

# 风力发电机大风限速保护方法的研究

冯国英, 包道日娜, 刘志璋, 范 源

(内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘 要:** 小型风力发电机面临的重大难题是其可靠性问题, 即大风时的限速保护问题。从能量守恒的角度分析了利用风轮与发电机的功率匹配特性实现风力发电机限速保护的可行性。另外, 设计了 2 台风轮与发电机具有不同匹配特性的 300 W/26 V 风力发电机, 为了使其具有可比性, 使用了同样型号的发电机。通过实验测试了风轮的机械输出特性、发电机在输出电压不同时的功率特性和整机的功率输出, 实验结果表明, 风速 12 m/s 以下时 2 台风力机输出功率基本相同, 风速 12 m/s 以上时其中 1 台随着风速的增加功率不断增加, 而另外 1 台随着风速的增加输出功率不再上升, 甚至有点下降, 与大风机功率特性相似。

**关 键 词:** 小型风力机; 限速保护; 风轮与发电机的匹配

中图分类号: TK83 文献标识码: A

## 引 言

小型风力发电机的可靠性问题越来越受到人们的关注, 而引起可靠性问题的一个重要原因就是大风时的超速。长期以来, 出于成本的考虑, 先进的控制技术没有在小型风力发电机的限速保护上采用, 只是根据空气动力学原理, 采用简单的机械控制方式对小型风力发电机在大风状态下进行限速保护。机械限速结构的特点是小型风机的机头或某个部件处于动态支撑的状态<sup>[1]</sup>, 这种结构在风洞试验的条件下, 可以反映出良好的限速特性, 但在自然条件下, 由于风速和风向的变化太复杂, 往往使风力机提前进入限速状态, 缩小了工作风速范围。而且自然环境恶劣, 小型风力发电机的动态支撑部件不可避免的会引起振动和活动部件的损坏, 从而使机组损坏<sup>[1-2]</sup>。另外, 还有风力发电机采用弹性叶片, 大风时依靠叶片扭曲卸掉过多的风力防止风轮超速, 但这种方法会使风轮产生特别大的噪音<sup>[3]</sup>。

本研究工作放弃了对风轮的机械限速保护, 从风轮与发电机的匹配特性即能量守恒的角度寻求风轮限速的办法。利用 Wilson 方法分别设计了直径

为 1.6 m(风机 1)和 1.7 m(风机 2)的叶片, 其中风机 1 设计尖速比为 3.5, 风机 2 设计尖速比为 4, 风机 1 与风机 2 的叶片弦长和扭转角如表 1 所示。叶片翼型选用 NACA4412, 发电机选用 600 交流永磁发电机。本研究从理论和实验两方面分析了风轮与发电机的匹配特性及其功率输出。

表 1 风轮叶片各截面的弦长与扭角值

截面 序号	风机 1 弦长与扭转角分布			风机 2 弦长与扭转角分布		
	截面与转 轴距/mm	弦长 /mm	扭角 /(°)	截面与转 轴距/mm	弦长 /mm	扭角 /(°)
1	160	150	26.9	170	130	27
2	240	170	19.5	255	130	22
3	320	160	14.4	340	119	15
4	400	140	11	425	104	7
5	480	120	8.4	510	90	5
6	560	105	6.3	595	76	3.5
7	640	75	4.5	680	61	2.3
8	720	50	2.8	765	44	1
9	800	24	1.8	850	24	-1

## 1 风轮与发电机之间的能量守恒关系

风轮与发电机的匹配实际上就是一个能量守恒的关系, 即发电机接受的能量等于风轮从风中吸收的能量。风轮可以看作是一个弹性体, 在相同的风速下, 从风中吸收能量的多少取决于它的转速(这一点我们可以从后面论述的风轮机机械输出特性看出), 也就是说, 在某一风速下, 当风轮运行在最佳转速(最佳叶尖速比)时, 风轮从风中吸收的能量最多, 当风轮转速偏离最佳转速时, 风轮从风中吸收的能量就会减少<sup>[4-5]</sup>。基于这一点, 我们就考虑如何在大风时降低风轮的转速, 使风轮吸收的能量减少, 从而达到大风限速保护的目。

在一定转速范围内交流永磁发电机的输出功率

与转速基本上是成正比的。风力发电机启动后, 风轮传递给发电机的能量随着风速的增加而增加, 转速也随之增加, 当风轮传递的能量与发电机需要的能量相同时, 转速不再增加, 风轮与发电机达到一个能量平衡。当风速增加, 风轮输出的能量大于发电机需要的能量时, 这个平衡关系就被打破, 发电机转速增加, 风轮与发电机到达另一个转速较高的平衡点。反之, 风速降低, 风轮与发电机到达另一个转速较低的平衡点。

## 2 风轮与发电机的匹配特性

风轮与发电机如何匹配是指在各种风速下风轮与发电机在什么转速下达到能量平衡, 这是设计风力发电机的一项重要内容, 如果风轮与发电机匹配的不好, 就会降低整机的输出特性, 甚至使风力发电机不能正常工作。将发电机在各种转速下的功率值除以其对应的效率后绘制到风轮的功率—转速特性曲线上, 就可以比较它们的匹配情况<sup>[2]</sup>。

### 2.1 风轮的功率—转速特性

风轮的机械输出功率是由风轮直径和叶片的外形决定的。根据 GB/T19068.2—2003 中规定的风轮空气动力特性测量方法, 测得风轮风能利用系数—尖速比( $C_p-\lambda$ )关系曲线, 如图 1 所示。可见, 风机 1 的  $C_p-\lambda$  曲线比较平缓, 在叶尖速比为 2~5 的范围内都具有较高的风能利用系数, 而风机 2 的  $C_p-\lambda$  曲线则比较陡峭。

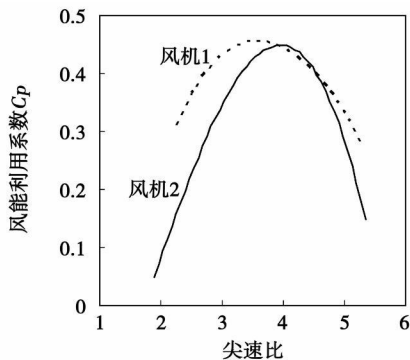


图 1 风轮风能利用系数—尖速比关系

利用  $C_p-\lambda$  曲线, 分别取风速为 6、8、12 和 15 m/s, 在各种风速下取尖速比  $\lambda$  为 2~5.5, 计算出转速和功率即可得到图 2 中所示的风轮功率特性曲线。与  $C_p-\lambda$  曲线相对应, 风机 2 的风轮功率随转速变化比较明显, 而风机 1 在各种风速下的风轮功率—转速曲线都比较平缓。

### 2.2 发电机的功率—转速特性

用来为蓄电池充电的风力发电机, 为防止蓄电池过充, 一般当充电电压高于 28 V 时, 控制器就要控制风力发电机泄荷或停机。再考虑到线路损失, 发电机工作电压(直流电压)一般为 26~30 V 的范围内。所以发电机的输出特性一般需要考虑的是输出电压在 26~30 V 时, 发电机输出功率随转速的变化特性。图 2 中 26 和 30 V 所指的曲线为 600 W 交流永磁发电机在输出电压分别为 26 和 30 V 时测量的功率随转速的变化关系。测量时发电机的负载由 24 V 蓄电池和内蒙古工业大学研制的模拟电池负载并联组成, 通过调节模拟电池负载保持了发电机输出电压的稳定。

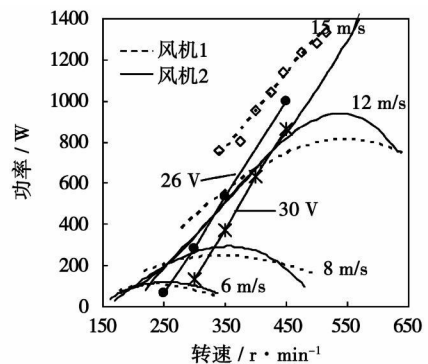


图 2 风机 1 与风机 2 的风轮与发电机匹配关系曲线

可以看出, 发电机输出功率对电压非常敏感, 相同转速下输出电压不同时输出功率也不同。因此, 发电机的工作电压也会影响发电机与风轮的匹配特性。

### 2.3 风轮与发电机的匹配特性对大风限速保护的影响

在同一风速下, 风轮的输出功率与其运行转速有关, 即与其尖速比  $\lambda$  有关<sup>[4~5]</sup>。即使风速很大, 风轮转速上不去的话, 其风能利用系数就会很低, 相应地风轮传递给发电机的能量就较少。然而, 风力发电机会不会发生超载超速还取决于风轮与发电机的匹配情况。

如图 2 所示, 当风速为 6~12 m/s 时, 风机 1 与风机 2 的风轮与发电机的匹配特性相差不大; 当风速从 12 m/s 变化到 15 m/s 时, 输出电压为 26 时风机 2 的风轮与发电机的匹配点基本不变, 输出电压为 30 V 时稍有变化; 而风机 1 的风轮与发电机的匹配点却随着风速的变化而变化, 风速增加时其转速和功率都在增加, 且增加幅度都较大。因此, 对于使用相同发电机的两台风力机来说, 风轮的不同会产

生完全不同的匹配特性, 并且输出电压的工作范围也会影响到风轮与发电机的匹配特性。例如, 在 15 m/s 风速以下时, 风机 2 在输出电压为 26 V ~ 30 V 的范围内具有大风自动限速功能, 当输出电压大于 30 V 时, 也就丧失了这一功能。

### 3 不同匹配情况的风力发电机的输出特性对比

图 3 为风机 1 与风机 2 外接 24 V 蓄电池的输出功率。因为蓄电池充电电压的不同对风力机输出功率有很大影响, 为了使两台风力发电机的实验结果更具有可比性, 试验中准备了 4 块 12 V 蓄电池, 将其中的任意两块进行串联组合, 以保证蓄电池的充电电压在 26 ~ 28 V 之间。从图中结果可以看出, 风速 10 m/s 以下时, 风机 1 与风机 2 输出功率差别不大; 风速 11 m/s 以上时, 风机 1 输出功率持续上升, 而风机 2 输出功率不再上升, 具有与大型风力发电机相似的输出特性。本实验结果与前面的分析吻合, 进一步证明了利用风轮与发电机的匹配特性实现大风限速保护的可行性。

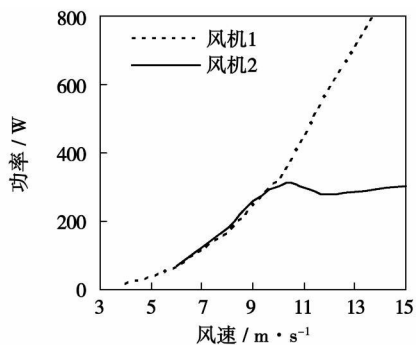


图 3 风机 1 与风机 2 的功率输出特性

### 4 可实现自动限速保护的风力发电机的设计原则

#### 4.1 风轮叶片的设计

依据前面的分析, 要想实现大风自动限速保护, 风轮的输出功率对转速的变化一定要敏感, 即风轮只在较小的尖速比范围内风能利用系数较大, 超出这一尖速比范围时, 风能利用系数就要求降到一个较小的值, 如图 2 中的风机 2 所示。一般具有上述特性的风轮叶片弦长较小, 叶尖扭转角也较小, 这会对风轮的启动性能有一定的影响, 但我们可以通过适当加大风轮直径来弥补这一损失。

#### 4.2 发电机的设计与选型

目前用于风力发电的发电机多为永磁交流发电

机, 在设计或者选择发电机时除了对其额定功率和额定转速提出要求外, 还要求其输出功率对转速的变化比较敏感, 即功率—转速曲线斜率较大。对比图 4 中的发电机 A 和发电机 B, 我们就可以看出发电机的特性曲线对风力机整机输出的影响。当风轮与发电机 A 匹配时, 风速从 8 m/s 增加到 12 m/s, 风轮的转速就会从  $n_1$  增加到  $n_2$ , 功率从  $P_1$  增加到  $P_2$ , 风轮的工作点由 A 点变化到 B 点再到 C 点; 如风速从 12 m/s 增加到了 15 m/s, 对于风轮来说, 转速从  $n_2$  变化到  $n_3$  的过程中, 其输出功率基本没有变化, 而发电机 A 的转速要想从  $n_2$  增加到  $n_3$ , 风轮传给发电机的功率不得小于  $P_3$ , 同时还需要考虑到发电机的损失, 这就导致虽然风速增加了, 但风力机的转速和功率均未增加, 从而达到大风自动限速保护的目的。而如果风轮与发电机 B 匹配, 只要风速增加风力机的转速和功率就会增加, 需要通过其他控制装置来实现限速保护。

另外, 需要注意的一点就是发电机输出电压的变化范围, 要想实现风力发电机的大风自动限速保护, 就必须严格控制发电机的输出电压。

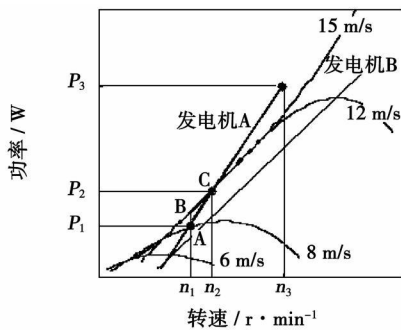


图 4 风轮与不同发电机匹配的功率输出特性

#### 4.3 风轮与发电机的匹配设计

传统的风力发电机的设计思路是寻找风轮与发电机的最佳匹配, 即在各种风速下风力发电机都能有最大功率输出。本研究为了达到大风限速保护的目的, 在风轮与发电机的匹配设计时要求在大风时风轮与发电机的匹配点位于匹配图的左侧, 如图 2 中风机 2 在 15 m/s 风速时的匹配情况所示。这就不可避免地造成低风速时风轮与发电机有时会偏离了最佳匹配, 使得风力发电机在低风速时效率较低。目前我们只能根据经验反复修改风轮与发电机的设计值, 以求得小风时风轮与发电机能够接近或达到最佳匹配。

## 5 结 论

从理论和实验两方面分析了利用风轮与发电机的匹配特性实现风力发电机大风限速保护的可行性。实验结果表明:

(1) 交流永磁发电机输出电压不同时, 输出特性也不同, 从而会影响到风轮与发电机的匹配特性和风力发电机的功率输出, 因此在进行整机设计时一定要予以考虑以上两点。

(2) 不同的风轮与发电机具有不同的匹配特性, 具有特定匹配特性的小型风力发电机具有与大型风力发电机相似的输出特性。低风速时功率特性良好, 大风时具有较好的限速保护功能。但是本实

验受风洞最大风速的限值, 未能对极限风速状态下的限速保护功能作进一步测试。

## 参考文献:

- [1] GIPE, PAUL. Wind energy basics: A guide to small and micro wind systems[M]. United States: Chelsea Green Publishing Company, 1999.
- [2] 陈云程, 叶枝全, 朱程明. 风力机设计 and 应用[M]. 上海: 上海科技出版社, 1994.
- [3] 余俊杰. 风力发电最大功率追踪技术之研究[D]. 太原: 中原大学, 2003.
- [4] MILLER A, MULJADI E, ZINGER D S. A variable speed wind turbine power control[J]. Energy Conversion, IEEE Transaction on Volume 12, Issue 2, 1997, 6: 181 - 186.
- [5] 卞松江, 潘再平, 贺益康. 风力机特性的直流电机模拟[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 360 - 364.

(编辑 韩 锋)

新技术、新产品

## 装有再热循环先进汽轮机装置的 177 000 m<sup>3</sup> LNG 船

据《Kawasaki Technical Review》2008 年 1 月号报道, 川崎造船公司已开发出 177 000 m<sup>3</sup> LNG (液化天然气) 运输船作为新的 de Facto 标准, 以便继承目前的 147 000 m<sup>3</sup> 级船。

该级 LNG 运输船已从常规级别运输船实现了 30 000 m<sup>3</sup> 装载量的增加, 并保持与世界上许多 LNG 终端高度的相容性, 以及具有优异的推进性能。

此外, 该船装有具有再热循环的先进的汽轮机推进装置—川崎 URA 型汽轮机装置, 与常规装置比较, 它能减少燃油消耗 20%, 预期这将是 LNG 运输船未来的世界标准。

图示了新 LNG 船在船长、吃水方面与现有 LNG 终端的相容性、新船的总布置图(侧视图和平面图)、船首部分 CFD(计算流体力学)计算结果的例子、177 000 m<sup>3</sup> 型和 147 000 m<sup>3</sup> 型船体中央截面的比较、177 000 m<sup>3</sup> 和 147 000 m<sup>3</sup> LNG 运输船燃油消耗量的比较。

表列了这二型 LNG 船主要参数的比较。

列举了新开发的 177 000 m<sup>3</sup> LNG 运输船的优点。

(吉桂明 摘译)

cone gear tooth, with a comprehensive consideration of a marginal contact in the system and errors resulting from the installation mismatch and engagement of various gear pairs in the system, designed was a chart indicating the tooth surface contact footprint and transmission errors of the system, thus, providing a theoretical basis for optimizing the system gear-meshing performance and further analyzing the load-bearing condition of various gear pairs in the system. **Key words:** marine gear, arc-tooth cone gear, flow-dividing transmission system, tooth surface contact pattern, transmission error

温度对污水污泥流化床热解油成分影响的 GC-MS 分析 = **GC-MS Analysis of the Influence of Temperature on Pyrolyzed Oil Constituents in a Sewage Water and Sludge Fluidized Bed** [刊, 汉] / JIA Xiang-ru, JIN Bao-sheng, LI Rui (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 656 ~ 660

By adopting a gas-phase chromatogram/mass spectrum joint usage technology, analyzed was the pyrolyzed oil obtained from sewage water and sludge through a pyrolysis in a fluidized bed at different temperatures. Through an analysis by using the above-mentioned technology, more than 100 constituents were identified in the oil from sludge pyrolysis. By employing a peak area method, quantitatively analyzed were various constituents and qualitatively analyzed were 29 constituents with a peak area ratio being greater than 1% in the pyrolyzed oil. Benzene and its compounds, alkene, carboxylic acid, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), nitrogen-contained compounds, chlorides and esters are found in the pyrolyzed oil. At 400 °C, esters predominate in the pyrolyzed oil. At 600 °C, the alkene content attains its maximum value and the distribution of various constituents becomes more uniform than at 400 °C. **Key words:** sewage water and sludge, oil, GC-MS analysis, pyrolysis, fluidized bed

新型医疗垃圾焚烧炉热力计算及优化 = **Thermodynamic Calculation and Optimization of a New Type Medical Waste Incinerator** [刊, 汉] / XIE Rong, LU Ji-dong, LI Jie (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430034) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 661 ~ 665

Thermodynamically analyzed was a novel gas-controlled type medical waste pyrolysis and gasification incinerator. In the light of specific features of medical wastes and by employing a material and energy balance theory, the authors have calculated and analyzed the whole furnace, No. 1 and No. 2 combustion chamber of the incinerator. Obtained was a law governing the influence of the total excess air coefficient and No. 1 combustion chamber excess air coefficient on the outlet temperatures of the incinerator and No. 1 combustion chamber. When the total excess air coefficient increases from 1.6 to 2.0, the outlet temperature of No. 1 combustion chamber will go up from 640 °C to 1 150 °C and in the meantime, the outlet temperature of the incinerator will gradually drop from 1 000 °C to 650 °C. When the total excess air coefficient is kept constant and the excess air coefficient of No. 1 combustion chamber changes from 0.36 to 0.5, the outlet temperature of No. 1 combustion chamber will increase from 700 °C to 1 100 °C and that of No. 2 combustion chamber will be kept at 900 °C. A combustion test was performed on a practical medical waste incinerator, and the test results were in relatively good agreement with the calculated ones. **Key words:** incinerator, excess air coefficient, optimization, thermal calculation

风力发电机大风限速保护方法的研究 = **A Study of Wind Speed Limit-related Protection Methods for Wind Turbine Generators During a Gale** [刊, 汉] / FENG Guo-ying, BAO Dao-ri-na, LIU Zhi-zhang, et al (College of Energy Source and Power Engineering, Inner Mongolia Polytechnic University, Huhhot, China, Post Code: 010051) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 666 ~ 669

The most difficult problem faced by a small-sized wind turbine generator is the assurance of reliability, i. e. speed limit-related protection problem when a gale takes place. From the standpoint of energy conservation, the authors have analyzed

the feasibility of employing the power matching characteristics of a wind wheel and an electric generator to fulfil the speed limit protection of a wind turbine generator. In addition, the authors have designed two sets of 300 W/26 V wind turbine generator, of which the wind wheels and generators have different matching characteristics. To enable them to share an identical base for comparison, electric generators of the same model were used. Through tests, measured were the mechanical output characteristics of the wind wheels, power characteristics of the generators and power output of the whole machine at different output voltages. The test results show that when the wind speed is below 12 m/s, the two wind turbine generators have a basically same power output. When the wind speed is over 12 m/s, one of the two wind turbine generators will increase its power output continuously with an increase of the wind speed, while another will no longer increase its power output with a wind speed increase, but even slightly decrease its power output, similar to the characteristics of a large-sized wind turbine generator. **Key words:** small-sized wind power turbine, speed limit protection, matching of a wind wheel and a generator

中低温废热与甲醇重整结合的氢电联产系统— A Hydrogen-power Cogeneration System Set up by Combining Medium-and-low Temperature Waste Heat with Methanol Reforming[刊, 汉] / LIAO Teng-fei, LIU Bai-qian (College of Mechanical Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing, China, Post Code: 100083), HONG Hui (Research Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 670 ~ 675

A new approach was presented for combining the medium-and-low temperature waste heat in sintered gas with methanol steam reforming to produce hydrogen. A hydrogen production system by combining medium-and-low temperature waste heat with methanol reforming was established and simulated. On the basis of an energy grade concept and by using an energy utilization diagram (EUD) image-based exergy analytic method, revealed were the energy conversion characteristics featuring the conversion of low grade medium-and-low temperature waste heat to high grade chemical energy. Studied was the variation law governing the upgrading of medium-and-low temperature waste heat with methanol reforming reaction temperatures. The research results show that the exergy efficiency of the new type hydrogen production system is expected to reach 82.8%, 12 percentage points higher than that of a traditional methanol-based hydrogen-production system. The energy-saving rate of methanol fuel is 23.7%. In addition, a preliminary static economic analysis indicates that the hydrogen production cost of the new system is about RMB 1.5 yuan/m<sup>3</sup>, far lower than that of water electrolysis (RMB 5.5 yuan/m<sup>3</sup>). When the cost of raw material methanol price is maintained within a certain price range, the hydrogen production cost can be competitive with the traditional natural gas-based hydrogen production cost of RMB 1.2 yuan/m<sup>3</sup>. The foregoing can provide a new approach to the metallurgical industry for both solving a technically intractable problem of utilizing medium-and-low temperature waste heat and coping with a high energy consumption for hydrogen production. **Key words:** medium-and-low temperature waste heat, methanol steam reforming to produce hydrogen, EUD (energy utilization diagram) image-based exergy analysis