

海上风电机组偏航系统抗台风优化控制策略

本柏忠¹, 侯力², 张丹^{1,2}, 徐晓惠³

(1. 四川工程职业技术学院 教务处, 四川 德阳 618000;

2. 四川大学 制造科学与工程学院, 四川 成都 610065;

3. 西华大学 汽车与交通学院, 四川 成都 610039)

摘要: 鉴于台风风速的强非平稳性会导致较大的风力发电机组极端荷载, 风电机组偏航系统频繁启停会影响机组安全稳定性的问题, 设计了一种变结构模型参考自适应转速辨识器, 用于对风电机组偏航电机的转速进行有效辨识, 通过建立偏航电机无传感矢量控制系统来达到优化偏航系统抗台风控制策略的目的。所提出的控制策略在风场进行了试验验证, 其结果表明, 风电机组偏航电机能快速响应使风轮追踪主风向, 叶片根部和塔筒底部的等效疲劳荷载至少降低了 1.28%, 机组的叶尖速比和风能捕获系数分别稳定在 0.948 和 0.483 附近, 偏航次数降低了 13.5%。

关键词: 风力发电机; 偏航系统; 抗台风; 优化控制; VS-MRAS 转速辨识器

中图分类号: TK89 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19301

Optimization Control Strategy of Anti-typhoon for Yaw System of Offshore Wind Turbine

BEN Bozhong¹, HOU Li², ZHANG Dan^{1,2}, XU Xiaohui³

(1. Educational Administration Office, Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, Sichuan, China;

2. School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

3. School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China)

Abstract: Strong non-stationary of typhoon wind speed can lead to extremely larger load of wind turbine, and frequent starting-stopping of the wind turbine yaw system can affect the wind turbine's safety and stability. A variable structure model reference adaptive system (VS-MRAS) observer for speed identification of the yaw motor was proposed, which was used for effectively identifying the yaw motor's speed of the wind turbine. A sensorless vector control system of the yaw motor was established in order to optimize control strategy of anti-typhoon for the yaw system of the wind turbine. The control strategy proposed was tested and verified in the wind field. Test results show that the yaw motor responds to make wind wheel track main wind direction quickly, and the equivalent fatigue load at the root of the blade and the bottom of the tower is reduced by at least 1.28%. Furthermore, the blade's tip speed ratio and wind energy capture coefficient of the wind turbine are stable around 0.95 and 0.483 respectively, and its yaw frequency is reduced by 13.5%.

Key words: wind turbine; yawing system; anti-typhoon; optimization control; VS-MRAS speed identification observer

台风风速的强非平稳性会导致风力发电机组产生较大的极端荷载, 使机组侧面受风的载荷比正面迎风至少大 20%, 这就需要风电机组偏航系统在台风到来时, 具有较高的可靠性和鲁棒性。然而根据相关文献统计, 我国沿海风场的风电机组偏航系统动作次数频繁, 已成为影响风机稳定运行的重要因素, 因此研究偏航系统抗台风

控制策略是目前海上风力发电机组设计的重要内容^[1-2]。

作为风电机组偏航系统的驱动装置之一, 偏航电机是偏航系统的重要组成部分, 其作用是及时响应使偏航系统去主动迎合台风的实时变化。考虑到海上恶劣自然条件和环境条件对机组运行的影响, 偏航电机转速传感器容易受到外部气

基金项目: 国家自然科学基金项目(11402214); 四川省高新技术产业发展重大关键技术项目(11kjt-04)

作者简介: 本柏忠(1969—), 男, 本科, 副教授, Email: bbz@scetc.edu.cn。

温、风沙、盐雾、油污等因素影响产生故障^[3-4],进而制约偏航电机的性能响应。

本文针对上述问题,结合偏航系统常用的偏航电机是异步感应电机的结构特点,提出取消偏航电机转速传感器,将变结构控制方法引入到自适应控制中^[5],设计了一种变结构模型参考自适应(VS-MRAS)转速辨识器,用于偏航电机无传感矢量控制系统的转速辨识,以达到优化偏航系统抗台风控制策略的目的。

通过 Bladed 软件研究偏航电机优化后的控制策略对风力机关键部件运行载荷的影响,并将本文提出的控制算法移植到风电机组控制系统中进行风场试验验证,进而探讨该算法对海上风电机组偏航次数的影响。

1 风电机组系统特性及偏航控制

1.1 风电机组系统特性

变桨距风力机捕获的风能 P 与风速 v 、风能利用系数 C_p 、桨距角 β 、叶尖速比 λ 、空气密度 ρ 、风轮半径 R 之间存在以下关系^[6]:

$$P = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_f R}{v} = \frac{2\pi R \Omega}{v} \quad (2)$$

式中: ω_f 为风轮角速度; Ω 为风轮转速。

风能利用系数 C_p 是风电机组吸收风能程度的重要参数^[7],可以用下式近似表示为

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \left| \frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} \right| - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (3)$$

本文建立的海上风电机组偏航系统的状态方程,如下式所示:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_r \quad (4)$$

$$M \frac{d^2\theta}{dt^2} + K \frac{d\theta}{dt} + Q\theta = F - \frac{3}{2H} M_{yaw} \quad (5)$$

式中: J 为风轮转动惯量; M_r 为风轮转矩; θ 为风轮偏航角; M 为机舱总质量; K 为风电机组的阻尼系数; Q 为风电机组的塔基刚度; F 为机舱的侧向力; H 为机舱高度; M_{yaw} 为偏航力矩。

风电机组偏航原理是将风速风向传感器作为感应元件,将风向的变化转化为电信号后传输到偏航驱动装置(偏航电机和偏航齿轮箱)控制回路的控制器中,控制器计算出风向信号与机舱位置

的夹角;当机舱角度与风向偏差超过设定值则开始偏航,偏航驱动装置调节机舱的角度使风轮对准风向以最大限度的吸收风能^[8];当对风动作完成后,风速风向传感器失去电信号,偏航电机停止工作,偏航制动器锁定机舱使其保持在主风向位置^[9-10]。

1.2 偏航系统抗台风优化控制

海上风力发电机组抗台风策略如图 1 所示。在风电机组控制系统中增加台风运行模式,风力机可在台风来临时切入台风模式,风力机可开始主动偏航,偏航电机通过偏航齿轮箱等驱动装置使风轮追踪主风向对风,使整机尽量处于最小载荷状态。但由于台风风况的复杂性、实际测量手段的局限性、偏航电机传感器失效及其数量的有限性,使得可用的测量数据难以完全满足控制系统的需求。因此,为使风电机组快速精确对风、提高偏航系统的追踪性能、降低偏航系统的动作次数,本文提出了偏航电机无速度传感器控制,采用系统辨识和参数估计的方法估算电机转速,以优化偏航系统抗台风控制策略。

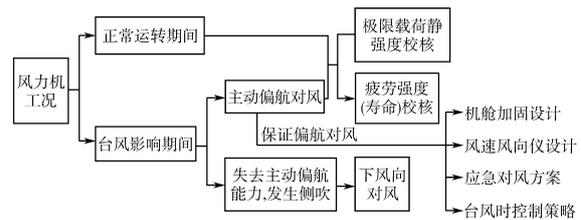


图 1 海上风力发电机组抗台风策略

Fig. 1 Anti-typhoon strategy for offshore wind turbine

偏航电机无传感矢量控制的关键在于精确地转速估计与解耦控制,其控制框图如图 2 所示。

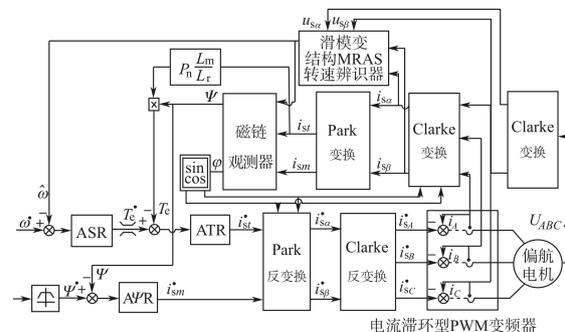


图 2 偏航电机无传感矢量控制框图

Fig. 2 The block diagram of sensorless vector control for yaw motor

图 2 中, $A\Psi R$ 为磁链调节器, ATR 为转矩调节器, ASR 为转速调节器。偏航电机无传感矢量控制系统一方面采用矢量控制,在转速环内增设

了转矩控制内环,提高了转速和磁链闭环控制系统的解耦性能,该交流调速系统在静态、动态性能上完全能够与直流调速系统相媲美;另一方面取消速度传感器,结合滑模观测器对电机参数变化及外部干扰有极佳的不敏感性特点,将滑模变结构和模型参考自适应法有机结合完成对转速辨识,跟踪速度快,提高了系统抗干扰能力。

偏航电机无传感矢量控制系统包含了磁链控制和转速控制2个子系统,由图2可知,控制过程包括以下步骤:1)通过Clarke变换将实测到的偏航电机三相定子的电压电流 $u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$ 变换成 $\alpha-\beta$ 坐标系下的 $u_{\alpha}, u_{\beta}, i_{\alpha}, i_{\beta}$;2)按照滑模变结构MRAS转速辨识算法,将 $u_{\alpha}, u_{\beta}, i_{\alpha}, i_{\beta}$ 代入转子磁链的电压模型和电流模型,推算出偏航电机的速度 $\hat{\omega}$,并将其作为磁链观测器和速度环的负反馈量;3)通过Park变换将两相电流 i_{α}, i_{β} 转换成MT坐标系下的 i_{sm}, i_{st} ,并将 i_{sm}, i_{st} 作为电流环的负反馈量;4)磁链观测器的输入信息为MT坐标系下的 i_{sm}, i_{st} 及推算速度反馈值 $\hat{\omega}$,计算出转子总磁链的模 Ψ 和定向角 φ ,并将 Ψ 作为磁链环的负反馈量;5)将 i_{st}, Ψ 代入转矩方程,计算出电磁转矩 T_e ,并将其作为转矩环的负反馈量;6)速度指令值 ω^* 与 $\hat{\omega}$ 进行比较,经过ASR计算出转矩 T_e^* ,并将 T_e^* 与 T_e 的比较值经过ASR计算出转矩电流给定 i_{st}^* ;7)转子磁链指令值 Ψ^* 与磁链观测值 Ψ 的比较值经过A Ψ R计算出励磁电流给定 i_{sm}^* ;8)通过Park反变换将 i_{sm}^*, i_{st}^* 转换成 $\alpha-\beta$ 坐标系下的 $i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*$,并通过Clarke变换得到 $i_{sA}^*, i_{sB}^*, i_{sC}^*$;9)电流控制信号 $i_{sA}^*, i_{sB}^*, i_{sC}^*$ 加到电流滞环型PWM变频器上,驱动偏航电机^[11]。

2 滑模 MRAS 转速辨识设计

2.1 滑模 MRAS 转速辨识的基本原理

根据变结构控制理论,基于等效控制的滑模控制器,其控制律由等效控制和切换控制构成,等效控制保证系统的状态在滑模面上,切换控制保证系统的状态不离开滑模面。滑模控制的鲁棒性由切换控制项得到保证,滑模控制的振抖也由切换控制造成。为了消除抖振,应使切换控制项在保证鲁棒性的同时尽量小。VS-MRAS转速辨识的基本原理是寻找等效速度,使估测转速有效快速地跟踪变化信号,渐进一致地收敛于给定转速,即满足如下条件:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{\Psi}(t) = 0 \quad (6)$$

2.2 广义误差的构造

异步电机在静止两相 $\alpha\beta$ 坐标下转子磁链电流模型的线性状态方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{r\alpha} \\ \Psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_r & -\omega \\ \omega & -1/T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{r\alpha} \\ \Psi_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ 分别为转子磁链在 α, β 轴分量; T_r 为转子电磁时间常数; L_m 为互感; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 分别为定子电流 α, β 轴分量; ω 为转子速度。

根据模型参考自适应原理,以式(7)作为参考模型,选择并联可调模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \hat{\Psi}_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_r & -\hat{\omega} \\ \hat{\omega} & -1/T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \hat{\Psi}_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

定义广义误差为

$$e_{\Psi} = \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \hat{\Psi}_{r\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Psi_{r\alpha} \\ \Psi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{其中} \begin{cases} \Psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt - \sigma L_s i_{s\alpha} \right] \\ \Psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt - \sigma L_s i_{s\beta} \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中: L_s, L_r 分别为定、转子绕组自感; $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ 分别为定子电压在 α, β 轴分量; R_s 为定子绕组电阻; σ 为电动机漏磁系数。

将式(7)、式(8)代入式(9)整理可得

$$\frac{d}{dt} e_{\Psi} = \begin{bmatrix} -1/T_r & -\omega \\ \omega & -1/T_r \end{bmatrix} e_{\Psi} + (\hat{\omega} - \omega) \begin{bmatrix} -\hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \hat{\Psi}_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.3 等效控制器设计

选择切换面的原则是:当系统发生滑动时 $s=0$,保证滑动模态运动的渐进稳定性并具有良好的动态品质。本文根据该原则构造滑模MRAS转速辨识器的滑模切换函数:

$$s = \Psi_{r\alpha} \hat{\Psi}_{r\alpha} - \Psi_{r\beta} \hat{\Psi}_{r\beta} \quad (12)$$

将式(7)、式(8)代入式(12),并对滑模切换函数 s 进行求导:

$$\begin{aligned} \dot{s} = & (\omega - \hat{\omega})(\Psi_{r\alpha} \hat{\Psi}_{r\alpha} + \Psi_{r\beta} \hat{\Psi}_{r\beta}) + \frac{2}{T_r} (\Psi_{r\alpha} \hat{\Psi}_{r\beta} - \\ & \Psi_{r\beta} \hat{\Psi}_{r\alpha}) + \frac{L_m}{T_r} [i_{s\alpha} (\Psi_{r\beta} - \hat{\Psi}_{r\beta}) - i_{s\beta} (\Psi_{r\alpha} - \hat{\Psi}_{r\alpha})] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{令 } b = \Psi_{r\alpha} \hat{\Psi}_{r\alpha} + \Psi_{r\beta} \hat{\Psi}_{r\beta}$$

$$\begin{aligned} f(\hat{\Psi}_{r\alpha}, \hat{\Psi}_{r\beta}, \Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}, \omega, T_r, L_m) = & b\omega + \frac{2}{T_r} \Psi_{r\alpha} \hat{\Psi}_{r\beta} - \\ & \Psi_{r\beta} \hat{\Psi}_{r\alpha} + \frac{L_m}{T_r} [i_{s\alpha} (\Psi_{r\beta} - \hat{\Psi}_{r\beta}) - i_{s\beta} (\Psi_{r\alpha} - \hat{\Psi}_{r\alpha})] \end{aligned}$$

那么式(13)可改写为

$$\dot{s} = -b\hat{\omega} + f(\hat{\Psi}_{r\alpha}, \hat{\Psi}_{r\beta}, \Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}, \omega, T_r, L_m) \quad (14)$$

令 $\dot{s}=0$, 等效控制器设计为

$$\omega_{\text{eq}} = \omega + \frac{1}{b} \left\{ \frac{2}{T_r} (\Psi_{\text{ra}} \hat{\Psi}_{\text{rp}} - \Psi_{\text{rp}} \hat{\Psi}_{\text{ra}}) + \frac{L_m}{T_r} [i_{\text{sa}} (\Psi_{\text{rp}} - \hat{\Psi}_{\text{rp}}) - i_{\text{sp}} (\Psi_{\text{ra}} - \hat{\Psi}_{\text{ra}})] \right\} \quad (15)$$

由式(15)可知, 当估计磁链收敛于参考磁链时, 等效速度收敛于真实速度。

2.4 滑模控制器设计

为使系统在扰动下满足可达条件, 即 $\dot{s}s \leq -\eta|s|$, ($\eta > 0$), 切换控制设计律设计如下:

$$\omega_{\text{sw}} = \frac{1}{b} K \text{sgn}(s) \quad (16)$$

将等效控制 ω_{eq} 和切换控制项 ω_{sw} 相结合, 得到传统的滑模变结构控制器:

$$\hat{\omega} = \omega_{\text{eq}} + \omega_{\text{sw}} \quad (17)$$

下面证明在式(17)作用下, 切换面 $s=0$ 是可达到的, 即证明 $\dot{s}s \leq 0$ 。

证明:

将式(16)、式(17)代入式(13), 在本控制器作用下有:

$$\dot{s} = -b \left(\frac{f}{b} + \omega_{\text{sw}} \right) + f = -K \text{sgn}(s) \quad (18)$$

则 $\dot{s}s = -K \cdot s \cdot \text{sgn}(s) = -\eta|s| \leq 0$ 。

3 仿真实验及分析

以 5 MW 海上风力机偏航系统为例, 在同样电机参数和外部载荷条件下, 结合电机参数对上述控制算法进行试验验证, 分别采用本文提出的 VS-MRAS 矢量控制和传统控制方式对偏航系统进行仿真。仿真实验所用的偏航电机参数如下: 电机功率 4.0 kW, 电机额定转矩 39.8 N·m, 电机最大转矩 99.5 N·m, 电机额定转速 960 r/min。

3.1 风力机偏航过程仿真

鉴于台风经过时风速和风向在短时间内会发生急剧变化, 则需要偏航电机及时响应启动去主动迎合台风的实时变化。偏航电机的负载在偏航过程中是变化的, 那么负载的突然增加或减少均会造成电机转速突变, 使机舱在偏航过程中失稳。因此为验证偏航系统在负载随时间变化时的控制性能, 对 VS-MRAS 矢量控制和传统控制方式下的偏航过程进行仿真。

5 MW 风力机在塔架顶部的极限转矩 M_z 约为 19 040 kN·m, 该转矩通过偏航轴承及偏航齿轮箱等效到单个偏航电机的最大负载转矩约为 40 N·m, 由此可认为 5 MW 风力机负载转矩的绝对

值会在 0~40 N·m 内变化。根据 5 MW 机组的载荷及偏航速率要求, 设置 5 MW 风力机仿真的初始条件: 参考转速设定为 800 r/min, 负载转矩设定为 10 N·m。风力机偏航过程的仿真结果如图 3 所示。

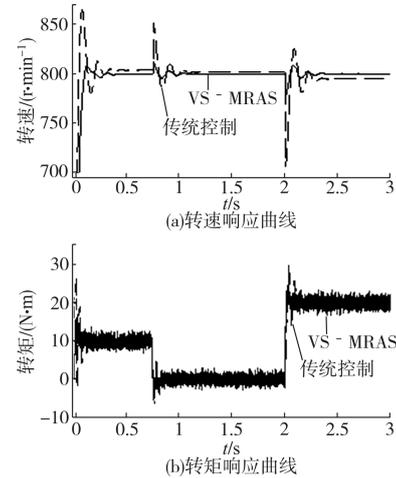


图3 偏航过程中转速、转矩响应曲线

Fig. 3 Response curves of speed and torque during yawing process

1) 当速度接近参考转速, 风力机偏航系统在 VS-MRAS 矢量控制和传统控制方式下, 速度和电磁转矩均产生了振荡过渡过程。

2) 0.75 s 时负载转矩由 10 N·m 突变为空载, 此时偏航电机在 2 种控制下均会因负载突然减少而致使转速突升。VS-MRAS 矢量控制反应迅速, 给定转矩 T^* 迅速下降过零变负, 而后缓慢上升到零; 当估测转速恢复至给定转速时, 有微小的超调调节过程。而传统控制方式超调量明显, 需要较长时间才能恢复到给定转速, 稳态误差比 VS-MRAS 矢量控制下的更大。

3) 2.0 s 时负载由零加载为 20 N·m, 由图 3 可知, VS-MRAS 矢量控制具有更好的稳定性和鲁棒性。

3.2 风力机偏航启动和停止状态仿真

偏航系统的启动与停止有以下 3 种情况: 1) 通过对风力机的迎风控制, 保证风轮的扫风平面与主风向垂直以获取最大的风能; 2) 当风力机遭遇切出风速以上的特大强风时, 风力机偏航系统需要对机舱作出 90°侧风处理, 使机舱走最短路径, 以保护风轮免受损坏; 3) 当风力机机舱朝一个方向, 旋转到电缆的扭转极限位置, 需要启动偏航电机反向旋转解缆。在以上 3 种情况中, 当机舱旋转到指定位置时, 都需要偏航电机迅速地减速停机。因此对 VS-MRAS 矢量控制和传统控制时

偏航启动和停止状态进行仿真,响应曲线如图4所示。

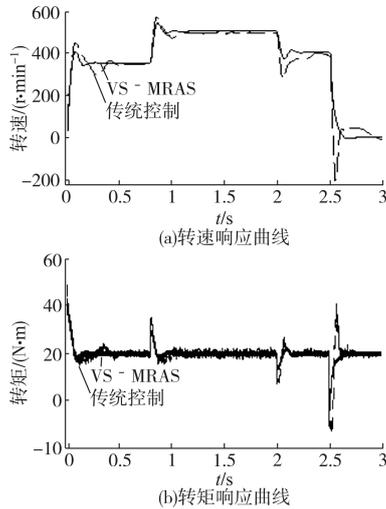


图4 偏航启动和停止时的转速、转矩响应曲线
Fig. 4 Response curves of speed and torque when starting or stopping the yaw system

为研究偏航电机在启动和停止状态下良好的动态性能,启动时参考转速设定为 350 r/min,0.8 s,2.0 s时参考转速设定为 500 r/min,400 r/min,停止时转速降至零,负载恒定为 20 N·m。由图4可知,偏航电机在启动、参考转速变化及停止时,VS-MRAS 矢量控制和传统控制方式的系统,电磁转矩均产生脉动,电机转速超调量明显。而 VS-MRAS 矢量控制下的系统,其输出结果更平稳,具有较高稳定性和鲁棒性。

通过对 5 MW 海上风力机偏航系统偏航过程、启动和停止状态进行仿真,其结果表明本文提出的控制算法,对海上风力机最大限度地获取风资源,偏航电机及时响应使机舱偏航到设定的角度位置,控制机舱平稳、可靠的对风,降低负载波动对风轮造成的疲劳损伤,延长风力机内各种构件的寿命乃至整个风电机组的稳定性都具有重要意义。

4 偏航控制策略风场试验验证

为探讨偏航电机优化后的控制策略对风力机关键部件运行载荷的影响,图5为某海上风力发电机组机舱风速仪测量得到的风速,运用本文提出的抗台风控制策略,通过 bladed 软件进行载荷仿真。根据 GL2010 标准定义载荷坐标系,基于风电机组寿命为 20 a、应力循环次数为 1.0×10^8 的假设,计算主要部件叶根和塔底的等效疲劳载荷,

其结果如表1所示。叶根载荷相比传统控制方式在 M_x, M_y 和 M_z 方向上分别降低了 3.31%, 4.43%和 5.02%,塔底载荷相比传统控制方式在 M_x, M_y 和 M_z 方向上分别降低了 1.28%, 6.06%和 1.27%。

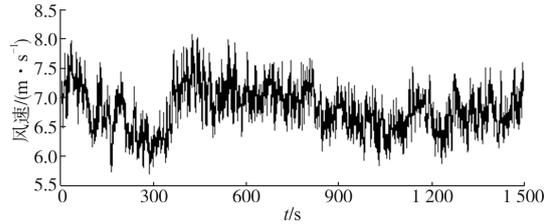


图5 测量风速
Fig. 5 Wind speed measured

表1 某海上风力发电机组主要部件等效疲劳载荷对比

Tab. 1 Equivalent fatigue load comparisons of main components of offshore wind turbine

控制方式	叶根载荷/(N·m)			塔底载荷/(N·m)		
	M_x	M_y	M_z	M_x	M_y	M_z
本文控制	4 661.1	8 260.2	147.5	48 538	65 332	51 22.5
传统控制	4 820.9	8 626.5	155.3	49 158	69 550	5 188.2
绝对误差	159.8	366.3	7.8	620	4218	65.7
相对误差	3.31%	4.43%	5.02%	1.28%	6.06%	1.27%

将本文提出的控制算法移植到风电机组控制系统中进行风场试验验证,试验结果如图6、图7所示。从图6、图7可看出,该机组的叶尖速比稳定在 9.5 附近,随着叶尖速比控制的稳定,风能捕获系数 C_p 稳定在最大值 0.483 附近。图8为某风场应用本文提出的控制策略前后风力机偏航次数对比图,由图8可知,本文提出的优化控制策略能有效降低偏航次数 13.5%左右。

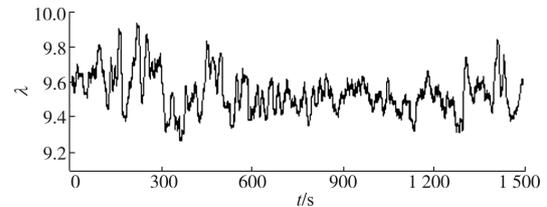


图6 叶尖速比图
Fig. 6 Tip speed ratio diagram

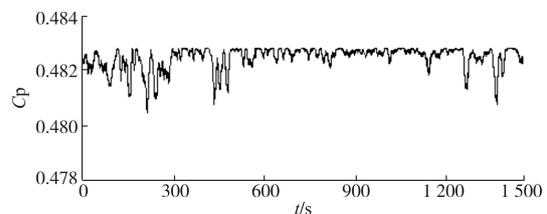


图7 风能捕获系数 C_p 图
Fig. 7 Wind energy capture coefficient C_p diagram

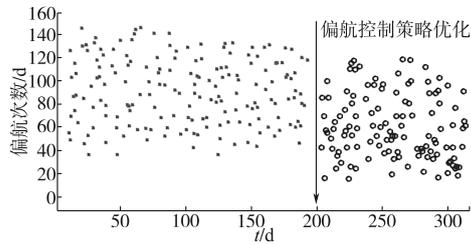


图8 偏航次数对比
Fig. 8 Comparison of yaw times

5 结论

针对台风可能给风电机组带来极大的破坏,造成电网失效、机组控制失效、结构失效等恶劣后果,本文提出了将偏航电机无传感器控制应用于海上风力发电机组偏航系统,得出以下结论:

1)文中方法取消了偏航电机转速传感器,将矢量控制、变结构控制和自适应控制三者有机结合,设计了VS-MRAS转速辨识器,该辨识器在受到随机与不确定性因素影响时,系统实际转速能快速稳定地跟踪给定转速。

2)台风剧烈变化过程中,偏航电机所受负载变化,电机转速随之突变,采用VS-MRAS转速辨识器对转速进行有效辨识,偏航电机可及时响应保证风轮追踪主风向正面迎风顺桨,降低了叶片根部和塔筒底部的载荷。

3)该控制方法可有效减少偏航故障,避免了偏航系统的频繁动作,降低了系统的机械损耗,对

降低海上风电机组的故障发生率具有重要意义。

参考文献

- [1] 申新贺,叶杭冶,潘东浩,等. 风力发电机组的台风适应性设计方法研究[J]. 中国科学工程,2014,16(3): 70-75.
- [2] 贺广零,田景奎,常德生. 海上风力发电机组抗台风概念设计[J]. 电力建设,2013,34(2):11-17.
- [3] 沈小军,杜万里. 大型风力发电机偏航系统控制策略研究现状及展望[J]. 电工技术学报,2015,30(10):196-203.
- [4] 谭茂强,杨源,贾斌,等. 海上风电机组抗台风技术研究[J]. 中国电力,2018,51(2):112-117.
- [5] 韩兵,周蜡吾,陈浩,等. 基于变论域模糊控制的大型风电机组偏航系统[J]. 电工电能新技术,2016,35(8):15-20.
- [6] 苗森. 基于自抗扰的STATCOM抑制风电次同步振荡[J]. 电气传动,2018,48(5):53-58.
- [7] 杨骏华,陈永强,刘扬. 直驱永磁同步风电机组的无功功率支撑策略[J]. 电气传动,2017,47(2):43-47.
- [8] Fumihito Watanabe, Toru Takahashi, Hideki Tokuyama, et al. Modelling Passive Yawing Motion of Horizontal Axis Small Wind Turbine: Derivation of New Simplified Equation for Maximum Yaw Rate[J]. Wind Engineering, 2012, 36(4):433-442.
- [9] 王欣,吴根勇,潘东浩,等. 基于运行数据的风电机组偏航优化控制方法研究[J]. 可再生能源,2016,34(3):413-420.
- [10] 孙园,张辑. 风电网络偏航控制器的优化设计与实现[J]. 计算机仿真,2016,33(9):151-154,162.
- [11] 班新,司放玻. 双馈风电系统低电压穿越的联合控制策略[J]. 电气传动,2017,41(11):50-54.

收稿日期:2018-07-15

修改稿日期:2018-08-19