

基于转速微分量的大型风力机 桨距角优化控制

高鑫, 魏智民

大唐西北电力试验研究院, 西安市经开区凤城七路 155 号 710065

Optimal Control of Pitch Angle of Large Wind Turbine Based on Speed Differential

Gao Xin Wei ZhiMin

Datang Northwest Electric Power Test & Research Institute

Addr. No.155, Fengcheng 7th Road, Economic Development Zone, Xi'an

ABSTRACT: In order to improve the large wind turbine wind power output, The aerodynamic characteristics of blades are studied in this paper. that is, the curve cluster of the relationship between tip velocity ratio and wind energy utilization coefficient at different installation angles., it is found that the introduction of the rotor speed Differential feedback in the PI controller can achieve the purpose of improving the power output of the wind turbine. That is, when the wind speed changes, the optimal pitch angle between the different installation angle to switch, to track the optimal value. Through the establishment of a model 1.5MW wind turbine model as the research object, The strategy of wind wheel speed Differential feedback is added to the PI controller, and Bladed is used to simulate the model. The simulation results show the effectiveness of the strategy.

KEY WORD: Wind turbine; PI controller; pitch angle; power; speed Differential

摘要: 为了提高大型风力机小风时的功率输出, 本文通过研究叶片的气动特性, 即在不同安装角下的叶尖速比与风能利用系数关系的曲线簇, 发现在变桨 PI 控制器中引入风轮转速微分量反馈可以实现风力机功率输出提高的目的。即当风速变化时, 最佳桨距角在不同安装角之间切换, 用以追踪最优风能利用系数。通过建立某型号 1.5MW 风力机模型作为研究对象, 在变桨 PI 控制器中添加风轮转速微分量反馈的策略, 使用 Bladed 进行模型仿真, 仿真结果证明了此策略的有效性。

关键词: 风力机; PI 控制器; 桨距角; 功率; 转速微分量

1 前言

MW 级风力发电机组在额定点以下的扭矩需求量, 一般采用追踪最优 $C_p - \lambda$ 曲线^[1]的方法, 扭矩需求量设置为 $Q_g = K_\lambda \omega^2$ 。 K_λ 由下式定义:

$$K_\lambda = \frac{\pi \rho R^5 C_p(\lambda)}{2 \lambda^3 G^3} \quad (1)$$

式中: Q_g - 发电机扭矩需求; K_λ - 恒定叶尖速比曲线的参数; ρ - 空气密度; R - 叶轮半径; λ - 期望的叶尖速比; $C_{p(\lambda)}$ - 尖速比为 λ 时的功率系数; G - 齿轮箱的传动比。这样就保证了风力机稳态运行时, 会保持尖速比 λ 对应的功率系数。

根据参数 K_λ 可制定一个表格, 表中把发电机扭矩请求作为转速的函数(查表法)或者在机组的运行过程中根据风场的实际温度和海拔高度计算空气密度, 并联系风力机的特性参数算出最佳增益值。在额定扭矩点以下, 桨距角一般会维持在最优 $C_p - \lambda$ 曲线所对应的桨叶安装角 (β) 运行, 且保持不变。

基于以上分析, 本章提出一种小风时, 在桨叶最佳安装角 β_0 上叠加风轮转速微分量的

方法，以提高叶片的气动效率为目的，最终提高机组在低风速下功率。

2 最优模态增益 K_{opt} 动态更新策略

由于 K_{opt} 的数值与空气密度密切相关^[2],

因此在修正 K_{opt} 的同时需要知道风场的实际密度值，而在无法准确测量空气密度的情况下，可采用如下经验公式进行近似计算：

1) 空气密度的计算

忽略湿度对空气密度的影响，可得空气密度计算方式如下：

$$\rho_{10\min} = B_{10\min} / (R_0 * T_{10\min}) \quad (2)$$

式中： $\rho_{10\min}$ - 10min 平均空气密度，单位 kg/m^3 ； $T_{10\min}$ - 10min 平均绝对空气温度，单位 K ($T = 273.16 + t$)； $B_{10\min}$ - 10min 平均空气压力，单位 Pa ； R_0 - 气体常数 287.05J/kgK 。

在上述计算方式中，涉及到风场的空气压力 B ，而风机本身不具备测压传感器，因此可利用风场的海拔高度并采用另一计算公式进行空气压力的推算，方式如下：

2) 利用当地海拔高度计算平均空气压力的经验公式

考虑大气温度与高度有关系，但假定大气在短期的变化过程中，由温差引起的对流是缓慢的，可近似为准静态，赶在的的导热系数 K 极小，过程可认为是绝热的，可以得到：

$$B_{10\min} = B_0 \left(1 - \frac{Z * 9.8e - 3}{T + Z * 9.8e - 3}\right)^{3.5} \quad (3)$$

式中： B_0 - 标准大气压，等于 101325Pa ； Z - 海拔高度，单位 m ； T - 绝对空气温度 (K)，取 10min 平均值。一般风场均可提供风机现场

的海拔高度，利用该值即可推算风场的大气压力式 (3)，进而可推算空气密度式 (2)。

在得到风场的空气密度值^[3]后，便可计算最佳模态增益值 10min。

K_{opt} 的计算公式如下：

$$K_{opt} = 0.5 \rho \pi R^5 C_{p\max} / (\lambda_{opt}^3 G^3) \quad (4)$$

式中： ρ - 空气密度； R - 风轮半径；

$C_{p\max}$ - 最大风功率系数； λ_{opt} - 最佳叶尖速比； G - 齿轮箱速比。其中 $C_{p\max}$ 和 λ_{opt} 都与叶片气动特性相关，这里建议：

1) K_{opt} 每隔 2h 更新一次，并设定限值

$0.8 * K_{opt0} \leq K_{opt} \leq 1.1 * K_{opt0}$ ，其中 K_{opt0} 为上一次计算所得的增益值；

2) 风力机操作面板 (HMI) 上需要提供当地海拔高度的输入框，以便维护人员修改。

3 小风变桨策略

3.1 风力机功率系数 C_p 、叶尖速比 λ 及桨距角 β 之间的关系

图 1 为某型号 40.3m 叶片 (风轮直径 82m) 在不同安装角 β 的 $C_p - \lambda$ 曲线簇^[4]。

根据最佳 $C_p - \lambda$ 的选取原则： $C_{p\max}$ 要高、

$C_p - \lambda$ 曲线的顶端要平、 λ 尽可能的小。依照图 1 中可得，叶片最佳桨距角为 0° ，对应的最佳 C_p 为 0.48，最佳叶尖速比 λ 为 8.5。所以此

叶片的最优安装桨距角应是 $\beta_0 = 0^\circ$ 。

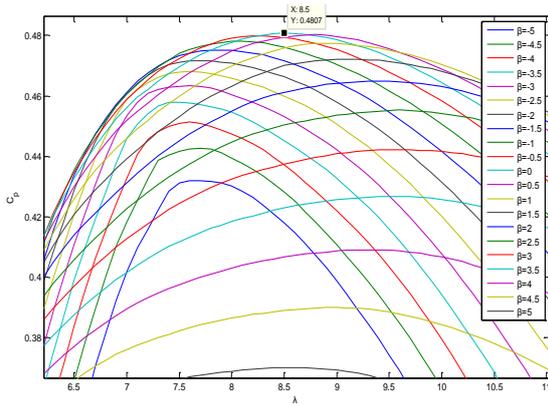


图 1 某型号叶片在不同安装角 β 下的 $C_p - \lambda$ 曲线簇

Fig.1 Clusters of $C_p - \lambda$ curves for a certain type of blade at different installation angles β

风机低风速运行时，桨叶角度被设定为最佳安装角运行（图 1 中 $\beta_0 = 0^\circ$ 的曲线）。叶尖速比：

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (5)$$

式中： ω —风轮角速度； R —风轮半径； v —上游风速；

由于叶轮有很大惯性，叶轮转速的变化跟不上风速的变化。当风速突然增加时 λ 会减小。在桨距角不变的情况下，风机状态会由图 2 中 A 点变化至 D 点。显然此时如果能将桨距角调节至 $\beta = -1^\circ$ ，即风轮状态会切换至图中 C

点。在同样的叶尖速比的情况下，C 点的 C_p 值（ λ ）明显大于 B 点（0.469）。当转速逐渐稳定后，风机会回到 A 点，继续维持最佳功率系数（0.483）。即在风速突然增加过程中，当 $\beta_0 = 0^\circ$ 时，风机会沿着 $\beta_0 = 0^\circ$ 的 $C_p - \lambda$ 曲线

运行，即沿着曲线 ABD 运行，当风轮转速稳定后，再由 D 点回到 A 点，此时沿着曲线 DBA 运行，即在一次风速变化的过程中运行轨迹为 ABD \rightarrow DBA。现当风速增加的同时将最优桨距角调整为 -1° ，即实际运行曲线是 ABC。当风速稳定后沿着曲线 CBA 运行，即在一次风速变化的过程中运行轨迹为 ABC \rightarrow CBA。显

然轨迹 ABC \rightarrow CBA 在曲线 BC 段的 C_p 值明显高于曲线 BD。

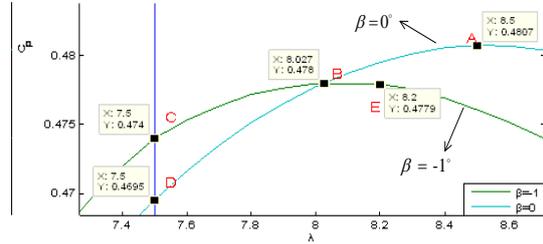


图 2 图 1 局部放大后

Fig.2 Fig 1 After partial amplification

基于以上分析，在风轮最优桨距角 β_0 中引

入风轮转速微分量反馈信号，可轻松实现上述策略。

3.2 桨距角优化控制器设计

(1) 风轮转速微分量的提取

风轮转速微分量 $\dot{\omega}$ 的获得有多种方法，下文采用“非线性最速微分跟踪器^[5]”，公式如下：

$$\begin{cases} x_1(t+h) = x_1(t) + h \times x_2(t) \\ x_2(t+h) = x_2(t) + h \times u, |u| \leq r \end{cases} \quad (6)$$

在方程 6 中，有

$$u = fst(x_1(t) - v(t), x_2(t), r, h_0) \quad (7)$$

$$d = r \times h_0; d_0 = d \times h_0; \quad (8)$$

$$y = x_1 - v(t) + h_0 \times x_2; \quad (9)$$

$$a_0 = \sqrt{d_2 + 8 \times r \times |y|}; \quad (10)$$

$$a = \begin{cases} x_2 + (a_0 - d) \times \text{sgn}(y) / 2, |y| > d_0 \\ x_2 + y / h_0, |y| \leq d_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$fst = \begin{cases} r \times a / d, |a| \leq d \\ r \times \text{sgn}(a), |a| < d \end{cases} \quad (12)$$

式中： h —积分步长； r —速度因子，即变量 $x_1(t)$

对被跟踪量 $v(t)$ 的跟踪快慢； $x_2(t)$ —变量 $x_1(t)$

的微分信号； h_0 – 滤波因子，具有滤除被跟踪量 $v(t)$ 中噪声的功能。调节速度因子 r 和滤波因子 h_0 的大小就可以实现对被跟踪量跟踪速度的控制和滤波控制。

最速微分跟踪器是使用快速跟踪原始信号的方式，同时能合理提取信号中的微分量，并能较好的衰减信号中的噪声干扰。

(2) 桨叶优化控制器设计

现使用离散化的“非线性最速微分跟踪器”提取风轮转速中的微分量信号(TD)，并根据上文分析叶轮桨距角优化原理设计变桨距 PI 控制器^[6]，框图如图 3 所示。

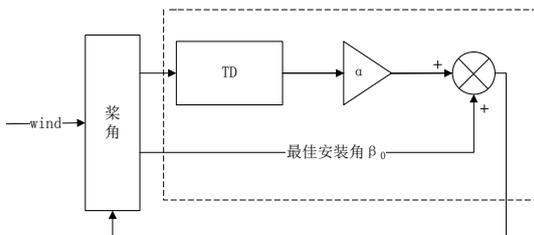


图 3 桨距角优化控制器

Fig.3 Pitch angle optimization controller

优化后的桨距角控制器见图 3 中虚线框内，由微分跟踪器提取的风轮转速微分量乘以调节系数 ($-\alpha\dot{\omega}$) 和桨叶最佳安装角组成 (β_0)。桨距角优化控制的最终桨距角如下：

$$\beta = \beta_0 - \alpha\dot{\omega} \quad (13)$$

3 仿真结果

3.1 风速阶跃变化仿真

将此控制策略添加进桨距角 PI 控制器并使用 VC6.0 生成 DLL。使用 Bladed 软件的外部控制器接口调用此控制器 DLL 文件同时进行仿真。所使用的风力机模型简述如下：叶轮直径 82m (叶片长度 40.3m)，额定功率和扭矩额定值分别为 1.5MW 和 8550Nm，高速轴额

定转速 1770rpm，齿轮箱变比 104.2。

使用阶跃风模型仿真，即仿真过程中第 20s 时刻风速由 6m/s 突增至 7m/s，第 120s 时刻风速由 7m/s 突降至 6m/s，总仿真时间 200s。

风速变化见图 4。仿真“一般变桨控制”和“添加小风变桨策略”两次计算给定的风速条件相同。

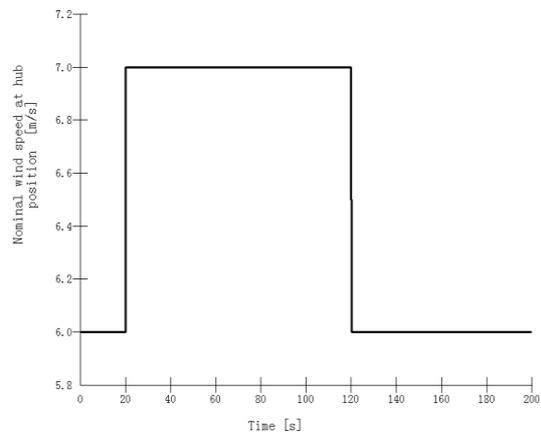


图 4 风速变化

Fig.4 Wind speed change

图 5 为添加图 4 所示的风速条件后的仿真计算结果，从图 5 中可以看出在 6-7m/s 风速条件下，正常变桨距系统的桨叶一直保持在 0°，而添加“小风变桨策略”后的桨角会随着风速改变自动调整。

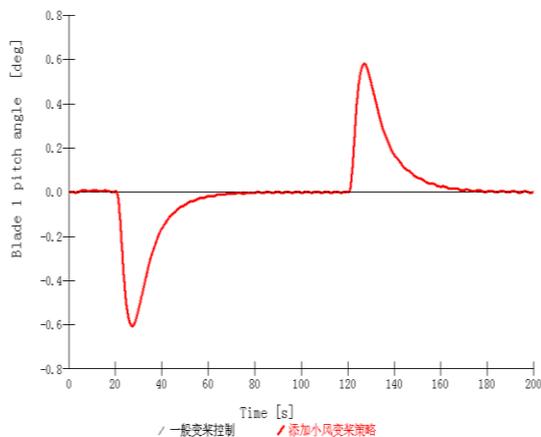


图 5 桨距角变化

Fig.5 Pitch angle change

图 6 为此过程中风力机功率变化的图形，可以看出功率 40s 之前增加而在 40s 后减小的原因是图 2 中实际的交叉点可能会偏离 B 点引起的，所以合理的选取 α 值对仿真结果尤为重要。

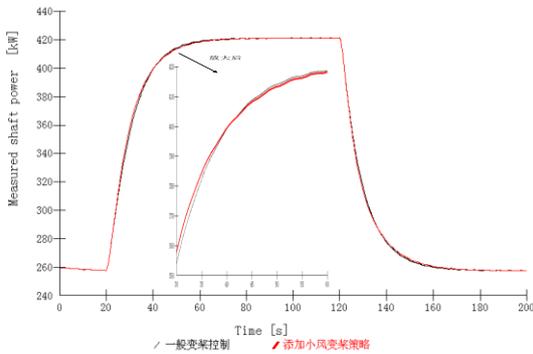


图 6 功率变化
Fig.6 Power change

使用 Bladed 自带统计功能对图 6 中输出轴功率进行统计，统计结果见表 1。其中 Mean 是功率的平均值，Std.Dev (标准差) 反映了功率的偏离平均值的离散程度，即功率的波动，Units 表明功率的单位是 W (瓦)，No of points (点数) 中 Bladed 输出时设定为 0.02s 输出一个点，所以 10000 个点等于 200s (下同)。均值结果表明添加小风变桨策略后功率增加了。

表 1 阶跃风情况下功率统计

Tab.1 Power Statistics under Step Wind

Channel	Mean	Std.Dev	Units	No of points
一般变桨控制	338705	73620.9	W	10000
添加小风变桨策略	338827	73456.7	W	10000

3.2 湍流风仿真

风速的变化主要是湍流强度引起的。图 7 为 IEC61400-1:2005 标准^[7]中规定的用于确定风力发电机组等级的基本参数，其中 I_{ref} 表征湍流特性等级。即从 A 到 C 逐步递减。若按 A 类等级推算，风速为 6m/s 时，其湍流强度代

表值为 26.93%。

Table 1 – Basic parameters for wind turbine classes¹

Wind turbine class		I	II	III	S
V_{ref}	(m/s)	50	42,5	37,5	Values specified
A	I_{ref} (-)	0,16			by the designer
B	I_{ref} (-)	0,14			
C	I_{ref} (-)	0,12			

图 7 不同类风机的基本参数

Fig.7 The basic parameters of different types of fans

选取合理的 α 值，风速设定为 6m/s，湍流强度设 26.93%，进行 10min 湍流风仿真，给定风速的变化见图 8，叶轮桨距角变化见图 9，功率变化见图 10，使用 Bladed 对图 10 中的功率变化进行统计，结果见表 2。均值计算结果显示功率增加了：

$$0.557\% = (300037 - 298374) / 298374 .$$

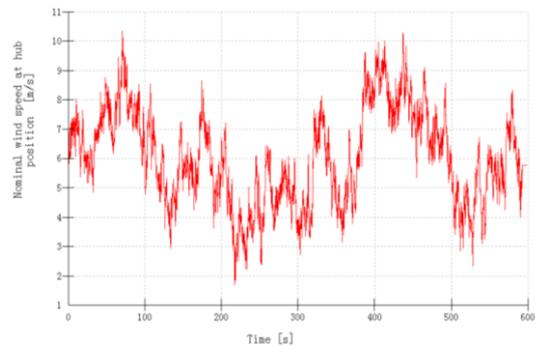


图 8 湍流风速变化

Fig.8 Turbulence wind speed change

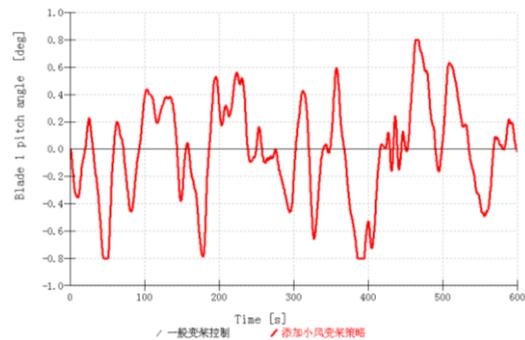


图 9 湍流风速条件下桨距角变化

Fig.9 Pitch angle variation under turbulent wind speed

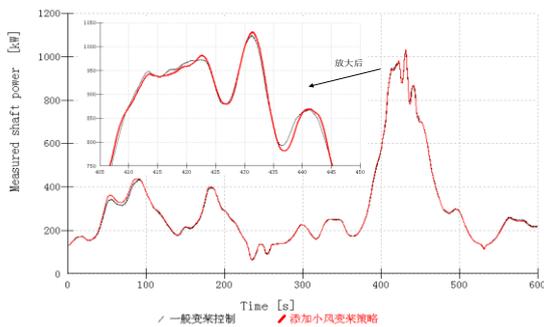


图 10 湍流风速条件下功率变化

Fig.10 Power variation under turbulent wind speed

表 2 3D 湍流风情况下 10 分钟功率统计

Tab.2 Turbulence wind power for 10 minutes

Channel	Mean	Std.Dev	Units	No of points
一般变桨控制	298374	198426	W	30000
添加小风变桨策略	300037	198831	W	30000

4 结语

1) 基于叶轮的气动模型即不同安装角下 β 的 $C_p - \lambda$ 曲线簇, 提出在现有变桨 PI 控制器中引入风轮转速微分量的策略。即当风速变化时, 通过切换桨叶的最小桨距角 (最佳安装角 β_0), 用以追踪最佳 C_p 。使用 Bladed 建立了 1.5MW 风力机模型进行计算仿真验证。首先计算了 200s 阶跃风情况下机组的桨距角等运行状态, 并证明机组的功率增加了。然后计算

了此策略在接近风场实际运行情况的 10min 3D 湍流风模型下机组的运行状态, 再次证明了机组功率的增加并给出此风况下具体的增加值 0.557% ;

2) 小风时, 当机组出功在额定点以下时,

变桨系统一直处于最小桨距角 β_0 , 此时变桨系统一般处于休眠状态。添加小风变桨策略后, 变桨系统将处于工作状态, 这无疑将增加变桨系统的工作时间, 减少了变桨系统的寿命^[8]。对于平原上湍流较小的风场, 由于风速较稳定, 添加此策略能增加的功率十分有限, 所以下一阶段的研究目标是需要综合考量湍流强度、变桨系统工作寿命、小风变桨策略三者之间的经济性关系。

参 考 文 献

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术(第 2 版)[M]. 机械工业出版社, 2008
- [2] 汪正军, 张会广, 纪国瑞, 等. 风电机组控制策略的最优增益在线计算方法、系统及装置: CN102767473A[P]. 2012
- [3] 柳明, 柳文. 基于风速和空气密度估计的最大风能捕获[J]. 电网技术, 2009, 33(1):56-60.
- [4] Garrad Hassan. Bladed manual[M]. 2015
- [5] 韩京清. 自抗扰控制技术-估计补偿不确定因数的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] 夏安俊等. 基于微分跟踪器的大型风电机组转矩优化控制[J]. 电机与控制应用, 2012. 39(6). 33-36
- [7] IEC, Wind Turbines-Part 1:Design Requirements[J]. 2005.
- [8] 叶杭冶. 风力发电机组监测与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

作者简介:

高鑫 (1986.11—), 男, 陕西蒲城, 硕士, 工程师, 控制工程