

# 基于反馈线性化的风轮机变桨距控制研究

纪志成 冯海英 沈艳霞

(江南大学, 江苏无锡 214122)

**摘要:** 在分析额定风速以上风力发电系统变桨距控制研究现状和风轮机模型开环控制性能薄弱的基础上, 阐明了桨距角控制的必要性和优越性。采用状态反馈线性化理论对风轮机模型进行精确反馈线性化处理, 得出其全局线性化模型, 并用最优控制进行桨距角控制。在 MATLAB 环境下进行仿真, 得出结果, 并进行分析比较。

**关键词:** 变速恒频; 变桨距; 反馈线性化; 最优控制

**中图分类号:** TM341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-7018(2011)11-0040-04

## The Active Pitch Control Research of Wind Turbine Based on Feedback Linearization Method

Ji Zhi-cheng, FENG Hai-ying, SHEN Yan-xia

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The necessity and advantage of active angle control were expounded based on the analysis of the active angle control at wind velocity higher in wind electric power system and the weak open-loop performance of turbine model. The theory of state feedback linearization was adopted to create its accurate linearized model controlled with the optimal control method. The model was simulated under MATLAB and the wave shapes were analysed with comparison.

**Key words:** VSCF; active pitch control; feedback linearization; optimal control

## 0 引言

风能是一种有效的清洁能源, 随着能量需求的日益增加, 风机容量日益扩大, 变速恒频风力发电机组的研究已成为国内外相关领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。

早期主要研究低风速下风力机的控制策略及运行目标: 低于额定风速运行时, 风轮应跟踪最佳叶尖速比, 实现风能的最大功率动态跟踪; 高于额定风速时, 采用变桨控制策略, 将转速恒定在额定值附近并维持输出功率稳定。然而, 风速波动范围较宽, 空气的气动力特性, 随机机械阻尼的影响以及柔性结构的传动链等因素是系统控制困难的原因<sup>[3]</sup>。

文献[4]以变桨控制为目标, 通过反馈控制器观察转速信号, 设计了鲁棒控制器; 文献[5]用神经网络法对风电系统进行进一步分析控制, 对比了 MLP 和 RBF 神经网络的控制特性; 文献[6]提出了变速恒频风力发电转速非线性 PID 控制, 它具有一定的适应性和鲁棒性; 文献[7]提出模糊 PI 变桨距控制法, 并与变增益法和基于机械转矩观测器的控制增益法等控制方案进行了比较分析; 此外, 自适应控制、模糊神经网络、变论域自适应、灰色预测、数据驱动等先进控制方法也是常用的变桨距控制方

法<sup>[8-10]</sup>。

由于风能的气动效应及随机性等特点, 传统的控制方法已难于实现高精度控制, 并且输出电能质量较差。为了改善系统在高于额定风速运行区域内的动态性能, 变速恒频风力发电已成为一种主导趋势, 该系统具有强非线性、动态过程较快等特点。本文根据风力发电机组的模型, 将风轮机模型进行精确反馈线性化, 并设计最优控制器, 通过仿真得到波形, 对比开环性能, 论证了桨距角控制的重要性, 并对改变参数进行了比较分析。

## 1 风力发电机组模型

### 1.1 风轮机模型

风轮机从自然风能中吸取能量的大小程度用风能利用系数  $C_p$  来表示<sup>[11]</sup>:

$$C_p = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2)$$

式中: 叶尖速比  $\lambda$  为风轮叶尖线速度与风速之比  $\lambda = \frac{\omega_r R}{v}$ ;  $\omega_r$  为风轮转速;  $R$  为风力机风轮半径;  $v$  为风速;  $\beta$  为桨距角。

作为风力机组的关键部件的一部分, 风轮机将桨叶捕获的风能转换为传递到轮毂上的机械转矩。其动态方程:

$$J\dot{\omega}_r = T_{aero} - T_{gen} \quad (3)$$

式中:  $T_{gen}$  为发电机的电磁转矩, 为便于分析, 本文设为定值;  $J$  为风轮转动惯量;  $T_{aero}$  为风给的风轮动力矩, 为整个机组的驱动力矩;  $T_{aero}$  可表示:

$$T_{aero} = \frac{P}{\omega_r} = \frac{\rho \pi R^3 v^2 C_p}{2\lambda} \quad (4)$$

式中:  $P$  为风轮机实际获得的轴功率。

不同于额定风速以下采用的最大叶尖速跟踪调节, 额定风速以上时, 系统主要采用变桨距调节这一复杂动态过程, 将系统输出功率保持在额定值附近。为便于分析, 本文采用直驱式传动系统。

### 1.2 桨距角的执行机构

桨距角的执行机构为一阶惯性环节:

$$\dot{\beta} = \frac{1}{T_\beta}(\beta_r - \beta) \quad (5)$$

式中:  $T_\beta$  为变桨伺服系统的时间常数;  $\beta$  是执行机构的输出, 即桨距角的实际值;  $\beta_r$  为参考桨距角, 是控制器输出的给定值。一般来讲,  $T_\beta$  很小,  $\beta$  可以很快跟踪到  $\beta_r$ 。

### 1.3 测速装置

由于存在滞后, 用一个一阶惯性环节来表示:

$$\dot{\omega}_{rm} = \frac{1}{T_\omega}(\omega_r - \omega_{rm}) \quad (6)$$

式中:  $\omega_{rm}$  是利用速度传感器得到的风力机角速度;  $T_\omega$  为系统的时间常数。

### 1.4 全局模型

$$\left. \begin{aligned} \dot{\beta} &= \frac{1}{T_\beta}(\beta_r - \beta) \\ \dot{\omega}_r &= \frac{1}{J}[T_{aero}(\beta, \omega_r) - T_{gen}] \\ \dot{\omega}_{rm} &= \frac{1}{T_\omega}(\omega_r - \omega_{rm}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由以上分析可得, 该系统是三阶的, 状态变量有测量转速  $\omega_{rm}$ 、风轮机转速  $\omega_r$ 、桨距角  $\beta$ 。

## 2 基于精确反馈线性化的变桨距控制器设计

### 2.1 精确反馈线性化

所谓状态反馈线性化<sup>[12-13]</sup>, 就是在一定条件下, 将一个仿射非线性系统通过非线性状态反馈和恰当的坐标变换进行精确线性化, 用得到的状态反馈维持控制系统的平稳性, 提高系统的动态性能。由于它精确对消了系统的非线性特性, 该方法又被称为精确反馈线性化。

状态反馈线性化可应用于如式(8)的单输入单输出仿射非线性系统:

$$\dot{X}(t) = f[X(t)] + g[X(t)]u(t)$$

$$y(t) = h[X(t)] \quad (8)$$

式中:  $f(X)$  及  $g(X)$  为状态空间中  $n$  维向量场;  $u \in \mathbf{R}^l$  为控制量;  $X \in \mathbf{R}^n$  为状态向量;  $h(X)$  为  $X$  的标量函数;  $y \in \mathbf{R}^l$  为输出量。

### 2.2 线性二次型最优控制

对于线性控制系统:

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + BV(t) \quad (9)$$

式中:  $A$  和  $B$  分别为  $n \times n$  维状态系数矩阵与  $n \times m$  维控制系数矩阵;  $Z$  为  $n$  维状态向量,  $V$  为  $m$  维控制向量。若矩阵  $[B|AB|A^2B|\dots|A^{n-1}B]$  的秩为  $n$ , 则式(9)完全可控。对其提出二次型目标函数:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty [Z^T(t)Q(t)Z(t) + V^T(t)R(t)V(t)] dt \quad (10)$$

式中:  $R$  为正定  $m \times m$  阶权矩阵;  $Q$  为非负定  $n \times n$  阶

权矩阵。由线性控制理论<sup>[14]</sup>得式(9)的最优控制  $V(t)^*$ :

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (11)$$

的解。

利用 Matlab 7 函数 “care( )” 求解代数黎卡提 (Riccati) 方程, 使用方法如下:

$$[K \ P \ L] = \text{care}(A \ B \ Q \ R) \quad (12)$$

式中:  $L$  是闭环状态方程参数矩阵的特征值;  $P$  是求得的代数黎卡提方程的解;  $K$  为最优反馈增益矩阵。

### 2.3 风力机组模型的精确反馈线性化和最优控制器设计

将式(7)写成  $\dot{X} = f(X) + g(X)u$  的形式, 有:

$$f(X) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\beta}\beta \\ \frac{1}{J}[T_{aero}(\beta, \omega_r) - T_{gen}] \\ \frac{1}{T_\omega}(\omega_r - \omega_{rm}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$g(X) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$u = \beta_r \quad (15)$$

第一, 检验精确线性化条件的满足性。使  $\omega_{rm}^* - \omega_{rm}$  的值为零是本系统的控制目标 ( $\omega_{rm}^*$  为风力机的额定转速), 故可选定其输出函数  $h(X) = \omega_{rm}^* - \omega_{rm}$ , 因为:

$$\left. \begin{aligned} L_g L_f^0 h(X) &= \frac{\partial h(X)}{\partial X} g(X) = 0 \\ L_g L_f h(X) &= \frac{\partial L_f h(X)}{\partial X} g(X) = 0 \\ L_g L_f^2 h(X) &= \frac{\partial [L_f^2 h(X)]}{\partial X} g(X) \neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

所以此系统的  $r=3$  ,满足进行精确反馈线性化变换的条件。

第二、选取合适的状态反馈及变换坐标。令  $\varphi$ :

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= h(X) = \omega_{rm}^* - \omega_{rm} = x_3^* - x_3 \\ z_2 &= L_f h(X) = -\frac{1}{T_\omega}(\omega_r - \omega_{rm}) = \\ &\quad -\frac{1}{T_\omega}(x_2 - x_3) \\ z_3 &= L_f^2 h(X) = -\frac{1}{JT_\omega}[T_{aero}(x_1, x_2) - T_{gen}] + \\ &\quad \frac{1}{T_\omega^2}(x_2 - x_3) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$u = -\frac{L_f^3 h(X)}{L_g L_f^2 h(X)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(X)} v \quad (18)$$

则式(7)被转化成了式(9)的形式,它是一个完全可控的布鲁诺夫斯基标准型,其中三阶系统的系数矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

由式(18)可以看出,一旦  $v$  确定,控制量  $u$  也随之确定,即  $\beta_r$  确定,最优控制器为确定  $v$  提供了途径。

用控制器输出的控制量来使性能指标  $J$  达最小并保持较小的系统误差是最优控制的目的,从而实现能量和误差的统筹最优控制。因此使控制向量  $V$ :

$$V = -K^* Z \quad (19)$$

此处  $K^*$  为最优反馈增益矩阵,且有:

$$K^* = R^{-1} B^T P^* \quad (20)$$

选取  $R=1$ ,  $Q = \text{diag}(500, 500, 0)$ ,由式(11)和式(20)用 Matlab 求解出:

$$K = [22.360 \ 7 \quad 28.992 \ 1 \quad 7.614 \ 7] \quad (21)$$

结合式(19)得线性系统最优控制量  $v$ :

$$v = -22.360 \ 7 z_1 - 28.992 \ 1 z_2 - 7.614 \ 7 z_3 \quad (22)$$

结合式(18),可得所建的三阶线性模型的状态反馈控制律为:

$$u = -\frac{L_f^3 h(X)}{L_g L_f^2 h(X)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(X)} \cdot \left\{ \begin{aligned} &-22.360 \ 7 (\omega_{rm}^* - \omega_{rm}) - 28.992 \ 1 \left[ -\frac{1}{T_\omega}(\omega_r - \omega_{rm}) \right] \\ &7.614 \ 7 \left[ -\frac{1}{JT_\omega}(T_{aero}(x_1, x_2) - T_{gen}) \right] \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

### 3 系统仿真与分析

为了验证本文所设计的精确反馈线性化和最优

控制器系统的正确性,本文用两种风速模拟并对风电机组进行开环仿真。风力发电机组的主要仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数表

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$P_N / \text{kW}$	600	$J_g / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$6.41 \times 10^4$
$V_N / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	11	$J_{wt} / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$2.58 \times 10^5$
$W_N / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	41.5	$\beta$	$0 \sim 30^\circ$
$R / \text{m}$	21.65	$T_\beta / \text{s}$	0.2
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	1.25	$T_w / \text{s}$	0.2

在不同风速下,输出功率和风轮转速的开环仿真结果如图1和图2所示。

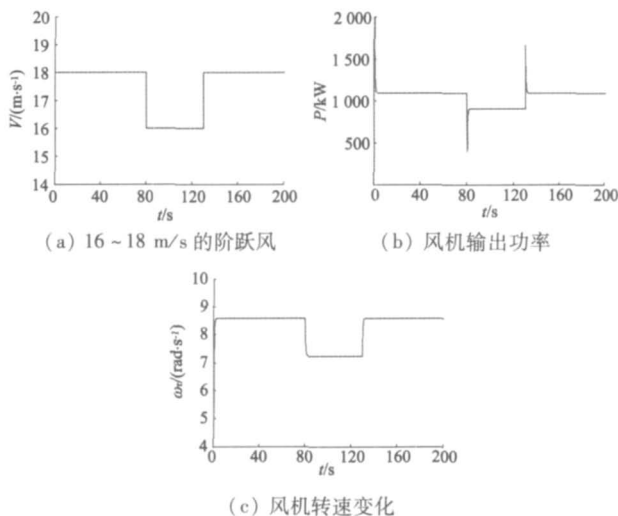


图1 风速在16~18 m/s内阶跃变化的输出功率及转速

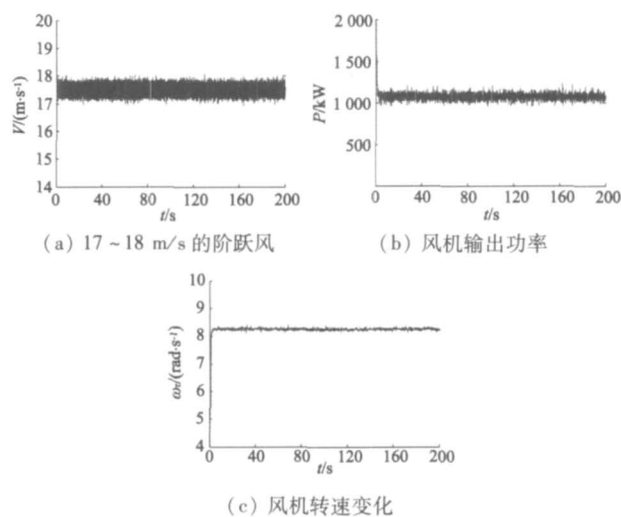


图2 风速在17~18 m/s内随机变化的输出功率及转速

通过对上述结果的分析知道,当风电系统为开环控制时,其输出功率和转速难以保持在额定值附近,因此一个合适的控制器是必须的,只有风力机的输出功率保持在允许范围内,发电机的恒定功率输出才能实现。因此,额定风速以上时的变桨距控制成为直驱型风力发电系统的关键。

基于精确反馈线性化和最优控制器的闭环仿真结果如图3和图4所示。

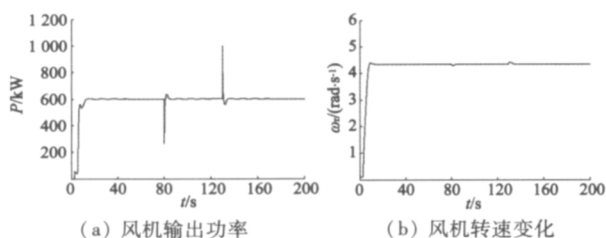


图3 风速在16~18 m/s内阶跃变化的输出功率及转速

由图3知,当风速在80 s处由18 m/s跳变到16 m/s时,风力机转速由4.34 rad/s迅速变为4.27 rad/s,相应的输出功率也变小,为防止其偏离额定值,变桨控制器动作,使输出功率迅速回升至额定值;而当风速在130 s处回升至18 m/s时,为使风能利用率减小,桨距角调节,依然将输出功率保持在额定值附近。

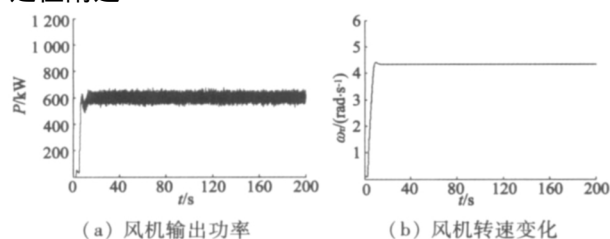


图4 风速在17~18 m/s内阶跃变化的输出功率及转速

由图4可得,当风速模型为随机风时,由于桨距角控制器的及时调节,改变风能的功率系数,从而风力机的输出功率被限定在允许的范围内,并使转速维持在额定值附近。但须指出的是,该控制策略在起始阶段响应较慢,稳定性不够好,这是有待进一步研究的内容。

#### 4 结 语

为提高变速恒频风力发电机组额定风速以上的控制性能,本文在分析风电机组不同风速模型开环仿真结果的基础上,提出反馈线性化的风轮机变桨距控制方案,结合最优控制器,从而使风机功率和转速值维持在额定值附近。仿真波形证明该控制方法对风速和系统参数具有很好的鲁棒性,并且具有较好的动态性能。

(上接第36页)

#### 参考文献

- [1] 王凤翔,张凤阁,徐隆亚.不同转子结构无刷双馈电机转子磁耦合作用的对比分析[J].电机与控制学报,1999,3(2):113-116.
- [2] 邓先明.无刷双馈电机的电磁分析与设计应用[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [3] Williamson S, Ferreira A C, Wallace A K. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 1: Analysis[J]. IEE Proc Electrical Power Applications, 1997, 144(2): 111-122.

#### 参考文献

- [1] 马幼捷,尹向前,赵国华,等.变速恒频双馈风电机组参数扰动对并网控制的影响[J].太阳能学报,2009,30(5):650-654.
- [2] Beltran B, Ahmed - Ali T. Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 551-558.
- [3] Senjyu T, Sakamoto R, Urasaki N, et al. Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 467-475.
- [4] Takaai H, Chida Y, Sakurai K, et al. Pitch Angle Control of Wind Turbine Generator using Less Conservative Robust Control[J]. IEEE International Conference on Control Applications, 2009, 7(18): 542-547.
- [5] Yilmaz A S, Ozer Z. Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks[J]. Expert Systems with Applications, 2009(36): 9767-9775.
- [6] 赵永祥,夏长亮,宋战锋,等.变速恒频风力发电系统风机转速非线性PID控制[J].中国电机工程学报,2008,28(11):133-138.
- [7] Cardenas - Dobson R, Asher G M. Power limitation in variable speed wind turbines using pitch control and mechanical torque observer[J]. Wind Engineering, 1996, 20(6): 363-386.
- [8] 郭庆鼎,赵麟,郭洪澈.1MW变速变距风力发电机的滑模变结构鲁棒控制[J].沈阳工业大学学报,2005,27(2):171-174.
- [9] 刘新海,于书芳.神经网络在大型风力发电机电控系统中应用[J].微特电机,2004,32(2):37-42.
- [10] 张新房,徐大平,吕跃刚,等.大型变速风力发电机组的自适应模糊控制[J].系统仿真学报,2004,16(3):573-577.
- [11] 夏长亮,宋战锋.变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制[J].2007,27(14):91-95.
- [12] 卢强,孙元章.电力系统非线性控制[M].北京:科学出版社,1993,10-60.
- [13] 贺昱曜,闫茂德.非线性控制理论及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2007,20-36.
- [14] 胡寿松,王执铨,胡维礼.最优控制理论与系统[M].北京:科学出版社,2005.

作者简介:纪志成(1959-),男,教授,博士生导师,研究方向为高精度控制系统及风力发电控制系统。

- [4] 邓先明,姜建国.无刷双馈电机的工作原理及电磁设计[J].中国电机工程学报,2003,23(11):126-132.
- [5] 胡堃,伍小杰,邓先明.无刷双馈电机的工作特性测试[J].煤矿机械,2007,28(6):60-63.
- [6] 王凤翔,张凤阁.磁场调制式无刷双馈交流电机[M].长春:吉林大学出版社,2004.
- [7] 刘国强. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M].北京:电子工业出版社,2006.

作者简介:胡堃(1978-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向电机与电器。