

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.03.015

基于独立变桨距控制的风轮减载策略

唐俏俏,刘皓明,袁晓玲,许波峰

(河海大学能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要:为减小风切变、塔影效应以及湍流风等因素引起的风轮不平衡载荷,在分析风切变、塔影效应以及湍流风模型的基础上,提出了一种基于方位角和载荷联合反馈的独立变桨距控制策略。结合方位角权重系数分配环节和叶根挥舞载荷反馈PID控制环节,分别调节每支叶片的桨距角,实现风轮减载控制。基于GH Bladed平台的仿真结果表明,与统一变桨距控制相比,所提独立变桨距控制策略可有效减小风轮不平衡载荷,不仅适用于风切变和塔影效应引起的载荷波动,在湍流风影响时也能起到较好的抑制作用。

关键词:独立变桨距;减载策略;载荷反馈;方位角反馈;风切变;塔影效应;湍流风;GH Bladed平台
中图分类号:TM315 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2016)03-0278-05

Rotor load reduction strategy based on individual pitch control

TANG Qiaoqiao, LIU Haoming, YUAN Xiaoling, XU Bofeng

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to reduce the rotor unbalance load caused by wind shear, tower shadow, and turbulent wind, an individual pitch control strategy based on the combined feedback of the azimuth angle and load is proposed according to a wind model considering the wind shear, tower shadow, and turbulence. In the individual pitch control strategy, the azimuth angle weight coefficient assignment module and the module of blade root flapwise load fed back to the PID controller are used to adjust the pitch angle of each blade and achieve rotor load reduction. The simulated results of the GH Bladed software show that, compared with the collective pitch control strategy, the proposed individual pitch control strategy can significantly reduce the rotor unbalance load, and it is not only effective in alleviating the load fluctuation caused by wind shear and tower shadow, but also able to achieve good load reduction performance under turbulent conditions.

Key words: individual pitch control; load reduction strategy; load feedback; azimuth angle feedback; wind shear; tower shadow; turbulent wind; GH Bladed platform

随着风力发电技术的迅速发展,现代风力机的单机容量越来越大,体积和质量也不断增加^[1]。风力机运行过程中所受载荷情况非常复杂,除了受重力载荷、惯性载荷以及控制系统运行载荷,还受到由风切变、塔影效应、湍流等因素引起的不平衡气动载荷^[2]。这种不平衡载荷不仅加剧了风轮(包括叶片和轮毂)的疲劳损伤,还会进一步产生主轴、齿轮箱、塔架等主要零部件的额外疲劳载荷,加速关键部位的老化,从而影响机组的安全运行、威胁机组的寿命^[3]。

风力机变桨技术可分为统一变桨距和独立变桨距,独立变桨距控制是在统一变桨距基础上分别给每支叶片叠加桨距角微调量,从而改善叶片的气动特性、减小风轮不平衡载荷。国内外不少学者针对独立变桨距控制展开了研究;Zhang等^[4]分析了风力机不平衡载荷的产生原因,并得出大型风力机应采用独立变桨距技术减小风轮不平衡载荷的结论;在分析风切变和塔影效应风速模型的基础上,姚兴佳等^[5]、邢作霞等^[6]采用

收稿日期:2015-03-09

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2013AA050601);江苏省“六大人才高峰”项目(2015-XNY-005)

作者简介:唐俏俏(1991—),女,江苏阜宁人,硕士研究生,主要从事风力发电及其对电力系统的影响研究。E-mail: qqthhu@163.com

基于方位角反馈的独立变桨距控制策略,通过测量风轮方位角、设置权系数,分别调节每支叶片的桨距角,在稳定输出功率的同时减小叶片载荷;考虑到风场中湍流风的影响,Bossanyi^[7]、鲁效平等^[8]采用了基于载荷反馈的独立变桨距控制策略,利用坐标变换将测得的叶根载荷变换为轮毂俯仰和偏航载荷,经过PID控制器得到每支叶片桨距角微调量,对于湍流风引起的不平衡载荷有较好的控制效果。

上述研究均针对特定风速情况制定了相应的独立变桨距控制策略,但实际风场受各种因素影响,风速随时间和空间分布的差异性很大。笔者考虑到风速变化的周期性(如风切变、塔影效应)和随机性(如湍流风),提出一种基于方位角和载荷联合反馈的独立变桨距控制策略,结合方位角权系数分配环节和叶根挥舞载荷反馈PID控制环节,以调节每支叶片的桨距角,从而达到减小风轮不平衡载荷的目的。

1 风速模型

1.1 风切变

风切变是指风速随着高度的增加而增加,可用指数模型^[9]或对数模型^[10]来描述:

$$V(z) = V_h \left(\frac{z}{h} \right)^\alpha \quad V(z) = V_h \frac{\lg \frac{z}{z_0}}{\lg \frac{h}{z_0}} \quad (1)$$

式中: $V(z)$ ——距地面高度 z 处平均风速; h ——轮毂中心距地面的高度; V_h ——轮毂中心处风速; α ——风切变系数; z_0 ——地表粗糙高度。

目前采用较多的是指数模型,其中 α 的取值与地理、环境等因素相关,一般随地表粗糙程度的增加而增加^[11]。

1.2 塔影效应

塔影效应是指由于塔架对气流的阻塞造成的风速变化,即塔架上游和下游处来流风速的大小和方向均发生了改变^[12]。GH Bladed 软件中描述塔影效应共有3种模型:潜流模型、经验模型和组合模型。对于上风向风电机组,通常采用潜流模型描述塔影效应的影响^[9]。

潜流模型假设直径为 D 的圆柱体四周为不可压无黏气流,且

$$D = FD_T \quad (2)$$

式中: F ——塔架直径修正系数; D_T ——计算塔影效应处的塔架直径。

对于风轮旋转平面内一点,距离塔架轴线前方距离为 x 、侧向距离为 y ,风速可表示为

$$V(x, y) = V_0 + V_0 \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{y^2 - x^2}{(y^2 + x^2)^2} \quad (3)$$

式中: V_0 ——空间平均风速。

1.3 湍流风

实际风场的风速不仅随着空间分布变化,还具有时间上的随机性,湍流风即为描述随时间和空间变化的风速模型,可用 von Karman 或 Kaimal 模型来表示^[13]。利用 GH Bladed 软件可定义风场的宽度和高度、风区持续时间、频率、平均风速以及湍流种子,从而生成三维湍流风。湍流风场包括覆盖叶轮扫风面的矩形网格上每一点风速的时间记录,其中任意两点的的时间记录都彼此相关,与大气湍流的横向、纵向频谱特性相一致。

对于 von Karman 模型,三维湍流风模型的横向(v)和纵向(w)分量对应的频谱表示为^[14]

$$\frac{nS_{kk}(n)}{\sigma_k^2} = \frac{4n_k(1 + 755.2n_k^2)}{(1 + 282.3n_k^2)^{\frac{11}{6}}} \quad (4)$$

其中

$$n_k = \frac{nL_k}{\bar{V}}$$

式中: S_{kk} ——风速变化的自频谱, k 取 v 或者 w ; n ——变化的频率; σ_k ——风速变化的标准差; n_k ——无量纲频率参数; L_k ——湍流的长度; $\bar{V}$ ——湍流风参考高度处的平均风速。

2 独立变桨距控制策略

由于风切变、塔影效应和湍流风的影响,风轮旋转平面内风速分布不均匀,导致叶片在旋转过程中载荷波动,传递至轮毂处形成风轮不平衡载荷。由风力机的空气动力学原理可知,调节叶片桨距角的大小直接影响叶片气动载荷的变化^[15],因此采用独立变桨距控制技术,分别调节每支叶片的桨距角,使其根据自身位置或载荷情况独立地变化,可有效改变其气动特性、调整受力情况,进而减小风轮不平衡载荷。为减小风切变、塔影效应、湍流风等因素引起的风轮不平衡载荷,笔者提出了基于方位角和载荷联合反馈的独立变桨距控制策略,结合方位角权重系数分配环节和叶根挥舞载荷反馈 PID 控制环节,以调节每支叶片的桨距角,其控制框图如图 1 所示。

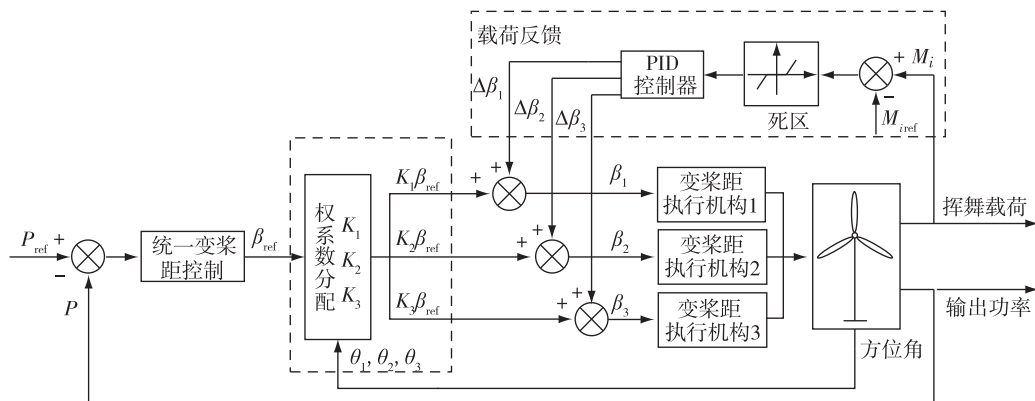


图 1 基于方位角和载荷联合反馈的独立变桨距控制框图

Fig. 1 Block diagram of individual pitch control based on combined feedback of azimuth angle and load

从图 1 可以看出,基于方位角和载荷联合反馈的独立变桨距控制策略有两套桨距角调节信号,分别来自于方位角反馈和载荷反馈。针对风切变和塔影效应引起的周期性载荷波动,根据方位角反馈可设置权重系数,动态调节桨距角,形成周期性控制律;考虑到湍流风等随机因素的影响,当方位角反馈不足以平缓载荷波动时,根据载荷反馈可在其基础上修正桨距角变化值、提供桨距角补偿信号,以进一步减小风轮不平衡载荷。

方位角反馈的控制规律为:首先根据功率控制的要求,计算输出功率测量值 P 与参考值 P_{ref} 的偏差值,并进行统一变桨距控制,得出桨距角给定值 β_{ref} ;根据风轮方位角信号 $\theta_i (i=1,2,3)$ 预测每支叶片的平均风速 $\bar{V}_i$,设置动态权重系数 K_i ;最后通过权重系数 K_i 重新分配调节每支叶片的桨距角,将统一桨距角的给定值 β_{ref} 转化为每支叶片独立变化的桨距角 $K_i\beta_{\text{ref}}$ 。其中叶片的平均风速 $\bar{V}_i$ 可等效为叶片中心位置处的风速^[1],权重系数 K_i 的计算公式为

$$K_i = \frac{3\bar{V}_i^m}{\bar{V}_1^m + \bar{V}_2^m + \bar{V}_3^m} \quad (5)$$

式中: m ——指数系数,可根据试验验证选取理想数值。

载荷反馈的控制规律为:测量实时叶根挥舞载荷 M_i 作为反馈值,与叶根挥舞载荷参考值 M_{ref} (M_{ref} 可取 3 支叶片的叶根挥舞载荷平均值,即 $M_{\text{ref}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 M_i$) 进行比较,得到挥舞载荷偏差信号 ΔM_i ;设置死区环节,当挥舞载荷 M_i 波动较小,即偏差信号 ΔM_i 在阈值范围内时,控制器不动作,以防止变桨距机构频繁动作引起疲劳损坏;最后通过载荷 PID 控制器,得到每支叶片的桨距角微调量 $\Delta\beta_i$ 。其中 PID 控制器的参数需精心调节,以达到最优的控制效果。

基于方位角和载荷联合反馈的独立变桨距控制将方位角反馈和载荷反馈的桨距角调节信号相加,最终得到每支叶片的桨距角需求,即

$$\beta_i = K_i\beta_{\text{ref}} + \Delta\beta_i \quad (6)$$

3 算例仿真

为了验证所提独立变桨距控制策略的有效性,本文基于 GH Bladed 平台进行仿真研究,对比分析不同控

制策略下的风力机桨距角和载荷变化情况。

3.1 考虑风切变和塔影效应的影响

假设轮毂处风速恒定为 12 m/s,考虑风切变和塔影效应的共同影响,取风切变指数模型系数 $\alpha=0.2$,塔影效应潜流模型的塔架直径修正因子 $F=0.8$,GH Bladed 仿真结果如图 2 所示,进一步数值分析结果见表 1。

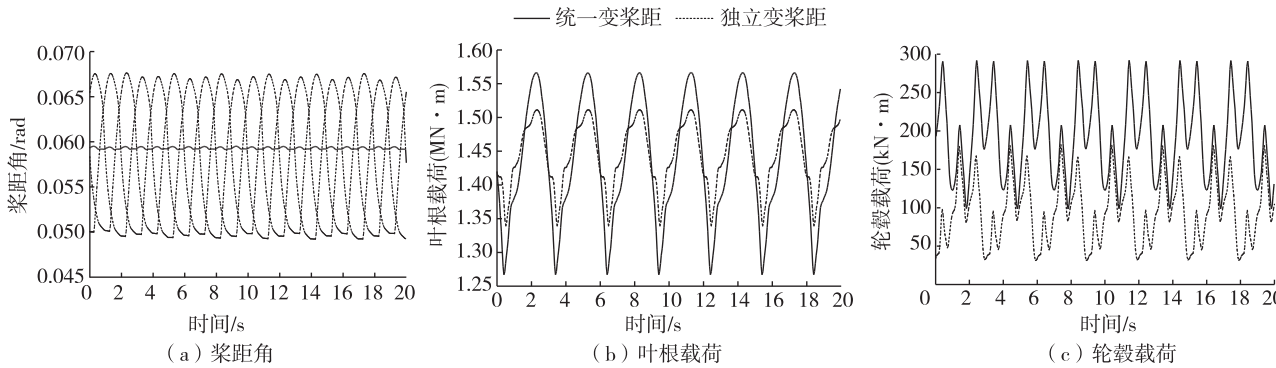


图 2 风切变和塔影效应仿真结果
Fig. 2 Simulated results in consideration of wind shear and tower shadow

从仿真结果可以看出,与统一变桨距控制相比,独立变桨距控制下的叶根载荷和轮毂载荷均有明显减小。其中,叶根载荷波动幅值降低了 46.98%,轮毂载荷平均值减小了 50.75%,此时 3 支叶片的桨距角均在 0.025 rad 范围内变化,工程上可接受。

3.2 考虑湍流风的影响

实际风场中存在很多随机因素,可能会激发较大的风轮不平衡载荷,本文在风切变和塔影效应的基础上,假设还有湍流风的作用,湍流风模型中轮毂处风速随时间变化如图 3 所示。数值分析结果见表 2,仿真结果如图 4 所示。

从仿真结果可以看出,与统一变桨距控制相比,独立变桨距控制下的叶根挥舞载荷波动幅值降低了 9.03%,轮毂载荷的平均值减小了 25.78%。显然,基于方位角和载荷联合反馈的独立变桨距控制策略不仅对风切变和塔影效应影响下的载荷波动有着较好的抑制作用,同时还能有效减小湍流风引起的风轮不平衡载荷。

4 结 语

针对风切变、塔影效应以及湍流风等因素引起的风轮不平衡载荷,提出了一种基于方位角和载荷联合反馈的独立变桨距控制策略,仿真结果表明,该控制策略有较好的风轮减载效果,对于叶根载荷和轮毂载荷波动均有明显的抑制作用,从而达到减小风轮疲劳载荷、延长机组寿命的目的。该控制策略不仅对风切变和塔影效应影响下的载荷波动有着较好的抑制作用,同时还能有效减小湍流风引起的风轮不平衡载荷。

表 1 风切变和塔影效应数值分析结果

Table 1 Numerical analysis results in consideration of wind shear and tower shadow

变桨技术	桨距角/rad		叶根载荷/(MN·m)		轮毂载荷/(kN·m)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
统一变桨距	0.059 3	0.000 1	1.437	0.091 1	191.08	54.32
独立变桨距	0.057 6	0.006 7	1.448	0.048 3	94.10	40.21

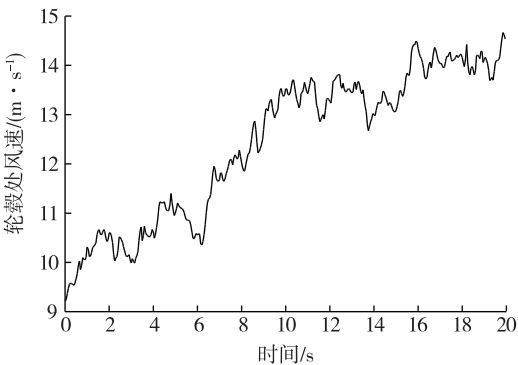


图 3 轮毂处风速随时间变化曲线
Fig. 3 Variation of wind speed at rotor hub with time

表 2 湍流风数值分析结果

Table 2 Numerical analysis results in consideration of turbulent wind

变桨技术	桨距角/rad		叶根载荷/(MN·m)		轮毂载荷/(kN·m)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
统一变桨距	0.090 9	0.037 8	1.292	0.178 3	264.1	121.8
独立变桨距	0.089 2	0.039 2	1.299	0.162 2	196.0	100.5

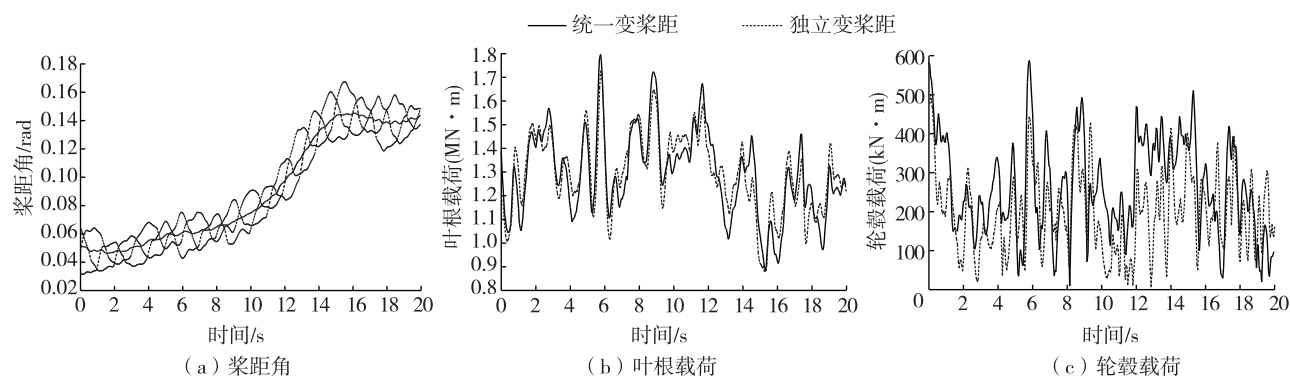


图4 湍流风仿真结果

Fig. 4 Simulated results in consideration of turbulent wind

参考文献:

- [1] 杜静, 谢双义, 金鑫, 等. 基于风速估计和风剪切的风力发电机组变桨距控制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 586-589. (DU Jing, XIE Shuangyi, JIN Xin, et al. Variable pitch control of wind turbines based on estimated wind speed and wind shear[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2012, 40(5): 586-589. (in Chinese))
- [2] 孔屹刚, 王杰, 顾浩, 等. 基于风剪切和塔影效应的大型风力机独立变桨控制研究[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 640-644. (KONG Yigang, WANG Jie, GU Hao, et al. Research on individual pitch control based on wind shear and tower shadow for large wind turbine[J]. East China Electric Power, 2011, 39(4): 640-644. (in Chinese))
- [3] 应有, 许国东. 基于载荷优化的风电机变桨距控制技术研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 106-111, 109. (YING You, XU Guodong. Development of pitch control for load reduction on wind turbines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 106-111, 109. (in Chinese))
- [4] ZHANG Y Q, CHENG M, CHEN Z. Load mitigation of unbalanced wind turbines using PI-R individual pitch control[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(3): 262-271.
- [5] 姚兴佳, 刘玥, 郭庆鼎. 基于前馈补偿方位角权系数的分程独立变桨距控制研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(4): 532-539. (YAO Xingjia, LIU Yue, GUO Qingding. A control method for split range individual pitch based on feed-forward azimuth angle weight number assignment[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2012, 33(4): 532-539. (in Chinese))
- [6] 邢作霞, 陈雷, 厉伟, 等. 减小塔影和风切变效应的变桨距控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(6): 915-923. (XING Zuoxia, CHEN Lei, LI Wei, et al. Pitch control method study on reducing the effects of tower shadow and wind shear [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2013, 34(6): 915-923. (in Chinese))
- [7] BOSSANYI E A. Individual blade pitch control for load reduction [J]. Wind Energy, 2003, 6(2): 119-128.
- [8] 鲁效平, 顾海港, 林勇刚, 等. 基于独立变桨距技术的风力发电机组载荷控制研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(11): 1591-1598. (LU Xiaoping, GU Haigang, LIN Yonggang, et al. Research on the load control of wind turbines based on individual pitch technology[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2011, 32(11): 1591-1598. (in Chinese))
- [9] DOLAN D S L, LEHN P W. Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow [J]. IEEE Transactions on, Energy Conversion, 2006, 21(3): 717-724.
- [10] 彭怀午, 冯长青, 包紫光. 风资源评价中风切变指数的研究[J]. 可再生能源, 2010(1): 21-23. (PENG Huaiwu, FENG Changqing, BAO Ziguang. Study on the wind shear exponent for wind resource assement[J]. Renewable Energy Resources, 2010 (1): 21-23. (in Chinese))
- [11] 刘磊, 石可重, 杨科, 等. 风切变对风力机气动载荷的影响[J]. 工程热物理学报, 2010(10): 1667-1670. (LIU Lei, SHI Kezhong, YANG Ke, et al. Effect of wind shear on the aerodynamic load of wind turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010(10): 1667-1670. (in Chinese))
- [12] SØRENSEN P, HANSEN A D, ROSAS P A C. Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12): 1381-1402.
- [13] 吴安, 孙文磊. 基于不同风速的湍流风模型下叶轮载荷分析[J]. 机床与液压, 2011, 39(13): 6-9. (WU An, SUN Wenlei. Analysis of rotor loads based on turbulent wind model with three different wind speeds[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(13): 6-9. (in Chinese))
- [14] 马欣欣, 陈进, 李世六. 风力机叶片在三维湍流下的载荷分析[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 19-22. (MA Xinxin, CHEN Jin, LI Shiliu. Analysis on the wind turbine's blade loads in 3D turbulence[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(5): 19-22. (in Chinese))
- [15] 胡岩, 刘玥, 姚兴佳, 等. 兆瓦级风力发电机组多段权系数独立变桨控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(6): 633-638. (HU Yan, LIU Yue, YAO Xingjia, et al. Multi-stage weight number individual variable-pitch control of mega-watt class wind turbine system[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009, 31(6): 633-638. (in Chinese))