

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.012

基于状态反馈的低风速风电机组不平衡 载荷控制方法研究^{*}

杨震宇¹, 王 青^{1,2}, 魏新刚¹, 应 有^{1,2}

(1. 浙江运达风电股份有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 风力发电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要:针对1P载荷控制只能减小叶片载荷的1P谐波分量和轮毂载荷的0P谐波分量但对高频振动没有抑制能力的问题,采用2P载荷控制策略,对风电机组的动力学特性及其等效线性化模型进行研究,推导出风力机的动力学方程与相关载荷的理论表达式。针对旋转坐标系下系统的耦合性,采用坐标变换将系统转换到固定坐标系,设计了固定坐标系下的2P载荷的控制方法。2P载荷控制策略是利用安装在叶轮上的载荷传感器得到的不平衡载荷实时值作为反馈信号,最终采用控制器实现载荷控制的实时反馈。研究表明:基于状态反馈的2P载荷控制与传统1P载荷控制相比,2P谐波分量显著降低,固定部件疲劳载荷明显降低,即基于状态反馈的2P载荷控制策略能够有效降低系统的不平衡载荷。

关键词:风电机组;降低不平衡载荷;状态反馈;2P载荷控制

中图分类号:TM614;TK8

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)07-0752-05

Unbalanced load control method for low speed wind turbine based on state feedback

YANG Zhen-yu¹, WANG Qing^{1,2}, WEI Xin-gang¹, YING You^{1,2}

(1. Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 2. State Key Laboratory of Wind Power System, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Aiming at the problems that 1P load control strategy could only reduce the 1P harmonic component of the blade and the 0P harmonic component of the hub could not restrain the high frequency vibration, a 2P load control method was applied to reduce the imbalance loads. By studying the dynamic characteristics of wind turbine and the equivalent linear model, theoretical dynamic equations and related loads equations of wind turbine was deduced. Due to the coupling of the system in the rotating coordinate, it was necessary to convert the system to the fixed coordinate through coordinate transformation so that the 2P load control method was applied appropriately. Using the load sensor mounted on the impeller, unbalanced load value was obtained as feedback signal, and state feedback controller was used to ensure real time load control. The results indicate that comparing with traditional 1P load control strategy the proposed method can effectively reduce the imbalance loads such as the 2P harmonic component of rotating parts and fatigue loads of fixed parts.

Key words: wind turbine; reduce the imbalance loads; state feedback controller; 2P load control

0 引 言

近年来随着风电行业的快速发展,现代风电机组的单机容量直线上升,其几何尺寸的迅速提高不仅使

得制造、运输与维护成本相应提高,还导致机组载荷的增加;合理降低风机的载荷在降低度电成本以及延长机组使用寿命方面都有很大的实际意义,这对风电机组的载荷控制技术提出了很高的要求^[1-2]。

收稿日期:2017-03-15

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAA06B01)

作者简介:杨震宇(1967-),男,浙江杭州人,本科,高级工程师,主要从事风电机组应用技术方面的研究. E-mail:yingyou@chinawindey.com

由于风流场分布的不均匀性(风湍流、风剪切、塔影效应)以及对风误差的存在,整个风轮面所受到的载荷是不均匀的,且风轮直径越大,风轮面受到的不平衡载荷也越大^[3];以风剪切效应为例,风流场会随着高度的变化而变化,这就使得风轮面在不同高度处的载荷不同,且风轮直径越大风速差越大,对应的不平衡载荷也越大。叶轮上的不平衡载荷会给变桨轴承、主轴等关键部件带来较大的疲劳载荷,降低了其使用寿命^[4]。

现代大型风电机组多通过变桨控制技术控制风轮转速^[5-6],实现机组大风情况下的恒功率输出。但是采用协同变桨控制技术的机组,3片桨叶的位置指令是相同的,这样的变桨控制不能降低叶轮的不平衡载荷。

状态反馈和输出反馈是控制系统设计中两种主要的反馈策略,输出反馈是将输出当做反馈量实现闭环控制;而状态反馈控制器将系统的状态变量通过比例环节反馈到系统的输入端,是现代控制理论的一种典型控制方式。相对于输出反馈,状态反馈能够全面地反映系统的内部特性,因此状态反馈比传统的输出反馈能更有效地改善系统的性能。对于不平衡载荷的控制,一般使用PI控制器来调节桨距角^[7-9],实现载荷的闭环控制。但是在稳态性能方面,PI控制器的基频增益相对PR控制器较低,因此控制精度远不如PR控制器^[10];由于PR控制器在基频上理论上有无穷大的增益,能够实现较小的稳态误差。在快速性方面,PI控制器的快速性远低于状态反馈控制器,往往不能应对载荷快速的变化^[11-13]。因此,需要对基于传统PI控制器的不平衡载荷控制进行改进。

本研究将设计一种新型的降低2P不平衡载荷控制技术,通过在叶轮上安装的载荷传感器得到叶轮上不平衡载荷的实时值,根据变桨系统的动态特性设计状态反馈控制器,将得到的反馈信号叠加到桨距角上实现闭环控制,并通过仿真以证实所提算法的有效性。

1 风机的线性化模型

风机的准确建模一直是风机控制领域的一个难题,目前只有有限元方法能够较为准确地建立风机模型,但是有限元方法的得到的风机模型由于维度太大而失去了实际控制应用价值;线性化的等效建模方法虽然精度较低,但是也能够有效反映出风机的系统特性,且得到的模型维度较低,给后续控制器的设计带来了方便。

建立风机线性化模型的主要步骤:

(1)根据叶素理论得到每片桨叶载荷相对于等效

风速与桨距角的线性化模型;

(2)将所有桨叶的载荷相叠加,再通过坐标变换得到固定坐标系下的总载荷,即输出方程。这里选取叶根面外弯曲力矩作为输出,输出方程基于的状态是:等效风速、桨距角、方位角;

(3)根据系统的动力学特性,得到塔架前后与传动链的运动方程;

(4)将(1)代入(3)的动力学方程中,得到输入为等效风速、桨距角、方位角,状态为转速、前后加速度的旋转坐标系下的动力学方程;

(5)利用坐标变换,得到与方位角无关的动力学方程、输出方程,方程中的状态与输入为:转速、前后加速度、等效风速、桨距角。

风力机简化模型示意图如图1所示。

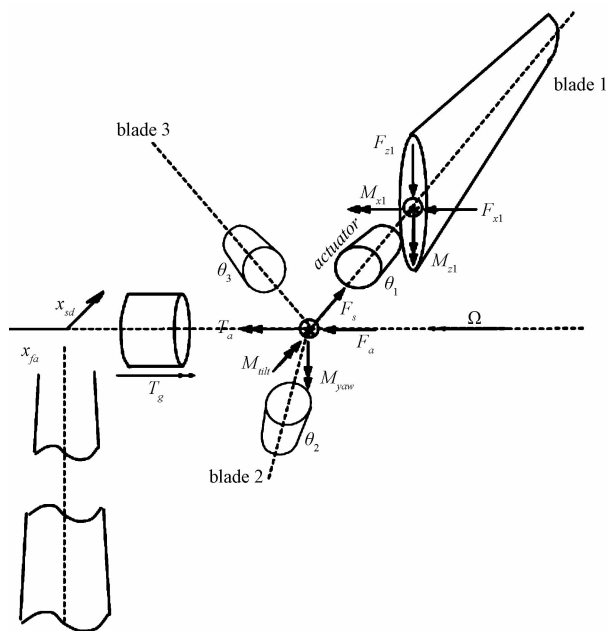


图1 风力机简化模型示意图

利用上述方法,得出的状态方程为:

$$J\dot{\omega} + B\omega = 3h_{M_z}u_1^{cm} + 3k_{M_z}\beta_1^{cm} - 3h_{M_x}\dot{x}_{fa} - T_g \quad (1)$$

$$m_t\ddot{x}_{fa} = \left(\frac{81R_b}{32H^2}h_{M_z} - 3h_{F_x} - B_t \right)\dot{x}_{fa} - k_t x_{fa} + 3k_{f_x}\beta_1^{cm} + \frac{9}{4H}k_{M_z}\beta_2^{cm} + 3h_{F_x}u_1^{cm} + \frac{9}{4H}h_{M_z}u_2^{cm} \quad (2)$$

输出方程为:

$$M_{z1}^{cm} = -h_{M_z}\dot{x}_{fa} + k_{M_z}\beta_1^{cm} + h_{M_z}u_1^{cm} \quad (3)$$

$$M_{tilt} = -\frac{27R_b}{16H}h_{M_z}\dot{x}_{fa} - \frac{3}{2}k_{M_z}\beta_2^{cm} - \frac{3}{2}h_{M_z}u_2^{cm} \quad (4)$$

$$M_{yaw} = \frac{3}{2}k_{M_z}\beta_3^{cm} + \frac{3}{2}h_{M_z}u_3^{cm} \quad (5)$$

式中: J —叶轮及传动系统折算到叶轮上的转动惯

量; m_i —塔架等效质量; R_b —叶轮半径; H —塔架高度; B_i —塔架等效阻尼; k_i —塔架等效弹性系数; ω —叶轮转速; x_{ja} —塔架顶部前后方向移动的位移; M_{tilt} , M_{yaw} —轮毂上的倾翻力矩和偏航力矩; β_i^{cm} , u_i^{cm} , M_{zi}^{cm} —变换到轮毂固定坐标系上的节距角、风速、挥舞力矩分量。

参数 h_{Mz} , h_{Fx} , h_{Mx} , h_{Fz} , k_{Mz} , k_{Fx} , k_{Mx} , k_{Fz} 分别是工作点附近线性化处理后的系数:

$$\begin{bmatrix} M_{zi} \\ F_{xi} \\ M_{xi} \\ F_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{Mz} & k_{Mz} \\ h_{Fx} & k_{Fx} \\ h_{Mx} & k_{Mx} \\ h_{Fz} & k_{Fz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{fli} \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 针对 2P 的载荷控制器

假定叶轮面积内风速湍流是均匀的,则叶片上等效风速 u_i 的傅立叶级数为:

$$u_i(t, \varphi_i) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\varphi_i} \hat{u}_n(t) \quad (7)$$

式中: $\hat{u}_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u_i(t, \varphi) e^{-jn\varphi} d\varphi$

对公式(7)进行坐标变换得出:

$$\begin{bmatrix} u_1^{cm} \\ u_2^{cm} \\ u_3^{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j3m\varphi} \hat{u}_{3m}(t) \\ \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j\beta m\varphi} (\hat{u}_{3m+1}(t) + \hat{u}_{3m-1}(t)) \\ \sum_{m=-\infty}^{\infty} j e^{j\beta m\varphi} (\hat{u}_{3m+1}(t) - \hat{u}_{3m-1}(t)) \end{bmatrix} \quad (8)$$

抑制 $\hat{u}_1(t)$ ($m=0$ 时) 风速引起的载荷变化的控制方法称为 1P 控制,抑制 $\hat{u}_2(t)$, $\hat{u}_4(t)$ ($m=1$ 时) 风速引起的载荷变化的控制方法称为 2P 控制。1P 控制策略只能减小叶片载荷的 1P 谐波分量和轮毂载荷的 0P 谐波分量(减小均值),如果轮毂载荷中 3P 的谐波分量仍很大,则需要采用高谐波控制策略。

2P 控制策略的变量坐标变换为:

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\Phi_1 & \sin 2\Phi_1 \\ \cos 2\Phi_2 & \sin 2\Phi_2 \\ \cos 2\Phi_3 & \sin 2\Phi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_2^{cm} \\ \beta_3^{cm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

经过 2P 坐标变换得到的固定坐标系下的载荷为:

$$\begin{bmatrix} M_{y2}^{cm2} \\ M_{y3}^{cm2} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 2\Phi_1 & \cos 2\Phi_2 & \cos 2\Phi_3 \\ \sin 2\Phi_1 & \sin 2\Phi_2 & \sin 2\Phi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{y1} \\ M_{y2} \\ M_{y3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

固定坐标系下的风速为:

$$\begin{bmatrix} u_2^{cm2} \\ u_3^{cm2} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 2\Phi_1 & \cos 2\Phi_2 & \cos 2\Phi_3 \\ \sin 2\Phi_1 & \sin 2\Phi_2 & \sin 2\Phi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

固定坐标系下输出方程为:

$$\begin{aligned} M_{y,i} &= h_{My} \left(\cos \Phi_i \frac{9R_b}{8H} - 1 \right) \dot{x}_{ja} + h_{My} u_i + k_{My} \beta_i = \\ &h_{My} \left(\cos \Phi_i \frac{9R_b}{8H} - 1 \right) \dot{x}_{ja} + h_{My} u_i + \\ &k_{My} (\cos 2\Phi_i \beta_2^{cm2} + \sin 2\Phi_i \beta_3^{cm2}) \end{aligned} \quad (12)$$

不考虑塔架的影响,把式(12)代入式(10)得:

$$\begin{aligned} M_{y2}^{cm2} &= k_{My} \beta_2^{cm2} + h_{My} \frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 \cos 2\varphi_i u_i = \\ &k_{My} \beta_2^{cm2} + h_{My} u_2^{cm2} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} M_{y3}^{cm2} &= k_{My} \beta_3^{cm2} + h_{My} \frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 \sin 2\varphi_i u_i = \\ &k_{My} \beta_3^{cm2} + h_{My} u_3^{cm2} \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(13 ~ 14)得到的 M_{y2}^{cm} , M_{y3}^{cm} 表达式可以知道, M_{y2}^{cm} , M_{y3}^{cm} 与 u_2^{cm2} , u_3^{cm2} , β_2^{cm2} , β_3^{cm2} 是线性关系,所以可以通过调节 β_2^{cm2} , β_3^{cm2} 控制载荷 M_{y2}^{cm} , M_{y3}^{cm} 。基于状态反馈的 2P 载荷控制器的结构图如图 2 所示。

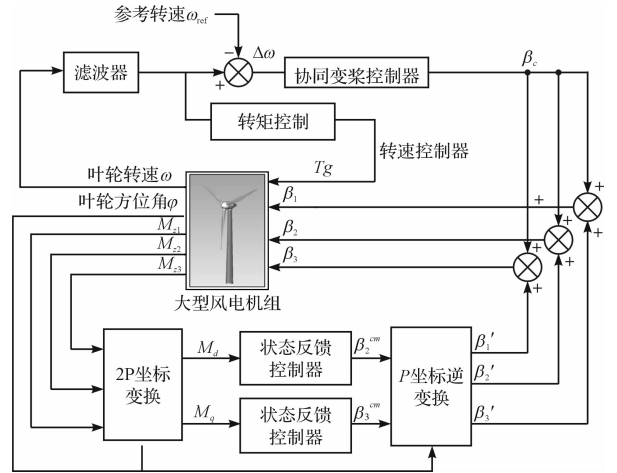


图 2 2P 载荷控制结构图

加入状态反馈控制器后,系统的状态会发生改变;为便于分析,假设只对载荷 M_{y2}^{cm} , M_{y3}^{cm} 进行线性反馈,新的桨距角为:

$$\beta_2^{cm2'} = \beta_2^{cm2} + k_1 M_{y2}^{cm2} \quad (15)$$

系统的载荷会由式(13)变成:

$$\begin{aligned} M_{y2}^{cm2'} &= k_{My} \beta_2^{cm2'} + h_{My} u_2^{cm2} = \\ &k_{My} (\beta_2^{cm2} + k_1 M_{y2}^{cm2}) + h_{My} u_2^{cm2} = \\ &k_{My} (\beta_2^{cm2} + k_1 (k_{My} \beta_2^{cm2} + h_{My} u_2^{cm2})) + \\ &h_{My} u_2^{cm2} \end{aligned} \quad (16)$$

化简后得:

$$M_{y2}^{cm2'} = k_{My}(1 + k_1 k_{My})\beta_2^{cm2} + h_{My}(1 + k_1 k_{My})u_2^{cm2}$$

(17)

同理,使得 $\beta_3^{cm2'} = \beta_3^{cm2} + k_2 M_{y3}^{cm2}$,有:

$$M_{y3}^{cm2'} = k_{My}(1 + k_2 k_{My})\beta_3^{cm2} + h_{My}(1 + k_2 k_{My})u_3^{cm2}$$

(18)

在参数设计时保证:

$$0 < 1 + k_i k_{My} < 1, (i = 1, 2)$$

对比公式(13 ~ 14)表示的原系统载荷表达式与式(17 ~ 18)表示的加入状态反馈的载荷表达式,可以看出:在相同的 u_2^{cm2} 、 u_3^{cm2} 与 β_2^{cm2} 、 β_3^{cm2} 下,新的载荷 $M_{y2}^{cm'}$ 、 $M_{y3}^{cm'}$ 要小于原来的 M_{y2}^{cm} 、 M_{y3}^{cm} 。这说明通过状态反馈控制,可以减小 M_{y2}^{cm} 、 M_{y3}^{cm} 的谐波。

由上可知,载荷控制需要 M_{y2}^{cm} 、 M_{y3}^{cm} 作为反馈值,而 M_{y2}^{cm} 、 M_{y3}^{cm} 可以通过测量叶片根部载荷、主轴载荷、轮毂载荷或塔顶载荷求出,本研究选择叶片根部载荷;叶片根部载荷测量指的是叶片根部面外的弯曲力矩(M_{yi})测量,一般通过测量叶片根部挥舞力矩 M_{flapi} 和偏摆力矩 M_{edgei} 计算出面外弯曲力矩 M_{yi} ,计算公式为:

$$M_{yi} = \cos\beta_i M_{flapi} - \sin\beta_i M_{edgei}$$

(19)

最后再通过式(10)得出需要的 M_{y2}^{cm} 、 M_{y3}^{cm} 。

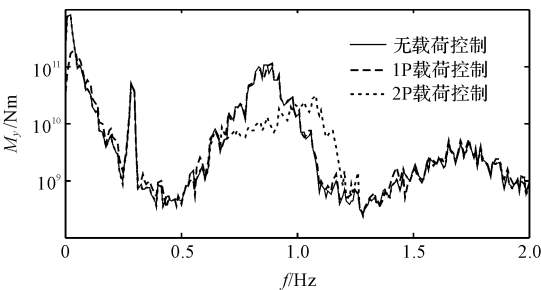
3 仿真研究及结果分析

为验证2P载荷控制器的有效性,本研究在Bladed仿真环境下设计了仿真试验,采用的仿真模型为运达风电的1.5 MW风力发电机数据,其主要参数如表1所示。

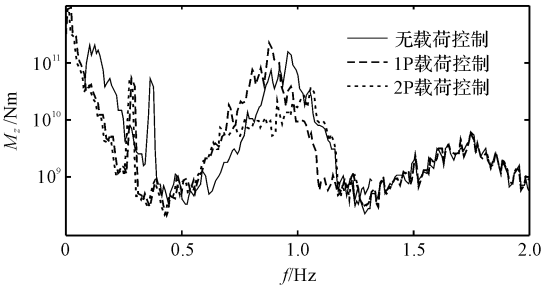
表1 风力发电机组WD1500-77主要参数表

名称	参数
风轮直径/m	77
桨叶数	3
切入风速/(m·s ⁻¹)	3
切出风速/(m·s ⁻¹)	25
变速比	104.494
电机惯量/kgm	113
高速轴惯量/kgm	10
低速轴刚度/(Nm·rad ⁻¹)	1.2E+8
低速轴惯量/kgm	2.3E+5
额定功率/kW	1 500
额定电机转矩/kNm	8.715
额定风速/(m·s ⁻¹)	11.2
转速范围/(r·min ⁻¹)	1 100 ~ 1 800

设 M_y 为叶片根部面外弯曲力矩, M_z 为主轴的弯曲力矩,在旋转坐标系下与固定坐标系下分别分析桨叶的载荷情况,可以有效区分旋转部件的载荷与固定部件的载荷。在平均风速10 m/s,偏航误差为0°情况下仿真效果如图(3 ~ 4)所示。



(a) 固定坐标系载荷My对比图

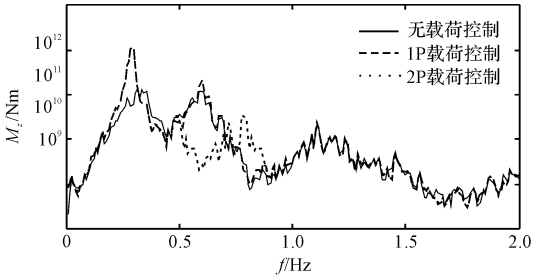


(b) 固定坐标系载荷Mz对比图

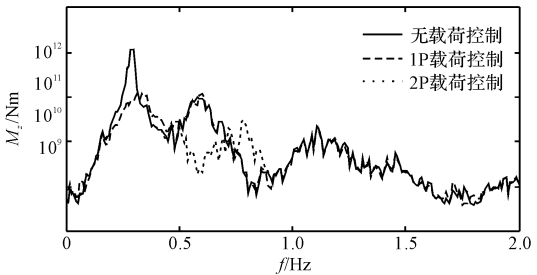
图3 固定坐标系载荷My与Mz对比图

从图3中可以看出,在3P频率(0.86 Hz)处,采用2P载荷控制的载荷 M_y 与 M_z 要低于采用其他控制的载荷;以载荷 M_y 为例,采用其他控制方法的载荷大概为1e11 Nm,而采用2P控制的载荷只有2e10 Nm左右。这说明采用2P控制,有效减小小轮毂固定坐标系上倾翻弯矩 M_{ilt} (即 $1.5M_{y2}^{cm}$)与偏航弯矩 M_{yaw} (即 $1.5M_{y3}^{cm}$)的3P谐波分量,即有效减小轮毂固定坐标系上的载荷波动。

旋转坐标系载荷 M_y 与 M_z 对比图如图4所示。



(a) 荷载My对比图



(b) 荷载Mz对比图

图4 旋转坐标系载荷My与Mz对比图

从图4中可以看出,在2P频率(0.574 Hz左右)处,采用2P载荷控制的载荷 M_y 与 M_z 要低于采用其他控制的载荷;以载荷 M_y 为例,采用其他控制方法的

载荷大概为 $1e11\text{ Nm}$, 而采用 2P 控制的载荷在 $1e10\text{ Nm}$ 以下。这说明采用 2P 控制, 可以有效减小旋转部件载荷的 2P 谐波分量。

在频域上分析不同控制算法对载荷影响, 1P、2P、3P 的频率为:

$1P=0.287\text{ Hz}, 2P=0.574\text{ Hz}, 3P=0.861\text{ Hz}$

为进一步研究不同控制算法下部件的疲劳损伤, 得出对比表如表(2~3)所示。

表 2 S-N slope =4 各种控制策略疲劳损伤比较

载荷名	无载荷控制	1P 控制	2P 控制
旋转坐标系 M_y	100%	71.66%	94.38%
旋转坐标系 M_z	100%	71.66%	92.82%
固定坐标系 M_y	100%	97.6%	79.86%
固定坐标系 M_z	100%	98.88%	83.02%

表 3 S-N slope =10 各种控制策略疲劳损伤比较

载荷名	无载荷控制	1P 控制	2P 控制
旋转坐标系 M_y	100%	65.34%	98.85%
旋转坐标系 M_z	100%	64.34%	96.47%
固定坐标系 M_y	100%	80.35%	83.17%
固定坐标系 M_z	100%	85.12%	91.54%

表 2 和表 3 结果来源于 bladed 软件的雨流法后处理的当量等效载荷, 由于风机大部分组件都是钢材料, 表 2 更具有参考价值。

从表 2 可以知道, 1P 控制对于固定部件(主轴承、塔架、偏航轴承)的载荷没有减小。这是由于 bladed 软件的雨流法后处理没有考虑平均值, 而 1P 控制只是减小了固定部件载荷的平均值, 对于载荷波动效果不明显。相对而言, 2P 控制的静止坐标系下载荷 M_y 与 M_z 要小很多, 这表明 2P 控制可以有效减小固定部件疲劳载荷。

4 结束语

针对不平衡载荷的问题, 基于风机的线性化模型本研究提出了 2P 载荷控制策略; 根据状态反馈控制器的原理给出了具体的应用方法, 利用状态反馈控制器实现不平衡载荷的实时控制。

在旋转坐标系下与固定坐标系下分别分析载荷情况, 结果表明, 相对于传统的 1P 载荷控制技术, 2P 载荷控制技术可以有效减小旋转部件载荷的 2P 谐波分量与固定部件疲劳载荷。研究表明, 基于状态反馈控制器的 2P 载荷控制器可以有效抑制不平衡载荷。

参考文献(References):

[1] SELVAM K, KANEV S, ENGELEN VAN T, et al. Feed-back-feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction[J]. **Robust and Nonlinear Control**, 2009, 19(1):72-91.

[2] KARL S A, HANS G M, GUNJIT B, et al. A comparison of multi-blade coordinate transformation and direct periodic techniques for wind turbine control design[C]. 47th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, New York: American Insttinde of Aeronautics and Astronautics, 2009.

[3] LARSEN T J, MADSHV H A, THOMSEN K. Active load reduction using individual pitch, based on local blade flow measurement[J]. **Wind Energy**, 2005, 8(1):67-80.

[4] TONY BURTON 著, 武鑫译. 风能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[5] Hong wei LIU, Yong gang LIN, Wei LI. Study on control strategy of individual blade pitch-controlled wind turbine[J]. **Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation**, 2006, 57(3):6489-6492.

[6] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.

[7] BOSSANYI E A. Individual blade pitch control for load reduction[J]. **Wind Energy**, 2003, 6(2):119-128.

[8] BOSSANYI E A. Wind turbine contol for load reduction[J]. **Wind Energy**, 2003, 6(3):229-224.

[9] 金鑫, 王亚明, 李浪, 等. 基于 LQG 的独立变桨控制技术对风电机组气动载荷影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22):6164-6170.

[10] 李辉, 杨超, 胡姚刚, 等. 抑制风力机疲劳载荷的直接比例谐振独立变桨控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3):79-85.

[11] 刘浩明, 唐俏俏, 张占奎, 等. 基于位置反馈和载荷联合反馈的独立变桨距控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14):3798-3805.

[12] 杨超, 李辉. 降低风力机载荷的一种直接 PR 独立变桨控制策略[C]. 中国电机工程学会第 13 届青年学术会议, 重庆: 中国机电工程学会, 2014.

[13] 杨文韬, 耿华, 肖帅, 等. 大型风电机组的比例-积分-谐振独立变桨距控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1):87-92.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式: