

# 新式盘式永磁直流风力发电机的设计与仿真

杜华夏, 王心尘, 范正萍, 王亚军

(福建省半导体照明工程技术研究中心, 厦门大学物理与机电工程学院 物理系, 厦门 361005)

**摘要:**对一种新型小功率盘式永磁直流风力发电机的原理和电磁设计进行了分析和推导, 利用 Ansoft Maxwell 3D 软件对电机的磁场分布和运动情况进行了仿真, 其结果可为进一步研究提供参考。

**关键词:**盘式永磁风力发电机; Ansoft Maxwell 3D; 仿真分析

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1005-7439(2008)03-0151-04

## Design and Simulation of a New Axial-field Permanent-magnet DC Generator

DU Hua-xia, WANG Xin-chen, FAN Zheng-ping, WANG Ya-jun

(Fujian Engineering Research Center for Solid-State Lighting, Physics Dept., Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** In this paper, an innovative model of vertical-axis permanent-magnet direct-current wind-energy generator has been presented. Its working principle and electromagnetic circuit design have been analyzed and optimized. Ansoft Maxwell 3D software was used to simulate the electromagnetic field and investigate the generator's dynamic behavior. All the simulation methodology and achievements facilitate the design optimization for wind-energy generator and in-depth research.

**Key words:** Permanent-magnet wind turbine; Direct-current generator; Wind-energy

作为目前风电场的主流机型水平轴风力发电机, 由于正常运行叶片的转速很低, 必需通过增速齿轮箱加速才能带动发电机高效发电。齿轮变速箱价格昂贵体积庞大安装困难, 运行中所发生的振动可能影响机组的正常运行, 所带来的传输损失还会影响电机的输出效率, 另外变速器运行的巨大噪声对环境的影响, 也是制约风电机组推广的重要因素之一<sup>[1]</sup>。直驱式风力发电系统采用新型的永磁直流发电机, 可以在低速下变速运行保持较高的发电效率, 机组可以取消增速齿轮箱将发电机直接连接到风力发电机组的轴上, 因而具有很好的应用前景。

发电机分为盘式和圆柱式两种。其中圆柱式发电机是目前的主流机型, 其特征是气隙磁场径向分布, 不过这种机型一直存在着转子散热条件不好和转子铁心利用率不高(只能达到 70%~75%)等问题, 而且必须在高速运转下才能获得高的发电效率; 盘式发电机的特征是气隙磁场沿轴向分布, 可以在低速运转下保持较高发电效率, 但是过去受磁性材料性能的制约盘式电机性能一直不够理想, 不过近

年来随着一些新的高剩磁高矫顽力的永磁材料研制成功, 盘式永磁电机性能正在不断提高, 因而重新受到了电机界的重视。

盘式电机一般垂直安装, 适合垂直轴风机配套使用。本文将提出一种小功率盘式永磁直流风力发电机模型, 用 Ansoft 公司的 Maxwell 3D 模块进行建模, 并用有限元方法对模型进行静态和瞬态分析, 分析电机的特性参数, 并验证模型设计的合理性。

## 1 结构和原理

### 1.1 电机结构

盘式永磁发电机有多种结构, 本文采用的是一种双边永磁体中间定子结构, 其特点是由双转子和单定子组成双气隙(如图 1 所示), 电机结构对称, 铁心两侧气隙磁密相等。盘式永磁发电机的定子铁心一般不开槽, 绕组可以粘结在铁心上, 或者采用环绕法均匀地环绕于铁心上形成环形绕组定子, 本例采用环绕法。转子是一个圆盘, 由高性能永磁材料粘结在实心钢上构成, 两种极性的永磁体交替排列在

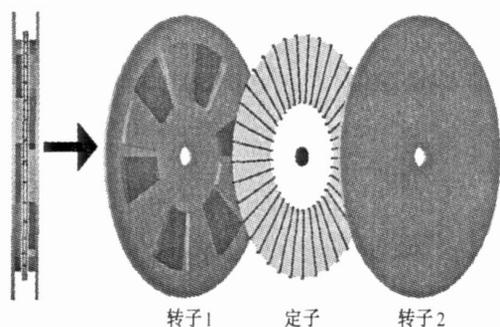


图1 盘式永磁直流发电机结构

圆盘上,上下两边的转子对应的磁体极性相反。

这种电机具有以下结构特点<sup>[2]</sup>:

(1) 不需要励磁电路,结构简单,有较高的功率质量比;轴向尺寸短适用于要求薄型安装的场合;电枢绕组两端面直接与气隙接触,有利于电枢绕组散热,运行中允许较大的电负荷。

(2) 双边结构永磁体轴向对称,对电枢绕组不发生单边磁拉力,因此不会造成电枢变形影响电机的性能。

(3) 电枢绕组的电感和电阻小,电机运行电阻损耗小效率高。

(4) 定子不开槽,电机的设计不需要考虑齿槽效应,电机运行噪音很小,开槽引起的电机震动和转子的高频损耗也都不再存在。

## 1.2 电机原理及基本电磁关系

由于盘式永磁发电机的电枢绕组是采用分布式布置的,有效导体位于永磁体前方的平面上,这样当永磁体由原动机拖动旋转时,就会在气隙中产生与电枢绕组交链的旋转磁场,从而在电枢绕组中感应出交流电动势。电枢绕组的单根导体,在该平面上的位置可用半径  $r$  和极角  $\theta$  来描述,气隙磁密可用平均半径处的磁密代表,写成  $B(\theta)$  的形式,如图2所示。

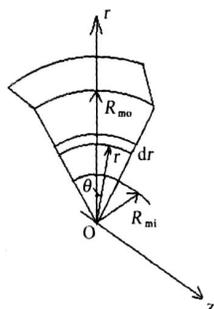


图2 结构示意图

设电机的机械角速度为  $\omega$ ,内直径为  $D_{mi}$ ,外直径为  $D_{mo}$ ,由于在  $(r, \theta)$  处  $dr$  长的导体所产生的电

动势  $de$  为:

$$de = B(\theta) r d\theta$$

因而有效导体在某个极角  $\theta$  位置下的电动势为:

$$e = \int_{D_{mi}/2}^{D_{mo}/2} B(\theta) r dr = \frac{1}{8} (D_{mo}^2 - D_{mi}^2) B(\theta)$$

由此可得每根导体的平均电动势  $E_c$ :

$$E_c = \int_0^{2\pi/p} e d\theta = \frac{1}{8p} B_{av} (D_{mo}^2 - D_{mi}^2)$$

$$B_{av} = i_b B$$

式中:  $B_{av}$  是在一个极距下的气隙磁密平均值,它与磁密幅值  $B$  成正比,比例系数为  $i_b$ 。

如果绕组并联支路对数为  $a$ ,总导体数为  $N$ ,则电枢的电动势  $E$  为:

$$E = \frac{NE_c}{2a} = C_e n$$

$$C_e = \frac{pN}{60a}$$

$$= \frac{1}{8p} B_{av} (D_{mo}^2 - D_{mi}^2)$$

同样,可得盘式永磁直流发电机的电磁转矩  $T_{em}$  为:

$$T_{em} = C_T I$$

$$C_T = \frac{pN}{2a}$$

如设每根导体的电流为  $I_c$ ,则发电机的电负荷  $A$  为:

$$A = \frac{NI_c}{D} = \frac{NI}{2aD}$$

相应的,发电机的平均电负荷  $A_{av}$  为:

$$A_{av} = \frac{NI_N}{a(D_{mo} + D_{mi})}$$

$$I_N = \frac{PN}{U_N}$$

式中:  $I_N$  为发电机的额定电枢电流。

## 2 发电机主要参数的确定

独立式小型风电发电机可与风机叶片连接在同一轴上,由风力机直接驱动。风力机采用萨窝纽斯型设计,设定其运转时额定风速为  $10 \text{ m/s}$ ,叶片半径  $250 \text{ mm}$ ,则风机额定风速为  $320 \text{ r/min}$ <sup>[3]</sup>。风电机组采用蓄电池进行储能,不并网发电,因此额定电压不宜设计过高,本例设计根据蓄电池的额定电压取  $24 \text{ V}$ 。由于盘式永磁电机散热条件较好,其电负荷可取为  $100 \sim 150 \text{ A/cm}$ (一般小功率电机为  $60 \sim 80 \text{ A/cm}$ )<sup>[4]</sup>,本例取  $100 \text{ A/cm}$ 。转子上的永磁钕

铁硼材料型号为 NTP33H,剩磁密度  $B_r$  为 1.043 T,矫顽力  $H_c$  为 793.5 kA/m。

## 2.1 发电机尺寸的确定

考虑到风力机的小型化,设计的发电机的尺寸也应尽可能小,发电机外壳直径取 300 mm。由于发电机存在着漏磁现象,只有当漏磁域宽度较大时其宽度变化对空载漏磁系数的影响才可以忽略,因此结构设计一般要求漏磁域宽度大于 10mm,包括轴外表面到永磁体内表面的距离、永磁体外表面到转子轭内表面的距离都应大于 10 mm<sup>[2]</sup>。为了获得最大功率,电机的电枢与直径的比值应为 $\sqrt{3}$ ,但在实际设计时还应综合考虑用铜量、效率和磁漏等因素,值可根据情况在 1.5~2.2 之间选择。

## 2.2 磁极尺寸的确定

在理想状况下,当永磁体的厚度近似等于气隙长度时最经济。但是由于气隙的磁密  $B = \frac{B_r}{2}$ ,如果永磁体的剩磁强度不高,采用这样的结构气隙磁密就会太低,为了保证足够的气隙磁密,例如采用磁性较差的铁氧体永磁,厚度与气隙长度之比要求在 3~6 之间;不过本例采用了磁性能较好的钕铁硼永磁,这个比值取 2。

## 2.3 永磁体极数的确定

电机的极弧系数  $\rho$  是指电机极弧宽度  $b$  与极距的比值。对于一定的极弧系数,减少电机的极数可以使极间距离增加漏磁显著减少,但是极数过少又会使电机的效率降低,为了确保电机效率盘式永磁发电机的设计仍采用较多的极数,一般为 6~12 极。为了确定本例电机的极数,分别建立 6 极与 12 极电机模型,并用 Ansoft Maxwell 3D 静态分析功能对模型进行静态磁场分析。图 3 和图 4 分别为 6 极和 12 极盘式永磁发电机气隙磁密沿周向分布的模拟结果。从图中可以看出,两者的磁场分布都很均匀,但是 12 极发电机的气隙磁密为 0.70 T,要高于 6 极的 0.56 T,因而发电效率也略高,因此本例采用 12 极。

综合以上分析,本文提出的电机参数如表 1 所示。

## 3 发电机模型的建立和外加电路

利用 Ansoft Maxwell 3D 软件建立发电机的有限元模型,并定义相应的外加电路来研究发电机在不同负载条件下的输出特性。为了模拟电机的空载

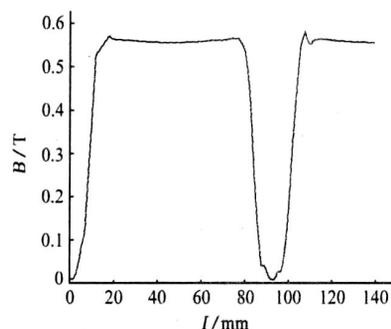


图 3 6 极盘式永磁发电机气隙磁密周向分布

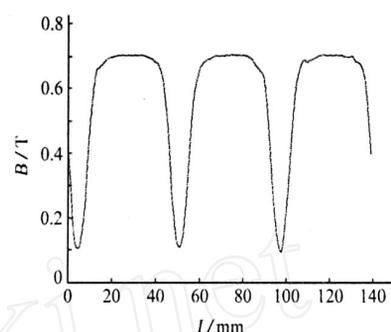


图 4 12 极盘式永磁发电机气隙磁密周向分布

表 1 盘式永磁直流风力发电机的基本参数

项目	参数	项目	参数
额定功率	300 W	额定电压	24 V
额定电流	12.5 A	额定转速	320 r/min
磁极内径	118.0 mm	磁极外径	236.0 mm
磁钢材料	钕铁硼	磁钢剩磁	1.043 T
磁钢矫顽力	793.5 kA/m	磁极对数	6
并联支路数	2	每元件匝数	15

特性,本例定子绕组外电路的电阻  $R_L$  取 100 mΩ,如图 5 所示。在定义外加电路时,选定的绕组会自动出现在 Ansoft Schematic Capture 编辑器中,每个绕组为 1H(L WINDING,不是线圈的电感值);对于多数情况,绕组还要加入串联的电阻  $R_g$  和端部的漏感  $L$ <sup>[5]</sup>。

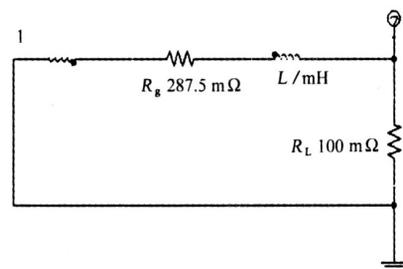


图 5 发电机外电路连接

网格剖分采用三角形有限元单元,在进行静态

分析时系统会自动对模型进行剖分及优化,不过在  
进行瞬态分析时只能进行手动剖分,即先由计算机  
进行粗略剖分再手动优化。在本例中,由于计算机  
自动剖分过于稀疏,故而对原剖分图进行了手动加  
密,重点加密了磁场变化率较大的气隙部分,得到的  
剖分图如图 6(上端盖未显示)。

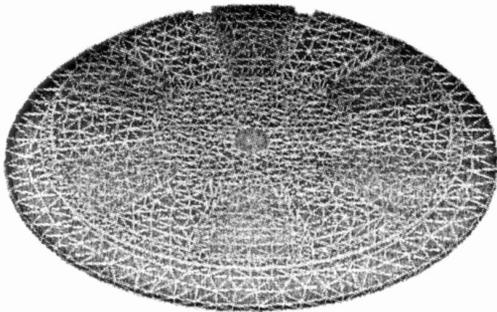


图 6 发电机网格剖分图

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 静态分析结果

首先通过对电机进行静态仿真了解电机的磁场  
分布,初步判定电机设计是否合理。在静态分析中,  
对电机的上转子、下转子、定子的受力和转矩分别进  
行了求解,求解结果如下。

$$\begin{cases}
 \text{上盘} \begin{cases} F_x = 0.61346 \\ F_y = -0.21191 \\ F_z = -4208.6 \end{cases} & T = -0.0860662 \\
 \text{下盘} \begin{cases} F_x = 0.32067 \\ F_y = -0.83866 \\ F_z = 4208.3 \end{cases} & T = 0.0253297 \\
 \text{定子} \begin{cases} F_x = -0.19924 \\ F_y = -0.013275 \\ F_z = -0.41035 \end{cases} & T = 0.0190542
 \end{cases}$$

式中:  $F_x$ ,  $F_y$  和  $F_z$  分别为电机各部分在  $x$ ,  $y$  和  $z$   
方向上所受力,  $N$ ;  $T$  为各部分的转矩,  $N \cdot m$ 。

从计算结果可以看出,虽然盘式电机转子盘的  
受力沿轴向比较大,但是上下转子盘的受力方向相  
反大小相近,因此轴向磁拉力的合力可以认为近似  
为零,这也是双转子的盘式电机的独特优点之一。

利用 Maxwell 后处理电机气隙磁密分布,沿磁  
极平均半径处气隙磁密周向分布结果如图 4 所示,  
径向磁密分布结果如图 7 所示。从图中可见由永磁  
体构成的气隙磁场是一个匀强磁场。

### 4.2 瞬态仿真结果

利用 Ansoft 瞬态求解器,可以求出电机的输出

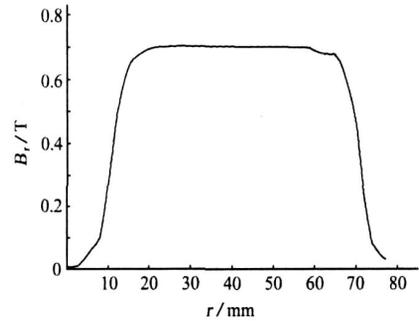


图 7 气隙磁密径向分布

电压、电流、磁链等一系列曲线。在电机的额定转速  
320 r/min 下,取电机旋转半周的时间进行计算,电  
机位置曲线见图 8,图 9 为电机的磁链随时间变化  
的曲线,图 10 为电机输出电压曲线。经过电刷的换  
向电机输出的直流电电压为 24 V,与设计一致。

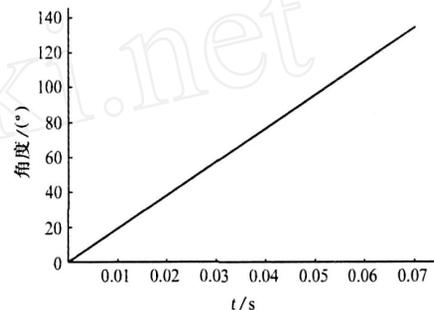


图 8 盘式永磁直流风力发电机的位置曲线

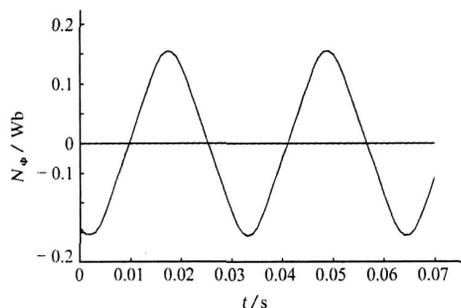


图 9 盘式永磁直流发电机的磁链曲线

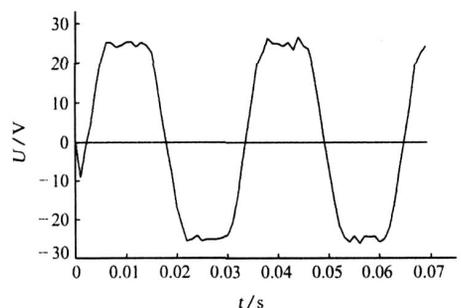


图 10 盘式永磁直流发电机的输出电压曲线

(下转第 156 页)

成,共用组件 48 块,每块太阳能电池组件标称功率为 130 W;最大输出电压为 17.6 V;最大输出电流为 7.39 A;开路电压为 21.9 V;短路电流为 8.02 A。太阳能电池方阵面向正南倾斜安装,方阵与水平面夹角为  $40^\circ$ ,与当地纬度相一致。

由于通信基站地处偏远地区,设备维修维护不方便,因此蓄电池选择了免维护型阀控式铅酸蓄电池产品,放电功率大、充电迅速、循环寿命长、重量轻、性能可靠和均衡。蓄电池的容量,按 3~4 天无风无光仍能保证向通信设备供电的要求配置,单体蓄电池规格为 2 V/400 Ah,共 96 块,采用每 24 块蓄电池串联成一组,4 组并联的连接方式。

系统配备的充电控制器具备蓄电池过充过放、开路和负载过电压、输出短路保护,以及光电池蓄电池接反、夜间反充电保护和雷击保护。充电控制器还具有温度补偿功能以及对输入输出电能的测量、显示的功能和故障报警功能。

## 2 系统运行情况

2007 年,该风光互补电源系统经整体调试后于投入运行,系统运转始终正常,图 2 为控制系统记录的 2007 年 8 月系统发电及基站用电数据柱形图。

图中深颜色的柱形表示每天风力发电机和太阳能电池为蓄电池充电的累积数值,浅颜色的柱形表示每天基站通信设备用电的累计数值。可以看到风光互补电源系统能够保证通信基站设备的用电需求。

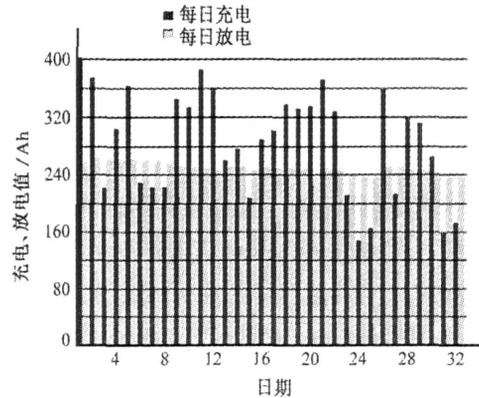


图 2 系统发电用电数据柱形图

## 3 结论

风光互补电源系统在内蒙古南天门通信基站的成功应用,证明了此类系统具有互补性,应用在通信基站电源系统中是可靠稳定的,而且设备的投资相对较低,值得在风光资源丰富的地区广泛推广。

(上接第 154 页)

利用 Origin 软件,作出一个周期内输出电压相对于磁极平均半径处周向分布如图 11 所示,对比图 4 可知电压变化与气隙磁密分布一致,电枢磁动势对主极磁场影响较小。

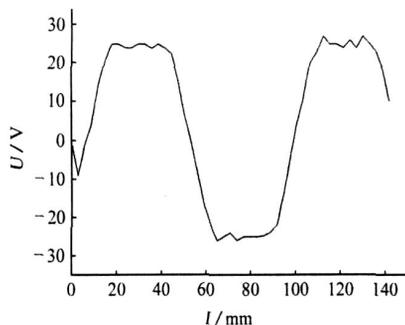


图 11 输出电压随周向位置变化曲线

## 5 总结

在 Ansoft 环境下建立了盘式永磁直流风力发电机的三维有限元模型,利用软件对模型进行了电

机的静态和瞬态仿真,通过仿真可以很方便地观察和分析电机内部磁场和电机的运行情况,判断电机设计的合理性。同时,仿真结果也为改善风力发电机系统参数提供了理论依据和创新途径,方便了电机的优化设计,可以有效缩短电机的研发周期,提高设计精度,降低研发成本。

### 参考文献:

- [1] 石安乐,黄守道. 风力发电用盘式永磁同步发电机的设计[J]. 电气应用, 2007, 26(2): 72-75.
- [2] 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.
- [3] 范正萍,王心尘,杜华夏,等. 小型家用垂直轴风力发电系统的设计[J]. 能源技术, 2007, 28(5): 279-283.
- [4] 郭继高. 小型交流永磁风力发电机设计特点[J]. 微特电机, 1999, 6: 36-38.
- [5] 刘国强,赵凌志,蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.