

基于改进DMC的风力机智能叶片多目标襟翼控制

张文广¹, 韩 越², 王奕枫², 刘瑞杰²

(1. 华北电力大学, 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;
2. 华北电力大学, 工业过程测控新技术与系统北京市重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 为研究尾缘襟翼在风力机主动降载和功率控制方面的效果,以NREL 5 MW参考风力机为研究对象,在改进FAST的带有尾缘襟翼的气弹仿真平台基础上,使用改进动态矩阵控制(DMC)方法,将独立襟翼控制器与集成襟翼控制器结合,提出DMC多目标襟翼控制策略。仿真结果表明,稳定风况及湍流风况下,独立襟翼控制器均能很好地降低叶根疲劳载荷;阶跃风况下与传统DMC控制器相比,使用改进DMC的集成襟翼控制器对叶轮功率的控制效果更好;湍流风况下与PID襟翼控制策略相比,DMC多目标襟翼控制策略有更好的控制效果,能使叶根弯矩标准差降低52.64%,叶轮功率标准差降低74.62%。

关键词: 风力机; 功率控制; 气动载荷; 智能叶片; 尾缘襟翼; 动态矩阵控制

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

随着风力发电技术的不断发展,风力机功率和叶片尺寸也不断增加。目前,维斯塔斯设计制造的8 MW风力机叶片长度已达80 m^[1]。风力机叶片尺寸增大使风力机受到的疲劳和极限载荷增大,导致风力机使用寿命降低、维护成本增加。在此背景下,研究者提出智能叶片概念。智能叶片可增大能量捕获,减小结构载荷,提高风力机使用寿命。现有的智能叶片技术中,尾缘襟翼是最为可行的智能叶片主动降载技术^[2]。

国内外学者对带有尾缘襟翼的风力机进行了大量的研究。张明明等^[3]在带有尾缘襟翼的风力机仿真平台上设计自适应襟翼控制器,仿真表明,与传统变桨控制器相比,叶根挥舞弯矩标准差可降低30%。Smit等^[4]研究了尾缘襟翼大小及位置对叶轮能量捕获的影响,仿真表明,靠近叶尖处的尾缘襟翼对增大叶轮能量捕获是最有效的。余 畏等^[5]以NREL 5 MW参考风力机为测试风力机,采用PID变襟翼控制器,研究柔性尾缘襟翼的叶片降载性能,仿真表明,在极限和标准湍流风

况下,尾缘襟翼控制器均能有效降低叶根疲劳载荷。目前,大多数研究者研究了尾缘襟翼的叶片降载控制,也有部分研究者研究了尾缘襟翼的功率控制,但是,同时对叶片疲劳载荷及叶轮功率进行控制的尾缘襟翼多目标控制策略尚未有详细研究。因此,本文以NREL 5 MW参考风力机^[6]为测试风力机,在基于FAST^[7]改进的带有尾缘襟翼的风力机气弹仿真平台上,使用改进DMC方法,研究以叶片主动降载和功率控制为目标的多目标襟翼控制策略。

1 仿真模型

1.1 风力机模型

本文选用NREL的FAST作为风力机气弹特性仿真平台。FAST已通过GL等相关机构认证,仿真结果可信度高^[8],对于风力机复杂的气弹耦合情况^[9],FAST也能进行较好模拟。本文通过对FAST进行二次开发,结合Matlab/Simulink软件设计带有尾缘襟翼结构的风力机气弹仿真平台,并使用NREL 5 MW参考风力机作为测试风力机,该风力机叶轮直径为126 m,轮毂直径为3 m,叶片

收稿日期: 2017-05-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0602105); 北京市共建项目

通信作者: 张文广(1975—), 男, 博士、副教授, 主要从事风力机振动检测及主动控制方面的研究。zwg@ncepu.edu.cn

长度为 61.5 m, 额定风速为 11.4 m/s, 切入风速为 3 m/s, 切出风速为 25 m/s, 轮毂高度为 90 m, 叶片数为 3。

1.2 风场模型

本文选用 TurbSim^[10] 对实际湍流风场进行模拟。TurbSim 是由 NREL 开发的一个随机、全流场的湍流风生成工具, 它采用冯卡曼模型来生成在二维垂直矩形网格中模拟三维风速向量的时间序列, 具有较高的真实性。

1.3 尾缘襟翼参数

为使尾缘襟翼的气动性能达到最优, 本文使用翼型设计分析工具 Xfoil^[11], 使用文献[12]中的方法对叶片进行尾缘襟翼结构设计和翼型升阻力系数分析。出于实际应用考虑, 将 5 MW 参考风力机原有 61.5 m 长的叶片分为 30 段。避开叶尖区域, 在叶片 24 至 29 叶素段共计 6 叶素段上安装占弦比为 25% 的尾缘襟翼, 并将改造后的叶片应用到 5 MW 参考风力机的 3 个叶片上。将安装的尾缘襟翼视为一个整体, 同时进行控制。带有尾缘襟翼的 NREL 5MW 参考风力机叶片如图 1 所示。

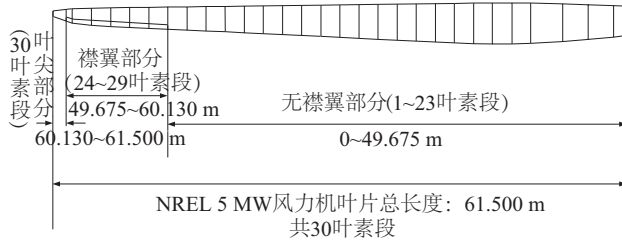


图1 带尾缘襟翼的NREL 5 MW参考风力机叶片示意图

Fig. 1 Description of NREL 5 MW reference wind turbine blade with trailing edge flap

2 控制器设计

本文提出的 DMC 多目标襟翼控制策略包含独立襟翼 (individual flap, IF) 控制器和集成襟翼 (collective flap, CF) 控制器。其中, IF 控制器通过改变叶片襟翼摆角来减小叶根载荷的波动, 从而减小叶根疲劳载荷, 三叶片襟翼角变化量不同; CF 控制器通过改变叶片襟翼摆角来控制叶轮转矩, 使叶轮功率维持在设定值, 三叶片襟翼角变化量相同。将 CF 控制器的控制信号线性叠加到 IF 控制器的输出

信号上, 即可在叶片主动降载的同时达到叶轮功率控制的效果, 这也是本文设计 DMC 多目标襟翼控制策略的控制目标。

2.1 动态矩阵控制原理

动态矩阵控制方法是一种基于对象阶跃响应的预测控制算法^[13], 该方法分为预测模型、滚动优化和反馈校正 3 个步骤。动态矩阵控制方法在其本身的建模时域 N 内, 通过阶跃模型向量 \mathbf{a} 预测对象模型未来的动态行为, 并在控制要求的约束条件和性能要求上, 滚动地求解预测时域 P 内的最优控制作用, 在控制时域 M 内实施控制。最后, 通过检测模型实际输出来修正对未来动态行为的预测, 完成当前步长的控制循环。动态矩阵控制器的成本函数为:

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^P q_i \left[w(k+i) - \tilde{y}_m(k+ik) \right]^2 + \sum_{j=1}^M r_j \Delta u^2(k+j-1) \quad (1)$$

式中, $w(k+i)$ —— $k+i$ 时的给定值; $\tilde{y}_m(k+ik)$ —— k 时刻预测模型在控制作用下对 $k+i$ 时的预测值; $\Delta u(k+j-1)$ —— $k+j-1$ 时的控制量变化值; q_i —— 输出量偏差的权值; r_j —— 控制偏差量的权值。控制器成本函数的目的是使得被控量偏差最小, 同时抑制控制量的剧烈变化。

2.2 IF 控制器

IF 控制器的控制目标为: 抑制叶根挥舞弯矩 (简称为叶根弯矩) 波动, 实现叶片主动降载。针对叶根弯矩随风速的变化特性, 本文基于多模型多变量 DMC 控制方法来设计 IF 控制器。

2.2.1 控制器设计

采用 d - q 坐标变换方法^[14], 将叶片旋转坐标系下的叶根弯矩 M_{y_1} 、 M_{y_2} 、 M_{y_3} 变化为叶根弯矩平均值 M_{avg} 、叶根弯矩俯仰分量 M_{tilt} 和叶根弯矩偏航分量 M_{yaw} 。叶根弯矩的 d - q 坐标变换的公式如式(2):

$$\begin{bmatrix} M_{\text{avg}} \\ M_{\text{tilt}} \\ M_{\text{yaw}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \cos \theta_1 & \frac{2}{3} \cos \theta_2 & \frac{2}{3} \cos \theta_3 \\ \frac{2}{3} \sin \theta_1 & \frac{2}{3} \sin \theta_2 & \frac{2}{3} \sin \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{y_1} \\ M_{y_2} \\ M_{y_3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, θ_1 、 θ_2 、 θ_3 —— 风力机 3 个叶片的方位角, 且

3 个叶片的方位角各相差 120° 。

经过 $d-q$ 变换,首先将与叶片疲劳载荷相关的叶根弯矩俯仰分量 M_{tilt} 和叶根弯矩偏航分量 M_{yaw} 分离出来,然后通过 IF 控制器计算出相应的襟翼角俯仰分量 β_{tilt} 和偏航分量 β_{yaw} ,最后使用 $d-q$ 逆变换得到 3 个襟翼角度的控制量 β_1 、 β_2 、 β_3 。IF 控制器通过改变襟翼角的偏航和俯仰分量,减小叶根俯仰弯矩与叶根偏航弯矩,从而实现叶片主动降载。襟翼角逆变换的公式如式(3):

$$\begin{cases} \beta_1 = \beta_{\text{yaw}} \sin(\theta_1) + \beta_{\text{tilt}} \cos(\theta_1) \\ \beta_2 = \beta_{\text{yaw}} \sin(\theta_2) + \beta_{\text{tilt}} \cos(\theta_2) \\ \beta_3 = \beta_{\text{yaw}} \sin(\theta_3) + \beta_{\text{tilt}} \cos(\theta_3) \end{cases} \quad (3)$$

针对风力机叶根弯矩在不同风速下的变化,本文使用多模型多变量 DMC 方法来对叶根疲劳载荷进行控制。在 3, 4, \dots , 25 m/s 风况及 11.4 m/s 额定风况下,测得襟翼角俯仰分量 β_{tilt} 对叶根弯矩偏航分量 M_{yaw} 和俯仰分量 M_{tilt} 的阶跃响应向量 $\mathbf{a}_{\text{tilt,yaw}}$ 、 $\mathbf{a}_{\text{tilt,tilt}}$,以及襟翼角偏航分量 β_{yaw} 对叶根弯矩偏航分量 M_{yaw} 和俯仰分量 M_{tilt} 的阶跃响应向量 $\mathbf{a}_{\text{yaw,yaw}}$ 、 $\mathbf{a}_{\text{yaw,tilt}}$,上述阶跃响应向量作为 IF 控制器的模型向量。其他风速下的模型向量采用线性插值法近似得到。

2.2.2 襟翼角约束变换

为模拟襟翼结构的实际特性,需要对襟翼角的变化速率和摆动角度进行约束,但因 IF 控制器控制量为襟翼角的偏航与俯仰分量,无法直接对襟翼角的变化范围和速率进行约束。为解决这一问题,对式(3)变换可得:

$$\begin{cases} \beta_1 = \sqrt{\beta_{\text{yaw}}^2 + \beta_{\text{tilt}}^2} \sin(\theta_1 + \varphi) \\ \beta_2 = \sqrt{\beta_{\text{yaw}}^2 + \beta_{\text{tilt}}^2} \sin(\theta_2 + \varphi) \\ \beta_3 = \sqrt{\beta_{\text{yaw}}^2 + \beta_{\text{tilt}}^2} \sin(\theta_3 + \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

式中, φ ——变换后的角度, $\varphi = \arctan \frac{\beta_{\text{tilt}}}{\beta_{\text{yaw}}}$, $\beta_{\text{yaw}} \neq 0$ 。

由式(4)及襟翼结构的实际特性可得, $\beta_{\text{yaw}}(k) \neq 0$ 时,襟翼角幅值与速率约束为:

$$\begin{cases} \sqrt{\beta_{\text{yaw}}^2(k) + \beta_{\text{tilt}}^2(k)} \leq 20 \\ \sqrt{(\beta_{\text{yaw}}(k) - \beta_{\text{yaw}}(k-1))^2 + (\beta_{\text{tilt}}(k) - \beta_{\text{tilt}}(k-1))^2} < 30DT \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\beta_{\text{yaw}}(k)$ ——襟翼角偏航分量在 k 时刻的值;
 $\beta_{\text{tilt}}(k)$ ——襟翼角俯仰分量在 k 时刻的值;
 $\beta_{\text{yaw}}(k-1)$ ——襟翼角偏航分量在 $k-1$ 时刻的值;
 $\beta_{\text{tilt}}(k-1)$ ——襟翼角俯仰分量在 $k-1$ 时刻的值;
 DT ——步长间隔时间。

$\beta_{\text{yaw}}(k) = 0$ 时,襟翼角幅值与速率约束为:

$$\begin{cases} \sqrt{\beta_{\text{tilt}}^2(k)} \leq 20 \\ \sqrt{(\beta_{\text{yaw}}(k-1))^2 + (\beta_{\text{tilt}}(k) - \beta_{\text{tilt}}(k-1))^2} < 30DT \end{cases} \quad (6)$$

2.3 CF 控制器

CF 控制器的控制目标为:在襟翼角 β_{rot} 的作用下,减少叶轮功率 P_{rot} 的波动。针对襟翼角与叶轮功率之间的非线性特性,本文使用改进的非线性 DMC 控制方法来设计 CF 控制器。

传统 DMC 控制器在对非线性模型进行控制时会出现控制性能变差的现象^[15]。图 2 为在翼型攻角为 0° 时襟翼角变化对翼型升阻力系数的影响,襟翼顺时针运动为正,逆时针运动为负^[5]。由图 2 可见,襟翼角的变化对翼型升阻力系数的影响是非线性的,导致襟翼角的变化与叶轮功率之间呈非线性关系。这会使传统 DMC 控制器的模型向量失配,导致控制器计算得到的预测变化量与模型实际变化量产生偏差。为解决这一问题,本文改进传统 DMC 控制方法,在原有的预测模型、滚动优化、反馈校正 3 个环节后增加输出校正环节,用于校正因模型向量失配产生的控制量偏差。输出校正环节的公式如式(7)。

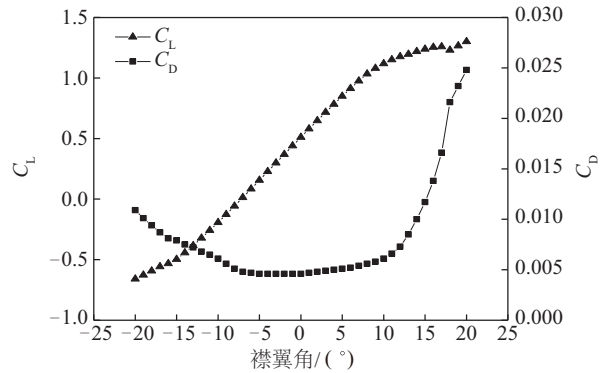


图2 襟翼角对翼型升阻力系数的影响
(翼型攻角为 0°)

Fig. 2 Influence of flap angle for airfoil's C_L and C_D
(when the airfoil's attack angle is 0°)

$$\begin{cases} u(k) = F(a(N)(\tilde{u}(k) - u(k-1)) + G(u(k-1))) \\ du = u(k) - u(k-1) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $u(k)$ —— k 时刻控制器校正后的控制量;
 $F(x)$ —— 使用最小二乘法拟合得到的叶轮功率-襟翼角的函数; $a(N)$ —— 襟翼角-叶轮功率的模型向量第 N 处的值; $\tilde{u}(k)$ —— k 时刻控制器原控制量;
 $u(k-1)$ —— $k-1$ 时刻的控制器控制量; $G(x)$ —— 使用最小二乘法拟合得到的襟翼角-叶轮功率的函数; du —— 该步长内控制量的变化量。

使用输出校正环节, 将控制器输出的原襟翼角控制量转换为校正后的襟翼角控制量, 从而使叶轮功率达到 DMC 控制器预测时域 P 内的最优控制效果。由襟翼结构的实际特性可得: 叶轮功率控制器的襟翼角变化范围为 $-20 < u(k) < +20$, 变化速率为 $0 < |du| < 30DT$ 。

为达到叶片主动降载及叶轮功率控制的目的, DMC 多目标襟翼控制策略将 IF 控制器与 CF 控制器的控制信号线性叠加。图 3 为 DMC 多目标襟翼控制策略控制示意图。

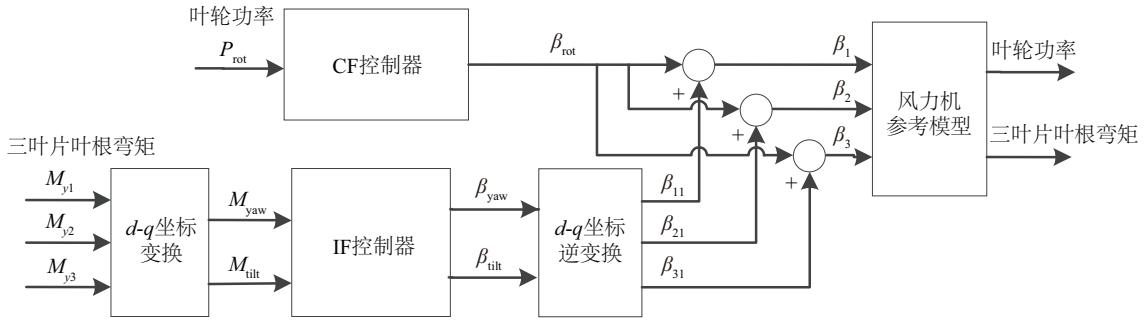


图3 DMC多目标襟翼控制策略控制示意图

Fig. 3 Control illustration of DMC multi-target flap control strategy

3 仿真实验

本节采用 DMC 多目标襟翼控制策略, 对智能叶片风力机进行仿真实验, 研究 DMC 多目标襟翼控制策略在叶片主动降载和叶轮功率控制方面的控制效果。风力机仿真全程采用标准控制^[16], 即风力机采用变速变桨距控制。

3.1 叶片主动降载控制仿真

在区域 2、区域 3 稳定风况及平均风速为额定风速的湍流风况下, 使用 IF 控制器分别对风力机进

行仿真。仿真时间为 200 s, 区域 2、区域 3 稳定风速分别为 8.0、16.0 m/s, 湍流风况为平均风速 11.4 m/s 的湍流风, 湍流强度 2%。t=100 s 时, IF 控制器开始控制。8.0 m/s 与 16.0 m/s 稳定风况下, 叶片 1 叶根弯矩与叶片 1 襟翼角变化如图 4a、图 4b 所示。11.4 m/s 湍流风况下, 叶片 1 叶根弯矩与叶片 1 襟翼角变化如图 4c 所示。由图 4 可看出, 襟翼角分别在 A、B、C 点开始变化, 叶根弯矩的标准差变化率分别为 94.27%、97.14%、65.18%。仿真结果表明, IF 控制器对不同风况下的叶根弯矩均能起到控制作用, 有效抑制了叶根弯矩波动。

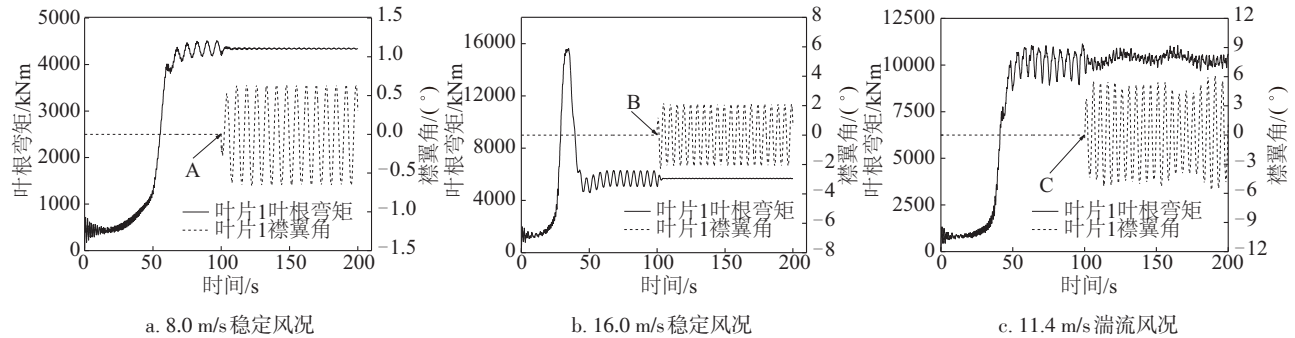


图4 叶片1叶根弯矩及襟翼角变化

Fig. 4 Blade root moment and flap angle variation of blade 1

3.2 叶轮功率控制仿真

在阶跃风况下,使用 CF 控制器控制叶轮功率,对风力机进行仿真实验,并与传统 DMC 控制器进行对比。仿真时间为 200 s, $t=100$ s 时风速由 11.4 m/s 变为 12.0 m/s, CF 控制器开始控制。

传统 DMC 控制器与 CF 控制器作用下的叶片 1

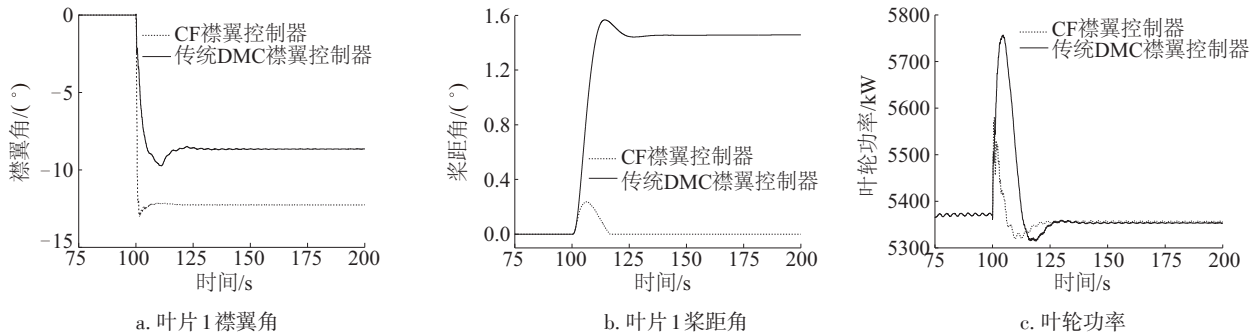


图5 叶轮功率控制仿真控制性能对比

Fig. 5 Control performance comparison of rotor power control simulation

3.3 阶跃风况下风力机控制仿真

在阶跃风况下,采用 DMC 多目标襟翼控制策略,对风力机进行仿真。仿真时间为 200 s, $t=100$ s 时风速由 11.4 m/s 变化为 12.0 m/s, DMC 多目标襟翼控制策略开始作用,并与无襟翼控制器作用的情况进行对比。有无襟翼控制器作用下的叶片 1 襟翼角对比、叶根弯矩对比及叶轮功率对比如图 6

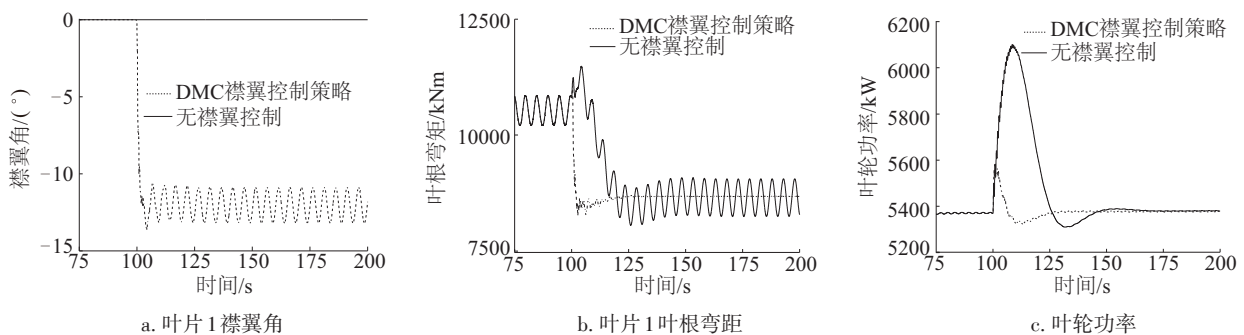


图6 DMC 襟翼控制策略与无襟翼控制控制性能对比

Fig. 6 Control performance comparison between DMC flap control strategy and no flap controller

3.4 湍流风下风力机控制仿真

在湍流风况下,采用 DMC 多目标襟翼控制策略,对风力机进行仿真实验,并与 PID 襟翼控制策略作用下的风力机进行比较。湍流风场平均风速为 12 m/s,湍流强度为 2%,总仿真时间 200 s,

襟翼角、叶片 1 桨距角与风力机叶轮功率对比如图 5 所示。与传统 DMC 控制器相比,使用改进 DMC 方法的 CF 控制器的调节时间超调量减小 46.83%,调节时间减少 58.62%,其桨距角幅值减小 84.8%。这表明,CF 控制器的控制速度更快,控制效果更好,能够减小桨距动作,也能较好地控制叶轮功率。

所示。

由图 4、图 5a、图 6a 可见,将 CF 控制器的控制量与 IF 控制器的控制量线性叠加的 DMC 多目标襟翼控制策略是有效的。在 DMC 多目标襟翼控制策略作用下,风力机叶根弯矩标准差减小 98.65%,叶轮功率调节时间为 6 s。这说明,DMC 多目标襟翼控制策略对叶根弯矩波动和叶轮功率起到较好的控制效果。

DMC 多目标襟翼控制策略在 $t=100$ s 时开始作用。在相同的湍流风况下,将 PID 襟翼控制策略、DMC 多目标襟翼控制策略与无襟翼控制作用下的风力机进行叶轮功率、叶根弯矩、桨距角的仿真对比。

湍流风风速变化如图 7 所示。100~200 s 时

叶轮功率、叶片 1 叶根弯矩、桨距角对比如图 8~图 10 所示。由图 8 及表 1 可知,与无襟翼控制下的风力机相比,DMC 多目标襟翼控制策略作用下的风力机叶轮功率标准差减少 74.62%。与 PID 襟翼控制策略作用下的风力机相比,DMC 多目标襟翼控制策略作用下的风力机叶轮功率标准差减少 23.65%。

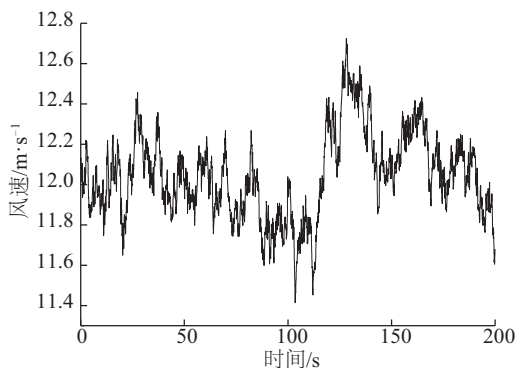


图7 湍流风速变化

Fig. 7 Variation of turbulent wind velocity

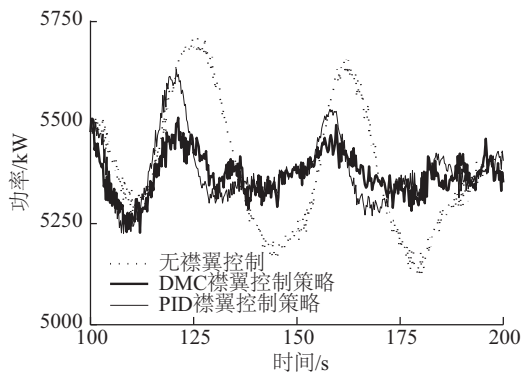


图8 叶轮功率对比

Fig. 8 Comparison of rotor power

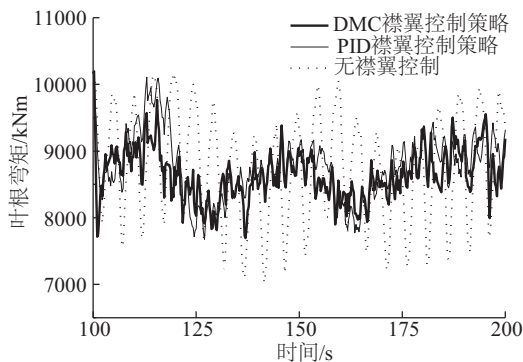


图9 叶片1叶根弯矩对比

Fig. 9 Comparison of blade 1's blade root moment

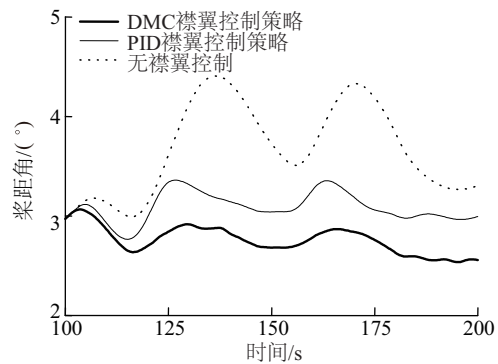


图10 叶片1桨距角对比

Fig. 10 Comparison of blade 1's pitch angle

由图 9 及表 1 可知,与无襟翼控制相比,DMC 多目标襟翼控制策略作用下的叶片 1 叶根弯矩标准差减少 52.64%。与 PID 襟翼控制策略相比,DMC 多目标襟翼控制策略作用下的叶片 1 叶根弯矩标准差减少 20.92%。

由图 10 及表 1 可知,与 PID 襟翼控制策略作用下相比,DMC 多目标襟翼控制策略作用下的桨距角平均值减小 12.46%,在叶轮功率控制和叶片主动降载方面的性能更好。

表 1 为湍流风况下控制策略性能对比。可看出,DMC 多目标襟翼控制策略在实际湍流风况下有较好的控制效果,能减少变桨机构的动作,其控制效果要优于传统 PID 襟翼控制策略。

表1 湍流风况下襟翼控制策略控制性能对比

Table 1 Performance of different flap control strategy comparison at turbulent wind condition

参数	无襟翼	PID	DMC
叶根弯矩标准差/kNm	803.63	481.32	380.62
叶轮功率标准差/kW	159.63	53.06	40.51
桨距角平均值/(°)	3.85	3.12	2.73

4 结 论

本文以 NREL 5 MW 参考风力机为测试风力机,在基于 FAST^[8]改进的带有尾缘襟翼的风力机气弹仿真平台上,使用改进 DMC 的多目标襟翼控制策略。该控制策略将 IF 控制器与 CF 控制器结合,以叶片主动降载和叶轮功率控制为目标,经过仿真实验,得出以下结论:

1)在区域 2、区域 3 稳定风况及平均风速为额定风速的湍流风况下,IF 控制器能使叶根弯矩标准

差分别降低 94.27%、97.14%、65.18%。这说明,本文使用的 IF 控制器对叶片主动降载有较好的控制效果。

2)在阶跃风况下,使用改进 DMC 的 CF 控制器对风力机进行控制。仿真结果表明,与传统 DMC 控制器相比,叶轮功率超调量减少 46.83%,调节时间减少 58.62%,其桨距角幅值减小 84.8%。可见本文使用的改进 DMC 的 CF 控制器具有较好的控制效果。

3)在湍流风况下,与无襟翼控制相比,DMC 多目标襟翼控制策略使叶根弯矩标准差、叶轮功率标准差分别减少 52.64%、74.62%。与 PID 襟翼控制策略相比,叶根弯矩标准差、叶轮功率标准差和桨距角平均值分别减少 20.92%、23.65% 和 12.46%。这说明,DMC 多目标襟翼控制策略在实际湍流风况下也有较好的控制效果,能够减少变桨机构的动作,其控制性能要优于传统 PID 襟翼控制策略。

[参考文献]

- [1] 黎 兴. 维斯塔斯世界最大风机 8 MW 风机在英国完成装机 [EB/OL]. <http://newenergy.in-en.com/html/newenergy-2281172.shtml>, 2016-09-09.
- [1] Li Xing. The largest wind turbine of the world——Vestas 8 MW wind turbine have been installed in Britian [EB/OL]. <http://newenergy.in-en.com/html/newenergy-2281172.shtml>, 2016-09-09.
- [2] Couchman I, Castaignet D, Poulsen N K, et al. Active load reduction by means of trailing edge flaps on a wind turbine blade [A]. 2014 American Control Conference [C], Portland, USA, 2014.
- [3] Zhang M, Yang H, Xu J. Numerical investigation of azimuth dependent smart rotor control on a large-scale offshore wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2017, 105: 248—256.
- [4] Smit J, Bernhammer L O, Navalkar S T, et al. Sizing and control of trailing edge flaps on a smart rotor for maximum power generation in low fatigue wind regimes [J]. *Wind Energy*, 2016, 19(4): 607—624.
- [5] 余 畏, 张明明, 徐建中. 基于柔性尾缘襟翼的风电叶片气动载荷智能控制[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(6): 1055—1060.
- [5] Yu Wei, Zhang Mingming, Xu Jianzhong. Effect of smart rotor control using a deformable trailing edge flap on load reduction under normal and extreme turbulence [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(6): 1055—1060.
- [6] Resor B R. Definition of a 5 MW/61.5 m wind turbine blade reference model[R]. Albuquerque, New Mexico, USA, Sandia National Laboratories, SAND2013-2569 2013, 2013.
- [7] Jonkman J M, Buhl J M L. FAST user's guide [R]. NREL/EL-500-38230, Technical Report: Denver, CO, USA, 2005.
- [8] Manjock A. Evaluation report: Design codes FAST and ADAMS for load calculations of onshore wind turbines [R]. Germanischer Lloyd Wind Energie GmbH, Rept, 2005, 72042.
- [9] 李德源, 莫文威, 夏鸿建, 等. 水平轴风力机柔性叶片气弹耦合分析[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(3): 734—742.
- [9] Li Deyuan, Mo Wenwei, Xia Hongjian, et al. The aeroelastic coupling analysis of flexible blades for a horizontal axis wind turbine [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(3): 734—742.
- [10] Jonkman B J. TurbSim user's guide: Version 1.50 [R]. 2009.
- [11] Drela M, Youngren. XFOIL 6.9 user primer [EB/OL]. http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/xfoil_doc.txt, 2016-11-01.
- [12] 张文广, 李腾飞, 刘吉臻, 等. 尾缘襟翼结构参数对大型风机气动性能影响的仿真研究[J]. *可再生能源*, 2016, 34(12): 1826—1833.
- [12] Zhang Wenguang, Li Tengfei, Liu Jizhen, et al. Simulation study on trailing edge flaps structure parameters affecting aerodynamic performance of large wind turbines [J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, 34(12): 1826—1833.
- [13] 席裕庚. 预测控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013, 9—11.
- [13] Xi Yugeng. Predictive control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013, 9—11.
- [14] 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.
- [14] Lu Xiaoping, Gu Haigang, Lin Yonggang, et al. Research on the load control of wind turbines based on individual pitch technology [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(11): 1591—1598.
- [15] 邹志云, 于德弘, 郭 宁, 等. 一种新型非线性

- Hammerstein 系统动态矩阵控制算法[J]. 计算机与应用化学, 2008, 25(4): 432—436.
- [15] Zou Zhiyun, Yu Dehong, Guo Ning, et al. A novel nonlinear Hammerstein system dynamic matrix control algorithm [J]. Computers & Applied Chemistry, 2008, 25(4): 432—436.
- [16] Aquino B B. New generator control algorithms for smart-bladed wind turbines to improve power capture in below rated conditions [D]. Amherst: University of Massachusetts-Amherst, 2014.

IMPROVED DMC-BASED SMART BLADE MULTI-TARGET FLAP CONTROL OF WIND TURBINE

Zhang Wenguang¹, Han Yue², Wang Yifeng², Liu Ruijie²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Key Laboratory of New Technology and System on Measuring and Control for Industrial Process, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to investigate the effect of trailing edge flap on active load alleviation and power control of wind turbine, A multi-target flap control strategy was designed using an improved dynamic matrix control method on the NREL 5 MW reference wind turbine. The strategy combines individual flap controller and collective flap controller to designed for the purpose of blade active load alleviation and rotor power control on wind turbine simulation platform which developed by an aeroelastic simulator-FAST. The simulation results showed that at both steady and turbulent wind condition, the individual flap controller can reduce the blade fatigue load effectively. At step wind condition, the collective flap controller which uses improved DMC method performs better than the original DMC controller for the control target of rotor power. Compare with the PID controller strategy at turbulent wind condition, the DMC multi-target flap control strategy have a better performance, which can reduce the standard deviation of blade root moment by 52.64% and reduce the standard deviation of rotor power by 74.62%.

Keywords: wind turbines; power control; aerodynamic loads; smart blade; trailing edge flap; dynamic matrix control