

关于风力发电机组吊装施工阶段的风险控制

张 坚

华润电力北方大区 内蒙古 呼和浩特 010090

【摘要】：目的探讨轮毂高度 140 米风力发电机组从塔筒吊装到整机吊装完成时的风险管控。本文指出吊装期间存在的风险点原理，同时阐明了对于风险点的有效控制措施，掌握必要的风险管控方法，从而保障项目顺利完成吊装。

【关键词】：1 阶涡激共振；2 阶涡激共振；扰流条；液体阻尼装置

随着现代风电技术的不断发展，新产品、新技术不断涌现，如今风力发电机组的单机容量、轮毂高度、叶轮直径都在不断增加，风电行业也在迈向平价上网时代。随着机组轮毂高度的不断增加，塔架设计的发展趋势也是高度越来越高，其中高塔架主要以柔性钢筒式塔架和混合式刚性结构塔架为主方向，而柔性塔架是风机厂家专门为低风速、大容量和大叶轮机组所设计的一款塔架产品，因为柔性塔架自身的频率在叶轮额定转频率 1P 以下，在低风速范围就会很容易进入共振区间，不可避免的会有以下共振风险的出现。

1 140 米高风机（柔塔）在吊装完成后无法及时带电的安全风险

1.1 塔架面临风险

风机塔架主要面临风轮转频及风频的两种外来激励源影响，风险表现为塔架的一阶共振（1P），塔架一阶涡激共振、塔架二阶涡激共振。

1.2 塔架一阶共振（1P）风险

全钢柔塔相比传统刚性塔架存在塔架 1P 共振风险，即风轮转速的 1 倍频与塔架的固有频率存在交叉点，则会引起机组共振风险。因 140 米风机吊装完成不带电不具备运营条件，此风险可暂且忽略。

1.3 塔架一阶、二阶涡激共振风险

任何非流线型物体，在一定的稳定流速下，都会在物体两侧周期性交替的产生脱离结构物表面的旋涡。这种交替发生的旋涡就会在筒体上产生横流向周期性变化的脉动压力，脉动压力的频率如果和结构固有频率接近，就会产生涡激共振将引发筒体横向的周期性振动，这种规律性的柱状体振动反过来又会改变其尾流的涡流脱落形态，恶化表面漩涡的脱离。这种流体结构物相互作用的现象，被称作“涡激振动”。

柔塔的涡激振动主要发生在机组吊装、停机运维、机组未并网、机组断网 4 种工况下，机组在正常发电状态下，叶轮的旋转会扰动经过塔筒的气流，机组不会发生涡激振动。

经对某发电集团山东区域若干风电项目进行研究，统计各项目引发一阶涡激共振风速、二阶涡激共振的频率、风速、风频占比范围如下：

项目	一阶涡激共振风速	二阶频率	二阶涡激共振风速	极大风速风频占比	机型
xx1 项目	2m/s	1.06HZ	19.5~20.5m/s	0.1%	直驱厂家 A
xx2 项目	3.0-6.5 m/s	1.07HZ	21.3~26.1m/s	0.0135%	直驱厂家 A
xx3 项目	2.0-5.0 m/s	1.01HZ	18.06~40m/s	0.068%	双馈厂家 B
xx4 项目	3.0-6.5 m/s	1.07HZ	21.3~26.1m/s	0%	双馈厂家 B
xx5 项目	3.0-6.5 m/s	1.07HZ	21.3~26.1m/s	0%	双馈厂家 B
xx6 项目	3.0-6.5 m/s	1.05HZ	21.0~25.6m/s	0.077%	双馈厂家 B

2 风险规避措施

2.1 风机载荷设计

风机厂家 A 和风机厂家 B 根据项目当地地形、气象条件、载荷工况测算，对风机塔筒进行定制化设计，塔架频率计算、焊缝疲劳强度、筒体屈曲强度、螺栓连接疲劳强度、螺栓连接极限强度以及涡流引起的横向振动等结构设计均要满足 IEC64100 标准，以保障塔筒的自身强度。

两个风机厂家都根据每个项目的微观选址对风资源情况进行了风机机位载荷计算分析，机组关键部位的极限载荷和疲劳载荷适应性分析均在安全范围之内。

2.2 防范吊装阶段塔架一阶涡激振动措施

在风机吊装期间，未安装机头的情况下，涡流脱落频率易与塔架 1 阶固有频率相近或重合，发生涡激振动，消耗塔

架寿命；同时可能引起塔顶的较大的摆幅，影响机头吊装。预防的主要措施是采用扰流条加缆风绳的方案来防范吊装时的塔架一阶涡激共振。扰流条能够打乱来风轨迹，使其不能形成频率稳定的漩涡，有效的阻止漩涡脱落的产生，避免涡流引起的结构振动，从而来防范吊装阶段塔架一阶涡激共振，主要措施如下：

措施	风机厂家 A 措施	风机厂家 B 措施
扰流条	5 段 140 米塔筒扰流条安装工作在倒数第三段塔筒吊装完成后进行。扰流条需在顶端塔筒整段（30m）安装、次顶端塔筒整段安装（30m），组装 3 根扰流条，每组由 35 个扰流块组成，扰流块截面为正三角形，三角形边长 300mm，长度为 500mm。扰流条拆除需要在变桨完成后进行。	5 段 140 米塔筒扰流条安装工作在第二段塔筒吊装完成后进行。每段塔筒扰流块分为 3 组，扰流块互连，并分别与塔架上端捆绑带预留位置连接。3 个位置应 120°均布。每组由 25 个扰流块组成，扰流块截面为正三角形，三角形边长 300mm，长度为 1200mm。
缆风绳	140m 高塔筒使用 250m 缆风绳，将 3 根缆风绳均布系在塔筒顶法兰上，保证连接可靠，且在偏航平台位置可以方便的进行拆除，在吊装的整个过程必须保证缆风绳不缠绕、扭曲。其中，两根缆风绳垂直于风向，第三根缆风绳平行于风向，距离塔筒底部的水平距离不小于 70m。塔顶绳子与塔筒之间夹角不小于 30°。需依据现场情况选择好合适的锚固点，可选择现场的车辆，配重，吊车等有一定重量的锚栓点，锚固点可以至少承载 2T 的拉力。	140m 高塔筒要使用 2 根 200m 缆风绳，固定于锚点，防范塔筒在吊装时大幅度晃动。

参考文献：

- [1] GB 18306-2015.中国地震动参数区划图[S].
- [2] GB/T 18709-2002.风电场风能资源测量方法[S].
- [3] GB/T 19072-2010.风力发电机组塔架[S].
- [4] GB 50011-2010.建筑抗震设计规范[S].
- [5] IEC61400-1 Wind turbines – Part 1: Design requirements, Third edition, 2005-08and Amendment 1, 2010-10.

3 防范塔架二阶涡激共振措施

在机组吊装完成后，若长时间不并网，机组无法偏航，在特定相对较高的风速下，涡流脱落频率易与塔架 2 阶频率相近或重合，发生涡激振动，剧烈消耗塔架寿命，甚至致使载荷超过极限载荷，导致塔架极限破坏。风机厂家 A 和风机厂家 B 防止塔架二阶涡激共振的措施是对高塔筒加装液体阻尼装置。液体阻尼装置能够有效的防止高塔筒二阶涡激共振，且液体阻尼器于建筑领域已有成熟应用经验，并在风电领域已有相关应用实例，其原理具备可行性。通过合理构造液体阻尼系统（结构、尺寸、液体容量、液体密度、液体粘度）使之接近塔架固有频率并提供足够的系统阻尼，则可降低塔架振动加速度及位移。

4 现场实际应用情况及效果



5 结论

综上，通过加装扰流条、缆风绳的措施能够在吊装阶段、未安装机舱的情况下，有效防范高塔架的一阶涡激共振风险。通过加装液体阻尼装置的措施能够达到增加塔架阻尼的效果，在机组吊装完成后，有效防范高塔架的二阶涡激共振风险。通过采用以上措施，可保证一阶、二阶涡激振动引起的极限和疲劳强度在塔架设计允许范围内，从而保障机组生命周期内的运行安全。

- [6] IEC CBC 4C Wind turbine type designation,2012-12.
- [7] Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, BSEN 1991-1-4:2005.
- [8] Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.6: Strength and Stability of ShellStructures, prEN 1993-1-6: 2007.
- [9] Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.9: Fatigue strength of steel structures,prEN 1993-1-9: 2005.
- [10] DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads.
- [11] Germanischer Lloyd: Guideline for the Certification of Turbines Edition 2010.
- [12] VDI 2230 Part 1, Systematic calculation of high duty bolted joints – Joints with onecylindrical bolt, issued: 2003-02.
- [13] Petersen, C. Stahlbau. 2nd revised edition, Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1990.
- [14] Herbert Schmidt, Meike Neuper. Zum elastostatischen Tragverhaltenexzentrischgezogener L-Stöße mit vorgespannten Schrauben. Stahlbau 66, No.3,1997.