

兆瓦级风电机组叶片延长在线安全预警系统设计

朱兴龙, 苏 俊, 钱 磊

(国家电投集团江苏新能源有限公司, 江苏 盐城 224005)

摘要: 叶片延长可有效地提高风电机组发电量, 降低额定风速, 为风电场进行风电机组技术改造提供了一种可行的方法, 尤其是低风速区域。然而, 叶片延长后必然导致叶片载荷增加, 从而影响风电机组叶片的稳定性和可靠性。首先分析了兆瓦级风电机组叶片延长增功原理及载荷、螺栓安全性, 然后设计了兆瓦级风电机组叶片延长在线安全预警系统总体方案, 并从系统功能、智能采集系统、网络拓扑和总体应用原则等方面详细介绍了在线安全预警系统方案。以江苏徐州某风电场 2 MW 风电机组叶尖延长为例, 分析了叶片延长后获得的功率和额定风速变化, 讨论了叶片延长前后风速不同时叶片各方向的弯矩变化情况, 确定叶根螺栓承受的周期性疲劳载荷, 为风电机组因螺栓、叶片损伤等问题引发安全事故预测提供一种有效方法。

关键词: 叶片延长; 叶片载荷; 高强度螺栓; 叶片故障; 安全预警

Design of online safety pre-warning system for MW level wind turbine based on blade extension

ZHU Xinglong, SU Jun, QIAN Lei

(SPIC Jiangsu New Energy Co., Ltd., Yancheng 224005, China)

Abstract: As one of alternative methods to increase the output power and reduce rated wind speed for wind turbines in low wind speed field, blade extension will raise the blade loads. The stability and reliability of wind turbine blades are affected by the blade extension. The basic principle of output power improvement of wind turbine and the safety of loads and bolts based on blade extension are analyzed. The overall scheme of MW level wind turbine blade extension online safety pre-warning system is designed. The design scheme of online safety pre-warning system is introduced in detail from four aspects, such as system function, intelligent collection system, network topology and general application principles. Take the blade tip extension of a 2MW wind turbine in Xuzhou, Jiangsu Province as an example, the changes of output power and rated wind speed based on blade extension are analyzed. The bending moments in each direction of the blade at different wind speed with and without blade extension are discussed. The periodic fatigue load of the blade root bolts is determined. It provides an effective method for predicting safety accidents caused by bolts and blades damage of wind turbines.

Key words: blade extension; blade loads; high strength bolt; blade failure; safety pre-warning

0 引言

随着我国能源结构转型升级及碳达峰、碳中和战略目标的提出,风力发电因其可再生、清洁环保等优点将再度迎来历史性发展机遇,进一步得到极大关注。据不完全统计,2010年我国风电累计装机容量为4 473万kW,居全球风电装机容量第一,之后连续11年位居世界第一。截至2021年底,我国风电累计并网装机容量为3.28亿kW,已成为全世界最大的风电装机国和风电装备生产国^[1]。然而,因受当时风电技术与风资源测量水平的限制,早期风电机组一般存在风机与叶片设计不匹配、叶片设计安全裕度大等问题,导致风电机组出力不足、低风速区风能利用率不高等后果。同时,基于复合材料的风机叶片使用寿命一般为20~25年^[2],2010年左右安装的风机将在2030—2035年达到使用寿命。预计到2035年,我国面临更新换代的风电机组将有9万台。为适应当前平价上网,降低运维成本的需求,通过风电机组叶片延长对早期风电机组进行技术改造,使早期风电机组发电性能最大化,已成为低风带区域风电场业主实现当前风电场增功提效的有效方式之一^[3-4]。

叶片是风电机组捕获风能的关键部件,根据叶素动量理论可知,在风速和空气密度一定时,延长叶片可有效提高风力机组的发电量。当前,叶片延长主要包括叶根延长和叶尖延长两种方式。文献[5]分析了叶片、叶根延长后对风力机气动性能的影响。相对于叶根延长的原材料用量大、安装复杂,叶尖延长成本投入低、功率增加显著,已成为风力机组增功的有效方式之一^[6]。然而,叶根延长与叶尖延长必将增加风电机组的载荷^[7],从而影响高强度螺栓疲劳强度,甚至使之断裂,进而导致叶片折断。同时,叶片延长后需要及时监测与预测叶片的裂纹(包括内部腹板和主梁裂纹、外部开裂等)、气动不平衡和结冰等故障,以避免风机因螺栓、叶片损伤等问题引发安全事故。因此,有必要对基于叶片延长的风电机组的安全预警进行研究与分析。

目前研究成果主要集中在叶片延长的技术与经济性分析、评估以及高强度螺栓疲劳失效研究,而关于如何通过监测螺栓和叶片实时状态设计兆瓦级风电机组叶片延长安全预警系统的研究成果很少。本文在分析风电机组叶片延长增功原理及载荷安全性基础上,着重阐述了叶片延长后风电机组在线安全预警系统方案设计,为保证叶片延长后的风电机组安全、可靠运行提供技术支撑。

1 兆瓦级风电机组叶片延长增功原理及载荷安全性分析

风电机组主要通过叶片来捕获风能,进而将风能转化为机械能。叶片延长可提高风电机组的发电量,但也增加了叶片气动力载荷及重力载荷,同时增加了叶根螺栓的载荷,给风电机组的安全性和可靠性带来一系列挑战。

1.1 风电机组叶片延长增功原理

根据叶素动量(BEM)理论,风电机组叶片延长后可增大风轮扫风面积,风电机组能从自然风能中获得的实际功率为

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

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2)$$

式中, v 为风速; ρ 为空气密度; S 为风轮扫风面积; C_p 为风能利用系数; R 为风电机组叶轮半径; λ 为叶尖速比; β 为叶片桨距角; ω 为风轮的角速度。

由式(1)、式(2)可知,当空气密度和风速一定时,风电机组获得的功率主要取决于 C_p 和风轮扫风面积;对 C_p 而言,可通过优化叶片设计与控制策略使 C_p 达到最大,此时风轮扫风面积 S 与风电机组获得的功率成正比,即叶轮半径 R 的二次方与风电机组功率成正比。因此,延长风电机组叶轮半径 R 即叶片延长可大大增加风轮扫风面积,从而提高风电机组获得的功率。

1.2 载荷及螺栓安全性分析

叶片延长可提高风电机组获得的功率,同

时,也直接增加了叶片承受的载荷,包括重力载荷、气动力载荷和机械振动载荷等。而作用在叶片上的载荷通过高强度的叶片螺栓传递给变桨轴承及其螺栓,从而增加叶片螺栓的拉应力和切应力,甚至导致叶片螺栓发生疲劳断裂、松动和脆断等,这直接关系着风电机组的运行安全。

根据叶素理论,叶片延长后风电机组风轮扫风面积增加,当气流经过风轮时,在叶片半径为 R 、宽度为 dR 的叶素上产生的叶片推力 T 和扭矩 Q 分别为^[8]

$$dT = \frac{1}{2} N \rho v^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) CR dR \quad (3)$$

$$dQ = \frac{1}{2} N \rho v^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) CR dR \quad (4)$$

式中, N 为叶片数; C_L 、 C_D 分别为翼型升力系数和翼型阻力系数; C 为弦长; ϕ 为入流角。

叶轮推力为各叶素推力的合力,当叶片延长时,如叶尖延长,虽然延长部分弦长不长,但因速度快,因而产生的额外推力叠加到原推力上;与此同时,延长部分因为离旋转中心较远,使相同的力得到的弯矩更大,加上叶轮最低点与最高点风剪切引起的风速之差,进一步增加了倾覆力矩。此外,叶片加长也会使叶片质量增大,进而加大了重力载荷。

叶片螺栓是连接风轮叶片与轮毂的高强度螺栓,在风电机组运行过程中,风轮叶片与轮毂所承受的不同载荷作用在叶片螺栓上主要表现为拉应力 P_L 和切应力 F_Q ,其具体计算式分别为^[9]

$$P_L = P_Z \pm P_M = \frac{F_Z}{n} \pm 4 \frac{M_{\max}}{Dn} \quad (5)$$

$$F_Q = F_{XY} + \frac{2M_Z}{D} \quad (6)$$

式中, P_Z 、 P_M 分别为叶片的等效轴向拉应力、倾覆力矩; n 为螺栓个数; F_Z 、 F_{XY} 为螺栓承受的拉应力、切应力; $M_{\max}$ 为叶片传递给叶片螺栓的最大扭矩; M_Z 为叶片螺栓承受的扭矩; D 为高强度螺栓分布时形成的圆直径。

在叶片延长后,加在风轮叶片与轮毂上所承受的载荷也相应增加,进而增加了叶片螺栓的交变拉应力和切应力,使叶片螺栓容易产生疲劳损

伤、断裂等现象。

2 基于叶片延长的风电机组在线安全预警系统方案设计

2.1 在线安全预警系统总体设计方案

影响风电机组安全运行的因素很多,但主要因素为叶片故障和塔筒倒塌,尤其是叶片延长后给叶片带来的潜在故障影响,包括叶片损伤、叶片雷击、腐蚀和叶根螺栓断裂等。为保证风电机组的安全运行,需要对叶片状态、螺栓状态及塔筒状态等主要部件进行实时在线监测,并能根据监测数据进行状态判断及预警,及早发现隐患、排除故障,提高系统设备管理水平,图1为风电机组在线安全预警系统总体设计方案框架。

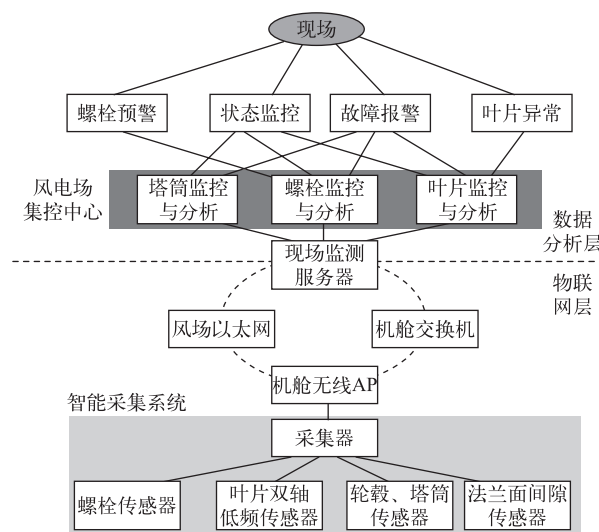


图1 在线安全预警系统总体设计方案框架

Fig. 1 Overall design framework of online security early warning system

系统主要包括物联网层和数据分析层。物联网层主要是由智能采集系统感知、获取各设备运行状态数据(如螺栓松动、法兰面间隙、叶片振动和温度等),然后通过网络将数据上传到现场监测服务器上。数据分析层主要对现场监测服务器上的状态数据进行分析、判断和预测等,让设备管理人员能及时掌握设备(叶片、塔筒)运行实时状态,并能及时发现机组运行的异常状态,降低叶片损伤与螺栓疲劳断裂的概率,充分保证

风电机组安全运行。

2.2 在线安全预警系统详细设计

(1) 系统功能设计

在风电机组运行时，风机叶片和叶片螺栓的健康状况直接关系到风机的安全。就目前而言，市场缺乏有效的实时监测手段，须对风机的高强度螺栓进行安全监测。本系统对风电机组螺栓进行全方位实时的监控监测，通过实时预紧力的采集，实现如下监测与预警功能：①对螺栓松动的在线实时监控；②对螺栓过载、断裂和松动等进行预警；③对叶片、塔筒和轮毂等实时载荷的监控；④对叶片裂纹（包括内部腹板和主梁裂纹、外部开裂等）、气动不平衡和结冰等故障的分析与判断。

(2) 智能采集系统设计

智能采集系统主要包括叶片螺栓监测传感器、法兰面间隙监测传感器、叶片双轴低频加速度传感器、轮毂及塔筒传感器和数据采集器等部分。叶片螺栓监测传感器主要用于实时监测螺栓的预紧力状态，提前预知松动或断裂问题；由于风机叶根螺栓数量一般较多，且空间位置跨度大，多个螺栓同时紧固时，设备对于螺栓松动具有一定允许裕度。即单个螺栓松动不会马上对设备造成损伤，只有当松动螺栓数量超过一定量时，才会因力载荷分布不均匀造成螺栓断裂，进而导致重大事故发生。因此，进行叶根螺栓选择与布置时无须对每个螺栓都安装一个传感器，只须对承载大、受力复杂的区域进行等角度按扇区均匀分布安装传感器。法兰面间隙监测传感器用于监测法兰面间隙的变化情况，因受交变载荷的影响，间隙的大小和位置会发生变化，通过监控间隙变化即可反映交变载荷对整个法兰上的螺栓松动情况。叶片双轴低频加速度传感器用于监测叶片上两个方向的振动信号，兼顾测温功能。

(3) 网络拓扑设计

网络拓扑主要包括机舱无线AP、机舱交换机、塔底交换机、风电场以太网和现场监测服务器等，风机智能采集系统采集各设备运行状态和

数据后，通过RS 485等通信方式把数据传输给采集单元，再通过有线传输给机舱无线AP，然后经过机舱交换机与塔底交换机，通过风电场以太网光纤环网传输至现场监测服务器，最后将采集数据传输至风场集控中心监控平台。平台可实时监控每个风机的螺栓在线运行状况，并结合历史数据对螺栓预紧力走势、疲劳寿命和载荷等多重信息进行分析，为管理人员提供第一手参考信息，以便作出有效的运维判断。由于在风机建设时已具备以太网光纤环网，无须单独进行网络架设，只须将智能监控采集设备设置好网络配置，接入光纤环网，即可通过后台进行实时监控，图2为系统网络拓扑示意图。

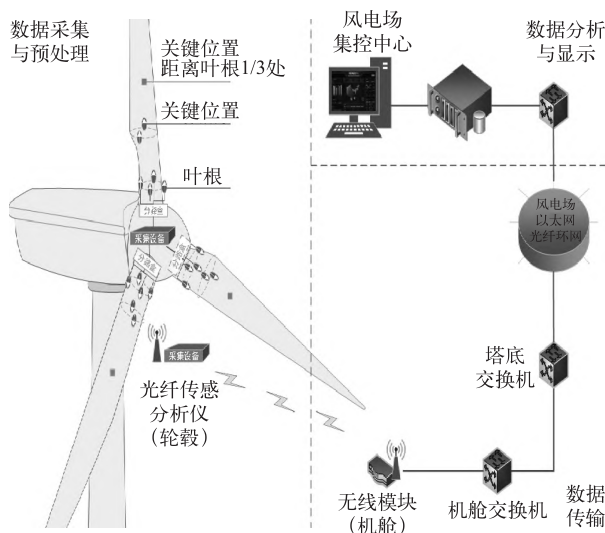


图2 系统网络拓扑示意图

Fig. 2 System network topology diagram

(4) 总体应用原则设计

考虑到后续技术的推广应用以及系统的成本收益，在线安全预警系统设计时还要注意以下几点：

1) 专用性。预警系统专为兆瓦级风电机组进行设计，且风机内部结构采用模块化设计，每个叶片由一个独立通道模块信号进行专门采集，而不影响风电机组其他系统。同时，高度集成的智能采集系统能够同时监测多个通道，具有采集快、数据全和通信便捷等优点。

2) 实时性。预警系统启动后实时采集螺栓

预紧力、法兰面间隙等数据，并紧密结合实时工况，能准确地反映各工况下对应载荷数据，在第一时间发现螺栓异常状况，可根据需求设置采集频率及采集频次。

3) 准确性。系统通过实时准确监测叶根、塔筒等部位螺栓及连接结构件的螺栓轴力数据，为风力机运行的安全性与可靠性提供强有力的螺栓轴力监测数据支持；同时，及早发现叶片的覆冰、雷击损伤、表面剥离和裂纹等常见损伤，并及时发现叶片早期故障。

3 实例分析

以江苏徐州某风电场2 MW风电机组叶尖延长为例进行分析，将风电场已运行的W2000-111机组叶片由原54.38 m延长至56.88 m，原风电机组系统参数见表1。根据安全预警系统总体设计方案要求，采用 Bladed 软件及Focus软件进行叶片气动性能评估与建模分析，通过叶根螺栓传感器、法兰面间隙传感器等监测数据对比分析叶片延长后风电机组的稳定性和安全性。

表 1 原风电机组系统参数

Tab. 1 Original wind turbine system parameters

系统参数	参数值	系统参数	参数值
额定功率 /MW	2	湍流强度	I15=0.14
额定转速 / (r/min)	14.5	年平均风速 / (m/s)	7
轮毂高度 /m	80	气流平均倾斜角度 (°)	±8
叶片数目	3	3 s 阵风风速 (1 年) / (m/s)	47.6
叶片长度 /m	54.38	10 min 阵风风速 (1 年) / (m/s)	34
额定风速 / (m/s)	9.5	3 s 阵风风速 (50 年) / (m/s)	59.5
切入风速 / (m/s)	3	10 min 阵风风速 (50 年) / (m/s)	42.5
切出风速 / (m/s)	22		

(1) 风电机组输出功率及额定风速对比分析

图3为叶片延长前后风电机组输出功率情况。由图3可知，由于叶尖延长后风轮扫风面积及叶片最大功率系数的增大，叶片延长后风电机组额定风速由9.5 m/s降至9.1 m/s，提高了风电机组在低风速时的风能捕获能力。同时，在达到额定风速之前，相同风速下延长后的叶片输出功

率都大于延长前（原）叶片输出功率，这是因为叶片延长后风轮扫风面积明显增大了。随着叶片输出功率的增加，对应风电机组年发电量及提升率也随之增加，具体见表2。由表2可知，当年平均风速为5.5 m/s时，风电机组年发电量提升率最大可达到9.5%。

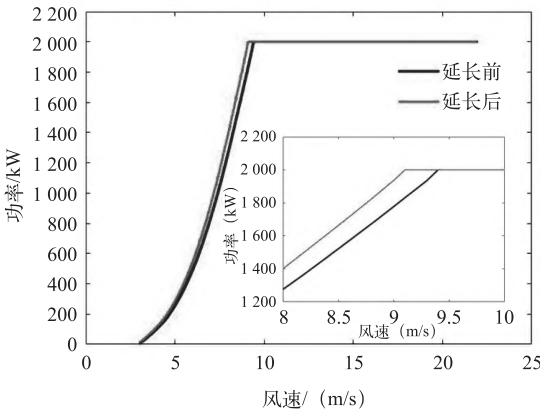


图 3 叶尖延长前后风电机组输出功率情况

Fig. 3 Output power of wind turbines before and after blade tip extension

表 2 叶尖延长后不同风速下年发电量及提升率

Tab. 2 Annual power generation and improvement rate under different wind speeds after blade tip extension

平均风速 / (m/s)	延长前发电量 / (MW·h)	延长后发电量 / (MW·h)	提升率 (%)
5.5	2 709 685.87	2 967 455.02	9.5
6	3 331 963.13	3 618 517.48	8.6
6.5	3 946 696.25	4 254 405.89	7.8
7	4 538 774.39	4 860 915.02	7.1
7.5	5 098 674.01	5 429 710.59	6.5
8	5 62 1099.19	5 956 676.06	6.0
8.5	6 103 558.73	6 440 383.28	5.5
9	6 545 271.89	6 880 892.14	5.1
9.5	6 946 289.93	7 278 933.37	4.8

(2) 载荷对比分析

图4为叶片延长前不同风速下叶片不同方向的弯矩情况。图5为叶片延长后不同风速下叶片不同方向的弯矩情况。由图4和图5可知，风速为4 m/s时，风速对 M_y 、 M_{xy} 和 M_z 弯矩变化影响最小，当风速接近额定风速（10 m/s）时，风速对 M_y 、 M_{xy} 和 M_z 弯矩变化影响最大。同时，不同风速对叶片不同方向产生的弯矩最大的为 M_y 弯矩，

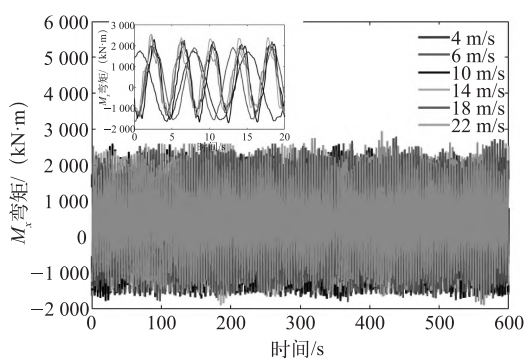
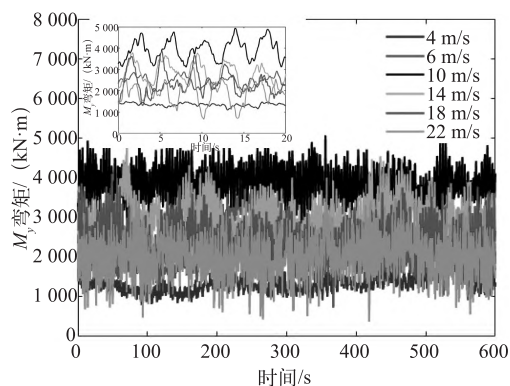
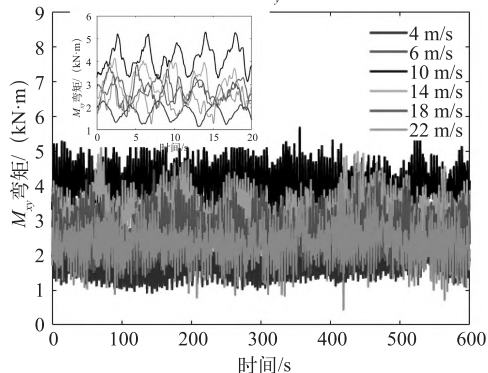
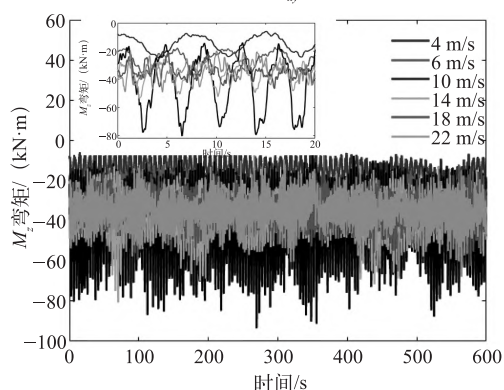
(a) M_x 弯矩(b) M_y 弯矩(c) M_{xy} 弯矩(d) M_z 弯矩

图4 叶片延长前不同风速下叶片不同方向的弯矩情况

Fig. 4 Bending moment situation of blades in different directions under different wind speeds before blade extension

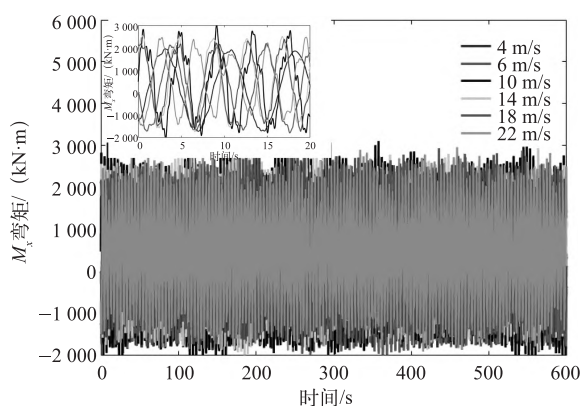
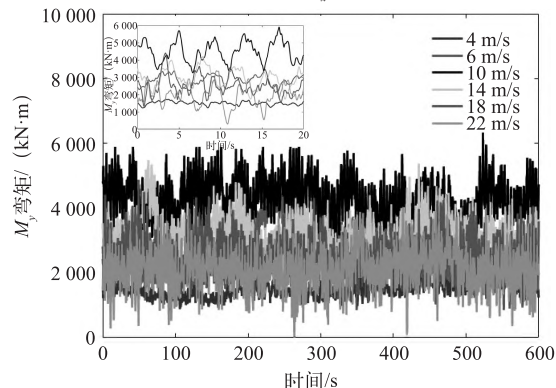
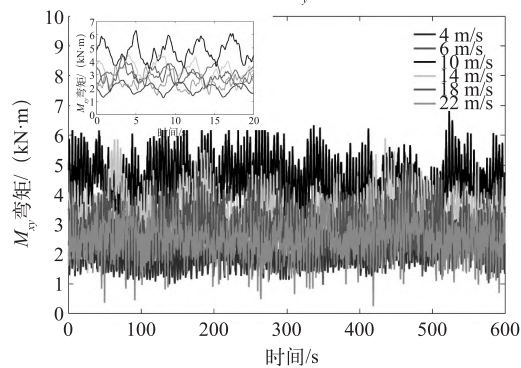
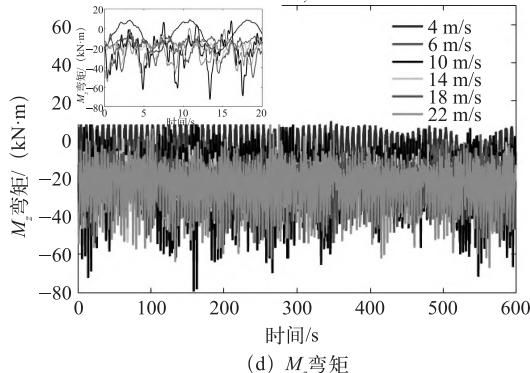
(a) M_x 弯矩(b) M_y 弯矩(c) M_{xy} 弯矩(d) M_z 弯矩

图5 叶片延长后不同风速下叶片不同方向的弯矩情况

Fig. 5 Bending moment situation of blades in different directions under different wind speeds after blade extension

即与叶片垂直方向的弯矩最大。此外，不同风速对 M_x 弯矩变化影响均差不多。

与此同时，由图4和图5可知，叶片延长后叶片各个方向所承受的载荷（ M_x 、 M_y 、 M_{xy} 和 M_z 弯矩）都比叶片延长前要大。如风速为10 m/s时，叶片延长前 M_y 弯矩最大值都小于5 000 kN·m，而叶片延长后 M_y 弯矩最大值约为6 000 kN·m，表明叶片延长后在叶片垂直方向螺栓将承受更大的应力和弯矩，叶根螺栓存在安全事故的概率更大。

4 结束语

早期风电场中风电机组的叶片延长可有效提高获得的功率，降低叶片额定风速，尤其适用于低风速区风电场风电机组的升级改造，然而叶片延长也给风电机组带来安全问题。本文在分析了风电机组叶片延长增功原理及载荷、螺栓安全性的基础上，设计了兆瓦级风电机组叶片延长在线安全预警系统总体方案，并以江苏徐州某风电场2 MW风电机组叶尖延长为例，将叶片延长后，提高了叶片输出功率，在年平均风速为5.5 m/s时，年发电量提升率最大为9.5%。同时，随着叶片风轮扫风面积和功率的增大，叶根螺栓在不同方向所承受的载荷也增大，尤其是对 M_y 弯矩变化影响大，预示着相应方向叶根螺栓将可能更容易疲劳损伤、甚至断裂，从而影响风电机组的安全性，为低风速地区风电场中兆瓦级风电机组进行叶片延长后预测是否引发安全事故提供一种有效方法。

参考文献

[1] 许淳瑶，葛立超，冯红翠，等．风力发电现状及叶片组成与回收利用综述[J]．热力发电，2022，51(9)：29-41．

[2] PETER M, NICK F, JOYTISHANA J, et al. End-of-life policy considerations for wind turbine blades [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022(164): 112538-112544.

[3] 姚志伟，张莹博，纪贤涛，等．110米叶轮风力发电机组叶尖延长技术研究及应用[C]．无锡：第七届中国风电后市场交流合作大会，2020：36-41．

[4] ACHILLES M B, THANASIS K B, HERRICOS S. Active control of wind turbines through varying blade tip sweep [J]. Renewable Energy, 2019(131): 25-36.

[5] 常化瑞．延长叶片叶根长度对风力机气动性能影响研究[D]．吉林：东北电力大学，2021．

[6] 邹立伟，魏敏，宋之燕．风力发电机组叶尖延长增效技术的经济性分析[J]．风能，2018(3)：80-82．

[7] 童彤，曹硕，武青，等．风电机组叶片技术升级中性能与载荷评估研究[C]．银川：第九届中国风电后市场交流合作大会，2022：351-358．

[8] 王效禹．基于BEM的风力机随机气动特性研究[D]．湘潭：湘潭大学，2021．

[9] 刘永超，郭德瑞，李帅，等．风电机组高强度螺栓的失效形式分析[J]．太阳能，2021，321：44-50．

作者简介

朱兴龙（1986—），男，工程师，主要研究方向为风力发电控制与管理技术。

苏俊（1983—），男，工程师，主要研究方向为风力发电控制与管理技术。

钱磊（1986—），男，工程师，主要研究方向为风力发电控制与管理技术。

（收稿日期：2022-12-14）