

# 试析海上风机在强台风下叶片受损风险与对策

## ——考察红海湾风电场的启示

王景全<sup>1</sup>, 陈政清<sup>2</sup>

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007; 2. 湖南大学风工程试验研究中心, 长沙 410028)

[摘要] 2003年9月近海丘陵区风电场——汕尾红海湾风电场风机叶片被台风“杜鹃”吹坏。从破坏形式可以断定叶片曾发生大幅度扭转颤振而且与不利地形有关。从这一实例来看,同等强度台风情况下海上风机叶片受损的风险可能低于海岸风机,因为海面平坦,不具备风向局部变化条件。此次风灾也表明,保持风机处于停转顺桨,但可偏航的暂停状态是叶片防损的关键。

[关键词] 海上风机;强台风;叶片受损;风险;对策

[中图分类号] TM315 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)11-0032-03

### 1 台风“杜鹃”作用下红海湾风电场叶片受损情况

于午铭在文献[1]中详细介绍了2003年9月2日台风“杜鹃”袭击广东汕尾市红海湾风电场的过程和风电场受损情况。2010年4月13—14日,笔者一行8人实地考察了红海湾风电场,并听取风电场总经理吴少花女士的详细介绍。依据以上信息可以总结出台风致红海湾风电场叶片毁坏的如下特点:

1) 红海湾风电场位于汕尾市施公寮半岛,地处碣石湾西海岸,共有25台V47-660变桨距风电机组,13台位于低海拔平坦地带,另外12台安装在海拔30~64m的丘陵地区(见图1),离海岸线一般在2km以内。

2) “杜鹃”台风经过风电场持续时间为14:00~19:00,共5h。台风经过时风向不断变化,风向由北转东北,再转东,最后转东南离开。风机测得最高瞬时风速57m/s,远低于风机叶片设计抗风强度70m/s。



图1 红海湾位于小山丘地带的风力发电机

Fig. 1 Wind turbine on the foothills in red bay wind farm

3) 9台机组发生叶片破坏,且每台只坏1个叶片,并且有7个叶片是处于下垂状态,只有6号、16号损坏叶片处于朝上位置(另有3号机组在台风

[收稿日期] 2010-07-28

[基金项目] 中国工程院土木、水利与建筑工程学部重点咨询项目“我国海上风电场建设重大工程问题研究”(2008-XZ-05)

[作者简介] 王景全(1937—),男,江西南昌市人,中国工程院院士,解放军理工大学教授,博士生导师,长期从事浮式结构、风电场建设等方面的研究;E-mail:wangjq@cae.cn

前被雷击坏 1 个叶片,台风后叶片无新的破坏,故未计入在内)。

4)处于平地的 13 台风机和处于最高海拔的 3 台风机(瞬时风速也最高)叶片并未受到破坏。叶片破坏的风机均在 30 ~ 50 m 的中间高度地带。最大瞬时风速只有 50.7 m/s。

5)叶片破坏形式比较一致。典型的破坏形式可以 8 号风机为例:在离风轮中心径向 6 ~ 13 m 处叶片后缘出现多道横向裂纹,扩展到叶片主梁与翼板交接处后逐渐转为纵向裂缝。纵向裂缝连通两道横向裂纹,致连通处的叶片局部脱落,见图 2。距中心 1/3 半径后直至叶尖,叶片后缘完全裂开。损坏最轻的叶片则只在距叶跟 8 ~ 12 m 区间有两道横向裂缝。

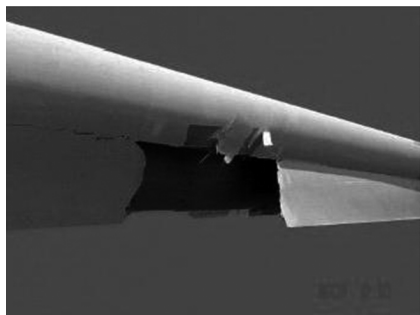


图 2 红海湾被台风“杜鹃”破坏的叶片

Fig.2 Blade damaged by the typhoon “Cuckoo”

6)所有风机叶片的受力主体结构如主梁、叶根等未受损坏。

## 2 叶片破坏原因是风致扭转颤振

下面分 4 步来论证这一结论:

1)叶片具明显的扭转破坏特征。风力机叶片的结构可视为由 1 根由粗变细的主梁外包两片翼板形成的流线型断面。由于刚度主要由主梁承担,因此如果发生扭转变形,距扭心最远的后缘扭转剪力最大,首先开裂,沿叶片横向向主梁扩展,到达主梁与翼板交接处因刚度突变会改沿交界线纵向扩展。红海湾风机叶片破坏的裂缝形式(特点 5)完全与扭转受力特征吻合。

2)叶片发生了强烈的扭转振动。叶片由玻璃纤维与环氧树脂制成,韧性极佳不易开裂,因此只有叶片发生强烈的扭转振动,裂缝尖端才可能处于反复作用的高应力状态而致裂缝迅速扩展。据资料记录,在 16: 34 ~ 17: 03 的半小时内,16 台风机均记录到机舱振动并发出停机指令。这可以认为是叶片

扭转振动的证据。

3)丘陵地形易诱发叶片扭转颤振。气动弹性力学上最先发现的颤振是机翼颤振。飞机大角度爬升时,达到一定速度后,机翼突然爆发出强烈的扭转振动而致飞机失去速度,严重时机翼断裂,飞机坠毁,因此也叫失速颤振。一般而言,攻角越大,导致颤振的临界风速越低,机翼抗颤振的能力越弱。颤振理论认为扁平物体颤振由非定常气动自激力产生,颤振导数可以描述在气流中受到的非定常自激力,并可由颤振导数预测扁平体进入颤振的临界风速<sup>[2,3]</sup>。

风力机遭遇台风时,当风速超过 25 m/s 后,依据风机控制程序,风机退出发电状态进入暂停状态:风轮停转,叶片顺桨,偏航系统工作,保持风轮对准风向。叶片顺桨后,总体上处于风攻角最小位置,抵抗扭转颤振的能力即颤振临界风速最大,一般不易发生颤振。但是笔者在考察中发现,红海湾受损叶片的风机一般处于山坡中部,塔柱后有小山坡遮挡。当台风吹过这些风机时,山坡的局部遮挡作用不仅可能使风转向,还可能使风加速,这就使得下垂叶片相对实际来流不是处于顺桨位置,而是大攻角位置,从而诱发下垂叶片进入扭转颤振状态,发生严重的扭转振动。扭转颤振本质上是发散振动,它导致裂缝迅速扩展。文献[1]也认为叶片可能发生了“扭谐振”,其实就是气动弹性力学所指的颤振。

4)风机由暂停转入紧急停机状态会使叶片更易发生扭转颤振。据文献[1]介绍:“电机组在台风时停机或者紧急停机后,按照原出厂设计的控制程序,机组将使叶片顺桨,偏航停运,此后变桨距系统和偏航系统都将停止工作,处于刹闸状态,基本相当于 1 台定桨距机组。”这种处理方式对于抗击台风很可能是有利的。

红海湾遭遇台风“杜鹃”的当天,下午 16:33 ~ 17:03 的半小时内 16 台风机探测到机箱振动,按照设计控制程序,这些风机由暂停转入停机或紧急停机处于刹闸状态。而恰恰在这段时间内风速达到最大值。台风风向是不断改变的,14:00 进入红海湾正北方向至 19:00 以东南方向离开红海湾,5 h 内风向变化约 135°。假设风向均匀变化,那么停机后半小时内风向约改变 13.5°。由于停机后偏航系统停止工作,因此致使在停机前处于顺桨的叶片也会因风向不断改变遭遇大攻角强风攻击,致使发生扭转颤振而损坏。

依据以上分析,笔者推测红海湾风机叶片损坏的过程大致是:当风速增大到一定程度后,处于不利地形的风机叶片先满足起振条件而发生振动,马上自动进入停机或紧急停机状态,偏航系统停止工作。此后由于风向继续改变,固定不动的风轮叶片受到的风攻角越来越大,并且同时风速在进一步增大,致使部分叶片完全进入严重发散的扭转颤振状态而损坏。所幸停机半小时后台风风速即迅速降低,否则损失会更大。

### 3 海上风机叶片受损的风险与对策

红海湾风电场安装的 V47 - 660 kW 风机制造商提供的叶片抗风强度为 70 m/s,在顺桨状态下这个指标也许能达到。安装在最高处的 7 号风机记录到风电场最高风速(3 s 阵风风速)为 57 m/s,风向仪和尾翼杆被吹断,但叶片并未受损。9 台受损风机均处于丘陵地带,且每台只坏 1 个叶片,7 个叶片是处于离地面最近的下垂位置,由此可以推断,不利的地形条件是诱发叶片振动的一个环境因素。海上风机处于平坦的海面上,即使有 10 m 高的巨浪,对于兆瓦级风机来说,也难以起到局部改变风向的作用,因此从地理条件看,海上风机叶片受损的风险应

低于近海丘陵地区风机。

但是台风中心经过的区域气流紊流强度大,并且有垂直对流气流,这种强烈脉动的气流可以诱发叶片抖振,对于大功率风机的长叶片会更严重一些。如果风机在检测到叶片振动后转为停机或紧急停机状态,对停机以后的时段抗击台风是不利的,因为这时风机处于刹闸状态,台风风向随时间变化后叶片受到的气流攻角会加大,有可能使叶片进入扭转颤振状态,而一旦进入颤振,叶片的损坏则是必然的。因此对于海上兆瓦级风机,如何设计叶片发生振动后的处理程序,仍是一个值得研究的问题。其中保持风机的偏航功能随着台风风向的改变风机能始终对准台风风向,从而叶片处于受力最小的顺桨状态,是降低叶片受损风险的关键。当然,提高叶片抗扭转颤振性能是根本。

#### 参考文献

- [1] 于午铭. 台风“杜鹃”的危害与思考[C]//中国科协 2004 年学术年会电力分会场暨中国电机工程学会 2004 年学术年会. 海南, 2004.
- [2] 埃米尔·希谬, 罗伯特·H. 斯坎伦. 风对结构的作用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [3] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

## Analysis of risks and measures on the blade damage of offshore wind turbine during strong typhoons ——enlightenment from Red Bay wind farm

Wang Jingquan<sup>1</sup>, Chen Zhengqing<sup>2</sup>

- (1. Engineering Institute of Engineer Corporations, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China;
2. Wind Engineering Research Center of Hunan University, Changsha 410028, China)

[Abstract] In september 2003, the fan blades of wind turbine were damaged by typhoon “cuckoo” in Shan-wei Red Bay wind farm, an offshore hilly land. It can be concluded from the failure modes that the blades flutter have occurred and significantly reversed, which was related to the negative terrain. From this instance of the term, under the same intensity of typhoons, the risk of blade damage of sea wind turbine may be lower than that of coastal ones because of flat sea lack of local change conditions of wind direction. The storm also showed that it was the key for blade loss prevention to keep the wind turbine be paused state of stopping rotation, feathering and yawing.

[Key words] offshore wind turbine; strong typhoons; blade damage; risk; measures