 **REETC/TN00X：2024**

|  |
| --- |
|  |
|   |
|  |
| 风力发电机组非运行时叶片稳定性分析与风险防控方法 |
|  |
| 2024-XX-XX发布 |

|  |
| --- |
| **可再生能源专家技术委员会** 发布 |

版权声明

本文的著作权属于可再生能源专家技术委员会成员单位共有，任何成员单位不经其他成员单位同意不得直接或变相将本文全部或部分用于商业用途或市场宣传。对于违反此声明或者其他违法使用本文内容者，可再生能源专家委员会将依法追究其法律责任。

本文件起草召集人：XXX

本文件主要起草人员（按姓氏拼音排序）：XXXXXXX

目 次

[1 范围 1](#_Toc163049799)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc163049800)

[3 术语和定义 1](#_Toc163049801)

[4 叶片稳定性分析仿真分析方法 2](#_Toc163049802)

[**4.1** **基于风机载荷工程仿真软件分析方法** 2](#_Toc163049803)

[4.1.1 风机模型要求 2](#_Toc163049804)

[4.1.2 软件高级气动模型及结构动力学响应算法要求 2](#_Toc163049805)

[4.1.3 基于坎贝尔图分析的低阻尼风险点分析 2](#_Toc163049806)

[4.1.4 工况仿真与后处理方法 2](#_Toc163049807)

[4.1.5 仿真结果评估 3](#_Toc163049808)

[**4.2** **基于CFD的流固耦合分析方法** 3](#_Toc163049809)

[4.2.1 模型要求（要考虑那些要素） 3](#_Toc163049810)

[4.2.2 边界条件设置 3](#_Toc163049811)

[4.2.3 仿真结果评估 3](#_Toc163049812)

[5 机组叶片稳定性风险规避措施 3](#_Toc163049813)

[**5.1** **规避措施规避原理要求** 3](#_Toc163049814)

[**5.2** **规避措施有效性评估** 4](#_Toc163049815)

[**5.3** **常规规避措施推荐** 4](#_Toc163049816)

[附录一 机组常规的叶片稳定性风险规避措施 4](#_Toc163049817)

[1 机组并网前 4](#_Toc163049818)

[1.1 机组叶片吊装 4](#_Toc163049819)

[1.2 吊装完成至上电前 4](#_Toc163049820)

[2 机组并网后 4](#_Toc163049821)

[2.1 停机-风轮空转可对风 4](#_Toc163049822)

[2.2 停机-风轮、偏航同时锁定 4](#_Toc163049823)

[2.3 停机（计划内断电） 4](#_Toc163049824)

[2.4 停机（计划外断电） 4](#_Toc163049825)

[3 无电长期停泊 4](#_Toc163049826)

[附录二 损伤评估方法 5](#_Toc163049827)

[1 监测数据要求 5](#_Toc163049828)

[2 叶片摆动幅度评估方法 5](#_Toc163049829)

[3 根据叶片摆幅反推载荷方法 5](#_Toc163049830)

[4 叶片失稳持续时间推算 5](#_Toc163049831)

[5 损伤评估 5](#_Toc163049832)

风力发电机组非运行时叶片稳定性分析与风险防控方法

# 范围

随着我国大兆瓦、大风轮直径风力发电机组逐渐成为行业主流，叶片也呈大型化、柔性化趋势。近年来，国内已发生多起停机工况下叶片大幅振动的情况，甚至出现了叶片破坏的事故，由叶片失效引起的机组故障呈上升趋势，且在现场观测案例中，已发生多起机组断电状态下叶片失稳振动的情况，叶片失稳振动已经成为行业不可忽视的风险。

本提案给出了风轮空转、风轮锁定(含安装、运维以及遇到故障导致叶轮不能转动的状态)等机组非运行时叶片稳定性的**分析方法**以及对应的**风险防控措施**。此外，对于有叶片监测数据的机组，如果已观测到叶片失稳振动的情况，给出一套叶片损伤分析方法。

**提案范围讨论：**

1. **非运行时**

风轮空转与风轮锁定(含安装、运维以及遇到故障导致叶轮不能转动的状态)

1. **叶片稳定性还是叶片涡激?**

叶片稳定性分析用于分析叶片发生失稳的边界性条件，涵盖的范围更广，譬如机组在运行状态下叶轮转速超速导致的叶片失稳也属于叶片稳定性范畴，如果是叶片涡激，则范围相对窄一点。

1. **关于叶片涡激振动，SIV、VIV是否分开研究？**

机组非运行时小风及大风条件下发生的叶片振动都属于本文考虑的范围，但是否有必要区分SIV和VIV，两者机理区别？

基于文献的理解：

VIV：旋涡脱落频率与叶片固有频率接近导致的振动（小风速、窄频）
SIV：失速导致的气动力和变形振动发散，出现气动-结构负阻尼（大风速、宽频）

*后续：*

1. *调研遇到的案例情况，包含：环境条件（风速、风向、湍流强度）、机组状态（风轮转速、1-3叶片桨距角、风轮相位）、振动情况（振动叶片相位、振幅、振动模态成分、振型、持续时间）、措施及是否有效、叶片长度、VIV/SIV的预估*
2. *对研究范围给出各位专家的期望*

# 规范性引用文件

下列引用文件对于本说明的应用是必不可少的。凡是注有日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本规范。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修订版）适用于本说明。

XXXX

# 术语和定义

3.1

风机叶片稳定性

XXXXX

风机叶片涡激振动

XXXXX

# 叶片稳定性分析仿真分析方法

## **基于风机载荷工程仿真软件分析方法**

### 风机模型要求

1. 风机模型应与风机设计认证时载荷仿真计算风机模型一致，可根据4.1.2进行调整。
2. 在对某些规避措施（譬如网兜）的有效性进行分析验证时，可对风机模型做适当的修正，但修正应基于测试验证过的数据作为依据。
3. 叶片及塔架结构阻尼（应基于叶片测试结果并略微向下浮动X‰计算，如果无测试结果，推荐1‰~5‰一个范围计算，会议上可讨论）
4. ……

### 软件高级气动模型及结构动力学响应算法要求

1. 动态失速模型：用于整机设计时载荷计算的失速模型是须考虑的，应适当考虑其他失速模型；
2. 塔影模型：推荐采用混合模型，因为势流模型只适用于正吹
3. 动态尾流模型：会上可以讨论采用哪个。
4. 叶片及塔架结构模态：要考虑几阶模态，会上讨论。
5. 叶片弯扭耦合特性：
6. 要考虑叶片大变形影响：叶片需分段建模。
7. ……

### 基于坎贝尔图分析的低阻尼风险点分析

1. 坎贝尔图计算要求（需考虑风速及方位角的范围）
2. 失速模型要求（与4.1.2要求一致）
3. 结构阻尼要求（应按照常规方法设置，不应提高结构阻尼；）
4. Non-rotating 和rotating的模态是否都须关注？（如只分析空转，rotating模态是否可删掉，会上可讨论）
5. 阻尼分析要求（应列出n\*P以下、模态阻尼低于X%的对应的风速及整机模态，特别关注叶片挥舞摆振前两阶及耦合模态）
6. ……

### 工况仿真与后处理方法

#### 工况设置

1. 机组状态：空转、叶轮锁定(含安装、运维以及遇到故障导致叶轮不能转动的状态)
2. 风况条件：风模型、风速、湍流强度、偏航角度、入流角、风切变（建议用稳态风或低湍流风进行仿真，湍流强度低至多少会上可以讨论）【大湍流大风速下也有发生】
3. 初始状态：叶轮方位角、桨距角、仿真时长
4. 规避措施考虑方式：第一，应考虑机组规避措施对工况设置的影响；第二，应评估规避措施是否会引入额外的风险。

拟定的工况表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **工况序号** | **机组状态** | **风速** | **风速步长** | **风模型** | **方位角** | **风向** | **仿真时长** |
| 6.5 | Parked（风轮锁定） | 待定 | 待定 | 稳态阶梯风 | 0~180，步长5度 | 0~360，步长为5度 | 每个阶梯持续时间不少于2分钟 |
| 6.6 | Idling（风轮空转） | 待定 | 待定 | 稳态阶梯风 | - | 0~360deg\*，步长为5度 | 每个风速段及风向的仿真时长不少于5分钟 |
| 8.3 | Parked（维护状态） | 待定 | 待定 | 稳态风 | 按照维护要求 | 0~360deg，步长为5度， | 至少5分钟。 |
| 8.4 | 吊装（包含单叶片吊装） | 待定 | 待定 | 稳态风 | 按照安装状态要求 | 0~360，步长为5度 | 至少5分钟。 |

#### 后处理方法

1. 极值统计
2. 极值对应时序的频谱分析
3. 等效疲劳载荷计算（如果某工况出现涡激，应核算该工况的损伤）

### 仿真结果评估

1. 根据载荷发散工况给出发生涡激振动的风况条件及机组状态（如果有）；
2. 根据4.1.4载荷仿真结果进行判断是否满足安全性要求（会上可讨论）。

### 与实测数据的比对

## **基于CFD的流固耦合分析方法**

### 模型要求（要考虑那些要素）

### 边界条件设置

### 仿真结果评估

### 实测验证

问题：会有什么样的分析结果，分析结果怎么指导设计？

# 机组叶片稳定性风险规避措施

## **规避措施规避原理要求**

规避措施至少需具备以下一种特性：

1. 增加气动阻尼
2. 干扰叶片周围气流流动稳定性
3. ……

## **规避措施有效性评估**

应基于第4章节方法进行评估

## **常规规避措施推荐**

见附录一

附录一 机组常规的叶片稳定性风险规避措施

本章节给出机组并网前、机组并网后以及长期停泊状态这三种状态下的常规的叶片稳定性规避措施。

# 机组并网前

## 机组叶片吊装

## 吊装完成至上电前

# 机组并网后

## 停机-风轮空转可对风

## 停机-风轮、偏航同时锁定

## 停机（计划内断电）

## 停机（计划外断电）

# 无电长期停泊

附录二 损伤评估方法

# 定期叶片检查

# 监测数据要求

# 叶片摆动幅度评估方法

# 根据叶片摆幅反推载荷方法

# 叶片失稳持续时间推算

# 损伤评估

进行损伤评估时应区分不同幅值量级并给出相应的评估办法。

后续：

1、4.12之前鉴衡发出调研信息表，包含：案例情况、大纲修订意见

2、4.26之前收集专家意见

3、暂定5月上旬开一次大纲确认讨论会