. A. Lipo 教授等在 20 世纪 90 年代末提出的永磁游标电机本质上相同<sup>[27]</sup>, 本文统称其为场调制永磁 (Field-Modulated Permanent-Magnet, FMPM) 电机。文献[25]提出的一层气隙场调制永磁电机, 转子采用表贴式永磁体结构, 永磁体容易脱落, 而且, 裂

1 国家自然科学基金项目(51137001, 51320105002);

江苏省创新学者攀登项目(BK2010013);

2012 年江苏省中央高校基本科研业务费专项资金(CXLX12\_0091)资助项目。

槽式定子一方面降低了空间利用率,另一方面由于调磁极的磁短路,减少了气隙磁通与定子电枢绕组的有效匝链,导致电机功率密度大打折扣。

本文提出一种新型聚磁式场调制永磁(Flux-Concentrating Field-Modulated Permanent Magnet, FCFMPM)电机,在详细分析该电机结构特点和工作原理的基础上,给出了该电机的气隙磁密表达式,并基于有限元方法(Finite Element Method, FEM)分析了电机的空载永磁磁链、感应电动势、电感、定位力矩和静态电磁转矩等静态特性,研制了一台 5kW 实验样机,进行了空载和负载试验,并与现有商业化小型永磁直驱风力发电机做对比,验证了所提电机具有转矩密度大、外特性硬等特点,适用于直驱式风力发电。

## 1 电机结构

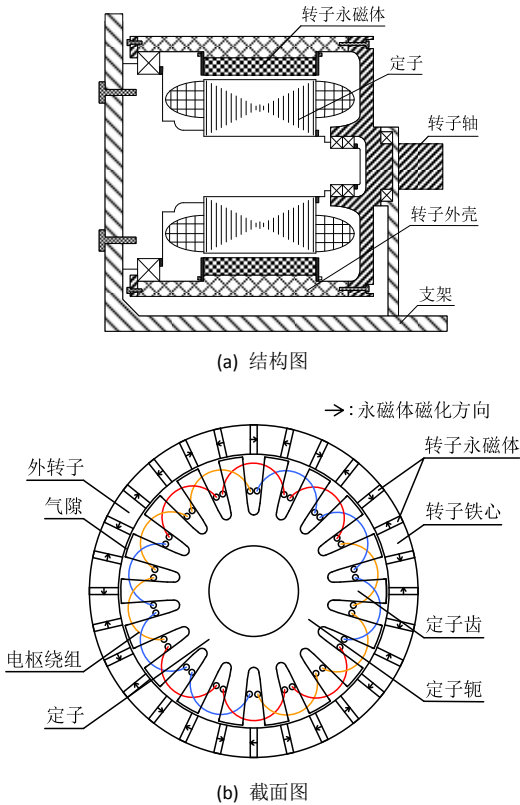


图 1 18/8 极 FCFMPM 电机结构

Fig. 1 Configuration of 18/8-pole FCFMPM machine

图 1 所示为一台三相 18/8 极 FCFMPM 电机,考虑到要使风机叶片可直接安装于电机转子,采用了直接驱动的外转子结构。其中,电机转子由硅钢片叠成的铁心和插入转子铁心均匀分布、交替切向充磁的转子永磁体组成。考虑到永磁体承受压应力

的能力大而承受拉应力的能力很低,辐条式永磁体结构一方面使永磁体在转子旋转中承受压应力,提高转子机械强度<sup>[6]</sup>;另一方面能够产生聚磁效应,改善气隙磁密,提高电机功率密度。电机定子采用硅钢片叠成的开口槽结构,三相电枢绕组对称嵌套在定子齿上,相比文献[25]中的定子结构,省去了调磁极块,定子齿兼做调磁块,提高了空间利用率,而且被调磁极块短路的磁通能够通过定子齿有效匝链电枢绕组,提高了永磁体利用率。考虑到最大限度的提高每相绕组磁链,取定子齿端宽度与转子等效极弧宽度近似相等。

## 2 工作原理

为清楚说明新型 FCFMPM 电机的工作原理,本文首先分析了该电机的气隙磁密组成,然后借助磁场分析做进一步阐述。为了简化分析过程,做如下假设:

- 1) 永磁体的相对磁导率为 1;
- 2) 磁场仅在截面发生变化,轴向不发生变化;
- 3) 忽略铁心局部磁饱和;
- 4) 忽略漏磁。

### 2.1 气隙磁密分析

不考虑定子齿的磁场调制功能,仅外转子永磁体单独作用时,在半径为  $r$  的气隙中产生的径向磁通密度随圆周位置  $\theta$  的变化关系为

$$B_{ag-r} = \sum_{m=1,3,5}^{+\infty} b_{rm}(c_r, r) \cos[mp_r(\theta - \omega_r t + \alpha_{0m})] \quad (1)$$

式中,  $c_r$ —转子极弧系数,等于转子铁心等效磁极与极距的比;

$p_r$ —转子永磁体极对数;

$\omega_r$ —转子旋转角速度;

$\alpha_{0m}$ —转子初始位置相对于等效磁极极轴偏移的角度;

$b_{rm}$ —傅里叶系数。

事实上,定子齿的磁场调制功能源于齿槽交替排布形成的气隙磁阻变化,利用该磁阻变化与永磁磁通的相对运动,调制出一系列旋转空间谐波磁场,其调制功能函数  $\lambda$  经傅里叶变换后可表示为

$$\lambda = a_0(c_{st}) + \sum_{n=1,2}^{+\infty} a_n(c_{st}) \cos[nN_{st}(\theta + \beta_{0n})] \quad (2)$$

式中,  $c_{st}$ —定子齿端弧系数,等于定子齿端宽度与槽距的比;

$N_{st}$ —定子齿数;

$\beta_{0n}$ —定子初始位置相对于槽中心轴偏移的角度;

$a_0, a_n$ —傅里叶系数。

忽略高次谐波的影响,仅考虑式(1)和式(2)的直流和基波分量,则经定子齿调制后的空载气隙径向磁通密度可近似表示为

$$B_{ag-r\lambda} \approx a_0(c_{st})b_{r1}(c_r, r)\cos[p_r(\theta - \omega_r t + \alpha_{01})] + \frac{a_1(c_{st})b_{r1}(c_r, r)}{2}\cos\left[\left(p_r + N_{st}\right)\left(\theta - \frac{p_r\omega_r}{p_r + N_{st}}t\right) + p_r\alpha_{01} + N_{st}\beta_{01}\right] + \frac{a_1(c_{st})b_{r1}(c_r, r)}{2}\cos\left[\left(p_r - N_{st}\right)\left(\theta - \frac{p_r\omega_r}{p_r - N_{st}}t\right) + p_r\alpha_{01} - N_{st}\beta_{01}\right] \quad (3)$$

式(3)中的第一项与永磁磁场基波分量有关,其旋转速度与转子相同;第二项和第三项均由永磁磁场经定子齿调制产生,前者所表示的谐波磁密极对数多,运行速度慢,后者所表示的谐波磁密极对数少,运行速度快。根据电机学原理,电机的感应电动势幅值与磁通的变化率成正比,因此后者可作为定子电枢绕组设计的有效谐波分量加以利用,能够提高电机的感应电动势,从而改善电机的功率密度。由式(3)可得,有效谐波磁通极对数 $p_{sef}$ 和旋转角速度 $\omega_{sef}$ 的表达式为

$$p_{sef} = |p_r - N_{st}| \quad (4)$$

$$\omega_{sef} = \frac{p_r}{p_r - N_{st}}\omega_r = G_r\omega_r \quad (5)$$

由式(4)可见,与普通永磁同步电机不同,FCFMPM 电机的转子永磁体极对数为 $p_r$ ,而定子电枢绕组按照极对数 $p_{sef}$ 绕制。由式(5)可知,定子电枢磁场与转子永磁磁场并非同步,而是定子电枢磁场的旋转速度较转子旋转速度放大 $G_r$ 倍, $G_r$ 称为磁齿轮变比,即:定子齿的磁场调制作用实现了转子磁场到定子磁场的增速(本文将这种现象称为“磁齿轮增速效应”)。此外,当 $p_r > N_{st}$ 时, $\omega_{sef}$ 和 $\omega_r$ 同向,反之,则二者反向。为了获得较高的有效谐波磁密幅值,综合分析后,本文选用 18/8 的极槽数配比,即:转子永磁体极对数为 14,定子齿数为 18,

电枢绕组极对数为 4。

图 2 所示为 18/8 极 FCFMPM 电机空载时,气隙径向磁密波形及对应的谐波频谱图。从图 2(b)可见,气隙磁密包含一系列空间谐波,除 14<sup>th</sup> 基波分量外,高速低次谐波中的 4<sup>th</sup> 分量幅值最大,被作为有效谐波利用,此结论与前述分析一致。

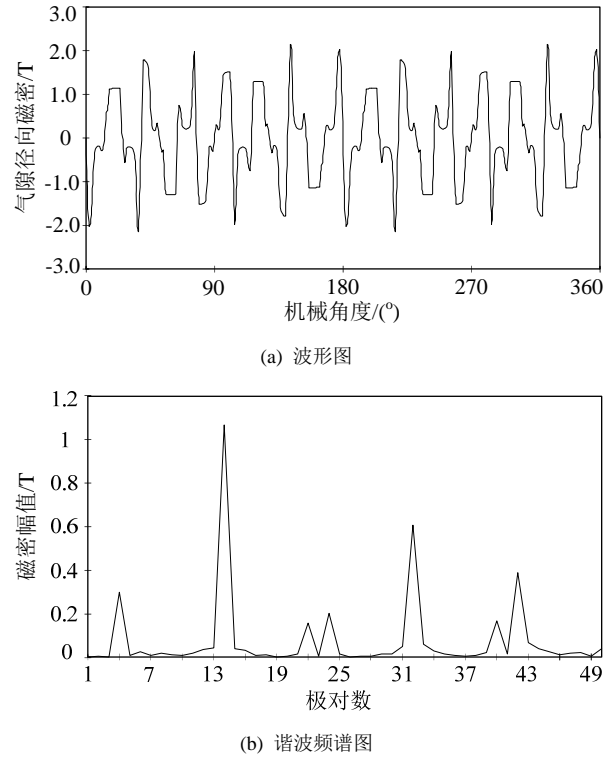


图 2 空载时气隙径向磁通密度

Fig. 2 No-load airgap radial flux density

## 2.2 磁场分析

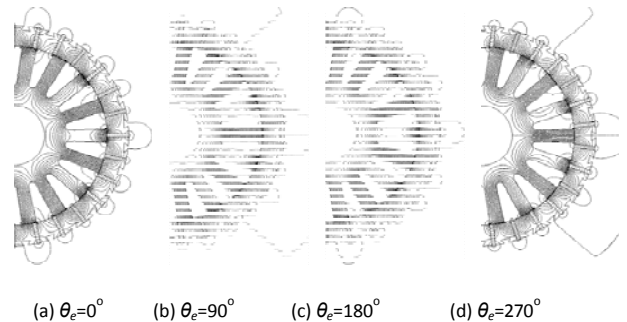


图 3 转子不同位置, 18/8 极 FCFMPM 电机空载磁场分布

Fig. 3 No-load flux distributions of 18/8-pole FCFMPM machine versus rotor positions

本节将借助磁场分析进一步阐述 FCFMPM 电机的工作原理。由于结构对称,图 3 所示为转子不同电角度位置时,18/8 极 FCFMPM 电机一半的空载磁场分布。可以看出,由于定子齿的磁场调制作用,虽然转子永磁体极对数为 14,但是,定子磁场

分布与4对极普通永磁同步电机的磁场分布相似,因此,定子电枢绕组可按4对极电机设计。同时可以观察到,当转子转过1对极,定子磁场也转过1对极,由于极对数差异,定子磁场旋转速度较转子旋转速度快,即:实现了“磁齿轮增速效应”,此结论与前述分析一致。

### 2.3 电枢绕组设计

本文所研究18/8极FCFMPM电机,定子齿数为18,电枢绕组按4对极设计,则每极槽数为9/4。为减小绕组端部长度,可采用集中绕组,此外,还可采用图4所示的分布绕组。图4中的分布绕组线圈跨距为2,小于每极槽数9/4,属于短距线圈,能够有效改善电动势波形。表1对比分析了相同条件下,两种不同绕组连接所得到的单匝绕组相空载感应电动势。结果表明,采用图4所示的分布绕组不但能够改善电动势波形,而且能够大大提高相电动势幅值,在槽面积和槽电流密度相同的情况下,有利于提高电机功率输出能力。

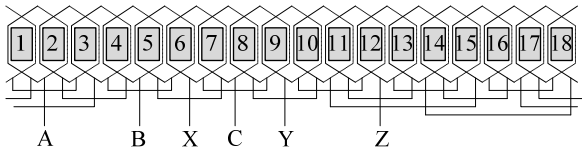


图4 定子电枢绕组展开图

Fig. 4 Stator winding connection

表1 不同绕组连接方式下,单匝绕组相电动势对比

Tab. 1 Comparison of phase EMF per turn

| 绕组连接方式      | 集中绕组  | 分布绕组   |
|-------------|-------|--------|
| 单匝绕组相电动势幅值  | 7.95V | 11.96V |
| 电动势波形总谐波畸变率 | 4.5%  | 3.85%  |

## 3 静态特性分析

### 3.1 空载永磁磁链与感应电动势

根据FCFMPM电机的工作原理,由于定子电枢磁场与气隙磁密有效谐波磁场是同步的,所以定子绕组中感应电动势的频率可表示为

$$f = \frac{p_{sef} n_{sef}}{60} = \frac{p_r n_r}{60} \quad (6)$$

式中,  $n_{sef}$ —有效谐波磁场旋转速度;

$n_r$ —转子旋转速度;

可见,虽然FCFMPM电机的定子电枢磁场旋转速度不同于转子速度,但是,定子绕组中感应电动势的频率计算表达式仍与一般永磁同步电机相同。

基于二维有限元法对所设计的18/8极FCFMPM电机进行分析,得到电机空载永磁磁链和空载感应电动势波形如图5和图6所示。由于改善的气隙磁密和优化的电机结构,所得空载感应电动势具有较高的幅值,在额定转速214r/min时,空载感应电动势幅值为323V,而且三相波形对称,谐波分析表明,其总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)仅为3.85%。

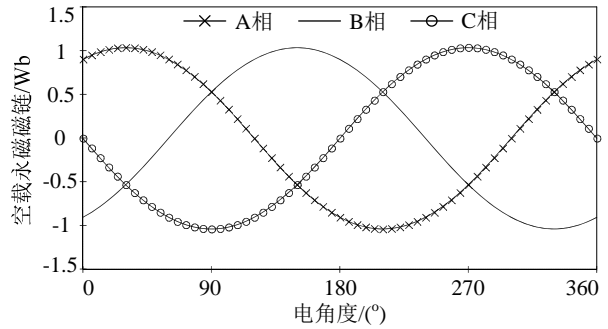


图5 空载永磁磁链波形

Fig. 5 No-load PM flux linkage waveforms

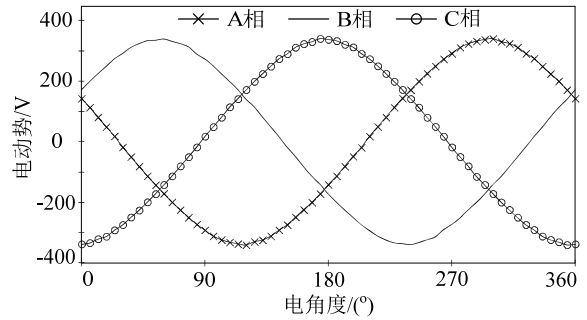


图6 空载感应电动势波形 ( $n=214r/min$ )

Fig. 6 No-load EMF waveforms at 214r/min

### 3.2 电感

使用有限元对电机电感进行计算时,对一相绕组通入电流,此时某相绕组匝链的总磁链由两部分组成,即永磁磁链和电枢磁链:

$$\psi = \psi_{pm} + LI \quad (7)$$

式中,  $\psi_{pm}$ —永磁体产生的永磁磁链;

$L$ —相自感(被测相与通电相为同一相)或互感(被测相与通电相为不同相);

$I$ —通入的相电流。

根据式(7)可得绕组电感

$$L = \frac{\psi - \psi_{pm}}{I} \quad (8)$$

由于电枢反应磁场较永磁磁场弱,仿真分析表

明,对 FCFMPM 电机施加增磁电流或去磁电流时,所得相绕组饱和电感差别不大,图 7 给出了施加增磁电流时,三相绕组饱和电感波形。由图 7 可得,相绕组自感平均值约为 23mH,依此推算,额定电流时该 FCFMPM 电机的内感抗压降较小。

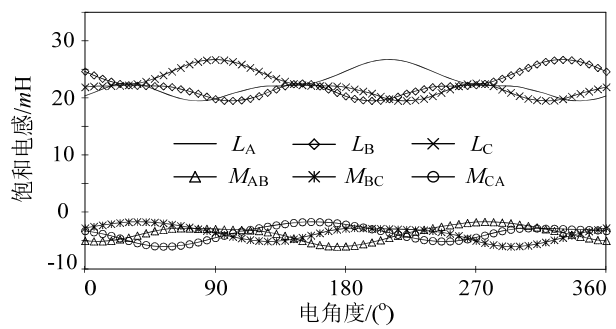


图 7 绕组饱和电感波形

Fig. 7 Winding saturated inductance waveforms

3.3 定位力矩

定位力矩是衡量永磁电机性能的重要指标之一,它会影响电机起动性能,并造成转矩脉动,对于 FCFMPM 电机,定位力矩周期以电角度可表示为

$$\delta_{\text{cog}} = \frac{p_{\text{sef}} \times 360^\circ}{N_{\text{cog}}} \tag{9}$$

式中,  $N_{\text{cog}}$ —有效谐波极数与定子齿数的最小公倍数,对于 18/8 极 FCFMPM 电机,  $\delta_{\text{cog}}=20^\circ$ 。

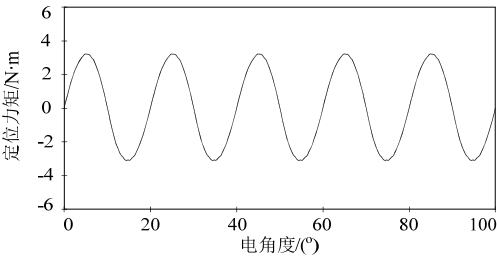


图 8 定位力矩波形

Fig. 8 Cogging torque waveform

图 8 所示为采用 ansys 有限元仿真软件中的虚功法计算得到的电机定位力矩波形,其电周期为  $20^\circ$ ,与式(9)结果一致。定位力矩峰值约为  $3.05\text{N}\cdot\text{m}$ ,仅为额定输出转矩的 1.39%。

3.4 静态电磁转矩

图 9 所示为加载与感应电动势同相位的电流时,电机平均电磁转矩随相电流有效值变化曲线,当电流小于 1.5 倍额定值时,电磁转矩随电流几乎呈线性增长。当电流过大时,由于该电机铁芯饱和程度受电枢磁场影响不明显,与根据电压、电流计算得到的理论值相比,电磁转矩有限元计算值虽有

所减小,但差别不大,说明此电机具有较强的过载能力,此时主要考虑散热条件对电机性能的影响,这也是 FCFMPM 电机的特点。

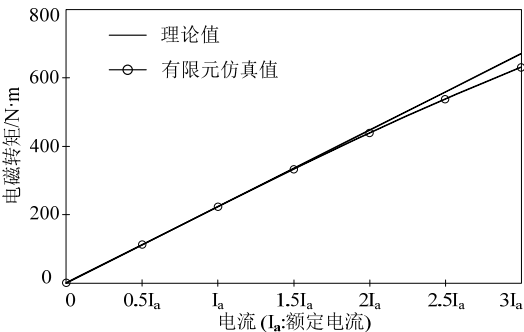


图 9 平均电磁转矩随电流变化曲线

Fig. 9 Variation of electromagnetic torque with current

4 样机实验与比较分析

4.1 样机实验

为验证上述分析的正确性,设计并制作了一台额定功率 5kW 的样机,该样机定子电枢绕组采用图 4 所示的分布绕组,表 2 所示为样机主要设计参数。其中,槽电流密度按有效铜线部分计算。图 10 为样机测试实验平台,变频器驱动三相异步电机拖动 FCFMPM 样机进行发电实验,先测空载电势,然后施加不同的三相对称电阻负载,测试发电机输出特性。

表 2 FCFMPM 样机参数

Tab. 2 Specifications of FCFMPM prototype

| 参数                         | 数值   | 参数            | 数值  |
|----------------------------|------|---------------|-----|
| 额定功率/kW                    | 5    | 定子齿数 $N_{st}$ | 18  |
| 额定输出相电压/V                  | 200  | 转子外径/mm       | 220 |
| 额定电流/A                     | 8.33 | 转子内径/mm       | 179 |
| 额定转速/(r/min)               | 214  | 定子外径/mm       | 178 |
| 槽电流密度/(A/mm <sup>2</sup> ) | 4.15 | 定子内径/mm       | 60  |
| 槽满率                        | 0.35 | 气隙长度/mm       | 0.5 |
| 转子永磁体极对数 $p_r$             | 14   | 轴向长度/mm       | 284 |

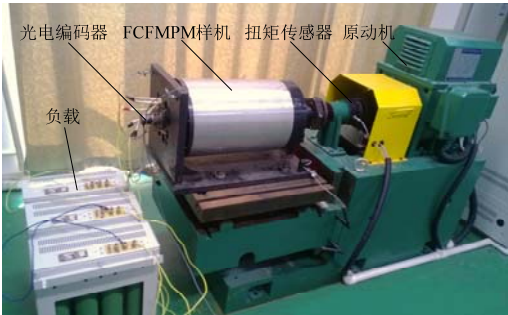


图 10 FCFMPM 样机实验平台

Fig. 10 FCFMPM prototype test platform

图 11 所示为额定转速下电机空载感应电动势



实测波形,与图6所示的仿真结果吻合,谐波分析表明,该实测波形THD仅为2.94%,比仿真值3.85%略小。由图11可得,实测空载感应电势幅值约为302V,比仿真值323V小6.5%,该误差主要是由二维有限元仿真忽略了端部漏磁、电机加工工艺等因素造成的。图12所示为采用LCR测试仪实测样机在不同转子位置时的三相绕组电感波形,其大小和变化规律与仿真结果基本一致。图13给出了样机的外特性仿真和实验曲线,二者变化趋势一致,由于空载电势减小,故额定电流时实测输出相电压约为180.5V,此时输出电压调整率约为15.7%。此外,额定负载下,实测电机效率约为92%。

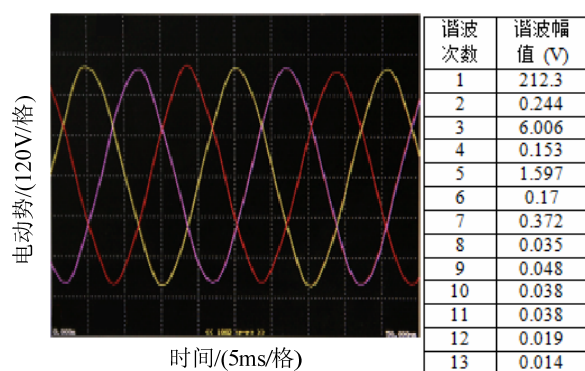


图11 实测空载感应电动势波形及谐波分析 ( $n=214\text{r/min}$ )  
Fig. 11 Measured no-load EMF waveform and harmonic components ( $n=214\text{r/min}$ )

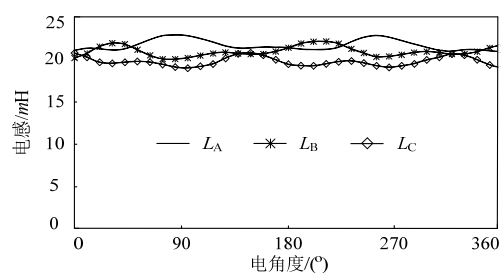


图12 电感实测波形  
Fig. 12 Measured inductance waveforms

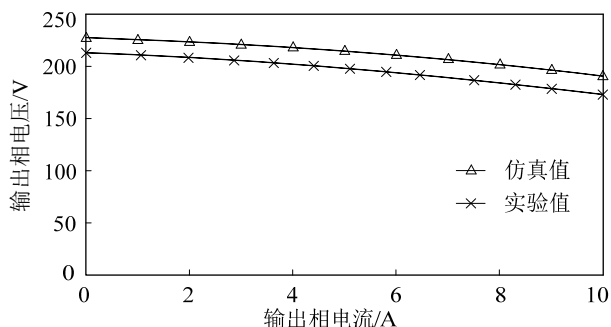


图13 样机外特性仿真与实验曲线  
Fig. 13 Simulated and measured output characteristics

## 4.2 比较分析

常温条件下,实验室测试,所设计FCFMPM样机能够带载长期稳定运行,电机温升满足热绝缘等级要求。为了进一步说明FCFMPM电机的特点,本文将所设计样机与一款额定值相近的商业化小型永磁直驱风力发电机做比较,结果见表3。分析数据表明,在额定功率、永磁材料、冷却方式、热绝缘等级相同,额定相电压、额定转速、铁芯材料等参数相近的情况下,所设计样机体积减小5.1%,质量降低16.7%,转矩密度提高38.3%,充分说明FCFMPM电机具有体积小、质量轻、转矩密度大的优点。

表3 FCFMPM样机和商业化电机比较

Fig. 3 Comparison of FCFMPM prototype with commercial counterpart

| 类型                                 | FCFMPM样机 | 商业化永磁风力发电机 |
|------------------------------------|----------|------------|
| 额定功率/kW                            | 5        |            |
| 额定相电压/V                            | 200      | 220        |
| 额定转速/(r/min)                       | 214      | 240        |
| 额定扭矩/Nm                            | 220      | 200        |
| 永磁材料                               | 稀土钕铁硼    |            |
| 铁芯材料                               | DW360-50 | 50WW470    |
| 永磁材料温度等级                           | 150℃     |            |
| 绕组温度等级                             | 150℃     |            |
| 整机体积/(cm <sup>3</sup> )            | 31360    | 33050      |
| 整机质量/kg                            | 125      | 150        |
| 转矩密度 (计有效部分)/(kNm/m <sup>3</sup> ) | 20.37    | 14.73      |
| 效率                                 | >90%     | >85%       |
| 冷却方式                               | 自然冷却     |            |

## 5 结论

本文提出了一种新型聚磁式场调制永磁风力发电机,详细介绍了该电机工作原理,并基于二维有限元方法,分析了包括空载永磁磁链、空载感应电动势、电感、定位力矩和电磁转矩在内的电机静态特性。通过研制样机,进行空载和负载试验,并与同类商业化电机比较,验证了设计方案的正确性和有效性。与传统永磁同步直驱电机、裂槽式永磁游标电机相比,所提电机具有如下特点:

1) 基于磁齿轮效应,能够同时实现转子低速直驱和定子绕组按高速磁场设计的要求,与传统永磁同步直驱电机相比,在转子极对数和转速相同的情况下,定子齿数较少,绕组易于绕制,结构简单紧凑,加工制造方便。

2) 转子采用辐条式永磁体结构,与表贴式结构相比,聚磁效应能够改善气隙磁密,在定子结构尺寸和槽电流密度相同的情况下,即施加相同的电负荷,气隙磁密的改善能够进一步提高电机功率密度;磁负荷的提高有利于用较少的绕组匝数获得较高的感应电势,从而使内电抗压降相对降低,利于获得较硬的外特性。

3) 开口槽定子结构省去了裂槽式定子中的调磁极块,定子齿兼具磁场调制功能,提高了定子空间利用率,减小了电机体积。

4) 体积小、质量轻、转矩密度大、定位力矩小、外特性硬等优点,使得所提 FCFMPM 电机在诸如风力发电等低速直驱系统中有应用前景。

需要说明的是,FCFMPM 作为一种新型电机,其自身仍然存在一些问题需要解决,如提高永磁体利用率等,这些内容将是下一阶段的主要研究任务,本文的工作为其打下了基础。

#### 参考文献:

- [1] Li H, Chen Z. Overview of different wind generator systems and their comparisons [J]. IET on Renewable Power Generation, 2008, 2(2): 123-138.
- [2] Henk Polinder, Frank F A van der Pijl, et al. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 725-733.
- [3] 程明, 张运乾, 张建忠. 风力发电机发展现状及研究进展[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 1-9.
- [4] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 交流励磁变速恒频风力发电系统的运行与控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 129-136.
- [5] 苑国锋, 李永东, 柴建云, 等. 1.5MW 变速恒频双馈风力发电机组励磁控制系统试验研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 42-47.
- [6] 王凤翔. 永磁电机在风力发电系统中的应用及其发展趋向[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 12-24.
- [7] 夏长亮. 永磁风力发电系统及其功率变换技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 1-13.
- [8] 邓先明, 姜建国. 无刷双馈电机的工作原理及电磁设计 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 126-132.
- [9] 张凤阁, 金石, 张武. 基于无速度传感器的无刷双馈风力发电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 20-27.
- [10] 施凯, 黄文新, 胡育文, 等. 宽风速运行的定子双绕组感应电机风力发电系统拓扑及控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 78-85.
- [11] Mueller M A. Design and performance of a 20 kW, 100 rpm, switched reluctance generator for a direct drive wind energy converter [C]. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005: 56-63.
- [12] 熊立新, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 一种开关磁阻风力发电机最大风能跟踪方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 1-7.
- [13] Fan Ying, Chau K T, Cheng Ming. A new three-phase doubly salient permanent magnet machine for wind power generation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(1): 53-60.
- [14] 张建忠, 程明. 新型直接驱动外转子双凸极永磁风力发电机 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 15-21.
- [15] 朱德明, 周楠, 张卓然, 等. 直驱式多转子极电励磁双凸极风力发电机 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 32-37.
- [16] 颜建虎, 林鹤云, 冯奕. 磁通切换型横向磁通永磁风力发电机 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 67-72.
- [17] 包广清, 李战明, 施进浩. 一种新型组合式横磁通永磁风力发电机 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 83-88.
- [18] 花为, 程明, Zhu Z Q 等. 新型磁通切换型双凸极永磁电机的静态特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 129-134.
- [19] Niu Shuangxia, Chau K T, Jiang J Z, et al. Design and control of a new double-stator cup-rotor permanent magnet machine for wind power generation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2501-2503.
- [20] Atallah K, Howe D. A novel high-performance magnetic gear [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 2844-2846.
- [21] 杜世勤, 江建中, 章跃进, 等. 一种磁性齿轮传动装置 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 41-46.
- [22] 张东, 邹国荣, 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.
- [23] Wang L L, Shen J X, Luk P C K, et al. Development of a magnetic-geared permanent-magnet brushless motor [J].

- IEEE [24]Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4578-4581.
- [24] Li Jianguai, Chau K T, Jiang J Z, et al. A new efficient permanent-magnet vernier machine for wind power generation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 1475-1478.
- [25] Li X L, Chau K T, Cheng M, Hua W. Comparison of magnetic-gear permanent-magnet machines [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2013, 133: 177-198.
- [26] Toba A, Lipo T A. Novel dual-excitation permanent magnet vernier machine [C]. IEEE IAS Annual Meeting, 1999: 2539-2544.

#### 作者简介:

李祥林 (1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为新型永磁风力发电机设计、分析与控制;

程明 (1960-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要从事电机与控制、新能源发电技术等研究。

## Principle and Analysis of a New Flux-Concentrating Field-Modulated Permanent-Magnet Wind Power Generator

Li Xianglin<sup>1</sup> Cheng Ming<sup>1</sup> Chau K. T.<sup>2</sup> Li Shun<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering Southeast University Nanjing 210096 China

2. Department of Electrical and Electronic Engineering The University of Hong Kong Hong Kong China)

**Abstract:** This paper presents a new flux-concentrating field-modulated permanent-magnet (FCFMPM) machine. This machine adopts a spoke-magnet outer rotor, which can increase airgap flux density due to the flux-concentrating effect. The stator employs an open-slot rather than split-slot structure to improve space utilization. Based on the “magnetic gearing effect”, the magnetic field produced by the low-speed outer rotor can be modulated by the stator teeth, such that a high-speed magnetic harmonic can be generated in the airgap, which can be used to improve the no-load EMF and torque density of the machine. By using the finite element method (FEM), the static characteristics of the proposed machine including the no-load PM flux linkage, no-load EMF, inductance, cogging torque and electromagnetic torque are analyzed. Moreover, a 5kW prototype is built for experimentation, and the comparison with a commercial PM direct-drive wind power generator is also conducted. The results show that the proposed machine possesses the merits of high torque density, low cogging torque, and robust output characteristics. Also, it confirms that the FCFMPM machine is very suitable for the low-speed direct-drive application, such as wind power conversion.

**Keywords:** flux-concentrating, field modulation, permanent-magnet machine, wind power generation, low-speed direct-driv