

## 基于半物理仿真的变速恒频独立变桨距控制

叶杭冶<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 林勇刚<sup>1</sup>, 刘宏伟<sup>1</sup>

(1. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 浙江杭州 310027)

2. 浙江运达风力发电工程有限公司, 浙江杭州 310012)

**摘要:** 依据对风力机变速恒频变桨距控制原理, 提出了电机电磁阻转矩调节和分段 PID 权系数分配的控制算法分别实现变速恒频和独立变桨距控制, 同时由于风力机系统的大惯性、迟滞, 采用了变桨距与变速恒频两算法切换过程以预测功率为界的综合控制算法代替了传统控制中以额定功率为界以减小输出功率的波动。将控制算法应用到自行搭建的半物理仿真试验台上进行试验分析, 在风速高于额定值时, 独立变桨距控制不仅稳定了发电机输出功率, 而且与统一控制相比大大减小了桨叶拍打振动; 当风速在额定值左右变化时, 运用综合控制算法比传统控制大大稳定了发电机输出功率。

**关键词:** 变速恒频; 独立变桨距; 权系数; 半物理仿真

**中图分类号:** TK8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2009)1-090-4

## Research on Variable-speed Constant frequency Individual Pitch-controlled Technology Based on Semi-physical Simulation

YE Hange<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LIN Yonggang<sup>1</sup>, LIU Hongwei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027,

China 2. Zhejiang Windy Wind Generating Engineering Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310012, China)

**Abstract** The variable-speed constant frequency pitch-controlled law was obtained by analysis of wind turbine aerodynamics. The electromagnetic damping torque regulation of brushless doubly generator was used for variable-speed constant-frequency control and the piecewise PID with weight number algorithm was applied for individual pitch control. Because of large inertia and hysteresis of wind turbine, pitch control and variable-speed constant frequency control were switched at predictive power instead of rated power to decrease output power fluctuation. All these control strategies were used in the semi-physical simulation testbed. Test result shows that when the wind speed is up the rated one, the blade flapwise is greatly decreased and the output power is kept around the rated. When the wind speed is varied around the rated one, the output power fluctuation is reduced.

**Keywords** Variable speed constant frequency; Individual pitch control; Weight number; Semi-physical simulation

风力机利用清洁的可再生风能已深受全世界的重视。随着机组单机容量和装机总量的增大, 在电网中的比重也越来越大, 为了得到高品质的风力电能, 机组控制的要求也相应提高。理论上风力机应尽可能将所有风能都转化为电能, 但实际上要受到机组机械和电气强度限制, 大型风力机组在风速高于额定值时, 由变桨距将发电机输出功率维持在额定功率左右, 而在风速低于额定值时, 通过变速恒频技术尽可能地捕获最大风能。变速恒频、变桨距技术已成为当今风力机两大关键技术<sup>[1]</sup>。目前国外学者已经进行了研究, 但往往只偏重于其中一方面。而风力机整个控制过程中, 特别风速在额定值附近变化时, 两种控制技术不断切换, 如何相互协调, 对于最大限度地捕获风能、稳定功率输出, 减小异常突变有一定的研究意义。

我国风电水平相对比较落后, 自行研制的风力机

仅 750kW, 而且是定桨距控制。浙江大学流体传动及控制国家重点实验室在国家“863”计划资助下, 开始变桨距控制技术的研究, 同时与其它科研组进行技术合作, 结合目前研究的变速恒频技术, 并在基于国际权威风力机设计软件 Bladed 作为模型的半物理仿真试验台上进行了两种技术综合控制算法的研究。

### 1 变速恒频变桨距控制基本理论

从理论上而言, 变速恒频变桨距控制的分界点在额定风速。但风力机组风速传感器安装在风轮后的机舱上, 不能正确反映扫及面上的风速, 因此控制时一般都以发电机额定功率或转子转速为界, 即当发电机输出功率(转速)低于额定值时, 进行变速恒频控制, 最大捕获风能; 而当输出功率(转速)高于额定值时, 进行变桨距控制, 维持发电机功率在额定值附近<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2008-02-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50735004); 国家“十一五”支撑项目(2006BAA01A01)

作者简介: 叶杭冶(1959-), 浙江杭州人, 浙江运达风力发电工程有限公司总工程师、研究员, 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室博士研究生, 主要从事风力机组设计研究工作。电话: 0571-8086377, E-mail: yehy@chinaindex.com。联系人: 林勇刚, 电话: 0571-87951271-8306, E-mail: ygli@zju.edu.cn

## 1.1 变速恒频控制

变速恒频由变速和恒频两部分组成。机组发电机功率曲线图(图 1), 图中可以看出, 在不同风速下, 调节发电机转子转速, 可以使机组输出功率沿着  $p_{opt}$  曲线捕获最大风能, 即变速控制。变速技术实现的形式

很多, 基本上都要求能控制发电机负载扭矩, 进而调节转子转速, 使  $C_p$  达到最大值。 $C_p$  曲线形状主要由桨叶结构决定。在变速控制中, 由于风轮的大惯性, 很难保证控制电机转子转速总能将  $C_p$  维持在最大值, 因此在桨叶设计时, 尽量使  $C_p$  曲线的顶端平直, 从而转子转速控制稍有偏差时,  $C_p$  不会偏离  $C_{pmax}$  过多。虽然转子转速随风速改变, 但发电机最终输出频率应与电网保持一致, 即恒频技术。早期由于风电在整个电网中比重不大, 输出频率可以被整个电网带着, 但随着单机容量和装机总量的增大, 在电网中比重越来越大, 对整个电网电力品质影响十分明显, 风电常常被称为“垃圾电”, 由此恒频技术也十分重要。恒频基本控制方法: 变速风力机转子转速随风速变化, 相应转子电流频率  $f_R$  是不定的。转子机械转速为  $f_M$ , 定子旋转磁场的频率为  $f_E = f_M + f_R$ 。控制转子电流频率  $f_{IR}$  以便使  $f_E$  等于电网频率, 以达到恒频的效果。

变速控制要跟踪  $P_{opt}$  曲线, 需检测到风速并根据特性曲线得到最佳的发电机转子转速, 控制负载扭矩实现最佳转速控制, 这也就是直接转速控制方法。但是正如前面所述, 风速传感器不能精确反映风轮所捕获的风速大小, 由此产生的误差将降低最大风能  $P_{opt}$  追踪的效果。然而根据无刷双馈电机功率控制原理, 可以实现无风速检测最大风能  $P_{opt}$  追踪的控制<sup>[3]</sup>, 其实质为通过控制电机有功功率来控制电磁阻转矩, 从而间接控制机组转速。如图 1 所示, 假如风力机正常工作在点  $A_1$ , 此时风轮捕获的功率与发电机输出功率相平衡, 但风速上升到  $V_2$  时, 由于惯性和调节动作的滞后, 机组转速仍维持不变, 其捕获的功率大于输出的功率, 转速上升, 控制发电机输出功率沿着  $P_{opt}$  曲线  $A_2-A_3$ , 而风轮捕获的功率则沿着  $A_1-A_3$ , 当到达  $A_3$  捕获功率和输出功率再一次稳定。同样也可以分析风速减小的过程, 发电机输出功率  $B_2-B_3$ , 风轮捕获功率  $B_1-B_3$ , 在  $B_3$  稳定。

## 1.2 变桨距控制

变桨距一般分为统一控制和独立控制两种方式。统一控制即机组所有桨叶都由 1 个执行机构驱动, 桨

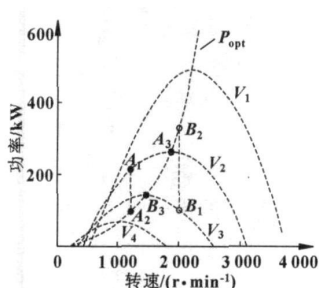


图 1 最优功率和功率曲线

叶节距角变化相同。独立控制, 每个桨叶都由独立的变桨距执行机构控制, 如果其中 1 个执行机构出现故障, 其它 2 个桨叶仍能调节桨叶节距角实现功率控制, 继续带伤工作, 而统一变桨距执行结构出现故障, 只能停机维修, 并且自然界的风在整个风轮扫及面上分布是不均匀的, 独立桨叶控制可以根据各个桨叶上的风速不同进行调节, 不仅能优化发电机输出功率, 而且能减小桨叶拍打振动, 从而减小整机的动态载荷。因此独立桨叶控制比统一控制更具有更大的优势。独立变桨距控制将桨叶负载分别由单一的执行机构承担, 所以一般都采用电机执行方式, 电动机通过主动齿轮带动桨叶轮毂内齿圈, 使桨叶节距角发生改变。但变桨距过程桨叶节距角变化只是  $0 \sim 90^\circ$ , 而且变桨距控制最经常出现在  $10^\circ \sim 20^\circ$  之间, 这样使的主动齿轮和轮毂内齿圈上总是几个轮齿受力, 最后往往是因那几个轮齿故障而必须更换整个内齿圈。现在有些企业开始采用皮带轮传动, 将负载分散, 但是由于皮带会出现老化、松软现象。因此在独立变桨距机构上采用液压方式, 3 个液压缸通过连杆机构实现桨叶独立控制, 并且随着风力机组的大型化的发展, 液压驱动比电机驱动更能体现其大扭矩的优势。

## 2 分段 PID 权系数分配独立变桨距控制

独立变桨距过程为多输入多输出, 由于风速传感器不能反映每个桨叶上的风速情况, 而且复杂的控制程序也很难在工程中实现, 所以一些企业仍然沿用统一控制的方法, 即 3 个桨叶动作相同。由此作者提出了分段 PID 权系数分配独立变桨距控制算法, 主要思想是首先与统一变桨距控制方式相同, 得到 3 个桨叶节距角变化值, 保证功率控制的要求, 而后根据每个桨叶的受风情况进行微调。统一变桨距控制工程中一般采用 PID 算法, 但从公式 (1) 和 (3) 可以看出, 发电机输出功率与桨叶节距角之间具有很强的非线性, 即在不同的桨叶节距角位置即使变化同样的角度, 引起功率变化值也不相同。虽然自适应、神经网络、模糊控制等算法都能较好地解决非线性问题, 但从工程实现考虑, 作者采用了分段 PID 控制算法, 将  $0 \sim 90^\circ$  每隔  $15^\circ$  为一份, 单独设定 PD 参数, 由此不仅解决了非线性问题, 而且对于原机组上的控制程序也无需大幅度修改。在得到统一桨叶节距角变化值  $\Delta\beta$  后, 就可进行权系数分配微调, 权系数是依据每个桨叶受风情况进行分配, 受风越大, 权系数越大, 桨叶节距角变化值也越大, 然而用传感器很难精确反映每个桨叶的受风情况, 必须考虑其它方法间接得到。

影响风速变化的因素很多, 除了气候、地形环境等因素外, 高度的影响最为显著<sup>[5]</sup>。

$$\frac{v_H}{v_0} = \left( \frac{H}{H_0} \right)^n \tag{1}$$

其中  $v_0$  为距地面高度为  $H_0$  时观测到的风速,  $v_H$  则是高度为  $H$  时的风速。  $n$  是一个大约 0.16~0.5 的系数, 具体数字依据地表环境进行选择, 而且随着机组的大型化, 风速的随机变化会因为桨叶长度的增加而相互抵消, 高度因素的影响反而会更明显, 因此由公式 (1) 可推得每个桨叶所受平均风速, 如式 (2) 所示 (假定桨叶平均风速点位于桨叶中心):

$$v_i = \left[ 1 + \frac{1}{2} \frac{R}{H_0} \sin[\theta + (i-1) \times 120^\circ] \right]^n \times v_0 \tag{2}$$

其中:  $R$  为桨叶长度,  $\theta$  为桨叶 1 的方位角,  $i=1\cdots3$  表示桨叶数。

由此权系数  $k_i$  为

$$k_i = \frac{3 \times \left[ 1 + \frac{1}{2} \frac{R}{H_0} \sin[\theta + (i-1) \times 120^\circ] \right]^{2n}}{\sum_{i=1}^3 \left[ 1 + \frac{1}{2} \frac{R}{H_0} \sin[\theta + (i-1) \times 120^\circ] \right]^{2n}} \tag{3}$$

经权系数分配后每个桨叶的节距角变化值为:

$$\Delta\beta_i = k_i \Delta\beta \tag{4}$$

3 变速恒频变桨距控制综合算法

风速在额定值变化时, 常常会存在这样的情况, 当输出功率低于额定值, 但风速增长速度很快或当输出功率高于额定值而风速降低速度很快, 如果仍然以额定功率为界, 由于桨叶等机械部分惯性很大, 必然产生较大的功率波动, 不仅降低电力品质, 而且将产生桨叶、齿轮箱、塔架等机械部件负载波动, 引起故障损坏。针对以上分析研究, 本文作者提出了变速恒频独立变桨距控制综合算法, 依据预测模型得到预测功率, 以此作为两种控制技术切换的界, 具体控制算法如图 2 所示。

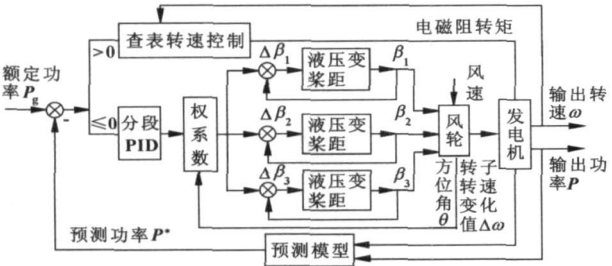


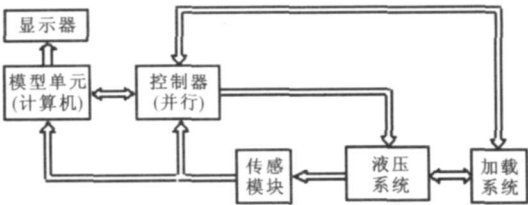
图 2 风力机变速恒频独立变桨距综合控制框图

预测模型  $P^* = P + \Delta P = P + J\dot{\omega}$ ,  $\dot{\omega}$  可以用加速度传感器检测, 或近似用单位时间内转子转速变化值  $\Delta\omega$  表示。当预测功率大于额定值, 进行独立变桨距控制, 而小于额定值时, 进行变速恒频控制。

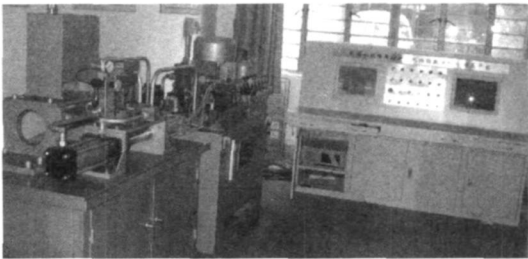
4 半物理仿真试验分析

变桨距变速恒频研究在我国刚刚起步, 如果直接在国外进口的真机上进行试验, 不仅成本昂贵, 耽误

此风力机正常的发电盈利, 而且在试验过程中不可避免地要出现一些失误, 就有可能对真机造成损坏。因此本文作者搭建了变速恒频变桨距风力机半物理仿真试验台, 其结构如图 3 所示。变桨距执行机构、控制器自行设计, 而风力机其它部件包括变速恒频电机以及风场环境都由国际权威的 B laded 风力机仿真软件公司提供的模型库文件代替, 该软件已被国际风电研究人员认可, 并得到广泛的应用。因此, 半物理仿真平台的合理性和科学性是可信的, 整个平台可看成一台变速恒频变桨距风力机<sup>[5]</sup>。在该试验台上除了可以对自行设计的变桨距系统进行分析论证, 也可在控制器中自行编写算法进行试验研究, 由此将上述变桨距变速恒频综合控制算法在半物理仿真试验台上进行试验, 并传统的以额定功率为界的控制算法进行比较。



(a) 结构框图



(b) 实物图

图 3 变桨距风力机半物理仿真平台

B laded 软件设定风力机机型为 1.5MW, 风轮直径 80m, 塔架高 60m, 额定风速 12m/s

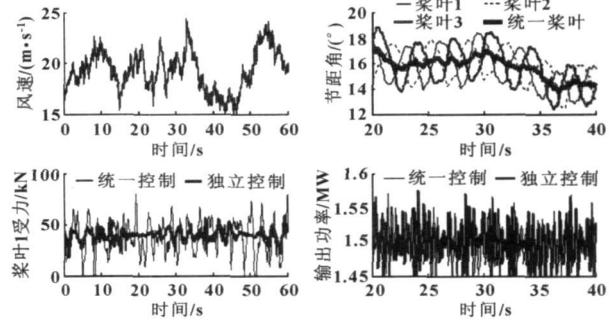


图 4 独立变桨距半物理仿真试验曲线

首先将本文中的独立变桨距控制算法进行半物理试验仿真 (图 4), 从图中可以看出风速高于额定值时, 虽然独立控制每个桨叶节距角变化幅度都比统一

控制大, 但正因为如此, 桨叶受力波动明显减小, 由此产生的桨叶拍打振动也相应减小了, 而发电机输出功率与统一控制相似, 基本能稳定在额定值附近。

将半物理仿真试验台模型软件内风速改为额定值附近随机变化, 进行本文中以功率预测值为界的独立变桨距变速恒频综合控制研究。

从图 5 中可以看出, 本文作者提出的变桨距变速恒频综合控制算法与传统控制算法相比, 整个控制系统响应快, 超调小, 而且发电机输出功率得到了很好的稳定。

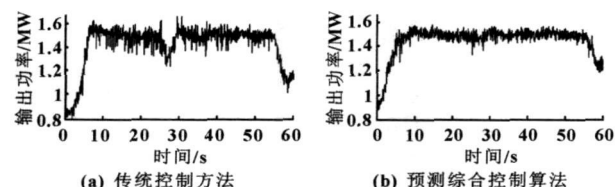


图 5 独立变桨距变速恒频半物理试验曲线

## 5 结论

变桨距变速恒频是当今风电研究的两个关键技术。针对风速传感器不能精确反映风轮上捕获的风能, 通过控制无刷双馈电机有功功率来控制电磁阻转矩, 从而间接控制机组转速, 实现变速恒频。而在变桨距控制方面, 介绍统一控制和独立控制的具体结构形式, 表明独立变桨距控制不仅能稳定发电机输出功率, 而且能减小桨叶的拍打振动, 并提出了分段 PD 权系数分配的控制算法。虽然从理论上变桨距与变速恒频技术的分界点在额定功率, 但是由于风力机大惯性和迟滞现象, 所以提出了以功率观察值为界的综合控制算法。

为了对两种控制技术的研发, 搭建了以 Bladed 软件为模型的半物理仿真试验台进行试验研究, 在风速高于额定值时, 独立变桨距控制不仅能稳定发电机输出功率, 而且与统一控制相比大大减小了桨叶受力波动, 减轻了桨叶的拍打振动; 而风速在额定值左右波动时, 以预测功率为界的变桨距变速恒频综合控制方法与与原传统的控制算法小相比, 发电机输出功率得到了较大的稳定。

## 参考文献

- [1] Thomas Ackemann, Lennart soder Wind energy technology and current status a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2000 (4): 315-374
- [2] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [3] 刘其辉, 何益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪 [J]. 电力系统自动化, 2003, 8 (26): 62-67

- [4] Naruhito Kodama, Tomoyuki Matsuzaka, Sayosi Yamada Modeling analysis of the NEDO 500-kW wind generator [J]. Electrical Engineering in Japan, 2001 (3): 37-47.
- [5] 林勇刚, 徐立, 李伟, 陈晓波. 电液比例变桨距风力机半物理仿真试验台 [J]. 中国机械工程, 2005, 8 (16): 667-670

(上接第 108 页)

根据 PC/104 规范定义的板卡标准尺寸只有 96mm (长) × 90mm (宽), 易于安装至狭小空间。

## (2) 可靠性高

PC/104 板卡在电气特性和机械特性上可靠性极高, 功耗低, 散热少, 板卡与板卡之间通过堆栈连接, 抗震性好。如环境更为恶劣, 还可考虑使用 PC/104 加固型系统 DAN, 该系统所具备的铝合金结构, 在密封系统的同时, 还起到散热作用, 可以保证系统在 -40~85℃ 之间正常工作。

## (3) 扩展性好

由于本设计中所采用的模块板, 均可同时支持 PC/104 总线和 PC/104+ 总线, 因此具备较好的扩展能力, 如可在其上继续添加 GPRS 通信模块, 为系统增加远程控制功能等。

## (4) 易于维护

所设计系统与普通 PC 兼容, 利用一些已有的桌面 PC 系统软件、开发软件, 所设计的人脸检测与辨识软件的升级、调试与更改都十分容易进行。

## 4 结束语

针对目前一些单元门禁系统存在的占用空间大、维护成本高、稳定性较低等问题, 提出了一种基于 PC/104 嵌入式平台和人脸识别技术的门禁系统设计方案。相比于一些已有的基于 DSP 或单片机的门禁系统开发方案, 该设计方案具有开发周期短、性能稳定、安全性高、扩展性好等优点, 应用前景较为广阔。

## 参考文献

- [1] 雷玉堂. 各类门禁系统的比较及其发展 [J]. 中国公共安全: 市场版, 2007 (3): 94-99
- [2] RTD. RTD 产品中文目录 2007
- [3] 杨吴冰, 陆徐平, 许晋华. 基于 DSP 和人脸识别技术的门禁系统设计 [J]. 2007, 29 (2): 38-41.
- [4] 王玮, 樊则宾. 基于 DSP 的新型门禁系统设计 [J]. 山西电子技术, 2007 (3): 19-21
- [5] 龚玲平, 邓燕妮. 基于单片机和 Lonworks 的门禁系统设计 [J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2007, 29 (7): 59-62