

# 双馈式风力发电机组叶片变桨连接螺栓断裂故障分析及预防

霍元胜, 祁正平, 王鉴鹏  
(五凌电力有限公司宁夏分公司, 宁夏 银川 750000)

**摘 要:** 叶片变桨螺栓为风力发电机组主要连接部件, 叶片高强度连接螺栓的材质标准和施工安装工艺对螺栓运行寿命长短至关重要。通过宏观分析、安装工艺分析、化学成分检验、机械拉伸试验分析等方法, 对螺栓断裂原因分析验证。结果表明, 从材质各元素及杂质含量导致螺栓质量不合格, 装配螺栓预紧力精度不足、螺栓润滑不到位造成叶片连接螺栓预紧力不均匀, 叶片自重、旋转离心拉力和风载荷等疲劳过载, 都有可能造成螺栓断裂。研究结果可为风机叶片螺栓安装过程中, 安装工艺不到位、材质不合格等问题, 有效的预防螺栓频繁断裂提供更多的理论依据。

**关键词:** 风力发电机组; 变桨连接螺栓; 断裂

中图分类号: TV736

文献标识码: B

文章编号: 1672-5387(2024)06-0092-05

DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2024.06.027

## 0 前言

甘肃省某风电场, 海拔高程 2 600~3 050 m 之间, 属高海拔高寒地区, 每年 10 月至次年 5 月均为低温雨雪冰冻天气。电场总装机 100 MW, 选用远景能源 EN-110/2.2 MW 型号双馈异步风力发电机组, 叶片变桨连接螺栓为某公司生产的材质为 42CrMoA。设计年等效利用小时数 2 246 h, 年设计发电量 2.273 亿 kW·h, 于 2016 年 9 月全部风机并网发电。

## 1 故障情况

2019 年, 通过风机巡视、维护以及风机大部件健康状态评估, 发现 5 台风机出现叶片变桨连接螺栓出现断裂现象。

表 1 螺栓断裂统计表

机组编号	发现断裂时间	叶片编号	断裂螺栓编号
T25	2019 年 3 月 15 日	1 号	18、19、20、21
T02	2019 年 10 月 28 日	3 号	36
T28	2019 年 10 月 30 日	3 号	6
T24	2019 年 12 月 23 日	3 号	8
T39	2020 年 1 月 31 日	3 号	60

## 2 故障诊断分析

### 2.1 宏观分析

从断裂整体宏观形貌(见图 1)来看, 螺栓断裂

端面均与变桨轴承齐平, 为螺栓与螺母处的第一个螺牙处。



图 1 变桨连接螺栓断裂

从螺栓断面(见图 2)来看, 断面较为平整, 断裂贝纹较为明显, 裂纹源、裂纹扩展区、瞬断区都较为明显。可以看到断面与(见图 3)第一行中的第四个图断面非常吻合, 即典型性的低预紧力下的螺栓疲劳断裂<sup>[1]</sup>。

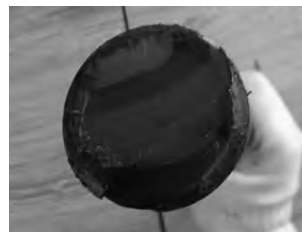


图 2 螺栓裂纹划痕

### 2.2 预紧力分析

螺栓插入被连接件, 通过螺母拧紧使螺栓拉伸

收稿日期: 2023-12-28

作者简介: 霍元胜(1988-), 男, 工程师, 从事风电场维护检修及技术管理工作。

变形,这个弹性变形产生了轴向的拉力,将被夹零件挤压在了一起,称为预紧力。

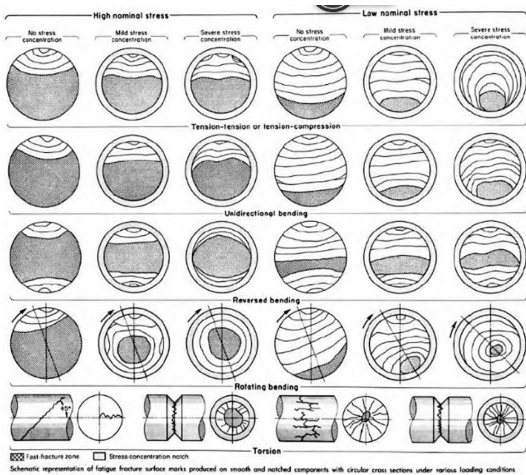


图 3 螺栓在不同载荷下的断面

风机高强度连接螺栓在风机安装时要求对螺母和螺栓配合段的螺纹以及螺母和垫片结合面进行全润滑,在润滑不足的情况下,即使施加的标准的螺栓力矩,也会使螺栓的轴向预紧力不足,更多的力矩用于克服螺栓和螺母之间的摩擦以及螺母和垫片之间的摩擦。同时安装时也有严格的作业要求,如预紧一圈叶片螺栓时需按照三角交叉或十字交叉的顺序,若不按要求进行预紧力会使个别或整个片区螺栓可能预紧力不足。

#### (1) 螺栓润滑及涂抹方式

螺栓紧固采用全润滑方式,全润滑方式首先保证螺栓与螺母的螺纹旋合部位润滑,在螺纹上均匀涂抹润滑脂;另外保证螺母与垫片的接触面充分润滑,在螺母的反面(与垫片的接触面涂抹润滑脂)润滑<sup>[2]</sup>。(注意:低温条件下使用润滑脂,润滑脂涂抹不均匀,需要对润滑脂进行加热,禁止往润滑脂中添加任何其它介质。)

螺纹处:保证螺纹旋合处均匀充分涂抹,螺纹螺牙内充分均匀涂抹,没有亮层锌面裸露。(参考:螺栓头部留出 3 个螺牙不涂抹)(见图 4)。

接触面:螺母与垫片的接触面保证充分均匀,涂在螺母上,保证螺母与垫片的接触面无锌层裸露(见图 5)。

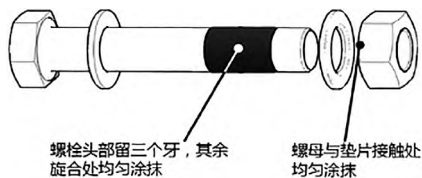


图 4 螺栓润滑部位

#### (2) 螺栓受力

从螺栓扭矩转化(见图 5)来看,施加的扭矩,其中约 50% 用于克服支承面的摩擦,约 40% 用于克服螺纹中的摩擦,只有约 10% 转化成了轴力。通过对螺栓进行全润滑(即螺纹副和支承面进行润滑)可以降低其中的摩擦系数,从而使得更多的扭矩转化成预紧力。

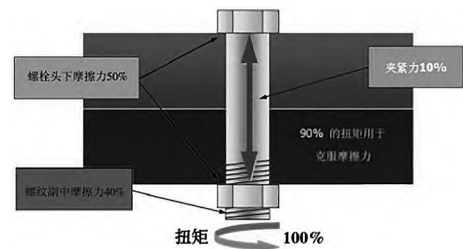


图 5 螺栓扭矩转化

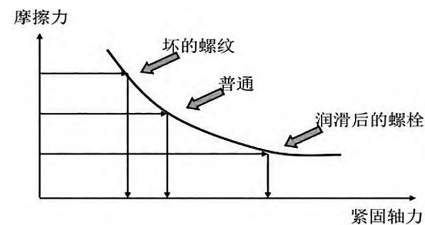


图 6 螺栓轴力与摩擦力的关系

从螺栓轴力与摩擦力的关系(见图 6)来看,在相同的扭矩下,润滑后的螺栓紧固轴力更大。而润滑工作是在安装阶段进行,在并网以后的维护期间,现场人员只是对螺栓的力矩进行检查,即只能保证施加在螺栓上的扭矩满足工艺要求;但如果安装阶段润滑不到位,在后期的维护期中,定期检查,仍然不能避免螺栓预紧力不足<sup>[3]</sup>。

从螺栓的载荷与应力曲线关系(见图 7)来看,其中横坐标是叶根所承受的载荷,纵坐标是螺栓的应力,可以看到螺栓预紧力越小,叶根外载到一定程度以后,相同的外载变化,引起的螺栓上的应力变化越大,螺栓所受的疲劳载荷越大,螺栓的疲劳寿命会大大降低,因此安装过程中螺栓润滑不到位、预紧力未达到标准是螺栓断裂的主要原因之一。

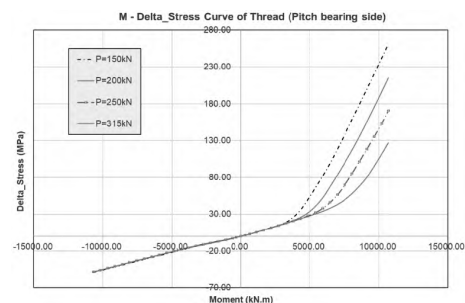


图 7 螺栓的载荷与应力曲线关系

### 2.3 机组运行工况分析

基于某风电场 2019 年 1 月到 2022 年 1 月的 SCADA 运行数据,得到全场机组风况。

表 2 机组年平均风况

风机名称	平均风速 /m/s	入流角 /°	风剪切
T01	6.91	5.8	0.2
T02	7.44	5.6	0.21
T03	7.96	5.3	0.07
T04	7.67	4.8	0.11
T05	7.57	4.4	0.24
T06	7.44	2.3	0.16
T07	7.61	2.1	0.1
T08	7.73	2.6	0.06
T09	7.51	2	0.11
T10	7.17	2.2	0.14
T11	6.93	1.2	0.1
T12	7.19	0.7	0.09
T13	7.11	2.9	0.1
T14	7.71	2	0.05
T15	7.93	0.8	0.1
T16	7.89	1.6	0.11
T17	7.53	1.6	0.09
T18	7.55	3.7	0.08
T19	7.33	1.3	0.1
T20	7.41	1.8	0.07
T21	7.72	2.5	0.08
T22	7.31	2.8	0.14
T23	7.05	3.1	0.13
T24	7.18	3.3	0.13
T25	7.2	2.1	0.11
T26	7.35	3	0.08
T27	7.15	5.6	0.18
T28	7.71	3.9	0.09
T29	7.32	2	0.09
T30	7.3	3.2	0.1
T31	7.81	1.9	0.12
T32	7.42	2.8	0.17
T33	7.16	3.7	0.14
T34	6.81	3	0.17
T35	6.54	3	0.16
T36	6.95	2.4	0.15
T37	6.75	1.7	0.14
T38	6.61	1.7	0.2
T39	7.23	1.8	0.15
T40	6.82	3.3	0.11
T41	7.24	4.2	0.13
T42	6.69	4.1	0.32
T43	6.75	2.8	0.18
T44	6.84	4.1	0.16
T45	6.3	3.5	0.31
T46	6.58	2.9	0.16

各机组年平均风速 (m/s)

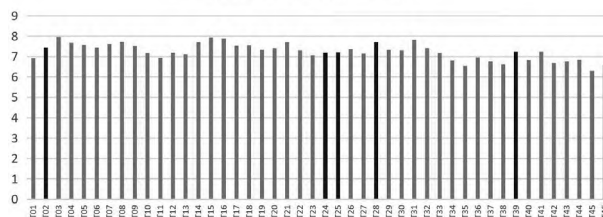


图 8 螺栓安全系数

从机组风况(图 8)对比来看, T02、T24、T25、T28 和 T39 号风机的年平均风速较大。从各风机年平均风速对比,5 台机组中 T25 号风机发生螺栓断裂最早,且年平均风速更高的 T02、T28 等机组还未发生螺栓断裂,因此风速大小不是各机组螺栓断裂的主要原因。

叶片螺栓疲劳安全系数分布

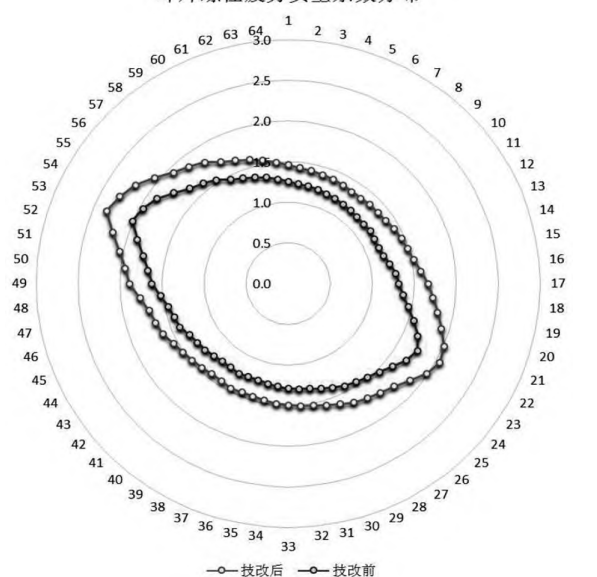


图 9 螺栓安全系数

螺栓承载力为叶根处的载荷通过一定的分配比传递给螺栓,(见图 9)来看,为叶片一圈 64 颗螺栓安全系数的分布,蓝色线为原始机型的安全系数分布,可以看到螺栓安全系数最小的区域为叶片靠近前后缘区域,即摆振方向的载荷。叶片摆振方向的弯矩主要由叶片的重力矩产生,每支叶片的实际重力矩和理论重力矩的偏差不得超过 3%。同时叶根摆振的一个疲劳循环就是风轮转一圈,风轮转的圈数越多,叶根的摆振疲劳越大。而年平均风速越大,则风轮转的圈数越多<sup>[4]</sup>。根据(图 8)各机位的风况信息,可以看到发生螺栓断裂的机位常年风速较大,因此疲劳载荷超载是引起螺栓断裂主要原因之一。



2.4 叶片力矩荷载受力分析

从叶片实测载荷和理论仿真载荷关系(见图 10)来看,可以发现摆振方向叶片的实测载荷和理论仿真载荷比较相差不大,因此在实际运行中疲劳载荷超载不大。

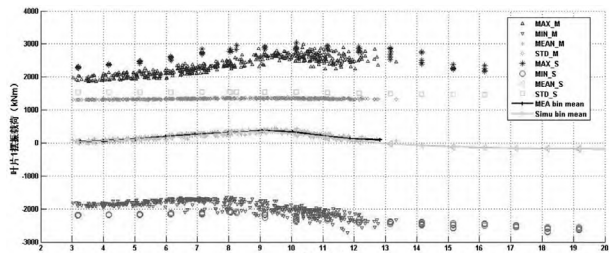


图 10 叶片实测载荷和理论仿真载荷关系

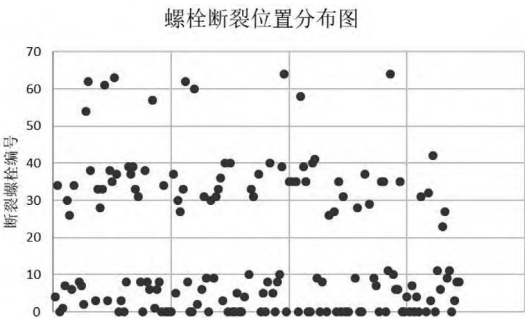


图 11 叶片螺栓断裂位置图

根据从发生过螺栓失效断裂的统计,螺栓发生断裂的位置绝大部分分布在叶片前后缘区域,因为这个位置的螺栓受载最大<sup>[5]</sup>,从叶片螺栓断裂位置

(见图 11)来看,可以看到断裂的螺栓绝大部分分布在 0 号~10 号螺栓以及 30 号~40 号螺栓之间,即叶片前后缘区域,这与叶片螺栓前后缘区域安全系数最小相吻合。由于每台风机每颗螺栓的润滑情况,预紧力大小等各不相同,个别螺栓失效区域并不是严格符合这个规律。

2.5 微观分析

(1) 化学成分检验

从断裂螺栓随机取样 3 颗进行化学成分分析,检测结果见表 3:

表 3 化学成分分析结果 (%)

检验项目	C	S	P	Si	Mn	Cr	Mo
技术要求	0.38~0.45	≤0.02	≤0.02	0.17~0.37	0.5~0.8	0.91~1.2	0.15~0.25
螺栓 X201917108	0.38	< 0.008	< 0.01	0.23	0.71	0.96	0.19
螺栓 X201917109	0.39	< 0.008	< 0.01	0.24	0.69	0.98	0.19
螺栓 X201917114	0.42	< 0.008	< 0.01	0.25	0.69	1.04	0.18

检测结果显示,螺栓化学成分符合(GB/T18254-2016)中 42CrMoA 的标准。不存在应材质成分造成螺栓断裂现象。

(2) 螺栓机械拉伸试验分析

从断裂螺栓随机取样 3 颗进行机械拉伸试验分析,检测结果见表 4:

表 4 机械拉伸试验分析结果

检验项目	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 /%	断面收缩率 /%	-40℃螺栓冲击 /J	螺栓表面硬度 /HV	螺栓芯部硬度 /HV	螺栓硬度差 /HV
技术要求	≥940	≥1 040	≥9	≥48	≥27	320~390	320~390	≤30
螺栓 X201917108	1 024	1 120	14.5	57	41	362.8	340.3	22.5
螺栓 X201917109	939	1 048	15.5	61	35	352.5	334.6	17.9
螺栓 X201917114	991	1 092	14.5	59	31	360.9	344.4	16.5

检测结果显示,机械拉伸试验符合(GB/3098.1-2010)标准。不存在螺栓强度低造成螺栓断裂现象。

(3) 螺栓杂质成分分析

从断裂螺栓随机取样 3 颗,在 3% 硝酸酒精溶液和 1 : 1 盐酸水溶液中进行螺栓非金属杂质成分分析,检测结果见表 5:

表 5 螺栓非金属杂质成分分析结果

检验项目	索氏体含量 /%	螺纹	硫化物类	氧化铝类	硅酸盐类	环状氧化物类	单颗粒球状类
		全脱碳层	粗系	粗系	粗系	粗系	
技术要求	≥90	< 0.015	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5
螺栓 X201917108	93	0	0	0	0	0	0
螺栓 X201917109	93	0	0	0	0	0	0
螺栓 X201917114	93	0	0	0	0	0	0

检测结果显示,非金属杂质成分符合(GB/T 224-2008、GB/T 10561-2005、GB/T 226-2015、GB/T

1979-2001)标准。不存在螺栓含非金属杂质超标造成螺栓断裂现象。

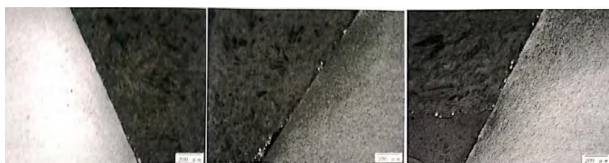


图 12 X201917108、X201917109、X201917114 叶片螺栓脱碳层 100X



图 13 X201917108、X201917109、X201917114 叶片螺栓头部显微组织 500X

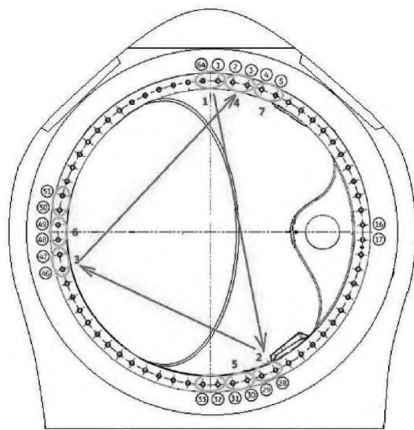


图 15 螺栓更换示意图

### 3 预防措施

#### 3.1 短期措施

对全场风机叶片连接螺栓进行一次力矩全检,确认其他机组是否有螺栓断裂的情况还未发现。部署螺栓监控系统 PCH2P,利用叶根螺栓特征信号可在早期发现螺栓断裂或松动的异常,系统可自动发出预警指示,提示现场人员检修。若螺栓断裂情况继续恶化,系统将自动执行停机指令保护风机安全。

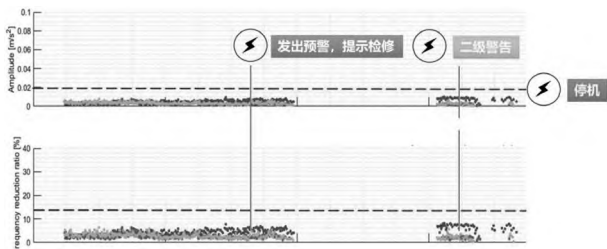


图 14 PCH2P 振动监测系统监测原理

#### 3.2 长期措施

由于安装预紧力不足分布存在一定的随机性,因此叶片连接螺栓断裂潜在风险的风机也存在一定随机性,为了彻底消除螺栓断裂的风险保证设备安全运行,对所有叶片螺栓进行更换,并使用拉伸器对螺栓的安装预紧力达到标准值。

#### 3.3 更换螺栓

更换螺栓每次更换 6 颗螺栓按照三角顺序进行(见图 15),对所使用的液压站、拉伸器、液压扳手进行送检。更换分两步紧固所有螺栓,第一步紧固到给定预紧力的 70%,第二步紧固到给定预紧力 100%。

### 4 结论

综上所述,叶片高强度连接螺栓运行寿命与材质标准和施工工艺有很大关系。从材质各元素杂质含量、预紧力、运行工况、叶片力矩荷载受力等分析,都有可能造成螺栓断裂。发生断裂的叶片连接高强螺栓多为疲劳断裂或材质不符合要求。叶片螺栓受力复杂,主要是自身重力、旋转离心拉伸及剪切力作用,疲劳应力在螺栓预紧力不足时,导致叶片螺栓寿命降低。如频繁出现螺栓断裂现象,为保证机组安全,建议分批次全部按标准要求进行更换螺栓后观察。自叶片螺栓更换后在定期维护中按标准工艺进行螺栓力矩紧固,机组运行 2 年再未发生连接螺栓断裂情况。

近年来,随着新能源风电装机不断增大,单机容量逐步向大容量机组发展,加强连接螺栓等金属连接件日常监测,改进维保工艺标准,可以有效预防和减少金属连接部件突发断裂影响风机安全运行。

#### 参考文献:

- [1] 张克君,吴士华,郭耀斌. 风力发电机组叶片螺栓失效原因分析与研究 [C]//2018 年(第四届)风电场运行维护及后评价专题交流研讨会.
- [2] 江纯伟,陈琦峰,朱凌静,等. 风力发电机高强度螺栓断裂分析 [J]. 金属制品,2015(4):55-57,64.
- [3] 陈杨,李军庆,童泽鑫,等. 关于陆上风力发电机组风轮系统吊装方式的研究 [C]// 第九届中国风电后市场交流合作大会,2022.
- [4] 龚民. 风电叶片根部螺栓连接的受力性能研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2020.
- [5] 刘丹. 预紧力对端板连接 M24 高强度螺栓常幅疲劳性能影响分析 [D]. 太原:太原理工大学,2021.

## ABSTRACTS

### Research and application of operating condition control of WTGS sectors based on acceleration trend regulation

PU Hong-jian

(Wuling Power Corporation Ltd., Changsha 410118, China)

**Abstract:** Sector management technology can ensure the safe and stable operation of WTGS, but traditional wind power sector management technology cannot accurately control WTGS, and may even cause frequent shutdown of WTGS, resulting in great losses. To solve the above problems, this paper proposes a control method for regulating the sector operating conditions of WTGS based on the acceleration trend. This method enables WTGS to accurately control its operating state under the condition of ensuring safety after entering the sector operating condition, effectively improve the utilization efficiency of wind energy, and avoid the power generation loss caused by frequent triggering of sector management shutdown by WTGS at some positions with poor wind conditions. It applies to the optimization of operation states of various WTGSs under sector operating conditions. The effectiveness of the proposed method is analyzed by taking the wind power operation data of the Shanxi Division of Wuling Power Corporation Ltd. as an example, which provides a reference application for other WTGSs.

**Keywords:** wind power generation; acceleration trend; sector operating condition

### Modeling analysis of cleaning strategy for PV power stations in northwest China based on the K-means algorithm and dust deposition loss coefficient

ZONG Song, ZENG Wei-cai, CHEN Zhi-yong, ZHAO Duo-yuan

(Ningxia Branch of Wuling Power Corporation Ltd., Yinchuan 750000, China)

**Abstract:** Given the lack of scientific and reasonable cleaning strategies for PV power stations in northwest China to remove dust on the surface of modules, a cleaning strategy model for PV power stations based on the K-means algorithm and dust deposition loss coefficient is proposed. The K-means algorithm is used to cluster the log power generation data provided by the station to obtain sunny day data samples, and the sample data are used to fit the power generation capacity loss curve to solve the dust deposition loss coefficient, and the cleaning cost is combined to establish the cleaning strategy model. In this paper, the power generation data of a PV power station in northwest China are used to verify the model. The analysis results show that the model has high accuracy and provides a new idea for the research on the cleaning strategy of PV power stations in northwest China.

**Keywords:** PV power station; dust deposition on module; K-means algorithm; dust deposition loss coefficient; cleaning strategy

### Fault analysis and prevention of blade pitch connecting bolt fracture of doubly-fed WTGS

HUO Yuan-sheng, QI Zheng-ping, WANG Jian-peng

(Ningxia Branch of Wuling Power Corporation Ltd., Yinchuan 750000, China)

**Abstract:** The blade pitch bolt is the main connecting component of the WTGS. The material standard and construction and installation process of high-strength connecting bolts for blades are crucial to the service life of bolts. Through macroscopic analysis, installation process analysis, chemical composition inspection, and mechanical tensile test analysis, the causes of bolt fracture are analyzed and verified. The results show that the bolt fracture may be caused by the unqualified bolt quality due to various elements and impurity contents of the material, insufficient pre-tightening force accuracy of assembly bolts, the uneven pre-tightening force of blade connecting bolts caused by poor lubrication of bolts, and fatigue overloads such as dead weight of blades, rotating centrifugal tension and wind load. The research results can provide more theoretical bases for effectively preventing the frequent fracture of bolts during bolt installation for wind turbine blades caused by improper installation processes, unqualified materials, etc.

**Keywords:** WTGS, pitch connecting bolt, fracture

### Research and application of "collaboration + listing" wind power project construction management mechanism

DING Ai-jun, FAN Yong, Yi Sheng, ZHANG Feng

(New Energy Branch of Wuling Power Corporation Ltd., Changsha 410029, China)

**Abstract:** Taking the construction of a distributed wind power project in Hunan Province as a pilot, a "collaboration + listing" wind power project construction management mechanism has been established to form a "big collaboration" with the project company as the core and all participating units as the support, and an operation mode of "small collaboration" with mutual cooperation and complement between the project company and various functional departments of the Company. The problems and difficulties are "listed" for dynamic management, and a problem list solution mode has been formed, such as "seeking optimization through multi-discussion", "tracing the root cause to improve equipment", "staggering construction to reduce interference" and "clearing problem daily and planning early". It has solved many difficulties such as regional dispersion, coordination and construction difficulty of distributed wind power in mountainous areas, successfully solved the problems of safety, quality and progress of wind power project construction in mountainous areas, and created a new speed for wind power construction in mountainous areas.

**Keywords:** project construction management; wind power; collaboration; listing