

两种类型盘式永磁同步发电机设计与比较分析

上官璇峰 王亚辰

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 为满足风力发电系统对发电机提出的低转速要求,研究设计了两台不同类型的轴向磁通永磁同步发电机。分析了这两种发电机拓扑结构的不同特点,确定了永磁极的形状和极弧系数,讨论了发电机的极槽配合问题,并着重对发电机的永磁体和绕组参数进行了详细计算。采用一种准三维有限元方法对两台发电机进行了仿真计算,计算结果验证了设计方法的可靠性,最后利用有限元计算结果对这两种类型发电机的电磁特性进行了比较分析。

关键词: 轴向磁通永磁电机;设计;铁芯;空气芯;参数计算;比较分析

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Design and comparative analysis of two types of axial flux permanent magnet synchronous generators

Shangguan Xuanfeng Wang Yachen

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to satisfy the low speed requirement of wind power generation system, two different types of axial flux permanent magnet machines were designed in this paper. The paper analyzed the different characteristics of these two kinds of topological structure, the shape of the permanent magnet poles and pole-arc coefficients were determined, the generators of slot-pole coordination problem was discussed, and the parameters of the permanent magnets and windings were calculated in detail in this paper. The paper computed the models with the quasi-3D finite element analysis (FEA) methodology for both generators, the reliability of designed methodology applied in axial flux permanent magnet machine was proved by finite element analysis (FEA) results. At last, the electromagnetic characteristics of these two types of generators were compared by Finite Element Analysis (FEA) results.

Keywords: axial flux permanent magnet machine; design; iron core; coreless; parameter calculation; comparative analysis

0 引言

轴向磁通电机(盘式电机)以其结构紧凑、冷却性能好、功率密度高等优点逐渐受到了电机行业的青睐。轴向磁通永磁同步发电机可以做到多极低速,特别适合直驱式风力发电系统^[1-4]。

2013年,巴基斯坦的 Ahmed 和 Ahmad 运用数值算法和解析算法设计了一个基于定子无铁芯轴向磁通永磁电机的风力发电系统模型,并且在 MATLAB/Simulink 的环境中实现了动态仿真^[5]。2012年,山东大学的张文山设计了一台小型垂直轴风力发电用轴向磁通电机,并采用变量分析的方法对电机永磁体形状、厚度、极弧系数、背铁厚度等参数进行了优化^[6]。

本文设计了两台输出功率为 15 kW 的轴向磁通永磁

同步发电机,一台定子带铁芯,一台定子空气芯,并对两台电机的磁场和输出特性进行计算、分析和比较,本文对风力发电用盘式电机的设计与开发具有一定参考价值。

1 结构设计

1.1 拓扑结构

本文设计的两台发电机采用中间定子、双侧转子结构,双转子同步旋转,转子上永磁极轴向均匀充磁,双转子结构可使电机受力均衡。带铁芯发电机结构如图 1(a)所示,定子铁芯由带状硅钢沿周向卷绕而成,无槽。绕组线圈端部沿电机内外径的轴向分布。空气芯发电机结构如图 1(b)所示,绕组线圈采用环氧树脂固化成型,并固定于定子外壳上。

1.2 磁极形状和极弧系数

两台发电机的永磁体均选用扇形结构,如图 2 所示,磁

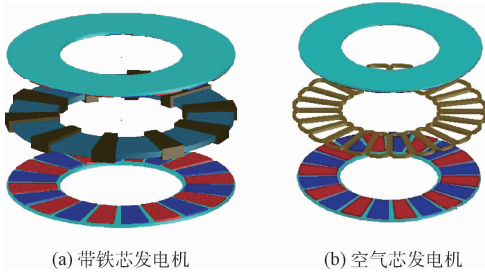


图1 轴向磁通发电机结构示意图

极在内、外径处的极弧系数相同,圆周方向截面为矩形。



图2 磁极形状

文献[7]指出,表面式永磁同步电机在极弧系数为0.77附近时,感应电动势谐波畸变率最小,并且随着极弧系数的增大,感应电动势基波幅值有微弱增大。本文极弧系数取0.8。

1.3 极槽的选择

根据文献[8],用 Z 表示槽数, p 表示极对数, m 表示发电机定子相数,常见 Z 和 p 的组合形式为:

$$Z = 2p \pm 4 \quad (1)$$

满足上式的电机槽数 Z 必须是偶数和 m 的整数倍。为满足风力发电机的低转速要求,转子选择多极结构,两台三相轴向磁通发电机选用10对极,则相应的电机槽数可以为16和24,而槽数必须是 m 的整数倍,所以选用20极24槽的配合方式。

2 电机的电磁设计

2.1 铁芯电机尺寸

定子带铁芯轴向磁通发电机输出功率为:

$$P_R = \frac{1}{1 + K_\varphi} \frac{\pi}{2} K_c K_i K_p \eta B_{mg} A_m \frac{f}{p} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right) \frac{1 + \lambda}{2} D_o^3 \quad (2)$$

式中: P_R 为额定输出功率,单位W; $K_\varphi = J_r/J_s$ 为转子和定子电负荷的比值(当转子没有绕组时, $K_\varphi = 0$), K_c 、 K_i 、 K_p 为电动势系数、电流波形系数和电功率波形系数; η 为电机效率; B_{mg} 为气隙磁密基波幅值,单位T; A_m 为电枢平均半径处电负荷,单位A/cm; f 为发电机频率; p 为极对数; D_o 为永磁极外直径,单位m; λ 为永磁极外径和内径比,当 $\lambda = \sqrt{3}$ 时,电机功率最大, λ 取值范围1.25~2.5。

由式(2)可得电机永磁极外直径 D_o :

$$D_o =$$

$$\left[\frac{P_R}{\frac{1}{1 + K_\varphi} \frac{\pi}{2} K_c K_i K_p \eta B_{mg} A_m \frac{f}{p} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right) \frac{1 + \lambda}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

对于中小型轴向磁通发电机,气隙长度 h_g 和永磁极外径 D_o 的关系一般满足:

$$h_g = 5 \cdot 10^{-3} \cdot D_o \quad (4)$$

2.2 空芯电机尺寸

根据文献[9],空气芯轴向磁通发电机永磁极外直径为:

$$D_o = \sqrt[3]{\frac{\epsilon P_R}{\pi^2 k_D k_{\omega 1} n_s B_{mg} A_m \eta \cos \phi}} \quad (5)$$

式中: P_R 为额定输出功率,单位W; B_{mg} 为气隙磁密基波幅值,单位T,(双边NS型永磁转子取0.4~0.6T); A_m 为电枢平均半径处电负荷,单位A/cm,通常取200~350A/cm; n_s 为发电机同步转速,单位r/min; η 为发电机效率; $\cos \phi$ 为发电机功率因数; $k_{\omega 1}$ 为基波绕组系数; $\epsilon = E_f/U = 1.2$, E_f 为空载相电势,单位V, U 为相电压,单位V; $k_D = (1 + k_d)(1 - k_d^2)/8$, k_d 为绕组分布系数。

2.3 永磁体设计

所设计发电机永磁体材料选用NdFe35,密度为 $\rho_m = 7.65 \text{ g/cm}^3$ 。常温时永磁体剩磁密度为 $B_{r20} = 1.32 \text{ T}$,工作温度时剩磁 $B_r = 1.22 \text{ T}$ 。磁极每极夹角可表示为 $\theta_p = 180^\circ \alpha_p / p$,其中 α_p 为极弧系数。永磁体每极磁通面积为 $A_m = \pi \alpha_p (D_o^2 - D_i^2) / 8p$,每极气隙磁通量为 $\varphi_f = A_m B_{mg}$,气隙磁密预估值 $B_{mg} = 0.4 B_r = 0.5 \text{ T}$,永磁体总体积为 $V_m = 4p A_m h_m$,永磁体总质量为 $M_m = \rho_m V_m$ 。

发电机的内、外径大小和极弧系数确定以后,磁极厚度的选择成为关键。根据文献[10],带铁芯发电机永磁体厚度 $h_m = B_{mg} \mu_r (h_g + b) / (0.8 B_r - B_{mg})$,其中, μ_r 为永磁体相对磁导率, b 为绕组厚度; B_r 为永磁体剩磁。

空气芯发电机永磁体厚度 h_m 通常为气隙长度 h_g 的2~2.5倍,考虑漏磁等综合因素之后,取 $h_m = 3h_g$ 。

2.4 绕组设计

两台发电机定子线圈均采用分数槽(虚槽)非叠集中绕组,其优点在于线圈结构简单、制造和装配简便,端部连接短。轴向磁通电机极数可以做到很多,采用非叠集中绕组可以得到较高的绕组系数和较大的转矩[11]。

带铁芯发电机定子三维模型如图3所示,单个绕组线圈形状为矩形,每个线圈环绕一个定子齿(虚齿);空气芯发电机定子三维模型如图4所示,单个绕组线圈形状为扇形,每个槽内放置两个线圈边。

带铁芯发电机每个线圈占一个槽,空气芯发电机一个槽内放置两个线圈边,所以两台发电机每相线圈数同为 $n_c = Z/m = 8$ 。

两台发电机绕组参数计算如下:

$$1) \text{ 每极槽数: } Q_1 = Z/2p = 1.2 \text{ (分数槽)}.$$

$$2) \text{ 每极每相槽数: } q_1 = Z/2pm = 0.4.$$

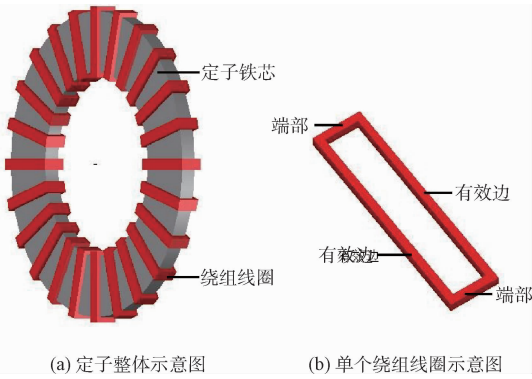


图 3 带铁芯发电机定子及定子绕组

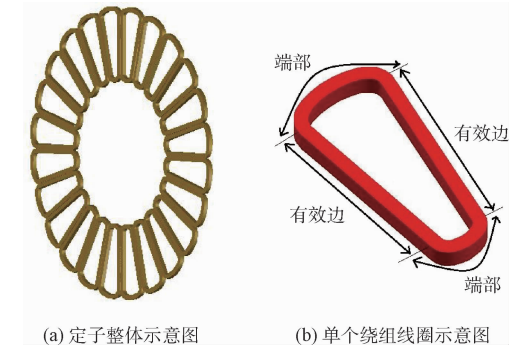


图 4 空气芯发电机定子及定子绕组

3) 并联支路数: $a = 1$ 。

4) 每相串联匝数: $N_1 = E_f / (\pi \sqrt{2} f k_{w1} \varphi_f)$, 经计算, 带铁芯发电机 $N_1 = 260$, 空气芯发电机 $N_1 = 280$ 。

5) 每个线圈匝数: $N_{1c} = N_1 / n_c$, 经计算, 带铁芯发电机 $N_{1c} = 33$, 空气芯发电机 $N_{1c} = 35$ 。

6) 电枢绕组总导体数: $N_c = 2mN_1$, 经计算, 带铁芯发电机 $N_c = 1\ 560$, 空气芯发电机 $N_c = 1\ 680$ 。

7) 每槽导体数: $N_s = N_c / Z$, 经计算, 带铁芯发电机 $N_s = 65$, 空气芯发电机 $N_s = 70$ 。

8) 导线截面积: $A_w = I_N / J = 3.5\ \text{mm}^2$, 其中 I_N 为额定电流, J 为电流密度, 通常 J 取 $5 \sim 12\ \text{A/mm}^2$, 本文预取 $8\ \text{A/mm}^2$;

9) 铜导体直径: $d_1 = 2 \sqrt{A_w / \pi} = 2\ \text{mm}$;

10) 槽满率: 65% 。

11) 绕组线圈端部长度:

带铁芯发电机绕组形状为矩形, 其单个线圈绕组端部长度 $l_e = 2h_s = 20\ \text{mm}$, 其中 h_s 为定子铁芯厚度。

空气芯发电机绕组线圈形状为扇形, 其端部长度受线圈跨度影响较大, 根据文献^[12], 单个线圈绕组端部长度可用式(6)估算:

$$l_e = \frac{(R_o - R_i)(\theta_m - 0.6\theta_{rav})}{p} \quad (6)$$

式中: θ_m 为线圈跨度所占的电角度(弧度表示), θ_{rav} 为平均

半径处线圈边宽度所占的电角度(弧度表示), R_i, R_o 为永磁体内外半径, 绕组线圈导体有效长度为 $l_{ef} = R_o - R_i$, 经计算, 空气芯发电机 $l_e = 40\ \text{mm}$ 。

12) 每匝电枢绕组长度: $l_{av} = 2l_{ef} + l_e$, 经计算, 带铁芯发电机 $l_{av} = 320\ \text{mm}$, 空气芯发电机 $l_{av} = 365\ \text{mm}$ 。

13) 每相电枢绕组工作时电阻值: $R_{a75} = (N_1 l_{av} \rho_{75}) / A_w$, 其中 $75\ ^\circ\text{C}$ 时绕组导体电阻率 $\rho_{75} = 0.0217\ \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ 。经计算, 带铁芯发电机 $R_{a75} = 0.5\ \Omega$, 空气芯发电机 $R_{a75} = 0.63\ \Omega$ 。

14) 基波绕组系数:

根据文献[13], 带铁芯发电机矩形绕组的基波绕组系数可表示为:

$$k_{w1} = \frac{2}{\theta_{rav}} \sin \frac{\theta_{rav}}{2} \sin \frac{\theta_m - \theta_{rav}}{2} \quad (7)$$

式中: θ_m 为线圈跨度所占的电角度(弧度表示), θ_{rav} 为平均半径处线圈边宽度所占的电角度(弧度表示), 经计算, $k_{w1} = 0.91$ 。

根据文献[14], 空气芯发电机扇形绕组的基波绕组节距系数可表示为:

$$k_p = \frac{\sin[0.5\theta_m(1-k)]\sin(0.5k\theta_m)}{0.5k\theta_m} \quad (8)$$

其中 $k = \theta_{rav} / \theta_m$ 。

基波绕组分布系数可表示为:

$$k_d = \frac{\sin[0.5N(\theta_m - \pi)]}{N\sin[0.5(\theta_m - \pi)]} \quad (9)$$

其中, 每极每相槽数 $q_1 = b + c/d = N/d$, b 为整数, c/d 为不可约真分数, 则 $N = bd + c = 2$, 空气芯发电机基波绕组系数 $k_{w1} = k_p k_d$, 经计算, $k_{w1} = 0.86$ 。

2.5 电机参数

两台发电机的参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 铁芯电机的电磁参数

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_o / kW	15	额定转速 $n / \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	300
额定相电压 U_N / V	220	相数 m	3
磁极外径 D_o / mm	700	磁极内径 D_i / mm	400
磁极对数 p	10	极弧系数 α_p	0.8
绕组厚度 b / mm	11	线圈边宽 W_c / mm	12
磁极厚度 h_m / mm	4.5	线圈总数 Q	24
单侧气隙长度 h_g / mm	2	背铁厚度 h_b / mm	10
导体直径 d / mm	3.5	单个线圈匝数 N_c	35
	(并绕)		

利用表 1 和表 2 所列数据, 可以计算得到发电机所用永磁体的体积。永磁体材料密度 $\rho_m = 7.65\ \text{g/cm}^3$, 经计算, 带铁芯发电机永磁体用量 $14.32\ \text{kg}$, 而空气芯发电机永磁体用量 $20.56\ \text{kg}$ 。带铁芯发电机在同样设计要求下可以

节省约40%的永磁体材料,经济性更优越,但空气芯电机因没有定子铁芯,重量大大减轻。

表2 空芯电机的电磁参数

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_n /kW	15	额定转速 $n/r \cdot \text{min}^{-1}$	300
额定电压 U_N /V	220	相数 m	3
磁极外径 D_o /mm	730	磁极内径 D_i /mm	405
磁极对数 p	10	极弧系数 α_p	0.8
绕组厚度 b /mm	11.67	线圈边宽 W_c /mm	12.04
磁极厚度 h_m /mm	6	线圈总数 Q	24
单侧气隙长度 h_g /mm	2	背铁厚度 h_b /mm	15
	3.5		
导体直径 d /mm	(并绕)	单个线圈匝数 N_c	35

3 发电机求解与分析

3.1 建立有限元分析模型

轴向磁通电机磁场分析通常应采用三维模型,但对完整电机的三维模型进行数值计算,运算量大、占用计算机资源多、用时长,影响研发的进度。为此,可采用一种更为实用的准三维有限元方法来分析轴向磁通电机的三维磁场分布^[15]。将电机沿径向分为 k 层,然后在每层的平均半径处重新用圆柱面去截,再将这些截面拉直,就得到了 k 个极距随截面半径 r 变化的直线电机模型,分别对这 k 个直线电机模型进行有限元仿真计算,就相当于分别计算盘式电机在不同半径处的磁场分布。在这些模型计算完成后,在每个模型的均等电角度间隔处取 j 个节点,然后将这 $(k \times j)$ 个节点的磁密映射回 3D 模型的相应位置,就能得到近似的电机 3D 磁场分布。如图 5 所示。最后通过等效后的直线电机模型来分析轴向磁通电机的磁场分布及运行特性。

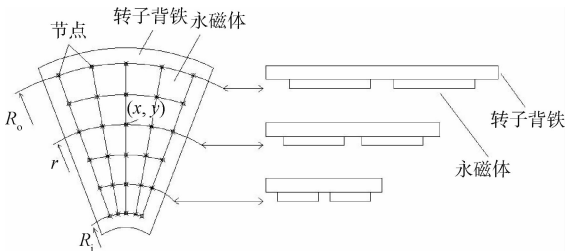


图5 盘式发电机 2D 与 3D 模型的关系

盘式电机磁路与绕组结构具有对称性,可以采用一个单元电机来建模。每个单元电机转子有 5 对永磁极,定子 12 个线圈。

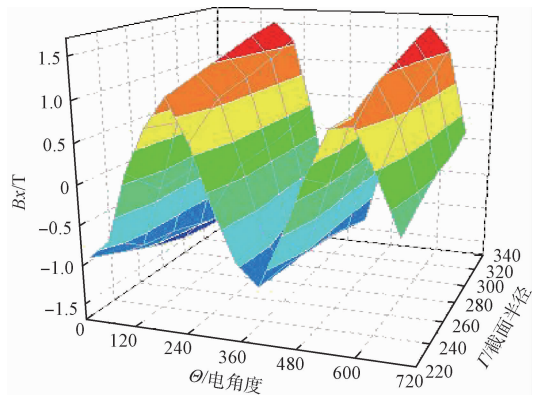
3.2 电磁特性分析

带铁芯发电机圆周截面半径分别选取为 $r=225$ mm, $r=250$ mm, $r=275$ mm (平均半径), $r=300$ mm 和 $r=325$ mm。空气芯发电机圆周截面半径分别选取为 $r=$

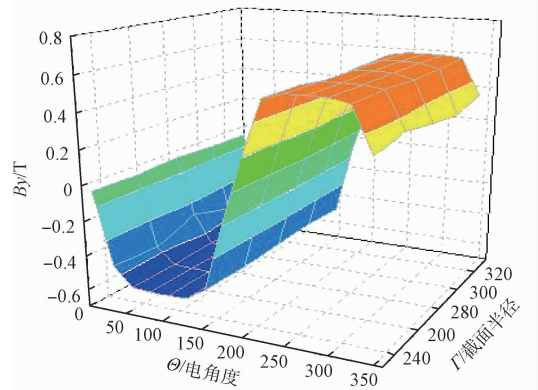
233.75 mm, $r=258.75$ mm, $r=283.75$ mm (平均半径), $r=308.75$ mm 和 $r=333.75$ mm。铁芯发电机轴向上选取定子铁芯中间位置(轴向坐标 $y=35.67$ mm),研究该位置处磁密的 X 轴分量沿电机周向的分布情况,空芯发电机轴向上选取绕组线圈中间位置(轴向坐标 $y=28.84$ mm),研究该位置处磁密的 Y 轴分量(对应轴向磁通电机的轴向分量)沿电机周向的分布情况。

3.2.1 空载特性分析

空载条件下,两台发电机在所选位置处不同半径下的磁密分布情况如图 6 所示,从图中可以看出,两台发电机磁密各分量具有明显的正弦性。两台发电机空载相电压波形如图 7 所示,所设计的两台发电机的空载相电压正弦对称性好,额定转速下,频率稳定。从图 8 中可以看出,对于空气芯发电机其空载电压中主要是三次谐波,其他高次谐波不明显;带铁芯发电机主要含三次、五次谐波。计算两台发电机相电压的总谐波畸变率 THD_u ,空气芯发电机 THD_u 为 2.38%,带铁芯发电机 THD_u 为 4.97%,空气芯发电机空载电压正弦性优于带铁芯发电机。



(a) 带铁芯发电机



(b) 空气芯发电机

图6 空载条件下发电机磁密三维分布

3.2.2 负载特性分析

发电机输出接三相对称的纯电阻负载,负载接线方式为星形。

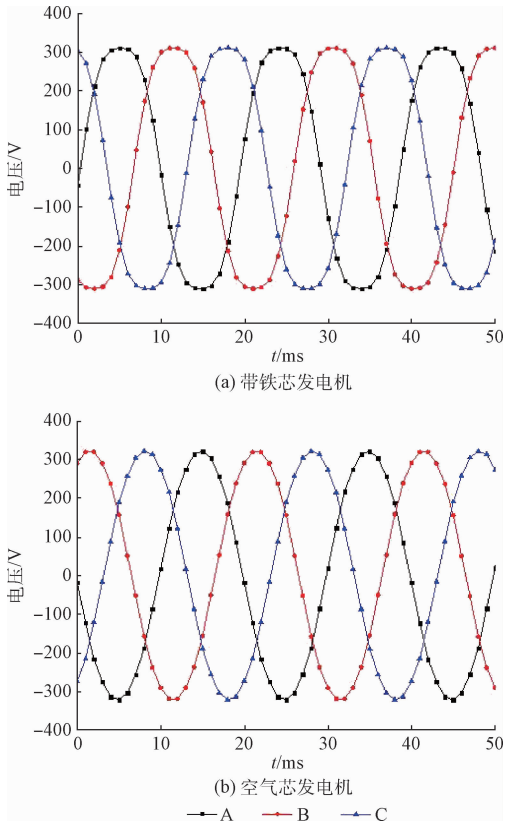


图 7 发电机空载相电压

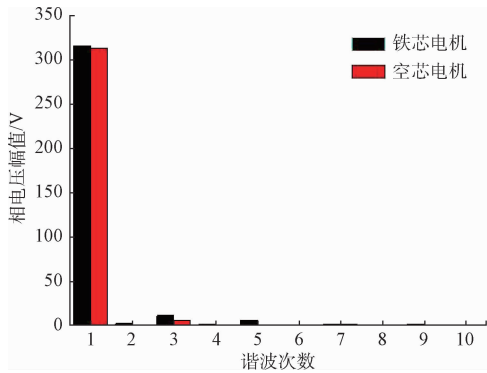
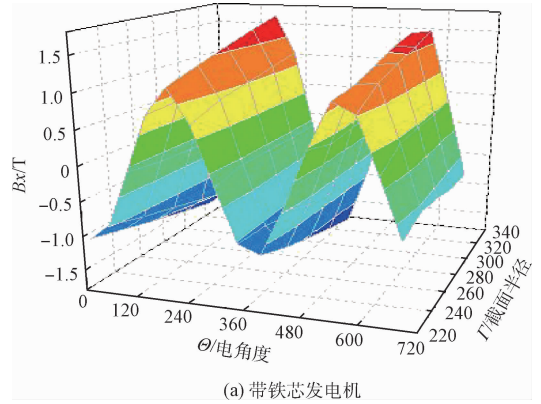


图 8 发电机空载相电压谐波分布

负载条件下两台发电机在所选位置处不同半径下的磁密分布情况如图 9 所示,从图中可以看出,相比较空载条件下的磁密波形,负载条件下发电机磁密波形产生了一定畸变,原因是发电机负载运行时,电枢绕组中流过三相电流,此时电枢绕组电流产生的电枢磁动势会影响电机磁场的分布和大小,故电机磁场与空载时不同,此时,励磁磁场与电枢磁场的合成才是真正的电机磁场。

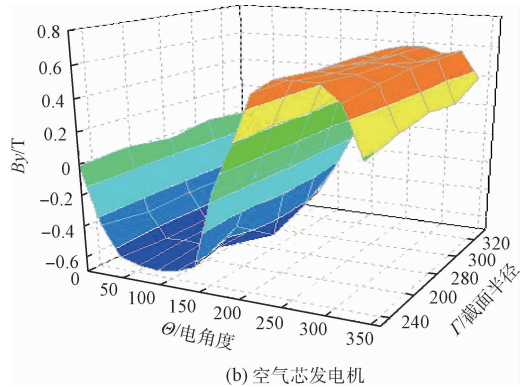
额定转速下两台发电机输出电流稳定后的波形如图 10 所示,发电机的绕组铜耗可以根据公式 $P_{cu} = 3I^2R$ 计算

得出,在不计涡流损耗及杂散损耗的情况下,空芯发电机效率为 92.65%,值得注意的是,定子带铁芯发电机存在定子铁芯损耗,除去定子铁芯损耗,铁芯发电机效率为 89.95%,所以在效率方面,空芯发电机效率更高。额定转速下两台发电机线电流的谐波分布情况如图 11 所示,铁芯发电机 THD_i 为 0.08%,空气芯发电机 THD_i 为 0.0021%,



(a) 带铁芯发电机

图 9 负载条件下发电机磁密三维分布



(b) 空气芯发电机

图 10 额定转速下发电机输出电流波形

盘式发电机应用于风力发电系统,需满足不同转速要求。两台发电机变速条件下输出功率和损耗的变化曲线如图 12 所示,两台发电机在保持负载不变的情况下,改变电机转速,由于风力机输入功率与转速的三次方成正比,可以从图中看到发电机输出功率随转速增大而升高;同时绕组铜耗因电流升高而增大;电机的铁芯损耗与电机频率的 1.3 次成正比,所以随着转速的增大,铁芯发电机的铁芯损耗增大。考虑到风力发电机较多情况下运行在额定转速以下,假设发电机实际运行时平均转速 200 r/min,空气芯发电机铜耗 280 W,效率为 93%;带铁芯发电机铜耗 265 W,铁芯损耗 200 W,效率为 90%。同样也考虑发电机短时运行在超过额定转速情况,超额定转速 15%时,发电机输出功率达 20 000 W,超额定功率 30%。

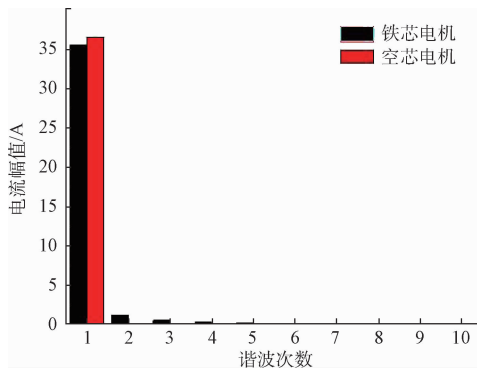


图 11 额定转速下发电机电流谐波分布

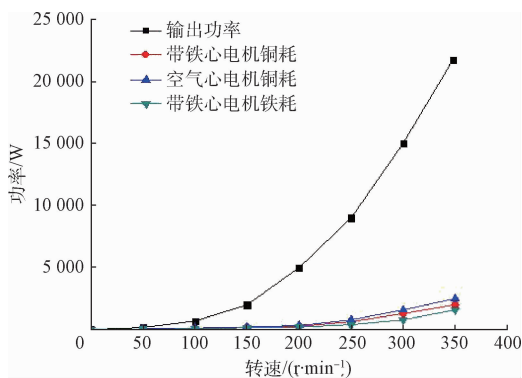


图 12 变速条件下发电机输出功率与损耗变化曲线

4 结 论

本文设计了两台输出功率同样为 15 kW 的轴向磁通永磁同步发电机,选用单定子双转子结构类型,一台定子带铁芯不开槽,另外一台的定子则为空气芯(无铁芯)。利用一种准三维有限元方法对两台发电机进行了仿真计算,并对两台发电机进行了比较分析。仿真结果表明,所设计的两台电机具有良好的电磁性能。比较结果表明,定子带铁芯结构发电机在永磁体用量上少于空气芯发电机,可降低成本,但空气芯发电机在空载电压中谐波成份小于定子带铁芯发电机,电机重量更轻,且几乎没有铁芯损耗,效率上也有一定优势。两台轴向磁通发电机可以适应不同转速要求,特别适合风力发电系统。本文的工作可以为双转子单定子的轴向磁通永磁同步电机的设计与开发提供有价值参考。

参考文献

- [1] 姜科,赵晨栋,单长帅,等. 离网型永磁风力发电机级联整流装置研究[J]. 电子测量技术,2015,38(5):7-23.
- [2] 秦斌,姜学想,周浩,等. 基于 SVM 的永磁直驱风电系统滑模变桨距控制[J]. 仪器仪表学报,2014,35(7):1525-1531.
- [3] 张保钦,雷保珍,赵林惠,等. 风机叶片故障预测的振动方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(3):285-291.

- [4] 崔畅,赵强. PSMG 风力发电系统 MPPT 优化控制策略研究[J]. 国外电子测量技术,2013,32(5):60-63.
- [5] AHMED D, AHMAD A. An optimal design of coreless direct-drive axial flux permanent magnet generator for wind turbine [C]. Journal of Physics Conference Series. Journal of Physics Conference Series, 2013:2039.
- [6] 张文山. 小型垂直轴风力发电用轴向磁通电机研究[D]. 济南:山东大学,2012.
- [7] 翟秀果,刘慧娟,张颖超,等. PMSM 极弧系数对感应电势和漏磁系数的影响[J]. 微电机,2012,45(5):4-6.
- [8] 陈益广. 永磁同步电机分数槽集中绕组的槽极数配合及磁动势[C]. 第十一届全国永磁电机学术交流会论文集,2011.
- [9] CHAN T F, LAI L L, XIE S. Field computation for an axial flux permanent-magnet synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1):1-11.
- [10] MIRIMANI S M, VAHEDI A, MARIGNETTI F. Effect of inclined static eccentricity fault in single stator-single rotor axial flux permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(1):143-149.
- [11] 曹永娟,黄允凯,金龙,等. 磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机的设计与分析[J]. 中国电机工程学报,2014(2):903-909.
- [12] AJILY E, ABBASZADEH K, ARDEBILI M. Three-dimensional field reconstruction method for modeling axial flux permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(1):199-207.
- [13] 董剑宁,黄允凯,金龙,等. 定子无铁心轴向磁场永磁电机的解析设计[J]. 电工技术学报,2013,28(3):43-49.
- [14] EGEA A, ALMANDOZ G, POZA J, et al. Axial flux machines modelling with the combination of 2D FEM and analytic tools [C]. Xix International Conference on Electrical Machines, IEEE, 2010:1-6.
- [15] 夏冰. 小型垂直轴风力发电盘式永磁电机的研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.

作者简介

上官璇峰,1965 年出生,博士,教授,研究方向为电机和电磁装置的优化设计和控制等。

王亚辰,1988 年出生,硕士研究生,研究方向为永磁电机理论与设计。

E-mail:hjkjwyc01@126.com