

# 大型双馈风电机组弹性支承动态特性分析

尹尧杰<sup>1</sup>, 褚景春<sup>2</sup>, 姜培学<sup>3</sup>

(1. 国电联合动力技术有限公司, 北京 100039; 2. 国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京 102209; 3. 清华大学 热能工程系, 北京 100084)

**摘要:** 风电机组正在朝着大型化与智能化方向发展, 机组载荷成倍增长, 这对机组部件的动力学设计提出了更高要求。文章以风电机组齿轮箱弹性支承为研究对象, 首先, 采用多体动力学软件建立了风电机组整机动力学模型, 并耦合风轮气动载荷计算与风电机组控制程序; 然后, 利用搭建的风电机组整机模型计算了均匀风速下齿轮箱弹性支承的动态响应时频特性, 对比分析了风切变、塔影效应以及非线性刚度对弹性支承响应的影响规律; 最后, 结合实际仿真计算了湍流风速工况下风电机组一个弹性支承出现损坏时的动态响应。结果表明, 当弹性支承出现损坏仅能匹配 50% 刚度时, 其响应会急剧增大, 超过振动标准安全阈值 4 倍以上, 影响风电机组整机安全稳定运行。

**关键词:** 风电机组; 多体动力学; 非线性刚度; 弹性支承; 动态特性

**中图分类号:** TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)08-1054-07

## 0 引言

随着“双碳”时代的开启, 风电迎来历史发展机遇, 我国风电装机规模已稳居全球第一, 技术创新能力不断提升<sup>[1]</sup>。当前, 风电机组研发正在朝着大型化、定制化和智能化方向发展, 应用场景也从陆上逐步扩展到深远海。复杂多变的外部应用环境叠加风电机组本身大型化与柔性化的结构特点, 使得风电机组整机与部件振动问题更加凸显<sup>[2]</sup>。风电机组常用的载荷计算软件, 如 Bladed 与 FAST 建模相对简单, 考虑的部件相对较少, 并不能对风电机组内部各部件, 如齿轮箱弹性支承等的动态特性进行有效仿真与评估。齿轮箱弹性支承作为承力部件, 其承受风轮传递来的时变载荷, 在长时间的工作中易于损坏, 影响风电机组安全运行。因此, 需要结合风电机组整机动力学模型对弹性支承的动态特性进行分析。

国内外很多学者对风电机组齿轮箱弹性支承以及传动链载荷做了相关研究, 文献[3]基于弹性支撑对浮式风电机组传动链系统动态特性的影响规律, 提出了多工况浮式风电机组弹性支撑优化方案。文献[4]基于集中质量和拉格朗日方法, 研究了齿轮箱弹性支承对传动链动力学特性的影响。文献[5]采用有限元分析技术对大功率风电

组弹性支承结构强度及变形进行了分析。文献[6]以某 10 MW 级风电机组传动链地面试验平台为研究对象, 采用虚拟仿真方法对传动链的动态特性进行了仿真分析。文献[7]基于 Simpack/Ansys 分析了各级传动链在发电机短路工况下的扭矩传递规律。从已有文献可以看出, 大多数对弹性支承的研究模型或局限于弹性支承独立模型进行模态分析, 或建立了整机模型侧重风电机组转矩载荷对传动链的影响, 忽略了弹性支承垂直方向的振动引起的扭振。本文针对现有研究的不足, 基于多体动力学仿真软件 Simpack 建立了包含风电机组叶片、轮毂、主轴、齿轮箱、机架、联轴器、发电机以及塔架等主要部件的动力学模型, 结合风电机组气动载荷计算模型与控制算法, 形成了气-构-控耦合的动力学模型。基于建立的耦合模型对弹性支承在多种工况下的动态响应进行了仿真计算与对比分析, 为弹性支承的设计与诊断提供了动力学依据。

## 1 建立模型

本文以美国可再生能源实验室提供的 NREL 5 MW 风力机模型作为算例进行 Simpack 多体动力学建模<sup>[8]</sup>。

### 1.1 NREL 5 MW 风力机简介

NREL 5 MW 风电机组为三叶片上风电机组,

收稿日期: 2023-02-06。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFN1506700); 国家能源集团联合动力技术有限公司科技创新项目(LHDL-2021-03)。

作者简介: 尹尧杰(1987-), 男, 博士, 工程师, 主要从事风电机组载荷计算与动力学仿真工作。E-mail: yinyaojie@126.com

其主要参数见表 1。

表 1 NREL 5 MW 风力机主要参数  
Table 1 Parameter of NREL 5 MW

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	5.0	风轮质量/t	110
额定风速/ $m \cdot s^{-1}$	11.4	机舱质量/t	240
风轮额定转速/ $r \cdot \min^{-1}$	12.1	塔架质量/t	347.46
叶轮直径/m	126	倾角、锥角/ $^{\circ}$	5, 2.5
轮毂高度/m	90		

## 1.2 叶片模型

Simpack 柔性叶片建模中需要叶片沿展向预弯、弦长、前掠、摆振刚度、挥舞刚度以及扭转刚度等参数,同时考虑质心、弹性中心以及气动中心在叶片截面“不共心”的特点。图 1 所示为叶片截面坐标系。

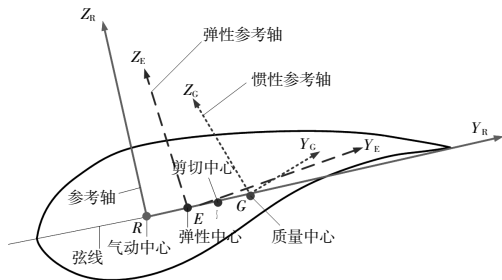


图 1 叶片截面坐标系

Fig.1 Blade cross section coordinate system

将 NREL 5 MW 风力机叶片的结构数据导入并进行模态分析,得到叶片一阶挥舞频率为 0.65 Hz,一阶摆振频率为 1.08 Hz,一阶扭转频率为 5.48 Hz。该结果与美国可再生能源实验室提供的数据吻合。

## 1.3 轮毂模型

风力机轮毂刚度很大,在动力学模型中作为刚体处理。本文在有限元软件中建立其有限元模型(图 2),并对轮毂扭转刚度进行了计算。

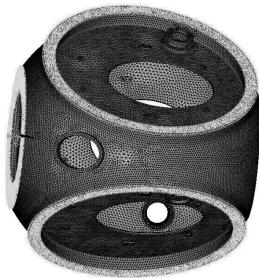


图 2 轮毂模型

Fig.2 Hub model

## 1.4 机舱模型

机舱模型包含了主机架、机舱壳体、齿轮箱传动链、联轴器以及发电机等部件。本文对这些部件分别建模。

### ①主机架与机舱壳体模型

主机架可由三维实体文件导入,如图 3 所示。主机架通过相应的 Markes 点分别与机舱壳体、主轴、齿轮箱以及发电机连接。风力机的机舱壳体作为刚体处理,其一端与主机架相连,另外一端则与塔架相连。

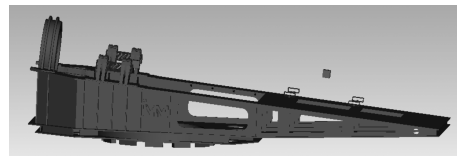


图 3 主机架模型

Fig.3 Mainframe model

### ②齿轮箱传动链模型

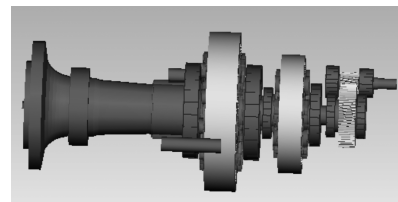
NREL 5 MW 风电机组传动链通过三级齿轮提速,传动比为 97,其中前两级为行星齿轮级,第三级为平行齿轮。三级齿轮啮合基本参数如表 2 所示<sup>[9]</sup>。

表 2 齿轮参数

Table 2 Gear parameter

部件	低速级			中间级			高速级	
	太阳轮	行星轮	内齿圈	太阳轮	行星轮	内齿圈	大齿轮	小齿轮
齿数/个	23	34	93	20	37	97	19	63
模数/mm	25			18			16	
螺旋角/ $^{\circ}$	7			7			7	
压力角/ $^{\circ}$	20			20			20	

建立的风电机组传动链模型力学拓扑结构如图 4 所示。图中风电机组传动链轴系轴承与齿轮箱弹性支承均采用 43 号力元模拟,43 号力元可以提供 6 个方向的刚度与阻尼。传动链除了轴承受力元件,还有齿轮啮合力。齿轮啮合可以使用 225 力元,225 力元基于 DIN 3990 的方法计算齿轮之间动态的啮合力。



(a)传动链模型

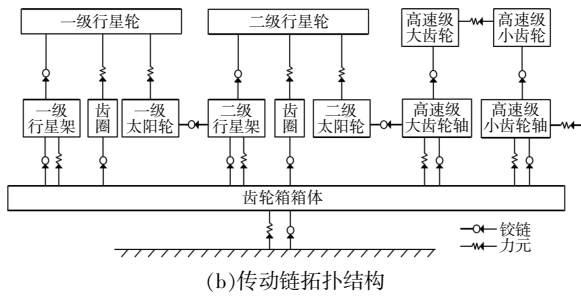


图 4 传动链模型与拓扑结构

Fig.4 Model and topology of drivetrain

③联轴器模型

齿轮箱输出轴通过联轴器与发电机轴相连, 联轴器可以有效减小齿轮箱轴与发电机轴之间的不对中, 也可以防止转子轴向的相对位移。在 Simpack 中, 联轴器可以用 4 个刚体质量块模拟, 刚体之间通过 43 号力元连接。

④发电机模型

发电机由定子与转子构成, 定子与转子之间通过 43 号力元连接, 即代表发电机前后轴承。同时定子与转子之间还有电磁转矩, 在 Simpack 中可以通过 110 号力元模拟。发电机定子通过 4 个弹性支承与主机架连接, 同样采用 43 号力元建模。

1.5 塔架模型

NREL 5 MW 风电机组提供了适用于陆上风电的固定桩以及适用于海上风电漂浮式的塔架支承结构。本文以陆上塔架为分析对象, 根据塔架的材料属性及截面直径与厚度, 以 Linear Simbeam 柔性梁建立风电机组塔架模型。

1.6 风电机组整机动力学模型

将叶片、轮毂、机舱、齿轮箱、联轴器、发电机以及塔架模型按照风电机组实际的拓扑进行组装, 得到风电机组整机动力学模型(图 5)。

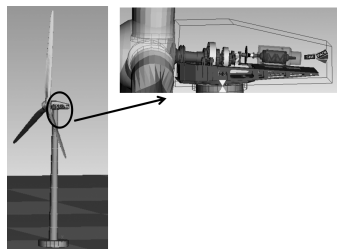


图 5 风电机组模型

Fig.5 Wind turbine model

2 气动载荷与控制模型

在本文建立的风电机组动力学模型基础上施加气动载荷计算与实时控制。

2.1 气动载荷计算

Simpack 通过 241 号力元调用 NREL 开发的 AeroDyn 气动载荷计算程序计算风力机受到的气动力<sup>[10]</sup>。AeroDyn 读取叶片模型的气动点位置与相应的弦长、翼型与扭角, 然后调用相应的模块迭代计算截面的诱导因子与气动系数。AeroDyn 在计算过程中考虑了叶尖叶根损失、动态入流、动态失速以及塔影效应等, 具体的求解过程见文献[10]。求得叶片截面的切向力与法向力, 沿叶片进行积分即可得到作用在风电机组上的气动载荷。AeroDyn 计算风电机组气动载荷的方法已得到 DNV GL 风力机载荷计算的认证, 因此本文气动载荷计算的方法是可靠的。

2.2 控制模型

NREL 5 MW 风力机为变速变桨控制风力机, 发电机转矩根据转速可以分为 5 个控制区, 即 1 区, 1½ 区, 2 区, 2½ 区和 3 区。1 区为切入风速前, 此时发电机转矩为 0, 不发电。2 区为最优功率区, 此时发电机转速根据风力机最优叶尖速比进行调节, 发电机转矩为发电机转速 2 次方关系。3 区为满功率控制区, 即保持风电机组发电功率不变, 发电机转矩与转速为反比例关系。1½ 区为 1 区和 2 区的过渡区, 采用线性变换由 1 区静止状态逐渐启动过渡到 2 区最优叶尖速比运行。2½ 区为 2 区和 3 区之间的过渡区, 为了保证在额定转速下同时达到额定转矩设置, 在此区域发电机转矩线性提升至额定转矩。本文通过调用 243 号力元读取控制程序动态链接库, 从而实现转矩与变桨控制。风力机转矩转速曲线如图 6 所示<sup>[8]</sup>。

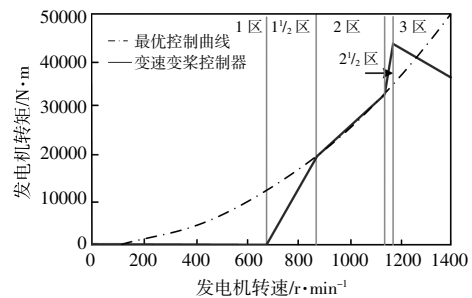


图 6 风力机转矩转速曲线

Fig.6 Torque-versus-speed curve

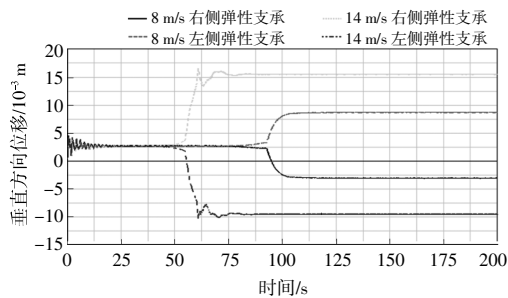
3 动态响应分析

利用建立的风电机组整机气-构-控耦合动力学模型对齿轮箱弹性支承在垂直方向的稳态风速、湍流风速下的动态响应进行仿真与分析。

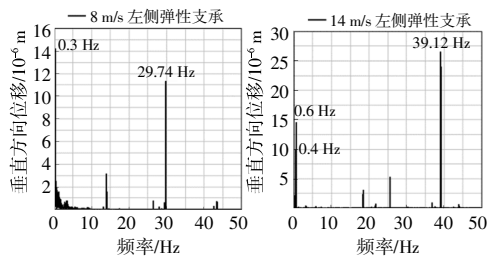
### 3.1 稳态风速

#### 3.1.1 均匀风速齿轮箱弹性支承的时频振动特性

计算得到均匀风速分别为 8 m/s 和 14 m/s 时齿轮箱弹性支承在垂直方向的时域动态响应 [图 7(a)]。由图 7(a)可知:齿轮箱两个弹性支承振动方向相反,即齿轮箱整体发生摇摆运动;风速为 14 m/s 时的振动为风速为 8 m/s 时的 2 倍左右。分别截取两个风速下弹性支承时域响应稳定后的 125~175 s 的振动数据做频谱分析[图 7(b)]。



(a) 时域响应



(b) 频域响应

图 7 齿轮箱弹性支承动态响应

Fig.7 Elastic Support dynamic response

风速为 8 m/s 时,风轮转速为 9.12 r/min,风速为 14 m/s 时,风轮转速为 12 r/min。根据 GL 认证规范<sup>[1]</sup>,风力机在运行过程中需要关注的主要激励频率如表 3 所示。

表 3 NREL 5 MW 风力机主要激励频率  
Table 3 Exciting frequencies of NREL 5 MW

转速 倍频	风轮转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	
	9.12	12
轮毂转速 1p	0.15	0.20
轮毂转速 2p	0.30	0.40
轮毂转速 3p	0.46	0.60
轮毂转速 6p	0.91	1.20
齿轮一级 1p	0.77	1.01
齿轮一级 2p	1.53	2.02
齿轮一级 3p	2.30	3.03
齿轮二级 1p	4.48	5.90

续表 3

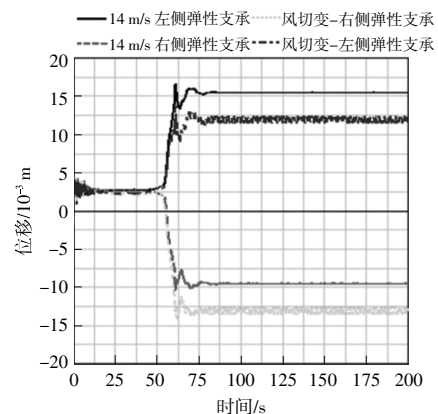
转速 倍频	风轮转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	
	9.12	12
齿轮二级 2p	8.97	11.80
齿轮二级 3p	13.45	17.70
齿轮三级 1p	14.87	19.57
齿轮三级 2p	29.74	39.13
齿轮三级 3p	44.61	58.70
齿轮一级啮合 1p	17.63	23.20
齿轮一级啮合 2p	35.26	46.40
齿轮一级啮合 3p	52.90	69.60
齿轮二级啮合 1p	89.69	118.02
齿轮二级啮合 2p	179.39	236.03
齿轮二级啮合 3p	269.08	354.05
齿轮三级啮合 1p	282.53	371.75
齿轮三级啮合 2p	565.07	743.51
齿轮三级啮合 3p	847.60	1 115.26

对应图 7 的齿轮箱弹性支承频域响应,可以看出,弹性支承振动的频率主要成分为轮毂转速 2 倍频、3 倍频以及齿轮箱第三级转速的 2 倍频成分。说明风轮处的载荷与齿轮箱输出端的载荷均可以传递到弹性支承,弹性支承的振动既包括低频振动也包含有高速级的高频振动,极易引起部件的损坏。

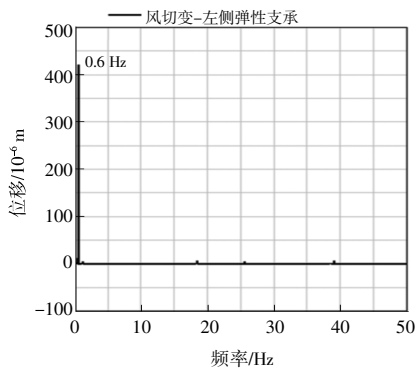
#### 3.1.2 风切变影响

由于风切变的存在,风电机组风轮在运行过程中受到的气动力在不同方位角是不同的,按照 IEC 61400-1 设计标准<sup>[2]</sup>,设置风切变系数为 0.2,轮毂处的风速仍然为 14 m/s,计算得到的弹性支承时域响应如图 8 所示。

由图 8 可知:当考虑风切变影响时,弹性支承时域振动信号整体发生了偏移,但是振动相对幅值变化不大;频域上则主要表现为低频振动,频率



(a) 时域响应



(b) 频域响应

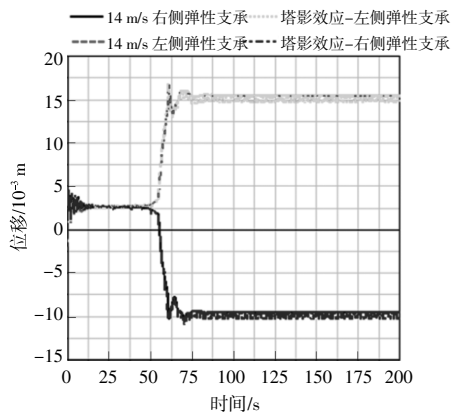
图 8 弹性支撑在风切变时的响应

Fig.8 Elastic support response of wind shear

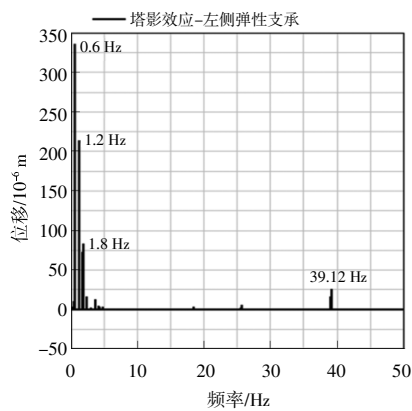
成分为轮毂转速 3 倍频,即 0.6 Hz, 齿轮箱高速级的高频振动被抑制。

### 3.1.3 塔影效应影响

对于上风风力机, 机组在运行过程中还会受到塔影效应产生的周期性激励, 这种激励载荷也会传递给齿轮箱弹性支撑。图 9 所示为考虑塔架



(a) 时域响应



(b) 频域响应

图 9 弹性支撑在塔影效应时的响应

Fig.9 Elastic support response of tower shadow

塔影效应的弹性支撑动态响应。

由图 9 可知, 塔架塔影效应对弹性支撑的振动幅值影响不大,但是波动值加大了,从频域中可以看出,主要是以轮毂转速 3 倍频,即 0.6 Hz 为倍数的谐波,这是由于风电机组 3 支叶片中的每一支过一次塔架就会形成一次冲击造成的。

### 3.1.4 线性与非线性支撑对比

实际风电机组齿轮箱弹性支撑并不是严格线性的,图 10 为某风电机组实测弹性支撑刚度曲线。

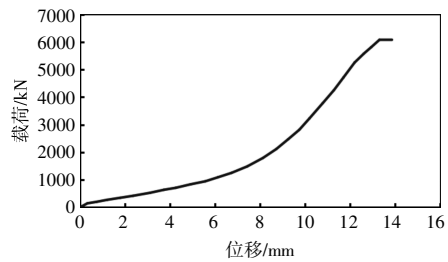


图 10 实测弹性支撑刚度曲线

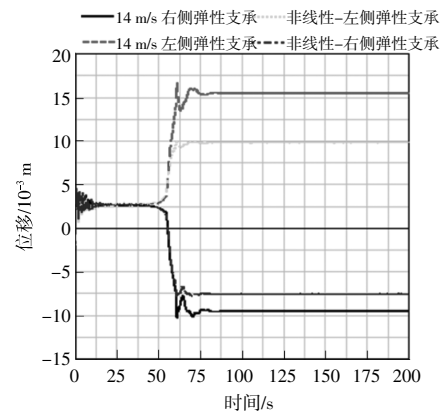
Fig.10 Measured stiffness curve of elastic support

将测试的弹性支撑刚度曲线根据动力学相似准则等效加载到 NREL 5 MW 风电机组整机动力学模型中,并对 14 m/s 均匀风速下弹性支撑的动态响应进行计算,计算结果如图 11 所示。

由图 11 可知,考虑非线性刚度时,弹性支撑的时域响应的幅值会降低 20%左右,频域表现的特征与线性刚度相同,主要以齿轮箱第三级转速 2 倍频,即 39.12 Hz 为主,这说明弹性支撑高频的振动主要与其刚度密切相关。

### 3.2 湍流风速

综合本文风切变、塔影效应以及非线性刚度影响因素,叠加湍流对比分析在湍流风中如果一个弹性支撑损坏对其响应的影响。



(a) 时域响应

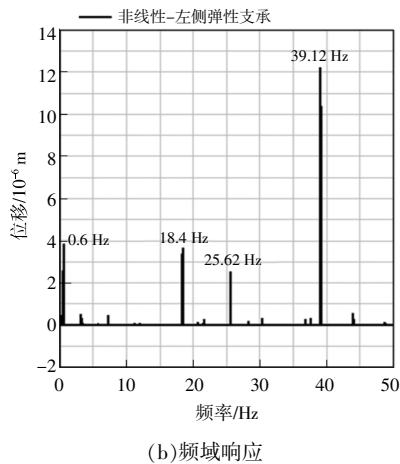


图 11 非线性弹性支承响应

Fig.11 Nonlinear elastic support response

将依照文献 [12] 模型产生的平均风速为 14 m/s, B 类湍流的湍流风加载到风电机组整机气-构-控耦合动力学模型中, 假设一个弹性支承发生损坏, 刚度为另外一个的一半, 不能匹配刚度, 计算其动态响应, 结果如图 12 所示。

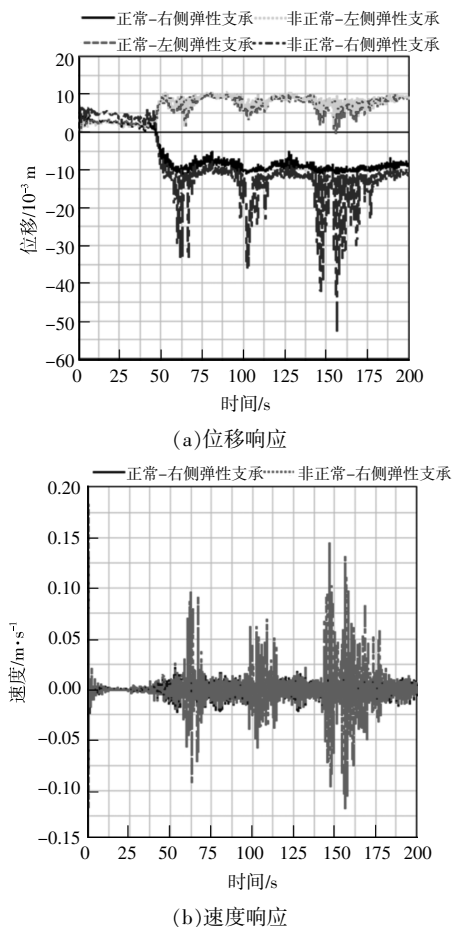


图 12 湍流风况弹性支承响应

Fig.12 Elastic support response of turbulence

由图 12 可知: 在实际的湍流风况中, 当一个弹性支承损坏不能提供足够刚度时, 振动会迅速放大, 振动有效值达到正常值 4 倍以上; 振动速度已经远超 VDI3834 规定的安全幅值, 会对风力机正常运行造成严重威胁。

#### 4 结论

①采用多体动力学软件分别建立了风电机组叶片、轮毂、机舱、主机架、齿轮箱、联轴器、发电机、塔架的动力学模型, 并联合气动计算程序与控制动态链接库搭建了风电机组气-构-控耦合的动力学模型, 该模型可对风电机组及其内部部件如齿轮箱弹性支承、齿轮以及轴承的动态特性进行准确仿真。

②应用建立的风电机组整机动力学模型, 以 NREL 5 MW 风力机模型为算例, 仿真计算了均匀风速分别为 8 m/s 和 14 m/s 时弹性支承在垂直方向的动态响应, 分析了其时频特性。以均匀风速为 14 m/s 的弹性支承的动态响应为标模对比分析了风切变、塔影效应以及非线性刚度对其振动的影响规律, 为弹性支承故障诊断提供了动力学依据。

③结合风切变、塔影效应以及弹性支承非线性刚度影响, 仿真计算了湍流风况条件下风电机组弹性支承刚度不平衡的动态响应。当弹性支承出现损坏不足以匹配刚度时, 其响应会急剧增加, 超过振动安全阈值, 影响风电机组安全稳定运行。

#### 参考文献:

- [1] 秦海岩.“十四五”, 大力发展风电正当时[J]. 风能, 2021 (11): 1.
- [2] 廖明夫, Gasch R, Tvele J. 风力发电技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009.
- [3] 余芷玲. 弹性支撑浮式风电机组传动链动态特性分析及优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [4] 李慧新, 吕杏梅, 王璇, 等. 弹性支撑下风电机组传动系统结构动力分析[J]. 动力学与控制学报, 2015, 13(4): 293-299.
- [5] 郭志伟. 大功率风力发电机组弹性支承设计制造技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- [6] 宋斌, 赵萍. 大型风电机组传动链地面试验平台简化影响分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(8): 1059-1065.
- [7] 白聪儿, 秦美娟, 孙哲杰, 等. 发电机短路工况下风电机组传动链动力响应特性研究[J]. 机电工程, 2022, 39(5): 612-619.

- [8] J Jonkman, S Butterfield, W Musial, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Golden: NREL, 2009. [EB/OL]. <https://www.docin.com/p-302585478.html>, 2007-11-12.
- [9] Keller J, Lacava W, Austin J, et al. Recommendations on model fidelity for wind turbine gearbox simulations[R]. Golden: NREL, 2015.
- [10] David J Laino, A Craig Hansen. Aerodyn user's guide [11] Germanischer Lloyd, Rules and Guidelines, IV - industrial Services, Part 1-Guideline for the Certification of Wind Turbines(2010)[S].
- [12] IEC 61400 -1, Wind Turbines -Part 1: Design Requirements(2009)[S].

## Dynamic characteristics analysis of large-scale doubly-fed wind turbine elastic support

Yin Yaojie<sup>1</sup>, Chu Jingchun<sup>2</sup>, Jiang Peixue<sup>3</sup>

(1.GuoDian United Power Technology Co.,Ltd., Beijing 100039, China; 2.CHN Energy New Energy Technology Research Institute Co.,Ltd., Beijing 102209, China; 3.Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The wind turbine is developing towards large-scale and intelligent, the loads of the turbine are increasing exponentially, which puts forward higher requirements for the dynamic design of the turbine components. In this paper takes the elastic support of wind turbine gearbox as the research object, and the dynamic model of entire wind turbine is established by using multi-body multi-dynamics software, coupled with the calculation of aerodynamic load and the control program of wind turbine. The time-frequency characteristics of the dynamic response of the elastic support under uniform wind are calculated, and the influences of wind shear, tower shadow effect and nonlinear stiffness on the elastic support are compared and analyzed. Finally, the dynamic response of the elastic support of the wind turbine under the condition of turbulent wind are simulated. The results show that when the elastic support is damaged and only matches 50% of the stiffness, the response of the elastic support increases sharply, exceeding the vibration standard safety threshold by more than 4 times, which affects the safe and stable operation of the whole wind turbine.

**Keywords:** wind turbine; multi-dynamics; nonlinear stiffness; elastic support; dynamic characteristics