

永磁涡流风力制热装置的参数设计

张仲彬¹, 杨勇¹, 纪晓东², 金韦辰¹, 姜铁骝¹, 曹丽华¹

(1. 东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林省 吉林市 132012;

2. 中钢设备有限公司, 北京市 海淀区 100080)

Parameter Design of Eddy Current Heating Device Based on Wind Energy

ZHANG Zhongbin¹, YANG Yong¹, JI Xiaodong², JIN Weichen¹, JIANG Tielu¹, CAO Lihua¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China;

2. Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd, Haidian District, Beijing 100080, China)

摘要: 永磁涡流制热是利用风能的一种制热形式, 因其对风质要求低、装置结构相对简单且拥有较高的制热效率, 是分布式能源的有效应用。以永磁涡流制热装置为研究对象, 根据电磁场原理推导热装置运行输入转矩, 将其与垂直轴风力机输入转矩进行对比, 建立关于装置内部不同部件之间几何参数关系的数学模型, 确定永磁涡流制热装置各部件结构参数, 为永磁涡流制热装置布置的参数设计提供参考。

关键词: 永磁涡流; 制热装置; 数学模型; 参数设计; 风能

ABSTRACT: Permanent magnet eddy current heating is a heating form using wind energy. Because of its low requirement on wind quality, relatively simple device structure and high heating efficiency, it is an effective application of distributed energy. Taking the permanent magnetic eddy current heating device as the research object, the input torque of the heating device, which was deduced according to the principle of electromagnetic field, was compared with the input torque of the vertical axis wind turbine. A mathematical model of the relationship between the geometric parameters of different components inside the device was established, and the components of the permanent magnet eddy current heating device were determined, which provides a theoretical basis for the design of a more reasonable permanent magnet eddy current heating device structure.

KEY WORDS: eddy current; heating device; mathematical model; parameter design; wind energy

0 引言

能源是社会发展和经济增长最基本的驱动

力, 是人类赖以生存的基础^[1-2]。风能是一种清洁、取之不尽、用之不竭的可持续利用的资源, 在当前化石能源面临枯竭和生态环境严重污染的情况下, 风能的高效开发利用已成为我国乃至世界能源开发的一大热点^[3-4], 同时人们在日常生产和生活中所需能源的主要形式为热能。风能制热研究在世界能源紧缺的今天具有十分重要的意义。

传统的制热方法是通过风能转化为电能, 然后通过焦耳效应将电能转化为热能^[5]。而在这种双转换过程中需要复杂且昂贵的电子设备, 同时风能的利用率不是很高^[6-9]。现阶段, 风力直接制热方式大体可分为4种: 液体搅拌制热、液体挤压制热、固体摩擦制热和磁涡流制热^[10]。永磁涡流制热的机制是通过风力机带动制热装置转子旋转产生变化磁场, 根据法拉第电磁感应定律, 金属定子受到变化磁场的影响产生电涡流继而使金属定子生成热并加热定子水槽内的水, 将风力机的机械能转换为热能, 并通过水槽内的水将热量供给热力系统。

鉴于我国东北地区风能资源丰富, 而且东北地区弃风问题严重^[11-12]。因此高效的永磁涡流风力制热装置, 有利于利用冬季充足的风能对外供热, 是提高风能利用率的有效途径。同时, 也有利于缓解我国煤炭资源紧张的局面并有益于缓解我国现阶段的环境污染等问题。

目前在风力制热方面主要以试验研究和数值模拟为主, 对制热装置参数设计方面的研究还比较

基金项目: 吉林省科技厅项目(20160203008SF)。

Project Supported by the Scientific and Technological Projects of Jilin Province (20160203008SF).

少^[13-15]。本文运用风力机输出功率相关公式及涡流制热原理,对制热装置定子内墙的长度与内径的关系进行研究。并在此基础上,确定磁极对数、永磁体厚度和气隙长度等参数,为垂直轴风力机永磁涡流制热装置的设计提供了理论依据。

1 风力机的动力计算

垂直轴风力机具有结构简单、制造工艺易行、无须偏航设置、安装方便、经济实用的特点^[16]。相对于水平轴风力机还具有运行噪音小、变速装置和永磁涡流制热装置便于放置等优点。风力机获得的机械能取决于风速和风力机的机构参数,风力机风轮输出功率为

$$P = 1/2 C_p \rho A V^3 \quad (1)$$

式中: C_p 为风能利用系数; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; A 为风轮扫掠面积, m^2 ; V 为额定风速, m/s 。

垂直轴风力机叶片扫掠面积:

$$A = 2hR \quad (2)$$

式中: h 为风轮高度, m ; R 为风轮的旋转半径, m 。

根据风力机的转矩 M 与风力机功率 P 的关系可知,垂直轴风力机的转矩:

$$M = \frac{P}{\omega_a} = \frac{C_p \rho A V^3}{2\omega_a} \quad (3)$$

式中 ω_a 为风机转速, r/min 。

风能利用系数 C_p 为叶尖速比 λ 的函数^[16],如图1所示。

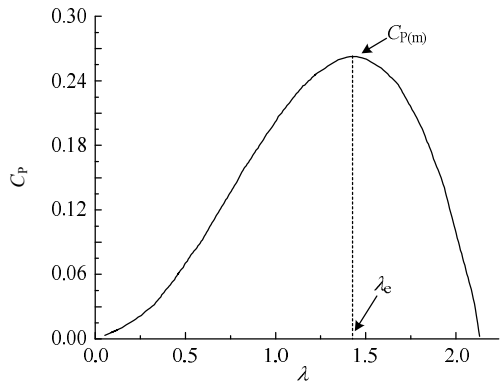


图1 风能利用系数和叶尖速比曲线

Fig. 1 Curve of wind power coefficient and tip speed ratio

$$\lambda = \frac{R\omega_a}{V} \quad (4)$$

由于 C_p 非线性且有最大值 $C_{P(m)}$, 此时 λ 所对

应的值为 λ_e , 如图1所示。将式(4)中的 V 代入式(3)得

$$M_t = \frac{C_p \rho A R^3}{2\lambda^3} \omega_a^2 \quad (5)$$

因此,根据图1的对应关系,当 λ 为 λ_e 时, C_p 为最大值 $C_{P(m)}$ 时的转矩:

$$M_G = \frac{C_{P(m)} \rho A R^3}{2\lambda_e^3} \omega_a^2 \quad (6)$$

2 永磁涡流制热装置的动力设计

涡流制热试验装置2D切面模型如图2所示。当永磁涡流制热装置转子旋转时在金属定子内产生感应电流,根据电磁感应定律:

$$e = B_x l_a v \quad (7)$$

式中: e 为导体感应电动势, V ; l_a 为导体处于磁场中的有效长度, m ; B_x 为导体所切割的气隙磁通密度, T ; v 为导体与磁场的相对速度, m/s 。

导体感应电动势 e 正比于导体所切割的气隙磁通密度 B_x , 也就是说,导体感应电动势的波形

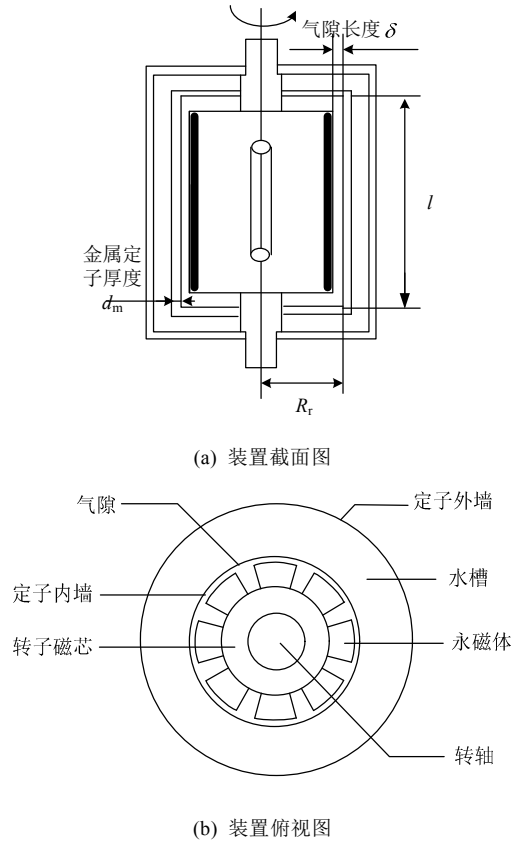


图2 永磁涡流制热装置设计图

Fig. 2 Structure of eddy current heating device

正比于制热装置气隙内磁通密度沿气隙分布的波形。如要得到正弦波形的电动势,就必须使气隙磁通密度沿气隙分布的波形为正弦波形。

气隙磁通密度 B_x 的分布曲线关系式为

$$B_x = B_m \sin \frac{\pi}{\tau} x \quad (8)$$

式中: x 为气隙中某一点与磁极中性线的距离, m; τ 为转子中相邻 N 极与 S 极间的距离, m; B_m 为气隙磁通密度的最大值, T。

气隙中某一点与磁极中性线的距离用电角表示为 $\frac{\pi}{\tau} x$, 在此正弦波磁场作用下的导体电动势为

$$e_c = B_m l_a v \sin \frac{\pi}{\tau} x \quad (9)$$

而速度 v 可以表示为:

$$v = \frac{2p\tau n}{60} = 2\tau f \quad (10)$$

$$x = v t \quad (11)$$

式中: p 为永磁转子极对数; n 为转子转速, r/min; f 为电动势的频率, Hz; t 为时间, s。

联立式(10)和式(11), 气隙中某一点与磁极中性线的距离用电角表示为

$$\frac{\pi}{\tau} x = \frac{\pi}{\tau} v t = -\frac{\pi}{\tau} 2\tau f t = \omega t \quad (12)$$

式中 ω 为永磁转子角速度, rad/s。因此, 式(9)可以表示为

$$e_c = B_m l_a v \sin \omega t = E_{cm} \sin \omega t \quad (13)$$

这说明, 磁通密度沿气隙分布为正弦波时, 导体感应电动势的波形也为正弦函数。式(13)中 $E_{cm} = B_m l_a v$ 为导体电动势的最大值。

因此, 导体电动势的有效值为

$$E_c = \frac{E_{cm}}{\sqrt{2}} = \frac{B_m l_a v}{\sqrt{2}} = \frac{B_m l_a 2\tau f}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

气隙磁通密度的最大值还可表示为

$$B_m = \frac{\pi}{2} B_a \quad (15)$$

式中 B_a 为磁通密度的平均值, T。

考虑到每极磁通:

$$\Phi_a = B_a l_a \tau \quad (16)$$

式中 Φ_a 为每极磁通, Wb。

由于磁通密度为正弦波, 联合式(14)~(16)可知导体电动势还可表示为

$$E_c = 2.22 f \Phi_a \quad (17)$$

可见, 每根导体电动势的有效值大小与每极磁通量和电动势的频率成正比。对于整个金属定子电动势 E 相当于若干个导体电动势 E_c 之和, 即

$$E = \sum E_c = 2.22 f \Phi_a \oint_L ds = 4.44 \pi R_r f \Phi_a \quad (18)$$

式中 R_r 为定子内墙半径, m。

金属定子的阻抗 Z 可以表示为

$$Z = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (19)$$

式中: R_L 为金属电阻, Ω ; X_L 为金属感抗, Ω 。

其中:

$$\begin{cases} R_L = \frac{\rho_l l}{S} \\ X_L = 2\pi L f = \omega L \end{cases} \quad (20)$$

式中: ρ_l 为金属电阻率, $\Omega \cdot m$; l 为金属导体长度, m; S 为导体横截面积, m^2 ; L 为金属电感, H。

通过联立式(19)和(20)可知金属导体的阻抗:

$$Z = \sqrt{\frac{\rho_l^2 l^2}{S^2} + \omega^2 L^2} \quad (21)$$

感应涡流在金属导体中所产生的功率为

$$P = \frac{E_c^2}{Z} \quad (22)$$

将式(18)和式(21)代入式(22)可知感应涡流在金属导体中所产生的功率可表示为

$$P = \frac{(4.44 \pi R_r f \Phi_a)^2 S}{\sqrt{\rho_l^2 l^2 + (\omega L S)^2}} \quad (23)$$

由于铁磁导体会受到趋肤效应的影响, 其趋肤深度为

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad (24)$$

式中: μ 为金属磁导率, H/m; γ 为金属电导率, S/m。

而根据永磁涡流制热装置原理, 定子内墙须使用矫顽力 H_c 要小, 相对磁导率 μ_r 要大的软磁材料, 比如碳钢。碳钢的磁导率一般在 5 000~7 000 S/m 左右, 所以根据式(24)计算, 其趋肤深

度最大不超过 5 mm, 因此取金属定子厚度 d_m 为 5 mm。所以定子内墙的外径可用 $(R_r+0.005)$ 表示, 即定子内墙的截面积 S 可表示为

$$S = \pi[(R_r + 0.005)^2 - R_r^2] \quad (25)$$

将其代入式(23)可知感应涡流在金属导体中产生的功率还可表示为

$$P = \frac{(4.44\pi R_r f \Phi_a)^2 \pi [(R_r + 0.005)^2 - R_r^2]}{\sqrt{\rho_1^2 l^2 + \omega^2 L^2 \pi^2 [(R_r + 0.005)^2 - R_r^2]^2}} \quad (26)$$

永磁涡流制热装置的转矩为

$$T_G = \frac{P}{\omega} = \frac{(4.44\pi R_r f \Phi_a)^2 \pi [(R_r + 0.005)^2 - R_r^2]}{\omega \sqrt{\rho_1^2 l^2 + \omega^2 L^2 \pi^2 [(R_r + 0.005)^2 - R_r^2]^2}} \quad (27)$$

联合式(26)和式(27), 当永磁涡流制热装置与风力机匹配时 $M_G = T_G$, 即

$$\frac{C_{P(m)} \rho A R^3}{2\lambda_e^3} \omega_a^2 = \frac{(4.44\pi R_r f \Phi_a)^2 \pi [(R_r + 0.005)^2 - R_r^2]}{\omega \sqrt{\rho_1^2 l^2 + \omega^2 L^2 \pi^2 [(R_r + 0.005)^2 - R_r^2]^2}} \quad (28)$$

因此, 可知定子内径 R_r 与长度 l 的关系为

$$l = \frac{\sqrt{4\lambda_e^6 (4.44\pi R_r f \Phi_a)^4 - C_{P(m)} \rho A R^3 \omega_a^2 \omega^4 L^2}}{C_{P(m)} \rho A R^3 \omega_a^2 \omega \rho_1} \pi [(R_r + 0.005)^2 - R_r^2] \quad (29)$$

3 结构参数计算

选用 NACA0024 作为风力机的叶片, 风力机的叶片数 $n=4$, 弦长 $c=0.15$ m, 风力机叶片的旋转半径 $R=0.4$ m, 叶片高度 $H=0.8$ m, 安装角度 $\theta=10^\circ$, 垂直轴风力机相关参数如图 3 所示。

根据已有研究可知, 永磁体的厚度为 4~16 mm 的磁场幅值随着厚度的增加而增大, 同时考虑工

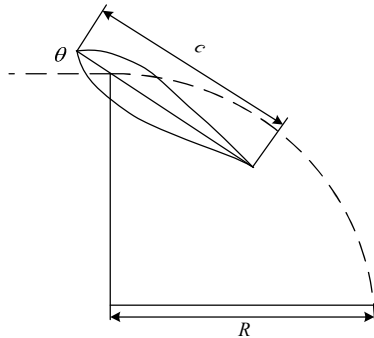


图 3 垂直轴风力机叶片参数

Fig. 3 Blade parameter of vertical axis fan power

程实际和其他因素, 本课题拟采用永磁体的厚度为 5 mm。通过比较不同极对数下制热装置的磁感线分布、磁感应强度分布、气隙磁通密度曲线及输入转矩与时间的关系, 最终确定磁极对数为 $2p=20$ 。由于装置运行时感应电动势无变化, 因此考虑装置中无自感现象。以垂直轴风力机为例, 假设风速 $V=8$ m/s, $\omega_a=26$ rad/s, 将下列参数:

$A=2hR=2\times 0.8\times 0.4=0.64$ m², $g=9.8$ m/s², $\rho_A=1.225$ kg/m³, $C_{P(m)}=0.25$, $R=0.4$ m, $f=50$ Hz, $\lambda_e=1.3$, $\rho_1=5\times 10^{-5}$ Ω·m, $l=0.5$ m。代入式(29)得到:

$$0.5 = \frac{2 \times 1.3^3 \times 4.44^2 \times 1.16^2 \times 0.5^2 \times \pi^4 R_r^2}{0.25 \times 1.225 \times 0.64 \times 0.4^3 \times 26^2 \times 100 \times 5 \times 10^{-5}} \cdot (0.01R_r + 0.005^2) \quad (30)$$

求解得 $R_r=0.0848$ m。

根据气隙长度 δ 的经验公式

$$\delta = 0.3(0.4 + 7\sqrt{2R_r l}) \times 10^{-3} \quad (31)$$

由式(30)计算得到气隙长度 $\delta=0.74$ mm。考虑到制热转子在实际运行中有可能发生振动、偏移等现象, 根据实际考虑气隙不宜太小, 因此本课题最终拟定气隙长度 $\delta=1$ mm。根据上述研究结果可知永磁涡流制热装置的参数见表 1。

表 1 永磁涡流制热装置参数

Tab. 1 Parameter of eddy current heating device

名称	材料	长度/mm	厚度/mm	直径/mm
永磁体	N33UH	400	10	167.6
定子内墙	45 号钢	520	5	179.6
定子外墙	45 号钢	600	5	260.0
气隙	空气	400	1	169.6
转子磁芯	45 号钢	405	40	147.6

4 结论

通过建立数学模型, 为垂直轴风力机永磁涡流制热装置的设计提供了理论依据。在设计过程中, 首先根据需要的热量确定风力机的功率, 然后根据数学模型确定制热装置定子内墙的长度与内径的关系, 根据涡流制热的原理确定磁极对数、永磁体厚度和气隙长度等其他参数。由此设计出所需容量的风力制热装置。

参考文献

[1] 戴慧珠, 陈默子, 王伟胜, 等. 中国风力发电现状

- 及有关技术服务[J]. 中国电力, 2005, 38(1): 80-84.
- [2] 周洪宇. 第三次工业革命的新能源革命[J]. 决策与信息, 2016, 3(1): 10-18.
- [3] 金浩, 胡以怀, 冯是全. 垂直轴风力机在风力发电中的应用现状及展望[J]. 环境工程, 2015, 33(1): 1033-1038.
- [4] 陈汝刚, 赵知辛, 王焕然. 风能制热系统的研究[C]//中国动力工程学会第三届青年学术年会论文集, 南京, 2005: 402-405.
- [5] 刘文瑞. 关于焦耳效应和焦-汤效应的比较[J]. 大学物理, 2003, 22(8): 24-25.
- [6] Bell J H. Permanent magnet eddy current heat generator: U.S. Patent 6,011,245[P]. 2000-1-4.
- [7] Bennetot M. Device for converting rotational kinetic energy to heat by generating eddy currents: U.S. Patent 4,486,638[P]. 1984.
- [8] Gerard F. Permanent magnet thermal energy system: U.S. Patent 4,511,777[P]. 1985-4-16.
- [9] Skomski R, Coey J M D. Giant energy product in nanostructured two-phase magnets[J]. Physical Review B, 1994, 48(21): 15812-15816.
- [10] 张玉实, 范垂文. 风力制热技术[M]. 沈阳: 沈阳工业大学出版社, 1998: 7-8.
- [11] 杨春伟, 刘晓明. 北方地区冬季利用风电供热的可行性[J]. 电工文摘, 2012, 3(3): 48-49.
- [12] 王熙, 李永光, 王凯, 等. 采用风力制热供暖的经济性分析[J]. 可再生能源, 2015, 33(1): 75-81.
- [13] 王浩西. 永磁涡流发热影响因素的二维电磁场有限元分析[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [14] 陈垂灿. 基于涡流法的风能制热系统应用研究[D]. 桂林: 广西大学, 2010.
- [15] 王福宝, 郑茂盛, 滕海鹏, 等. 垂直轴阻力差型风车驱动磁涡流制热分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2013, 43(4): 545-548.
- [16] El-Samanoudy M, Ghorab A A E, Youssef S Z. Effect of some design parameters on the performance of a Giromill vertical axis wind turbine[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2010, 1(1): 85-95.
-
- 收稿日期: 2018-04-03。
- 作者简介:
- 
- 张仲彬(1973), 男, 博士, 教授, 主要从事强化传热及可再生能源利用等研究工作, zhangzhongb@126.com。
- (责任编辑 车德竞)