

## 前 言

本标准的第 5 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章为强制性的,其他为推荐性的。

本标准等同采用 IEC 61400-1:1999《风力发电机组 安全要求》

本标准的编写格式和规则符合 GB/T 1.1—1993,保留了 IEC 61400-1:1999 的前言和引言,同时增加了本标准的“前言”。

本标准的附录 A、附录 B 和附录 C 是标准的附录。

本标准由全国风力机械标准化技术委员会提出。

本标准由全国风力机械标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:全国风力机械标准化技术委员会秘书处。

本标准主要起草人:王建平、李秀荣。

## IEC 前言

1) IEC(国际电工委员会)是由各国电工委员会(IEC 国家委员会)组成的世界标准化委员会组织。IEC 的宗旨是促进电气和电子领域有关标准化问题的国际间合作。为了这个宗旨开展其活动。IEC 发布国际标准,标准的制定工作委托给技术委员会;任何 IEC 国家委员会对涉及的项目感兴趣的话,都可以参加该项目的制定工作。与 IEC 建立了联络关系的国际的、政府的和非政府的组织均可参加制定工作。IEC 与国际标准化组织(ISO)根据两个组织间确立的协议条件,密切合作。

2) IEC 技术问题的正式决议和协议,尽可能地表达了国际间对有关项目一致的观点,因为每个技术委员会都是由对该问题感兴趣的国际委员会代表组成的。

3) 制定的文件推荐给国际上使用,并以正式标准形式,技术报告形式或技术指导文件形式发布。这些文件,在某种意义上讲,要由各国家委员会认可。

4) 为了促进国际间的统一,各 IEC 国家委员会应明确,在其国家和地区性标准中应最大限度地采用 IEC 国际标准。IEC 国际标准与相应的国家或地区性标准之间的差异,都应在后者给以明确指出。

5) IEC 不提供其标准制定及批准过程说明,也不对任何设备宣称的与某一标准相一致的说明承担责任。

6) 应注意本国际标准的某些部分属于专利项目的可能性。IEC 不负鉴别这些专利项目的责任。

国际标准 IEC 61400-1 是由 IEC 第 88 技术委员会:风力发电机组工作组制定的。

IEC 61400-1 第二版代替 1994 年发布的第一版,第一版取消。

该标准版本基于下列文件:

FDIS	投票报告
88/98/FDIS	88/103/RVD

关于赞同本标准的完整信息,可在上表指出的投票报告中找到。

附录 A, B 和 C 是本标准必要的部分。

日后,本标准将用两种文字发布。

## IEC 引言

本标准概述了风力发电机组最低的安全要求,它不能作为完整的设计规范或结构设计手册来使用。经适当论证后,认为取消某条要求不会牺牲机组安全,那么这条要求就可以放弃。但这一原则不适用于第 6 条。

使用本标准,并不意味着任何个人,组织或团体可以不遵守其他适用的标准或法规。

# 中华人民共和国国家标准

## 风力发电机组 安全要求

GB 18451.1—2001  
idt IEC 61400-1:1999

Wind turbine generator systems—Safety requirements

### 1 范围

本标准规定了风力发电机组(WTGS)在特定的环境条件下,设计、安装、维护和运行中的安全要求。本标准涉及到风力发电机组各子系统,如控制和保护机构,内部电气设备,机械系统,支承结构以及电气联接设备。

本标准适用于风轮扫掠面积等于或大于 40 m<sup>2</sup> 的风力发电机组。

### 2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。本标准出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB 17625.1—1998 低压电气及电子设备发出的谐波电流限值(设备每相输入电流≤16 A)  
(eqv IEC 61000-3-2:1995)

GB 17625.2—1999 电磁兼容 限值 对额定电流不大于 16 A 的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限制(idt IEC 61000-3-3:1994)

GB/T 17626.2—1998 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验  
(idt IEC 61000-4-2:1995)

GB/T 17626.3—1998 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验  
(idt IEC 61000-4-3:1995)

GB/T 17626.4—1998 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验  
(idt IEC 61000-4-4:1995)

GB/T 17626.5—1999 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验  
(idt IEC 61000-4-5:1995)

ISO 2394:1986 结构可靠性基本原理

IEC 60204-1:1997 工业机械电气设备——第 1 部分:通用技术条件

IEC 60364(全部) 建筑物电气装置

IEC 60721-2-1:1982 环境条件分类——第 2 部分:自然环境——温度和湿度

IEC 61024-1:1990 建筑物防雷设计规范

IEC 61312-1:1995 雷电电磁脉冲防护

### 3 定义

本标准采用下列定义。

#### 3.1 年平均 annual average

数量和持续时间足够长的一组测量数据的平均值,供作估计期望值用。时间周期应是一个完整的年数,以便将不稳定因素(如季节变化等)平均在内。

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 2001-09-15 批准

2002-04-01 实施

- 3.2 年平均风速 annual average wind speed  
按照年平均的定义确定的平均风速。
- 3.3 自动接通周期 auto-reclosing cycle  
故障消除后电网重新接通且 WTGS 也重新接通电网后,离合器松开需要的从 0.01 s 到数秒的一段时间。
- 3.4 锁定(风力机) blocking (wind turbines)  
利用机械销或其他装置(而不是通常用的机械制动盘)防止风轮轴或偏航机构运动。
- 3.5 制动器(风力机) brake (wind turbines)  
能降低风轮转速或能停止风轮旋转的装置。
- 3.6 严重故障(风力机) catastrophic failure (wind turbines)  
零部件严重损坏,导致主要功能丧失,安全受损。
- 3.7 特性值(材料性能) characteristic value (of a material property)  
材料具有的规定的概率值,这个值不是由假定的无限次试验获得。
- 3.8 复杂地形带 complex terrain  
风电场场地周围属地形显著变化的地带或有能引起气流畸变的障碍物地带。
- 3.9 控制系统(风力机) control system (wind turbines)  
接受风力机或其他环境信息,调节风力机,使其保持在工作要求范围内的系统。
- 3.10 切入风速( $v_{in}$ ) cut-in wind speed  
风力机开始发电时,轮毂高度(3.24 轮毂高度)处的最低风速。
- 3.11 切出风速( $v_{out}$ ) cut-out wind speed  
风力机达到设计功率时,轮毂高度处的最高风速。
- 3.12 设计极限 design limits  
设计中采用的最大值或最小值。
- 3.13 潜在故障 dormant failure (also known as latent fault)  
正常运行中未被发现的系统或部件的故障。
- 3.14 下风向 downwind  
主风方向。
- 3.15 电网 electrical power network  
用于输送和分配电能的专用设备、变电站、电线电缆。  
注:电网各组成部分之间的界限由适当的判别标准如地理位置,所有权归属,电压级别等来确定。
- 3.16 紧急关机(风力机) emergency shutdown (wind turbines)  
保护系统触发或人工干预下使风力机的迅速关机。
- 3.17 环境条件 environmental conditions  
影响 WTGS 工况的环境特征(海拔高度,温度,湿度等)。
- 3.18 外部条件(风力机) external conditions (wind turbines)  
影响风力机工作的诸因素,包括风况,电网条件和其他气象因素(温度、冰、雪等)。
- 3.19 极端风速 extreme wind speed  
 $t$  秒内的平均最高风速,它可能是  $N$  年一遇(重现周期  $N$  年)。  
注:本标准采用的重现周期  $N=50$  年和  $N=1$  年,采用的时限  $T=3$  s 和  $T=10$  s。极端风速即为俗称的“安全风速”。
- 3.20 故障风险 fail-safe  
避免由故障引发产品严重破坏的设计特性。
- 3.21 阵风 gust

超过平均风速的突然和短暂的风速变化。

注：阵风可用它的上升-时间，即幅度-持续时间表达。

3.22 水平轴风力机 horizontal axis wind turbine

风轮轴基本上平行于风向的风力机。

3.23 轮毂(风力机) hub-wind turbines

将叶片或叶片组固定到轮轴上的装置。

3.24 轮毂高度(风力机) hub-height (wind turbines)

从地面到风轮扫掠面(见 3.55 扫掠面积)中心的高度。

3.25 空转(风力机) idling (wind turbines)

风力机缓慢旋转而不发电的状态。

3.26 湍流惯性负区 inertial subrange

风速湍流谱的频率区间，此区间内涡流经逐步破碎达到均质，能量损失忽略不计。

注：在典型的 10 m/s 风速，惯性负区的频率范围大致从 0.02 Hz 到 2 kHz。

3.27 孤立运行 isolated operation

离网后，分离的动力系统稳定的或是暂时的运行。

3.28 极限状态 limit state

结构受力的一种状态，如果作用力超过这一状态，则结构不再满足设计要求(ISO 2394)

注：设计计算(即极限状态的设计要求)的目的是使结构达到极限状态的概率小于结构规定值(ISO 2394)。

3.29 对数风切变律 logarithmic wind shear law

表示风速随离地面高度以对数关系变化的数学式。

3.30 最大功率(风力机) maximum power (wind turbines)

正常工作条件下，风力发电机组输出的最高净电功率。

3.31 平均风速 mean wind speed

给定时间内瞬时风速的平均值，给定时间可从几秒到数年不等。

3.32 机舱 nacelle

设在水平轴风力机塔架顶部，包容传动系统和其他装置的部件。

3.33 电网联接点(风力机) network connection point (wind turbines)

对单台风力机组是输出电缆终端，而对风电场是电网与电力汇集系统总线的联接点。

3.34 正常关机(风力机) normal shutdown (wind turbines)

关机全过程都是在控制系统控制下进行的关机。

3.35 工作范围 operating limits

由 WTGS 设计者确定的支配控制系统和安全防护系统的诸多条件。

3.36 风力机停机 parked wind turbine

根据风力机结构的不同，决定是采用静止或是空转的停机状态。

3.37 电力汇集系统(风力机) power collection system (wind turbines)

汇集一个或多个风力发电机组电能的电力联接系统。它包括 WTGS 终端与电网联接点之间的所有电气设备。

3.38 风切变幂律 power law for wind shear

表示风速随离地面高度以幂定律关系变化的数学式。

3.39 功率输出 power output

通过专用设备将电能输送给用电设备的过程。

3.40 保护系统(风力机) protection system (wind turbines)

确保 WTGS 运行在设计范围内的系统。

## 3.41 额定功率 rated power

在正常的工作条件下,部件、装置或设备赋予的功率数。

注:(风力机)正常工作条件下,WTGS设计要达到的最大连续输出电功率。

3.42 额定风速( $v_r$ ) rated wind speed

风力机达到额定功率输出时规定的风速。

## 3.43 瑞利分布 Rayleigh distribution

经常用于风速的概率分布函数,分布函数取决于形状参数和尺度参数,它控制平均风速分布(见3.66)。

3.44 参考风速( $v_{ref}$ ) reference wind speed

用于确定WTGS级别的基本极端风速参数。与气候相关的其他设计参数均可从参考风速和其他基本等级参数中得到(见第6章)。

注:用参考风速 $v_{ref}$ 设计的风力机,轮毂高度承受的50年一遇10 min平均最大风速应小于或等于 $v_{ref}$ 。

## 3.45 共振 resonance

振动系统中出现的一种现象,此时强迫振动频率非常接近振动系统固有振动频率。

## 3.46 旋转采样风矢量 rotationally sampled wind velocity

旋转风力机风轮上某一固定点经受的风矢量。

注:旋转采样风矢量湍流谱与正常湍流谱有明显的不同。风轮旋转时,叶片切入气流,流谱产生空间变化。最终的湍流谱包括转动频率下的流谱和由此产生的谐波。

## 3.47 风轮转速(风力机) rotor speed (wind turbines)

风力机风轮绕其轴的旋转速度。

## 3.48 粗糙长度 roughness length

在假定垂直风廓线随离地面高度按对数关系变化的情况下,平均风速变为0时推算出的高度。

## 3.49 安全寿命 safe life

严重失效前的预期使用时间。

## 3.50 定期维护 scheduled maintenance

严格按预定的日期表进行的预防性维护。

## 3.51 使用极限状态 serviceability limit state

规范管理中正常使用下的边界条件。

## 3.52 静止 standstill

WTGS的停止状态。

## 3.53 支撑结构(风力机) support structure (wind turbines)

由塔架和基础组成的风力机部分。

## 3.54 安全风速 survival wind speed

结构能承受的最大设计风速的俗称。

注:本标准不采用这一术语,设计时可参考极端风速(见3.19)。

## 3.55 扫掠面积 swept area

垂直于风矢量平面上的,风轮旋转时叶尖运动所生成圆的投影面积。

## 3.56 湍流强度 turbulence intensity

标准风速偏差与平均风速的比率,用同一组测量数据和规定的周期进行计算。

## 3.57 湍流尺度参数 turbulence scale parameter

纵向功率谱密度等于0.05的无量纲的波长。

注:由此,波长可以这样确定 $\Lambda_1 = v_{hub}/f_0$ ,式中 $f_0 S_1(f_0)/\sigma_1^2 = 0.05$ 。

## 3.58 最大极限状态 ultimate limit state

通常指风力机处于能承受最大载荷的极限状态,即与损坏和可能造成损坏的错位或变形对应的极限状态。

3.59 不定期维护 unscheduled maintenance

不是根据确定的时间表,而是根据对某一状态的迹象而确定的临时性维护。

3.60 上风向 upwind

主风方向的相反方向。

3.61 垂直轴风力机 vertical axis wind turbine

风轮轴垂直的风力机。

3.62 威布尔分布 Weibull distribution

一种概率分布函数,见 3.66(风速分布)。

3.63 风力田 wind farm

见 3.64(风电场)。

3.64 风电场 wind power station

由一批风力发电机组或风力发电机组群组成的电站,通常称风电场。

3.65 风廓线;风切变律 wind profile;wind shear law

风速随离地面高度以对数关系变化的数学式。

注:通常应用(1)对数廓线(2)指数廓线。

$$v(Z) = v(Z_r) \times \frac{\ln(Z/Z_0)}{\ln(Z_r/Z_0)} \dots\dots\dots(1)$$

$$v(Z) = v(Z_r) \times \left(\frac{Z}{Z_r}\right)^\alpha \dots\dots\dots(2)$$

式中:  $v(Z)$ ——高度  $Z$  处风速;

$Z$ ——离地面高度;

$Z_r$ ——用于拟合风廓线的离地面标准高度;

$Z_0$ ——粗糙长度;

$\alpha$ ——风切变指数(或幂)。

3.66 风速分布 wind speed distribution

用于描述连续时限内风速概率分布的函数。

注:通常应用的函数是瑞利分布函数  $P_R(v_0)$  和威布尔分布函数  $P_W(v_0)$ 。

$$P_R(v_0) = 1 - \exp[-\pi(v_0/2v_{ave})^2] \dots\dots\dots(3)$$

$$P_W(v_0) = 1 - \exp[-(v_0/C)^k]$$

$$v_{ave} = \left\{ \begin{array}{l} \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \\ C \frac{\sqrt{\pi}}{2}, \text{如果 } k = 2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

式中:  $P(v_0)$ ——累积概率函数,也即  $v < v_0$  的概率;

$v_0$ ——风速(极限);

$v_{ave}$ ——风速的平均值;

$C$ ——威布尔分布函数的尺度参数;

$k$ ——威布尔分布函数的形状参数;

$\Gamma$ ——伽马函数。

$C$  和  $k$  二者均可由真值推算出。如果选择  $k=2$ ,也即  $C$  和  $v_{ave}$  满足(4)式  $k=2$  的条件,则瑞利分布

函数与威布尔分布函数相同。

分布函数所表达的是小于  $v_0$  风速的累积概率。如果估算  $v_1$  到  $v_2$  之间的分布,则式  $[P(v_1) - P(v_2)]$  给出了  $v_1$  与  $v_2$  间的各风速对时间的分布函数。对分布函数求导就能得出相应的概率密度函数。

### 3.67 风切变 wind shear

风速在垂直于风向平面内的变化。

### 3.68 风切变律指数 wind shear exponent

通常用于描述风速剖面线形状的幂定律指数。

### 3.69 风速 wind speed

空间特定点的风速为该点周围气体微团的移动速度。

注:风速即风矢量的数值(见 3.71 风矢量)。

### 3.70 风力发电机组(WTGS) wind turbine generator system

将风的动能转换为电能的系统。

### 3.71 风矢量 wind velocity

标有被研究某点气体微团运动方向,其值等于“气体微团”运动速度(即该点风速)的矢量。

注:空间任意点的风矢量,是“气体微团”通过该点的时间的导数。

### 3.72 WTGS 电力系统 WTGS electrical system

所有 WTGS 内部电气设备到 WTGS 的终端,包括接地、连接、通讯设备。由风力发电机到地线网络的一段导线也包括在内。

### 3.73 WTGS 终端 WTGS terminals

WTGS 供电系统上的一点,通过它 WTGS 被接到电力汇集系统上。它还应包括为输送电能和通讯目的的连接。

### 3.74 偏航 yawing

风轮轴绕垂直轴的旋转(仅适用于水平轴风力机)。

### 3.75 偏航角误差 yaw misalignment

风轮轴线偏离风向的水平偏差。

## 4 符号和缩写

### 4.1 符号和单位

$a$	湍流标准偏差模型斜率	[—]
$C$	威布尔分布函数的尺度参数	[m/s]
$Coh$	相干函数	
$D$	风轮直径	[m]
$f$	频率	[s <sup>-1</sup> ]
$f_d$	材料的计算应力值	[—]
$f_k$	材料的强度值	[—]
$F_d$	设计载荷	[—]
$F_k$	载荷值	[—]
$I_{15}$	轮毂高度 10 min 平均 15 m/s 风速下的湍流强度值	[—]
$k$	威布尔分布函数的形状参数	[—]
$K$	修正的贝塞尔函数	[—]
$L$	均匀湍流整体尺度参数	[m]

$L_e$	相干尺度参数	[m]
$L_k$	速度分量的总体尺度参数	[m]
$n_i$	bin $i$ 中疲劳循环次数	[-]
$N(\cdot)$	由于应力(或应变)作用失效的理论循环次数(也即 s-N)曲线	[-]
$N$	极限状况出现周期	[a]
$p$	幸存概率	[-]
$P_R(v_0)$	瑞利概率分布,也即 $v < v_0$ 的概率	[-]
$P_W(v_0)$	威布尔概率分布	[-]
$r$	分矢量投影值	[m]
$S_i$	bin $i$ 内对应某一循环次数的应力(或应变)水平	[-]
$S_l(f)$	能谱密度分量谱	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$S_k$	单面速度分量谱	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$T$	阵风特性时间	[s]
$t$	时间	[s]
$V$	风速	[m/s]
$v_z$	$Z$ 高度风速	[m/s]
$v_{ave}$	轮毂高度年平均风速	[m/s]
$v_{cg}$	风轮扫掠面上极端相干阵风值	[m/s]
$v_{eN}$	$N$ 年一遇极大风速(平均 3 s)期望值	
	$v_{e1}, v_{e50}$ 分别表示一年一遇和 50 年一遇	[m/s]
$v_{gustN}$	$N$ 年一遇极大阵风期望值	[m/s]
$v_{hub}$	轮毂高度 10 min 平均风速	[m/s]
$v_{in}$	切入风速	[m/s]
$v_0$	风速分布模型中极限风速	[m/s]
$v_{out}$	切出风速	[m/s]
$v_r$	额定风速	[m/s]
$v_{res}$	10 min 平均参考风速	[m/s]
$v_{(y,z,t)}$	用于描述瞬时水平风切变的纵向风速分量	[m/s]
$v_{(z,t)}$	用于描述极限阵风瞬时变化和风切变状况的纵向风速分量	[m/s]
$x, y, z$	用于描述风场的坐标系,分别为纵向风,横向风和垂向风	[m]
$Z_{hub}$	风力机轮毂高度	[m]
$Z_r$	离地面参考高度	[m]
$Z_0$	对数风廓线的粗糙长度	[m]
$\alpha$	风切变指数	[-]
$\beta$	最大风向变化模型参数	[-]
$\delta$	变化系数	[-]
$\Gamma$	伽马函数	[-]
$\gamma_f$	载荷安全系数	[-]
$\gamma_m$	材料安全系数	[-]
$\gamma_n$	损伤安全系数	[-]

$\theta(t)$	风向变化过渡过程	[°]
$\theta_{cg}$	阵风方向与平均风速方向最大偏离	[°]
$\theta_{eN}$	$N$ 年一遇最大风向变化	[°]
$\Lambda_1$	由波长确定的湍流尺度参数,无量纲,纵向能谱强度 $fS_1(f)/\sigma_1^2$ 等于 0.05	[m]
$\sigma_1$	轮毂高纵向风速标准偏差	[m/s]
$\sigma_k$	$k$ 轮毂高风速分量标准偏差 ( $k=1,2$ 或 $3$ )	[m/s]

## 4.2 缩写

A	异常(安全系数)
a.c	交流电
C	使用性制约
d.c	直流电
DLC	设计载荷情况
ECD	方向变化的最大相干阵风
ECG	最大相干阵风
EDC	最大风向变化
EOG	最大工作阵风
EWM	最大风速模型
EWS	最大风切变
F	疲劳
HAWT	水平轴风力机
N	正常的或最大(安全系数)
NWP	正常风速廓线模型
NTM	正常湍流模型
S	IEC WTGS 分类
T	运输和安装(安全系数)
U	极限
VAWT	垂直轴风力机
WTGS	风力发电机组

## 5 基本要素

### 5.1 概述

为了保证 WTGS 机构、结构、电气系统和控制系统的安全,在下面的条款中给出了技术要求。这些技术要求应用于 WTGS 的设计、制造、安装和维护以及相关的质量管理过程。此外,已有的 WTGS 的安装、运输和维护要求中的各种安全规程也必须遵守。

### 5.2 设计方法

本标准采用结构动力学模型,以便预测设计载荷。这个模型应用第 6 章指出的湍流和其他极端风况以及第 7 章规定的设计状况来确定风力机工作风速范围内的载荷。应对规定的外部条件与设计工况和载荷情况的所有相关组合进行分析,以确定具体型号 WTGS 设计载荷组。

WTGS 的整体结构试验数据,能提高设计数据的可信度,并能验证结构动力模型设计的合理性。

应通过计算和试验来验证设计的合理性。如果用试验验证,则试验时的极限条件必须满足本标准规定的特性值与设计状况。试验条件的选择,包括试验载荷在内,必须考虑相关的安全因素。

### 5.3 安全等级

WTGS 可按下面两种安全等级中的一种进行设计:

——一般安全等级,当失效的结果可能导致人身伤害,或造成经济损失和产生社会影响时,采用这一等级;

——特殊安全等级,当安全取决于局部调整或制造厂与用户二者协商决定时,采用这一等级。

一般等级 WTGS 的安全系数,本标准 7.6 条详细说明。特殊等级 WTGS 的安全系数必须由制造厂与用户协商同意。根据特殊安全等级设计的 WTGS 即为 6.2 条定义的 S 级 WTGS。

### 5.4 质量保证

质量保证是 WTGS 及其零部件设计、采购、制造、安装、运行和维护的主要部分。

建议质量体系遵照相关国家标准要求。

### 5.5 风力机铭牌

下列内容应突出明显地标示在永久性的产品铭牌上:

——WTGS 的制造厂和国家;

——型式和产品编号;

——生产日期;

——额定功率;

——参考风速  $v_{ref}$ ;

——轮毂高工作风速范围,  $v_{in} - v_{out}$ ;

——工作环境的允许温度范围;

——WTGS 的等级(见表 1);

——WTGS 输出端额定电压;

——WTGS 输出端频率或频率范围,通常额定频率偏差大于 2% 时,为频率允许变化范围。

## 6 外部条件

### 6.1 概述

在 WTGS 的设计中应考虑本章阐述的外部条件。

WTGS 要承受环境和电对它的影响,这些影响主要体现在载荷、使用寿命和正常工作等几个方面。为保证一定的安全性和可靠性水平,在设计中要考虑到环境、电力和土壤参数并在设计文件中予以明确规定。

环境条件可进一步划分为风况和其他外部条件。电力的条件则可参照电网条件。土壤特性关系到 WTGS 的基础设计。

各类外部条件可再细分为正常外部条件和极端外部条件。正常外部条件通常涉及的是长期结构载荷和运行状态。极端外部条件出现机会很少,但它是潜在的临界外部设计条件。设计载荷情况由这些外部条件与风力机运行模式结合而构成。

对结构整体而言,风况是最基本的外部因素。其他环境条件对设计特性,诸如控制系统功能、耐久性、锈蚀等有影响。

根据 WTGS 安全等级的要求,设计中要考虑正常和极端条件,详见下列相关条款。

### 6.2 风力发电机组分级

设计中要考虑的外部条件由 WTGS 安装场地类型决定。而 WTGS 等级又取决于风速和湍流参数。分级是想要达到最大限度应用的目的,使风速和湍流参数在不同的场地大体再现,而不是与某一特定场地精细吻合,见 11 章。总的目的是要得到明显由风速和湍流参数决定的 WTGS 的等级。表 1 规定了确

定 WTGS 等级的基本参数。

在这些情况中,需要一个特定的(例如特定风况或特定外部条件或一个特定安全等级,见 5.3)更高的 WTGS 等级,这个等级定为 S 级。S 级 WTGS 的设计值由设计者选取,并在设计文件中详细说明。特定设计中,选取的设计值所反应的环境条件要比预期的用户使用环境更为恶劣。

近海安装的风力机的特殊外部条件要求 WTGS 的设计为 S 级。

表 1 各等级 WTGS 基本参数

WTGS 等级	I	II	III	IV	S
$v_{ref}$ [m/s]	50	42.5	37.5	30	由设计者规定各参数
$v_{ave}$ [m/s]	10	8.5	7.5	6	
A $I_{15}$ [-]	0.18	0.18	0.18	0.18	
$a$ [-]	2	2	2	2	
B $I_{15}$ [-]	0.16	0.16	0.16	0.16	
$a$ [-]	3	3	3	3	

表中:各数值应用于轮毂高。

A 表示较高湍流特性级,

B 表示较低湍流特性级,

$I_{15}$  湍流强度 15 m/s 时特性值,

$a$  公式(7)中斜度参数。

除了基本参数以外,在 WTGS 的设计中还需要一些更重要的参数规定外部条件。后面称之为 WTGS 标准等级的  $I_A \sim IV_B$  中增加的参数在 6.3,6.4 和 6.5 条中加以说明。

设计寿命应为 20 年。

对 S 级 WTGS,制造厂应在设计文件中阐述所采用的模型及主要设计参数值。采用第 6 章的模型,对其参数值应作充分的说明。S 级 WTGS 的设计文件包含附录 A 所列内容。

### 6.3 风况

WTGS 应设计成能安全承受由其等级决定的风况。

风况的设计值须在设计文件中明确规定。

从载荷和安全角度出发风况可分为 WTGS 正常工作期间频繁出现的标准风况和一年或 50 年一遇的极端风况两种。

在所有情况下,应考虑平均气流与水平面夹角达  $8^\circ$  的影响。假定此夹角大小不随高度改变而变化。

#### 6.3.1 正常风况

##### 6.3.1.1 风速分布

场地的风速分布对 WTGS 的设计是至关重要的,因为它决定各级载荷出现的频率。对标准等级的 WTGS 计算设计载荷时,10 min 平均风速按瑞利分布计算。此时轮毂高概率分布为:

$$P_R(v_{hub}) = 1 - \exp[-\pi(v_{hub}/2v_{ave})^2] \dots\dots\dots(5)$$

##### 6.3.1.2 正常风廓线模型(NWP)

风廓线  $v(Z)$  表示的是平均风速随离地高度  $Z$  变化的函数。WTGS 的标准级,正常风廓线假定按:

$$v(Z) = v_{hub}(Z/Z_{hub})^\alpha \dots\dots\dots(6)$$

指数  $\alpha$  假定为 0.2。

风廓线用于确定穿过风轮扫掠面的平均垂直风速切变。

##### 6.3.1.3 正常湍流模型(NTM)

“风湍流”一词表示的是 10 分钟平均风速的随机变化。湍流模型包括风速变化效应,风向变化效应和样机转动的效应。标准级 WTGS,随机风矢量场能谱强度,不管是否在模型中明确地应用,都必须满足下列要求:

a) 纵向风速分量标准偏差特性值由下式给出<sup>1)</sup>:

$$\sigma_1 = I_{15}(15\text{m/s} + av_{\text{hub}})/(a + 1) \dots\dots\dots (7)$$

$I_{15}$ 和  $a$  值由表 1 给出。在  $I_{15}$ 和  $a$  有特定值前提下  $\sigma_1$  和湍流强度  $\sigma_1/v_{\text{hub}}$  的特性值作随风速变化的函数见图 1。

假定标准偏差 不随离地面高度变化。

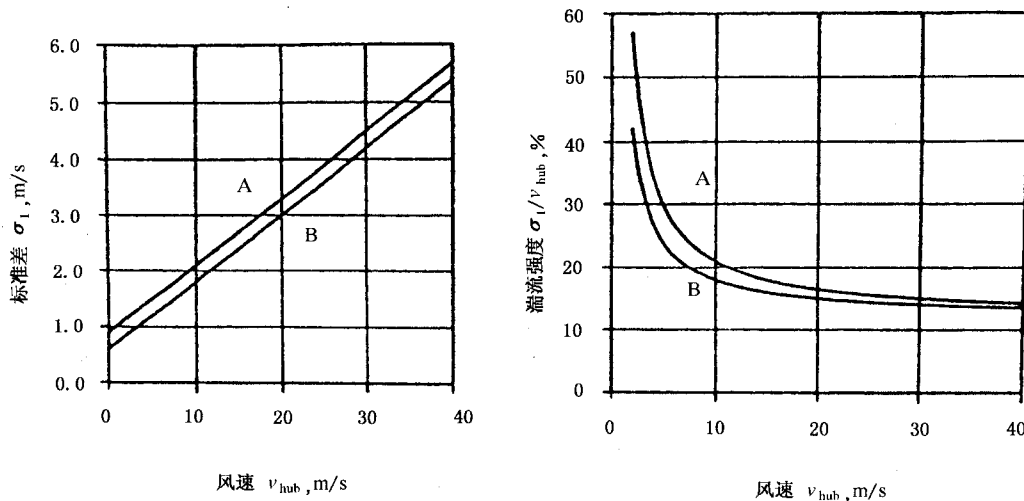


图 1 风湍流特性

b) 靠近惯性负区高频尾端,湍流纵向分量能谱强度  $S_1(f)$  逐渐接近下列形式:

$$S_1(f) = 0.05(\sigma_1)^2(\Lambda_1/v_{\text{hub}})^{-2/3}f^{-5/3} \dots\dots\dots (8)$$

湍流尺度参数由下式确定:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7Z_{\text{hub}} & Z_{\text{hub}} < 30 \text{ m} \\ 21 \text{ m} & Z_{\text{hub}} \geq 30 \text{ m} \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

满足上述要求的随机湍流模型的说明由附录 B 给出。在随机湍流模型基础上确立的简化模型由附录 C 给出。确定的简化模型当其被验证风轮叶片对旋转取样风速响应是充分衰减时使用。附录 C 也给出了对这个问题的说明。

6.3.2 极端风况

极端风况用于确定 WTGS 的极端风载荷。这种风况包括由暴风造成的风速峰值及风向和风速的迅速变化。这种极端状况含有湍流替在影响,在设计计算中仅考虑其确定的因素。

6.3.2.1 极端风速模型(EWM)

50 年一遇和 1 年一遇极端风速  $v_{e50}$ 和  $v_{e1}$ 应根据参考风速  $v_{\text{ref}}$ 来确定。在标准级 WTGS 的设计中,  $v_{e50}$ 和  $v_{e1}$ 作为高度  $Z$  的函数用下式计算:

$$v_{e50}(Z) = 1.4v_{\text{ref}}(Z/Z_{\text{hub}})^{0.11} \dots\dots\dots (10)$$

$$v_{e1}(Z) = 0.75v_{e50}(Z) \dots\dots\dots (11)$$

式中:  $Z_{\text{hub}}$ ——轮毂高<sup>2)</sup>。假定与平均风向短期偏离为  $\pm 15^\circ$ 。

1) 在计算载荷时除了表 2 内容外,还可以近似地使用不同的百分位数。这些百分位数的附加值,确定如下:

$$\Delta\sigma_1 = (X - 1)(2 \text{ m/s})I_{15}$$

式中  $X$  由正常概率分布函数确定。如 95%时,  $X=1.64$ 。

2) 现场设计准则可以这样描述,即风速和气动压力随高度而变化,但由上述关系式得到的结果同规定值差异甚少。

6.3.2.2 极端工作阵风(EOG)

标准级 WTGS  $N$  年一遇轮毂高阵风值  $v_{gustN}$  由下面的关系式给出:

$$v_{gustN} = \beta \left[ \frac{\sigma_1}{1 + 0.1 \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right] \dots\dots\dots (12)$$

式中:  $\sigma_1$ ——标准偏差,由公式(7)计算;

$\Lambda_1$ ——湍流尺度参数,由公式(9)选取;

$D$ ——风轮直径;

$\beta=4.8$   $N=1$ ;

$\beta=6.4$   $N=50$ 。

周期为  $N$  年一遇的风速,由下式确定:

$$v(Z, t) = \begin{cases} v(Z) - 0.37v_{gustN} \sin(3\pi t/T)(1 - \cos(2\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ v(Z) & t < 0 \text{ 和 } t > T \end{cases} \dots\dots (13)$$

式中:  $v(Z)$ 由公式(6)进行计算:

$T=10.5$  s  $N=1$ ;

$T=14.0$  s  $N=50$ 。

如一年一遇,湍流种类为 A 类,风轮直径 42 m,轮毂高 30 m,  $v_{hub}=25$  m/s 的极端工作阵风,见图 2。

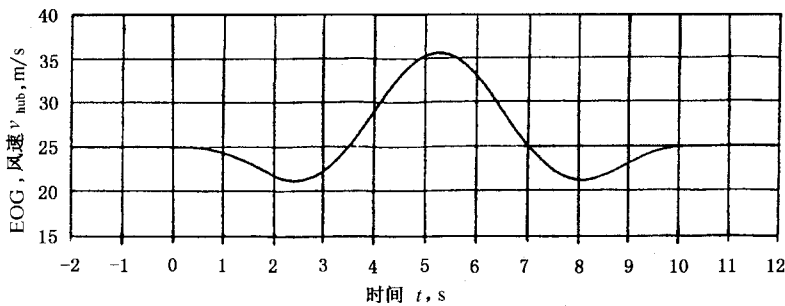


图 2 极端工作阵风范例( $N=1$ , A 类,  $D=42$  m,  $Z_{hub}=30$  m,  $v_{hub}=25$  m/s)

一年一遇和 50 年一遇二者均选取同一升降参数

6.3.2.3 极端风向变化(EDC)

$N$  年一遇极端风向变化值  $\theta_{eN}$ ,用下面公式进行计算:

$$\theta_{eN}(t) = \pm \beta \arctan \left[ \frac{\sigma_1}{v_{hub} \left[ 1 + 0.1 \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right) \right]} \right] \dots\dots\dots (14)$$

式中:  $\theta_{eN}$ ——限定在  $\pm 180^\circ$  范围内;

$\Lambda_1$ ——湍流尺度参数,由(9)式计算;

$D$ ——风轮直径;

$\beta=4.8$   $N=1$ ;

$\beta=6.4$   $N=50$ 。

$N$  年一遇风向瞬时极端变化  $\theta_N(t)$ ,由下式给出:

$$\theta_N(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 0.5\theta_{eN}(1 - \cos(\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ \theta_{eN} & t > T \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

此处,瞬时风向极端变化持续时间  $T=6$  s。最大瞬时载荷发生时,应有信号发出。风向瞬时变化结束后,认为风向保持不变。并假定风速遵从 6.3.1.2 正常风廓线模型(NWP)。

如 50 年一遇,湍流类型为 A,风轮直径 42 m,轮毂高 30 m,  $v_{hub}=25$  m/s 的极限风向变化见图 3。

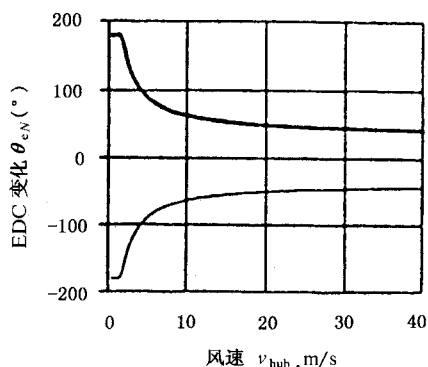


图3 极端风向幅值变化范例  
( $N=50$ , A类,  $D=42$  m,  $Z_{hub}=30$  m)

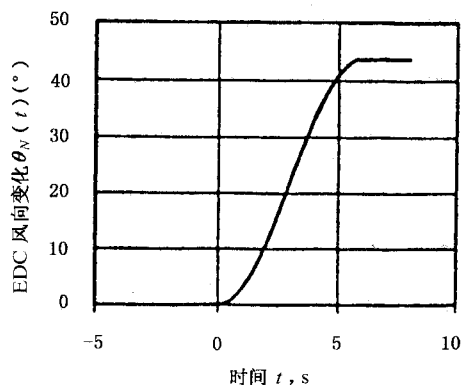


图4 极端风向变化范例  
( $N=50$ , A类,  $D=42$  m,  $Z_{hub}=30$  m,  $v_{hub}=25$  m/s)

6.3.2.4 极端相干阵风(ECG)

标准级 WTGS 的设计需假定极端相干阵风具有  $v_{cg}=15$  m/s 的幅值。风速由下式确定:

$$v(z,t) = \begin{cases} v(Z) & t < 0 \\ v(Z) + 0.5v_{cg}(1 - \cos(\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ v(Z) + v_{cg} & t > T \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

此外,上升时间  $T=10$  s,  $v(Z)$  为 6.3.1.2 给出的风速。应用公式(6)规定的正常风廓线。 $v_{hub}=25$  m/s 时极端相干阵风见图 5。

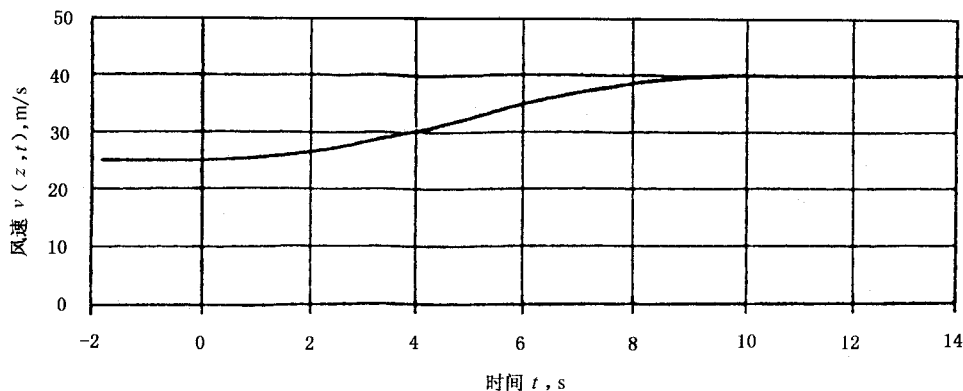


图5 极端相干阵风( $v_{hub}=25$  m/s)(ECG)

6.3.2.5 方向变化的极端相干阵风(ECD)

在这种情况下,假定风速的上升(由 ECG 阐述的,见图 5)与风向的变化  $\theta_{cg}$  是同步进行的。 $\theta_{cg}$  由下面的关系式确定:

$$\theta_{cg}(v_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ & v_{hub} < 4 \text{ m/s} \\ 720^\circ & 4 \text{ m/s} \leq v_{hub} \leq v_{ref} \\ v_{hub} & \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

同步的方向变化由下面关系式给出:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & t < 0 \\ \pm 0.5\theta_{cg}(1 - \cos(\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ \pm \theta_{cg} & t > T \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

此处上升时间  $T=10$  s。

应用公式(6)规定的正常风廓线。

风向的变化  $\theta_{cg}$  与风速  $v_{hub}$  的关系,风向的变化与时间的关系( $v_{hub}=25$  m/s 时),分别见图 6 和图 7。

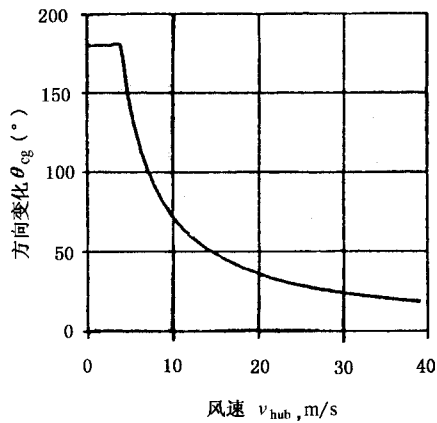


图 6 ECD 风向变化

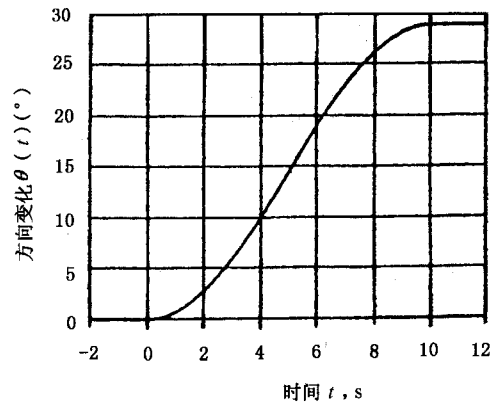


图 7  $v_{hub} = 25 \text{ m/s}$  时风向变化时间历程

6.3.2.6 极端风速切变(EWS)

50 年一遇极端风速切变应用于下列两种瞬时风速来计算:

—— 瞬时垂直切变

$$v(z,t) = \begin{cases} v_{hub} \left( \frac{Z}{Z_{hub}} \right)^\alpha + \left( \frac{Z - Z_{hub}}{D} \right) \left( 2.5 + 0.2\beta\sigma_1 \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right)^{1/4} \right) \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi t}{T} \right) \right) & 0 \leq t \leq T \\ v_{hub} \left( \frac{Z}{Z_{hub}} \right)^\alpha & t < 0 \text{ 和 } t > T \end{cases} \dots\dots\dots (19)$$

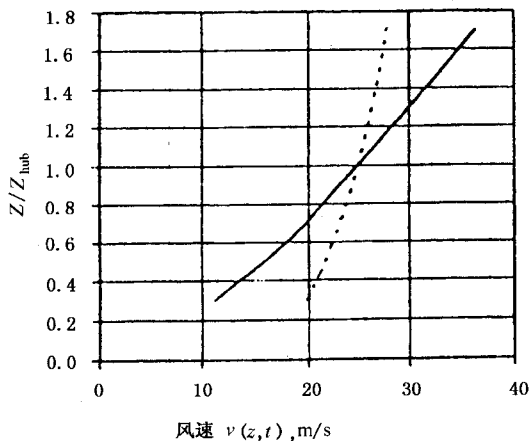
—— 瞬时水平切变

$$v(y,z,t) = \begin{cases} v_{hub} \left( \frac{Z}{Z_{hub}} \right)^\alpha + \left( \frac{Y}{D} \right) \left( 2.5 + 0.2\beta\sigma_1 \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right)^{1/4} \right) \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi t}{T} \right) \right) & 0 \leq t \leq T \\ v_{hub} \left( \frac{Z}{Z_{hub}} \right)^\alpha & t < 0 \text{ 和 } t > T \end{cases} \dots\dots\dots (20)$$

式中:  $\alpha = 0.2$ ;  $\beta = 6.4$ ;  $T = 12 \text{ s}$ ;

$\Lambda_1$  —— 湍流尺度参数, 由公式(9)计算;

$D$  —— 风轮直径。

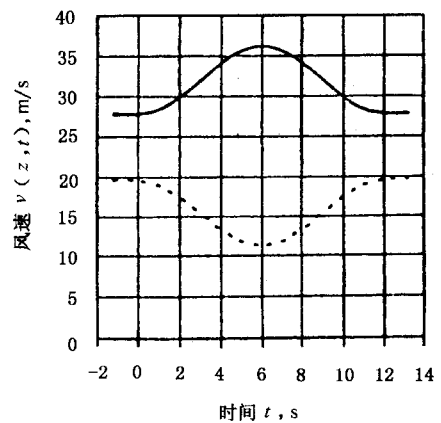


$t = 0 \dots\dots t = T/2$

图 8 极端垂直风速切变开始前风廓线

( $t = 0$ , 虚线) 最大切变 ( $t = 6 \text{ s}$ , 实线)

( $N = 50$ , 湍流 A 类,  $Z_{hub} = 30 \text{ m}$ ,  $v_{hub} = 25 \text{ m/s}$ ,  $D = 42 \text{ m}$ )



风轮上部.....风轮下部

图 9 风轮上部和下部风速切变时间历程

(假定以图 8 为存在前提)

要挑选水平风速切变信号,以使最严重的瞬时载荷出现。两种极端风切变是分别考虑的,所以不能同时应用。作为一例,50年一遇极端垂直风速切变在图8中予以说明,图中示出开始前的风速切变( $t=0$  s)和最大切变( $t=6$  s)。图9则表示出风轮上部和下部风速切变的时间历程。两图中均假定湍流类型为A,  $v_{hub}=25$  m/s,  $Z_{hub}=30$  m, 风轮直径  $D=42$  m。

#### 6.4 其他环境条件

除了风速外,其他环境(气候)条件通过热、光、化学、腐蚀、机械、电的或其他物理作用都会影响WTGS的完整性和安全性。而且综合的气候因素更会加剧这种影响。

至少应考虑下列其他环境条件,并将它们的作用在设计文件中阐明:

- 温度;
- 湿度;
- 空气密度;
- 太阳辐射;
- 雨、冰雹、冰雪;
- 化学作用物质;
- 机械作用颗粒;
- 雷电;
- 地震;
- 盐雾。

近海环境,需要考虑附加特殊条件。

设计中的气候条件可依照惯用值或气候条件变化范围来确定。选择设计值时,诸多气象条件同时出现的可能性也应予以考虑。对应一年周期里正常范围内气候变化不应影响WTGS正常运行。

除了相关存在因素外,6.4.2中的极端环境条件应和6.3.1中正常风况结合起来考虑。

##### 6.4.1 其他正常环境条件

应考虑的其他正常环境条件

- 设备正常工作环境温度范围 $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ;
- 最高相对湿度小于或等于95%;
- 大气成分相当于无污染的内陆大气(见IEC 60721-2-1);
- 太阳辐射强度 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ;
- 空气密度 $1.225\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

由设计者规定附加外部环境条件参数时,这些参数的值应在设计文件中说明,并应符合IEC 60721-2-1的要求。

##### 6.4.2 其他极端环境条件

WTGS设计中应考虑的其他极端环境条件是温度、雷电、冰和地震。

###### 6.4.2.1 温度

标准级WTGS极端温度范围设计值至少应是 $-20^{\circ}\text{C}\sim +50^{\circ}\text{C}$ 。

###### 6.4.2.2 雷电

第10.6条防雷措施适于标准级风力发电机组。

###### 6.4.2.3 冰

应给出标准级WTGS结冰时的最低要求。

###### 6.4.2.4 地震

应给出标准级WTGS地震时的最低要求。

#### 6.5 电网条件

下面列出设计中要考虑的WTGS终端正常条件。

当下列参数在下述范围内时,采用正常电网条件。

- 电压,额定值 $\pm 10\%$
- 频率,额定值 $\pm 2\%$
- 电压不稳定,电压的负量与正量的比值不超过 $2\%$
- 断电,假定一年内断电 20 次,风力机设计的最长断电持续时间为一个星期以上来设计。

## 7 结构设计

### 7.1 概述

风力机结构设计应以承载件结构完整性的验证为基础。零部件的极限强度和疲劳强度须通过计算或试验来验证,以表明相应安全等级的 WTGS 结构的完整性。

应以 ISO 2394 为基础进行结构分析。

确定一个能够接受的安全等级,并通过计算或试验来验证,以示载荷未超过设计值。

采用适当的方法进行计算。设计文件中需提供计算方法的说明。说明应包括计算方法有效性的证据或相应研究验证的参考文献。试验中的载荷水平应能反映相应计算中的安全系数。

### 7.2 设计方法

应验证风力机极端状态未超出设计范围。模型试验和样机试验可以代替计算来验证结构设计的合理性,如 ISO 2394 的规定<sup>3)</sup>。

### 7.3 载荷

设计计算中应考虑 7.3.1~7.3.4 阐述的载荷。

#### 7.3.1 惯性力和重力载荷

惯性力和重力载荷是作用于 WTGS 的静态和动态载荷,它们是由振动、旋转、地球引力以及地震的作用产生的。

#### 7.3.2 空气动力载荷

空气动力载荷也是静态的和动态的载荷,它们是由气流与 WTGS 的固定件或运动件相互作用引起的。

空气动力视风轮转速,穿过风轮平面的风速、湍流、空气密度和风力机零部件气动类型和它们之间相互作用(包括气动弹性)而定。

#### 7.3.3 运行载荷

运行载荷由 WTGS 的操作和控制而产生。与其他载荷是一样的。均与风轮转速的控制有关,如通过叶片变桨或其他气动装置进行扭矩控制,从而控制转速。这些载荷包括由风轮起动和停止而引起的传动机构制动瞬时载荷,发电机接通和分离引起的载荷和偏航引起的载荷。

#### 7.3.4 其他载荷

其他载荷,如波动载荷,尾流载荷,冲出载荷,冰载荷都可能发生。这些载荷可适当计入总载荷考虑,见第 11 章。

3) ISO 2394 定义极限状态和使用状态如下:结构和作用于其上的力的一种状态,一旦超过这种状态,结构不再满足设计要求。设计计算的目的是要使所研究的结构处在规定极限值以下。例如:最大极限状态相当于:

- 视为刚体的结构或其一部分失去平衡(如倾覆);
- 自由超过极限强度(或由于交变载荷强度减少)或材料最大变形,造成结构危险剖面的断裂;
- 机构机理破坏,失去稳定(弯曲等)。例如,使用效能和影响结构件或非结构件外表的变形;
- 造成不舒适,影响非结构件或设备的超标振动(尤其是发生共振);
- 减少结构耐久性的和影响使用功能或影响结构件非结构件外表的局部损伤。

为了在设计中控制使用极限状态,通常使用一个或多个约束,如规定最大变形、最大加速度、最大裂纹等。

7.4 设计工况和载荷状态

本条阐明了 WTGS 结构载荷状态,并规定了设计中需考虑的最低数量。

为了达到设计目的,WTGS 的寿命以机组将要承受的,包含各重要条件的设计工况来体现。

载荷状态取决于装配、吊装、维护、运行状态、设计工况与外部条件的组合方式。将具有合理发生概率的各相关载荷状态与控制和保护系统动作,放在一起考虑。

通常用于确定 WTGS 结构完整性的载荷状态,用下面的组合形式进行计算:

- 正常设计工况和正常外部条件;
- 正常设计工况和极端外部条件;
- 故障设计工况和相应的外部条件;
- 运输、安装和维护设计工况与相应的外部条件。

如果极端外部条件和故障工况二者相关存在,可以考虑将它们组合在一起,作为一种载荷状态。

在每种设计工况中,为使 WTGS 结构设计的完整,要考虑几种载荷状态。表 2 所列是考虑的最少载荷情况。表中,每种设计工况通过对风、电和其他外部条件的说明都规定了设计载荷状态。

在特殊的 WTGS 的设计中,如需要,也可以考虑其他有关安全设计载荷状态。

表 2 中,对各设计工况用“F”和“U”注明相应的分析方法。F 表示疲劳载荷分析,用于评定疲劳强度。U 表示极限载荷分析,如超越材料最大强度极限的分析、叶尖挠度分析、稳定分析等。

标有“U”的设计工况,又分为正常(N),非正常(A),运输和安装(T)等类。在风力机正常寿命期内,正常设计工况是要频繁出现的。此时风力机经常处于正常状态或仅出现短时的异常或轻微的故障。非正常设计工况出现的可能性较小,它的出现往往对应产生严重故障,例如保护系统的故障。设计工况的形式 N,A 或 T 决定极限载荷使用的安全系数  $\gamma_f$ 。这些系数在 7.6 条的表 3 和表 4 中给出。

表 2 列出了风速范围,应考虑到风速对 WTGS 产生的最严重影响。将风速范围分成若干个区段,并对每一段给出 WTGS 适当的寿命百分比。确定载荷状态时,应参考第 6 章阐述的风况。

表 2 载荷情况

设计工况	DLC	风 况	其他情况	分析方法	局部安全系数
1) 发电	1.1	NTM $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$		U	N
	1.2	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$		F	*
	1.3	ECD $v_{hub} = v_r$		U	N
	1.4	NWP $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$	外部电故障	U	N
	1.5	EOG <sub>1</sub> $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$	电线损伤	U	N
	1.6	EOG <sub>50</sub> $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$		U	N
	1.7	EWS $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$		U	N
	1.8	EDC <sub>50</sub> $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$		U	N
	1.9	ECG $v_{hub} = v_r$		U	N
2) 发电兼有故障	2.1	NWP $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$	控制系统故障	U	N
	2.2	NWP $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$	保护系统或内部电气故障	U	A
	2.3	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	控制(保护)系统故障	F	*
3) 起动	3.1	NWP $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$		F	*
	3.2	EOG <sub>1</sub> $v_{hub} = v_{in}$ $v_r$ 或 $v_{out}$		U	N
	3.3	EDC <sub>1</sub> $v_{hub} = v_{in}$ $v_r$ 或 $v_{out}$		U	N

表 2(完)

设计工况	DLC	风 况	其他情况	分析方法	局部安全系数
4) 正常关机	4.1	NWP $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$		F	*
	4.2	EOG <sub>1</sub> $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$		U	N
5) 紧急关机	5.1	NWP $v_{hub} = v_r$ 或 $v_{out}$		U	N
6) 停机(静止或空转)	6.1	EWM $v_{hub} = v_{e50}$	可能电网损坏	U	N
	6.2	NTM $v_{hub} < 0.7v_{ref}$		F	*
7) 停机兼故障	7.1	EWM $v_{hub} = v_{e1}$		U	A
8) 运输、组装、维护、修理	8.1	由制造厂加以说明			T
缩写见下面。 * 如果未确定切出风速 $v_{out}$ , 则用 $v_{ref}$ 代替。					

DLC 设计载荷状态

ECD 方向变化的极端相干阵风(见 6.3.2.5)

ECG 极端相干阵风(见 6.3.2.4)

EDC 极端风向变化(见 6.3.2.3)

EOG 极端工作阵风(6.3.2.2)

EWM 极端风速模型(6.3.2.1)

EWS 极端风速切变(6.3.2.6)

Subscript 以年计发生一次的机会

NTM 正常湍流模型(见 6.3.1.3)

NWP 正常风廓线模型(见 6.3.1.2)

F 疲劳

U 最大

N 正常的和极端的

A 非正常的

T 运输和安装

\* 疲劳安全系数(见 7.6.3)

#### 7.4.1 发电(DLC1.1~1.9)

这种设计工况, WTGS 处在运行状态, 并被接有电力负载。WTGS 总布局应考虑风轮不平衡的影响。设计计算中应考虑制造中规定的最大不平衡重量的气动不平衡(如叶片浆距和偏航角)。

另外, 理论最佳运行状态偏差, 如偏航角偏差, 控制系统轨迹误差等, 在分析运行载荷时应予考虑。

计算中应假设各种情况最不利的组合, 例如风向变化与偏航角偏差的组合(DLC1.8)或阵风与电负荷损失(DLC1.5)的组合。

设计载荷情况 DLC1.1 和 1.2 包含了由大气湍流造成的载荷要求。DLC1.3 和 1.6~1.9 规定了 WTGS 使用寿命期间可能出现的临界事件的瞬态情况。DLC1.4 和 1.5 考虑的则是外部故障和电负荷损失的瞬态情况。

#### 7.4.2 发电兼有故障(DLC2.1~2.3)

控制系统或保护系统故障, 电气系统内部故障(如发电机短路), WTGS 大的负荷都有可能在发电过程中发生。对 DLC2.1 控制系统产生的故障(认为是正常现象)应进行分析。对 DLC2.2 保护系统或内部电气系统出现的故障(认为是罕见的现象)应进行分析。如果发生故障后未能引起立刻关机, 由此产

生的载荷可导致严重疲劳破坏,这种情况可能持续的时间,应在 DLC2.3 中估计到。

#### 7.4.3 起动(DLC3.1~3.3)

这种设计工况包括 WTGS 从静止或空转状态到发电状态的瞬间作用于其上的所有载荷。

#### 7.4.4 正常关机(DLC4.1~4.2)

这种设计工况包括 WTGS 从正常发电到静止或空转状态的瞬间作用于其上的所有载荷。

#### 7.4.5 紧急关机(DLC5.1)

由紧急关机造成的载荷增长应予考虑。

#### 7.4.6 停机(静止或空转)(DLC6.1~6.2)

风力机停机时,风轮停止不动或空转,此时应考虑极限风况。如果某些零件产生严重疲劳破坏(例如由空转叶片重力造成疲劳破坏),应考虑对应各种风速的空转时数即不发电时数。电网损坏对停机后的风力机的影响也应加以考虑。

7.4.7 停机兼有故障(DLC7.1) WTGS 停机中,由于电网或 WTGS 自身故障造成的不正常现象,要进行分析。任何故障,电网亏损造成的 WTGS 正常特性变化可能造成的结果,都应成为分析对象。故障原因应与极端风速模型(EWM)和一年一遇的外部条件结合起来分析。

#### 7.4.8 运输、组装、维护和修理(DLC8.1)

制造厂应指定 WTGS 运输、组装、维护和修理中的风况和设计工况。如果在 WTGS 上有大的载荷产生,那么就应考虑规定一个最大允许风况。

### 7.5 载荷计算

对每种设计载荷情况都要考虑 7.3.1~7.3.4 中叙述的载荷。

也要考虑下列相关问题:

- 由 WTGS 自身引起的流场的扰动(尾流诱导速度、塔影效应等);
- 三维流对叶片气动特性的影响(例如三维失速和叶尖气动损失);
- 不稳定空气动力影响;
- 结构动力与振动的耦合模型;
- 气动弹性影响;
- WTGS 控制系统和保护系统动作的影响。

### 7.6 最大极限状态分析

#### 7.6.1 方法

安全系数取决于载荷和材料的不确定性和易变性。分析方法的不确定性以及失效零件的重要性。

##### 7.6.1.1 安全系数

为保证载荷与材料的安全设计值,载荷与材料的不确定性和易变性用公式(21)与(22)确定的载荷与安全系数进行补偿。

$$F_d = \gamma_t F_k \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中:  $F_d$ ——载荷的设计值;

$\gamma_t$ ——载荷安全系数;

$F_k$ ——载荷的实际值。载荷的实际值不容易估计出。

$$f_d = \frac{1}{\gamma_m} f_k \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:  $f_d$ ——材料的设计值;

$\gamma_m$ ——材料安全系数;

$f_k$ ——材料性能值。

本标准中应用的载荷安全系数还要考虑下列因素:

- 载荷实际值出现不理想偏差的可能性;

——载荷模型的误差。

本标准中应用的材料安全系数还要考虑下列因素：

- 材料性能值出现不理想偏差的可能性；
- 零件截面阻抗或结构承载能力计算不准确的可能性；
- 几何参数的误差；
- 零件材料性能与试验样品所测性能之间的差别，也即转换误差。

这些误差仅在个别安全系数中存在，本标准与大多数其他标准一样，载荷的相关因素并入系数  $\gamma_f$ ，而材料的相关因素并入系数  $\gamma_m$ 。引入重要失效系数  $\gamma_n$ ，以便进行区分：

一类零件安全系数：用于“失效-保险”结构件，结构件的失效不会引起 WTGS 重要零件的失效。

二类零件安全系数：用于“非失效-保险”结构件。结构件的失效会迅速引起 WTGS 重要零件的失效。

WTGS 最大极限状态的分析，执行下列四种分析形式：

- 极限强度分析(见 7.6.2)；
- 疲劳损伤分析(见 7.6.3)；
- 稳定性分析(弯曲等)见(7.6.4)；
- 临界挠度分析(叶片与塔架机械干扰等)(见 7.6.5)

不超出最大极限状态的通用公式：

$$\gamma_n \times S(F_d) \leq R(f_d) \dots\dots\dots (23)$$

每种分析都要求不同的载荷和阻抗函数， $S$  和  $R$ ，安全系数的使用要涉及不同的公差源。

### 7.6.1.2 材料规范的应用

在确定 WTGS 结构完整性中，可采用国内或国际的相应材料设计规范。当国内或国际规范中的安全系数与本标准安全系数同时使用时，应特别注意。须确保最终的安全水平不低于本标准的安全水平。

当考虑各种类型的不确定性时，如材料强度的固有可变性、加工控制范围或交工方法等，不同的标准将材料局部安全系数  $\gamma_m$  分为若干局部安全系数。本标准给出材料局部安全系数即所谓“一般材料安全系数”，是仅由强度参数固有变化决定。按照材料标准是给出安全系数还是给出不确定因素的影响简化后的安全系数，要认真考虑。

一个规范可选择不同的载荷和材料安全系数。这里的安全系数是 ISO 2394 确定的安全系数。如果这里选出的安全系数偏离了 ISO 2394，应根据本标准的要求进行必要的调整。

### 7.6.2 极限强度分析

一般来讲， $R$  就是材料抗载能力允许设计值，在此， $R(f_d) = f_d$ ，而极限强度函数  $S$  通常认为是结构最大应力值。对同时作用的多个载荷公式变为：

$$S(\gamma_{f1}F_{k1}, \dots, \gamma_{fn}F_{kn}) \leq \frac{1}{\gamma_m \times \gamma_n} \times f_k \dots\dots\dots (24)$$

#### 7.6.2.1 载荷安全系数

各种来源的载荷可分别进行计算，载荷系数应由表 3 规定的最小值。

很多情况下，特别是变化的载荷产生动态效应时，变化的载荷很难单独计算出来。此时载荷安全系数应选取表 3 中相应的最大安全系数。另一方面，应力的计算结合实际载荷或表现载荷的计算进行。对于不易确定因素，用表 3 的安全系数隐含定义的安全水平处理。

表 3 载荷安全系数  $\gamma_f$

载荷来源	非良性载荷			良性载荷
	设计工况类型(见表 2)			所有设计工况
	正常和极限	非正常	运输、安装	
空气动力	1.35	1.1	1.5	0.9
工 作	1.35	1.1	1.5	0.9
重 力	1.1/1.35*	1.1	1.25	0.9
其他惯性力	1.25	1.1	1.3	0.9

\* 因质量而非因重量产生。

7.6.2.2 无通用设计规范的材料安全系数

材料安全系数应根据充分有效的材料性能试验数据确定。考虑到材料强度的固有可变性。当使用 95%置信度及 95%幸存率的典型材料性能时,所用的材料一般局部安全系数应不小于 1.1。如果要获得其他幸存率  $P$ (但置信度为 95%)和/或变异系数  $\delta$  为 10%或高于 10%的典型材料性能,根据表 4 选取一般的系数。为了从一般系数导出综合材料系数,必须考虑尺寸效应以及外部环境如紫外线辐射、湿度以及通常探测不到的损伤造成材料强度容限减小的影响。

表 4 材料通用安全系数(由固有可变性)

$P$	$\delta=10\%$	$\delta=15\%$	$\delta=20\%$	$\delta=25\%$	$\delta=30\%$
99%	1.02	1.05	1.07	1.12	1.17
98%	1.06	1.09	1.13	1.20	1.27
95%	1.10	1.16	1.22	1.32	1.43
90%	1.14	1.22	1.32	1.45	1.60
80%	1.19	1.30	1.44	1.62	1.82

重大失效安全系数

一类零件:  $\gamma_n=1.0$

二类零件:  $\gamma_n=1.0$

7.6.2.3 有通用设计规范的材料安全系数

载荷、材料的安全系数和重大失效安全系数  $\gamma_f, \gamma_m$  和  $\gamma_n$  应大于或等于 7.6.2.1 和 7.6.2.2 的规定。对材料幸存率  $P$  和伸长率没有规定的,其值可假定为  $P=95\%, \delta=10\%$ 。

7.6.3 疲劳损伤

疲劳损伤可通过适当疲劳损伤计算来估计。例如,根据梅纳准则,累积损伤超过 1 时,达到极限状态。所以,在风力机寿命内,累积损伤应小于或等于 1。

$$\text{损伤} = \sum_i \frac{n_i}{N(\gamma_m \gamma_n \gamma_f S_i)} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:  $n_i$ ——载荷特性谱  $i$  区段中疲劳循环次数,包括所有载荷情况;

$S_i$ —— $i$  区段中与循环次数对应的应力(或应变)水平,包括平均应力和应力幅的影响;

$N_c$ ——至零件失效的循环次数,它是应力(或应变)函数的变量(即  $S-N$  特性曲线);

$\gamma_m, \gamma_n, \gamma_f$ ——分别为材料安全系数、重大失效安全系数和载荷安全系数。

7.6.3.1 载荷安全系数

正常和非正常设计工况载荷安全系数  $\gamma_f$  均为 1.0。

### 7.6.3.2 设计规范不适用时的材料安全系数

当生存率不小于 95% 和置信度为 95%，伸长率为 10% 时，由  $S-N$  曲线提供的材料安全系数  $\gamma_m$  为 1.1。如果材料特性为其他生存率  $P$  和其他伸长率  $\delta$ ，则相应的通用材料安全系数查表 4。疲劳强度应从有统计意义的试验循环数中获取，而特性值的偏差须考虑尺寸效应和由于诸如紫外线辐射和通常探测不到的外部影响造成的容限下降。

重大失效安全系数

一类零件： $\gamma_n=1.0$ ；

二类零件： $\gamma_n=1.15$ 。

### 7.6.3.3 设计规范适用时的材料安全系数

载荷和材料安全系数，重大失效安全系数应不小于 7.6.3.1 和 7.6.3.2 中的规定。

对材料特性生存率  $P$  和伸长率未规定的，假定  $P=95\%$ ， $\delta=10\%$ 。

### 7.6.4 稳定性

在载荷作用下，零件不应弯曲和扭曲。设计载荷下，仅“非失效-保险”承载件不许弯和扭，而其他零件允许产生弹性变形。

载荷安全系数  $\gamma_f$  的最小值应根据 7.6.2.1 中极限载荷不确定情况选取。

### 7.6.5 临界挠度分析

应验证表 2 详列的设计工况没有产生影响 WTGS 安全的变形。最重要的一条是要验证叶片与塔架之间无机械干扰。

应确定表 2 详列载荷情况不利方向上的最大弹性变形，并乘以载荷安全系数，材料安全系数和重大失效安全系数。

载荷安全系数

载荷安全系数  $\gamma_f$  从表 3 选取

材料安全系数

材料安全系数  $\gamma_m$  根据 7.6.2 选取。应特别注意几何形状不确定性和挠度计算方法的准确性。

重大失效安全系数

一类零件： $\gamma_n=1.0$ ；

二类零件： $\gamma_n=1.0$ ；

在不利方向，须将弹性变形的影响叠加到不变形的部位，将其最终位置与无干扰条件进行比较。

### 7.6.6 特殊安全系数

由测量或在测量基础上的分析得出的载荷值，如果把握性较正常情况高，可以用较低的载荷安全系数。使用的安全系数值，在设计文件中应加以说明。

## 8 控制和保护系统

### 8.1 概述

WTGS 工作和安全性受控于控制系统和保护系统。控制和保护系统应满足本条款的要求。

手动或自动的介入，应不损害保护系统功能。允许手动介入的装置在必要处应有清晰可辨的相应标记。

控制和保护系统的复位应能自由进行，不受干扰。

控制系统承受件或活动件中任何一件单独失效不应引起保护系统误动作。

### 8.2 风力机控制

WTGS 的控制系统通过主动的或被动的的方式控制 WTGS 的运行，并使运行参数保持在它们的正常范围内。控制方式的选择要认真考虑。例如对维修而言，除了紧急停机按钮外，它的每种控制方式都应超越其他控制。控制方式的选择由选择器操纵，它可以被锁定在相应单独控制方式的每个位置上。当

某些控制是数字控制时,要提供选择相应功能的数字码。

控制系统可控制的功能或参数如下:

- 功率范围;
- 风轮转速;
- 接通电负荷;
- 起动或关机过程;
- 电网或负荷亏损时的关机;
- 电缆线严重缠绕;
- 风力机对风调解。

### 8.3 风力机保护

由于控制系统失效或内部及外部损伤或当发生危险导致 WTGS 不能保持正常工作时,保护系统应起作用。

保护系统在下列情况下应起作用:

- 超速;
- 发电机超载或出现故障;
- 过分振动;
- 电网失电、负载丢失时风力机出现的关机故障;
- 电缆线非正常缠绕(由于偏航机舱旋转造成)。

保护系统按具有自动防止故障的功能来设计。保护系统通常能够在系统内电源或无安全寿命零件单独失效或故障情况下对 WTGS 进行保护。

如果两个或多个失效相互关联或共同起作用,可将它们按单一失效处理。

保护系统的非冗余零件必须分析最大强度、疲劳破坏和最大载荷,并满足 8.4 的要求。

### 8.4 控制和保护系统的功能要求

保护系统应有一个或多个能使风轮由任意工作状态转入停止或空转状态的装置(机械的、电动的或气动的)。它们之中至少应有一个必须作用在低速轴上或 WTGS 的风轮上。须提供使风轮在小于  $v_{e1}$  的任意风速下由危险的空转状态转为完全静止状态的方法。按紧急停机按钮后,解除要求应有恰当的动作。紧急停车的解除不能导致机组重新起动,起动须单独进行。

应经常进行检查,以减少潜在失效造成的危险。无安全寿命期的零件或装置,对可能伤害它的环境和它自身状态应进行监测;它们的失效应引起机器关机。按安全寿命设计的零件应定期检查。

能超越自动控制系统的紧急停机按钮,在每个重要工作位置都应设置。

保护功能和控制功能冲突时,应优先考虑保护功能。

由于内部故障,或因达到风力机安全极限发生跳闸时,风力机不应自动起动。

## 9 机械系统

### 9.1 概述

WTGS 的机械系统包括

- 传动系统包括齿轮箱、轴和联轴器;
- 附属装置,如制动器、叶片桨距控制器、偏航驱动器。

附属装置可由电的、液压的或气压的驱动方式驱动。

### 9.2 错误装配

有可能是危险源的零件错误装配,在这些零件的设计中是无法避免的。为克服这种危险,在这些零件上或其保护壳上做出标记。对运动件也要做出标记,并在其保护罩上标出运动方向,以避免产生危害,其他必要的信息应在操作者手册或维护手册中给出。

错误的连接也可能成为危险源,避免错误连接不可能在设计中做到。为克服这种危险,采取一定预防措施,在护管和软管上、接头上做出标记。

### 9.3 液压或气动系统

在装有液压或气动力的附件的地方,装置的设计和施工安装应避免受其潜在的危害。设计中应有隔绝和卸荷方法。

输送压力油或压缩空气的管和软管及联接件的设计,应能承受已知的内外压力。

应采取预防措施,使由破裂造成的危害减到最小。

## 10 电气系统

### 10.1 概述

WTGS 的电气系统包括在 WTGS 终端的所有安装于其上的电气设备。下面称作 WTGS 电气系统。

电力汇集系统不在本标准范围内。

### 10.2 风力发电机组电气系统的一般要求

所有电气元件和系统均须满足 IEC 60204-1 的要求。

WTGS 电气系统的设计,应保证对人畜最小的伤害。也须保证第 6 章确定的正常和极限外部条件下,WTGS 运行和维护中对 WTGS 外部电气设备的最小伤害。

WTGS 的电气系统,包括所有电气设备和电气元件,必须遵从 IEC 相关标准。特别是 WTGS 电气系统的设计必须符合 IEC 60364 的要求。制造厂应指明 WTGS 使用的设计标准是大于交流 1 000 V 或直流 1 500 V 正常供电电压的电路这一部分内容。电气系统的设计还应考虑风力发电的波动特性。

WTGS 电气系统应遵照电磁兼容性的相关标准。它们是 GB 17625.1, GB 17625.2, GB/T 17626.2, GB/T 17626.3, GB/T 17626.4, GB/T 17626.5。

### 10.3 保护装置

除了 IEC 60364 要求外,WTGS 电气系统还应有适当的防止 WTGS 和外部电气系统误动作的装置。因为它会导致不安全。

### 10.4 分离装置

当有维修和试验要求时,WTGS 的电气系统应能与电源分离。

半导体器件不能单独用分离装置。

维修工作中为安全起见使用的照明或其他电气设备的附属电路,应有自己的分离装置。这样,当其他电路断电时,不受影响。

### 10.5 接地系统

WTGS 的设计应包括局部接地电极系统,以满足 IEC 60363(电器设备正确操作)和 IEC 61024-1(防雷)的要求。设计文件中应指出适合接地电极的土壤条件。推荐土壤条件的同时,还需指出可能遇到的其他一些不适宜的土壤。

接地设备(接地电极、接地导线、主接地端点和接地棒)的选择和安装应按 IEC 60364-5-54 进行。任何工作在交流 1 000 V 或直流 1 500 V 以上的电气设备,都能为维护而接地。

### 10.6 防雷

按照 IEC 61024-1 进行 WTGS 的防雷设计。在安全不会受损的前提下,不需将保护范围扩大到所有 WTGS 的零件。

### 10.7 电缆

有啮齿运动或其他动物损害电缆可能性的地方,应使用有金属编织层的电缆或使用护管。地下埋线要埋到合适的深度,以免遭车辆或农机的损坏。如果没有护管,地下电缆用护套或胶带作出标记。

### 10.8 自励

能自励的 WTGS 的任何电气系统,以电网失电时都应能脱离电网,而且保持安全脱离状态。

如果一组电容器与并网 WTGS 并网(如功率因数补偿),应当设置一个适当的开关,以便电网功率亏损时,切除电容器组,以避免 WTGS 发电机自励。换句话说,如果电容器处于连接状态,必须充分证明它没有引起自励。

### 10.9 过压保护

过压保护的设计,按照 IEC 61312-1 的要求进行。

应规定过压保护极限,以使向电气设备输送的电压不会超过设备的绝缘水平。

### 10.10 谐波和功率调节装置

应设计功率调节装置,如逆变器、功率电子控制器、静态无功自耦变压器等,以使谐波线电流和电压波形失真不防碍电网安全转换。特别是并网 WTGS,它产生的电压谐波应该是在电网连接点超压波形失真不超过电网能承受的上限。

## 11 外部条件评估

### 11.1 概述

WTGS 受环境和电力条件支配,影响其他负载能力寿命和正常工作。除了环境状况外,对 WTGS 安装场地土壤性能还须考虑。

实际环境,电和土壤性质,应比设计时假定的情况要好。如果实际情况比假定的更糟,那么对工程的完善性应重新进行探讨。

沿海的场地,要求 WTGS 的等级为 S 级。

### 11.2 风况评估

作为最低要求,场地的风况根据下列能决定 WTGS 等级的基本参数进行评估。

——参考风速: $v_{ref}$

——年均风速: $v_{ave}$

—— $v_{hub}=15\text{ m/s}$  时湍流强度  $I_{15}$

此处, $I_{15}$ 为轮毂高度 10 min 平均 15 m/s 风速时湍流强度特性值。它是将测得的湍流强度标准偏差加到测得(或算出)的平均值上算出的。

风况以场地长期监测和记录的资料和当地气象标准为依据进行评估。场地风况应和当地气象站长期记录数据有一定关联。

监测周期应足够长,最少需得到六个月的可靠数据。在季节对风况有重大影响的地方,监测周期应将这种影响包含进去。

$I_{15}$ 是通过大于 10 m/s 的风速,应用适当的统计学方法确定的<sup>4)</sup>。在地形或其他局部因素可能干扰湍流强度的地区,在数据中应反映出它们的影响。

用于获得测量数据的风速仪特性,取样速率和平均时间,可能影响湍流强度的评估。复杂地貌条件下,对现场测量数据还要进一步评估。另外,地形对风速、风廓线、湍流强度的影响,以及每台风力机位置上气流倾斜的影响都必须考虑。

风电场内相邻机组尾流对 WTGS 工作的影响也要考虑。

### 11.3 其他环境条件的评估

为了与 WTGS 设计中假定的条件进行比较,对下列环境条件应进行评估:

——正常的和极限的温度范围;

——结冰;

4) 例如,风速数据出现低频倾向时,湍流强度和其他参数的评估就应该谨慎。从测量数据预测湍流强度时,这些影响因素应予以考虑。

- 湿度；
- 太阳辐射；
- 化学活性物质；
- 地震；
- 盐雾。

#### 11.4 电网条件评估

对 WTGS 和要与之并网之间的连接的电力条件进行评估,以保证与 WTGS 的兼容性以及 WTGS 与电网之间的设备的合理性。

这些条件包括下列内容,又不仅限于这些内容:

- 正常供电电压及变化范围；
- 正常的频率和变化范围；
- 电压不平衡；
- 对称性误差；
- 电网断电次数；
- 自动闭合周期；
- 风力机终端短路阻抗；
- 谐波电压畸变。

#### 11.5 土壤条件评估

计划实施场地的土壤性质,通过考察和参考当地建筑部门规范来进行评估。

### 12 组装、安装和竖立

#### 12.1 概述

WTGS 制造厂应提供安装 WTGS 要求的详细清楚的说明。WTGS 的安装工作应由经专门培训或经此业务指导过的人员进行。

WTGS 场地应便于准备、维护、操作和管理,以使工作安全有效地进行。入口位置要适当,不能任意设置。安装人员应能分辨出产生的和潜在的危险,并加以消除。

列出工作计划清单,准备好工作记录本,并将工作进行结果按时记录。

必要的时候,安装人员应使用眼、脚、耳和头部防护用具。攀塔人员,地面水面以上工作人员应进行一定程度的专业训练,并使用安全带,安全攀登辅助设施或其他装置。必要时,水域周围要设置救生装置。

所有设备都必须保持完好状态,并适合其工作性质。起重机,卷扬机和提升设备,包括所有钩索,吊环和其他器具,都必须适合安全提升的要求。

WTGS 在非正常情况下,如冰雹、闪电、大风、地震、结冰条件下的安装,应特别注意。

如果塔架站台上无舱,应采取适当措施,以避免由于横向振动产生的涡旋危险风速。这个危险风速及预防办法应在安装手册中说明。

#### 12.2 计划

WTGS 的组装、竖立和安装工作以及相关设备应根据地区的或国家的章程计划好,以使工作能安全地进行。

计划应包括下面相关内容:

- 挖掘施工安全规范；
- 施工详图和详细说明及检验计划；
- 预埋件,如基础、螺栓、地锚和加强钢筋等的处理规范；
- 混凝土成分,运输、取样、浇注、加工和管道敷设规范；

- 爆破安全规程；
- 塔架及地锚的安装规程；
- 质量保证规程。

### 12.3 安装条件

WTGS 安装过程中,安装场地不允许有危害安全的隐患。

### 12.4 场地通道

进出场地必须安全。为达此目的,应考虑下列事项:

- 行走通道和栅栏；
- 交通；
- 路面；
- 路宽；
- 清洁；
- 通道承重能力；
- 场内设施的移动。

### 12.5 环境条件

安装中,应遵守制造厂规定的环境限制。

下列事项应予考虑:

- 风速；
- 雪和冰；
- 环境温度；
- 扬沙；
- 闪电；
- 能见度；
- 降雨。

### 12.6 文件

WTGS 制造厂应提供 WTGS 组装、竖立、安装用图纸,详细说明和技术指导。制造厂还应提供载荷详情、重量、起吊点、专用工具和 WTGS 装卸及安装工作的必要的说明。

### 12.7 接收、装卸和存放

安装工作中,风力发电设备的装卸和运输应用适合完成此项任务的设备进行,并应与制造厂推荐的方法相一致。

WTGS 通常装在丘陵地带,因而重型设备卸下后,不再移动。选一块大小合适的平地,在其上做卸货和组装工作。如果找不到这样的地方,重型设备应固定在一个稳定的地点。

在设备有移动危险和易受风伤害的地方,叶片、机舱和其他气动零部件和较轻的箱子,应该用绳子、木条等固定。

### 12.8 基础/地锚系统

为安装或组装的安全,在制造厂规定的地方使用专用工具、夹子、固定器和其他器具。

### 12.9 风力发电机组的组装

WTGS 的组装工作按照制造厂的说明书进行。应进行检查,以确信润滑合适,零件完好。

### 12.10 风力发电机组的竖立

WTGS 的竖立应由经过培训和指导的人员用合适和安全的方法进行。

竖立过程中,WTGS 的电气系统,除非特殊需要,不要接通电源。电气设备的供电工作应遵守制造厂的说明。

零件的运动(转动或传动)潜在着危险。在整个竖立过程中,要将这些零件固定。

### 12.11 紧固件和联接件

螺栓和其他联接件应根据 WTGS 制造厂推荐的扭矩和其他文件提供的扭矩拧紧。应查看紧固件标记,以确定拧紧时的扭矩和其他要求。

特别是要进行检查,以便确定:

- 拉索、电缆、转动接头、起重把杆和其他器具的联接和组装是否合适;
- 提升装置的联接是否符合安全要求。

### 12.12 吊装安全

起重机、卷扬机和起吊设备以及所有吊钩、吊环和其他器具,应满足安全提升要求,能承受加于其上的全部载荷。制造厂的说明书和有关竖立或装卸的文件应提供零部件重要和安全起吊点。起吊前应进行试吊,以验证起吊设备、吊环、吊钩等能安全起吊。

## 13 试运行、运行和维护

### 13.1 概述

在考虑到人员安全的前提下,制定试运转、运行、检查和维护程序计划,并在 WTGS 手册中说明。

设计应体现零部件检查和维护用安全通道的防护措施。

第 10 章的要求也同样适用于为测量的目的而暂时安装于风力机上的电测量设备。

必要时,工作人员和维修人员应使用允许使用的眼、脚、耳和头部防护装置,攀塔人员和地面水面上工作人员应经一定的训练,并应使用安全带、安全攀升辅助装置或其他安全装置。必要时,水域周围准备救生器材。

### 13.2 试运行

试运行工作按照制造厂推荐的方法进行。

#### 13.2.1 接通电源

制造厂的说明书应包含有 WTGS 电气系统初次接通电源程序的内容。

13.2.2 WTGS 安装完成后,应根据制造厂推荐的程序进行试运行,以确信所有装置、控制系统和设备合适,安全和性能正常。

试运转应包括(且不局限)以下内容:

- 安全起动;
- 安全关机;
- 安全紧急关机;
- 超速状态下紧急关机或进行模拟;
- 保护系统性能试验。

#### 13.2.3 记录

对试验情况,试运行情况和控制参数及其结果应进行适当记录。

#### 13.2.4 试运行开始后的工作

安装工作完成之后,接下来进入制造厂建议的试运行期间,依照制造厂的要求,还要进行一些特殊工作。这些工作包括(不仅限于)螺栓预紧,更换润滑油,检查零件装配情况和工作情况,适当调节控制参数。

WTGS 场地应重新清理,铲除障碍物,防止发生危险。

### 13.3 运行

WTGS 的运行由经适当培训的人员或受过本专业指导的人员进行。

由操作人员完成的 WTGS 的正常操作,一般应能在地面上执行。自动/遥控系统中的适当部位应设置带标记的手动装置。

#### 13.3.1 操作手册

制造厂应提供操作者指导手册。手册的内容在 WTGS 试运行中根据地区特殊条件,应适当进行扩充。

手册内容应包括:

- 系统安全运行范围及说明;
- 起动和关机程序;
- 报警表;
- 应急程序计划。

操作人员和维护人员都应持有操作手册。操作手册应使用操作者能阅读理解的语言文字编写。

### 13.3.2 操作和维护记录

对运行和维护应及时记录,记录的主要内容:

- 风力机型号;
- 发电量;
- 工作时数;
- 关机时数;
- 发生故障日期和故障持续时间;
- 修理日期和所用时间;
- 故障和修理性质;
- 采取的措施;
- 更换的零件。

### 13.3.3 故障自动关机

对由故障引起的不定期自动关机,即操作者手册规定外的关机,在操作者重新起动 WTGS 以前,应检查引起关机的原因。对所有这类关机都应记录。

未造成临界安全损伤的外部故障,如电网无电后又恢复的情况,在完成关机程序后,允许其自动恢复到正常工作状态。

### 13.3.4 可靠性降低

应采取措施,消除降低可靠性的根源。

### 13.3.5 工作程序计划

WTGS 应根据编写的程序进行操作。计划应体现安全工作程序并包括下列内容:

- 制造厂的操作手册;
- 电气系统的操作;
- 运行与维护的协调;
- 有效的清洁方法;
- 攀塔规程;
- 设备管理规程;
- 恶劣天气应采取的措施;
- 通讯程序和应急计划。

### 13.3.6 应急计划

应意识到意外事故发生的可能性,且应由指定工作人员采取处理措施。

当发生火灾或出现风力机结构损坏危险时,对在危险未准确判定之前,任何人不得接近 WTGS。在制定应急措施计划中,应考虑到由于下列情况结构损坏的危险会增大:

- 超速;
- 覆冰状态;
- 雷电、暴雨、暴风;

- 地震；
- 拉索松弛或断裂；
- 制动失效；
- 风轮不平衡；
- 紧固件松脱；
- 润滑不畅；
- 沙暴；
- 火灾、水灾；
- 其他零部件失效。

#### 13.4 检查和维护

##### 13.4.1 概述

WTGS 的检查和维护应由经专门培训人员按 WTGS 维护手册中规定的时间间隔进行。

为防止工作人员意外触到运动件,除了频繁出入的通道外,其保护装置应固定。

防护装置应该:

- 结构坚固；
- 不能轻易穿越；
- 在尽可能不拆除装置的情况下,使主要维修工作能够进行。

设计中,应规定使用故障检测仪器。

##### 13.4.2 计划要求

为了保证检查人员和维修人员的安全,计划应由下列内容组成:

- 检查和日常维修用的安全通道和工作台；
- 防止工作人员意外碰触旋转件或运动件的合适方法；
- 当攀登或在地面以上工作时,提供牢固的安全绳、安全带或其他防护器材；
- 检查和维修中,对风轮和偏航机构和其他机械运动件进行锁紧,工作完成后应能重新安全

启动；

- 载电体的警示信号；
- 合适的放电设施；
- 合适的人身火灾保护；
- 机舱安全门。

维护程序要求进入封闭室如轮毂和叶片内部人员戴安全帽,使之随时意识到自身处境。当紧急情况发生时,也能起到保护作用。

##### 13.4.3 维护手册

每台 WTGS 均应配备维护手册,手册至少应包括 WTGS 制造厂规定的维护要求和应急程序。维护手册也应有不定期维护的内容。

维护手册应规定零件磨损更换标准。

手册还应包括下列内容:

- 对 WTGS 分系统的描述以及操作要求；
- 规定润滑周期的润滑表,润滑脂、润滑油种类；
- 返修程序；
- 维护检查周期和程序；
- 预定的维修时间间隔；
- 保护系统功能检查程序；
- 完整的布线图和内部接线图；

- 拉索检查预紧周期表,螺栓检查预紧周期表。预紧力包括张力和扭矩;
- 诊断程序和故障排除说明;
- 备件表;
- 现场组装图,安装图;
- 工具清单。

附录 A  
(标准的附录)  
S 级 WTGS 的设计参数

在 WTGS 的 S 级设计文件中,应给出下列数据:

机器参数:

额定功率 [kW]

轮毂高度运行风速范围  $v_{in} - v_{out}$  [m/s]

设计寿命 [a]

风况:

作为平均风速的函数的湍流强度特性

年平均风速 [m/s]

平均气流偏向 [°]

风速分布(威布尔分布、瑞利分布、实测分布、其他分布)

风廓线模型和参数

湍流模型和参数

轮毂高度极限风速  $v_{e1}$  和  $v_{e50}$  [m/s]

1 年一遇和 50 年一遇极限阵风模型和参数

1 年一遇和 50 年一遇极限风向变化模型和参数

极限相干阵风模型和参数

伴随方向变化的极限相干阵风模型和参数

极限风切变模型和参数

电网状况:

正常供电电压和波动范围 [V]

正常频率和波动范围 [Hz]

电平不平衡 [V]

电网中断最长持续时间 [天]

电网中断次数 [1/a]

自动闭合循环

平衡和不平衡外部故障期间状态特性

要考虑的其他环境条件:

海上 WTGS 的设计条件(水深、波浪等)

正常和极限温度范围 [°C]

空气相对湿度 [%]

空气密度 [kg/m<sup>3</sup>]

太阳辐射 [W/m<sup>2</sup>]

雨、冰雹、雪和结冰

化学作用物质

机械作用颗粒

防雷系统描述

地震形式和参数

盐分 [g/m<sup>3</sup>]

附录 B  
(标准的附录)  
随机湍流模型

下面的随机湍流模型可用于设计载荷的计算。它们满足 6.3.1 给出的要求。湍流速度波动假定为随机向量场,它的各分量具有零平面高斯统计量。描述各分量功率谱密度应按照凯默谱和指数相干模型或温·卡门各向同性模型确定。

凯默谱模型

分量功率谱密度由无量纲公式给出:

$$\frac{fS_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{4fL_k/v_{hub}}{(1 + 6fL_k/v_{hub})^{5/3}} \dots\dots\dots (B-1)$$

式中:  $f$ ——频率,Hz;

$k$ ——表示速度分量的方向下标(即 1=纵向,2=横向,3=垂直方向);

$S_k$ ——单边速度分量谱;

$\sigma_k$ ——速度分量标准偏差(见公式 B-2);

$L_k$ ——速度分量总体尺寸参数;

$$\sigma_k^2 = \int_0^{\infty} S_k(f)df \dots\dots\dots (B-2)$$

湍流谱参数由下表给出。

表 B1 凯默模型湍流谱参数

	速度分量下标(k)		
	1	2	3
标准偏差 $\sigma_k$	$\sigma_1$	$0.8 \sigma_1$	$0.5 \sigma_1$
总体尺寸 $L_k$	$8.1 A_1$	$2.7 A_1$	$0.66 A_1$

表中  $\sigma_1$  和  $A_1$  分别为本标准规定的湍流标准偏差和尺度参数。

下面的指数相干模型可同凯默自谱模型一起用于解释纵向风速空间立体构造:

$$C_{oh}(r, f) = \exp [- 8.8((f \times r/v_{hub})^2 + (0.12r/L_c)^2)^{0.5}] \dots\dots\dots (B-3)$$

式中:  $C_{oh}(r, f)$ ——相干函数,它是纵向风速分量由自谱函数分开的二维空间分离点正交谱密度合成值;

$r$ ——两点间分离的矢量在垂直于平均风速方向平面上的投影值;

$f$ ——频率,Hz;

$L_c = 3.5 A_1$  相干尺度参数;

温·卡门各向同性湍流模型

纵向风速分量谱由下面无量纲公式给出:

$$\frac{fS_1(f)}{\sigma_1^2} = \frac{4fL/v_{hub}}{(1 + 71(fL/v_{hub})^2)^{5/6}} \dots\dots\dots (B-4)$$

式中:  $f$ ——频率,Hz;

$L = 3.5 A_1$  各向同性湍流总体尺度参数;

$\sigma_1$ ——轮毂高纵向风速标准偏差。

横向和垂直方向谱同样由下面无量纲公式给出:

$$\frac{fS_2(f)}{\sigma_2^2} = \frac{fS_3(f)}{\sigma_3^2} = 2fL/v_{hub} \times \frac{1 + 189(fL/v_{hub})^2}{(1 + 71(fL/v_{hub})^2)^{11/6}} \dots\dots\dots (B-5)$$

式中：L——与(B-4)式一样，为各向同性尺度参数；

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  为风速标准偏差分量。

相干函数由下式给出：

$$C_{oh}(r, f) = \frac{2^{1/6}}{\Gamma(5/6)} (x^{5/6} K_{5/6}(x) - 0.5x^{11/6} K_{11/6}(x)) \dots\dots\dots (B-6)$$

式中：x——等于  $2\pi((f \times r/v_{hub})^2 + (0.12r/L)^2)^{0.5}$ ；

r——固定点之间距；

L——各向同性湍流总体尺度参数；

$\Gamma(\cdot)$ ——伽马函数；

$K_{(\cdot)}(\cdot)$ ——分数序号，修正贝塞尔函数。

公式(B-6)近似于以各向同性尺度参数 L 取代  $L_c$  后的公式(B-3)指数模型。

### 附录 C

(标准的附录)

#### 确定湍流的描述

如果风力机的振动波形，尤其是风轮振动波形被充分衰减，则下面确定的模型可用于正常风况下的湍流。衰减程度可用旋转取样风速的简单随机模型来验证。在这个简单验证模型中，一个单独的、连续、非束缚的、具有 5% 标准偏差的随机增量被加到气动模拟风力机每个叶片时间步长的平均风速上。假定每个叶片都处于各自的瞬态速度场控制下，模拟叶片叶尖挠曲和叶根弯矩(襟翼与筋条的合理性)随时间变化特性应进行分析。这个分析包括确定旋转频率下，较高波幅与基本波幅的比率。如果这一比率皆小于 1.5，下面确定模型就可使用：

纵向风速分量：

$$v_1(y, z, t) = v(Z) + A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 y \sin(2\pi[f_2 t + 1/4 \sin(2\pi f_3 t)]) + A_2 z \sin(2\pi[f_2 t + 1/4 \cos(2\pi f_3 t)]) \dots\dots\dots (C-1)$$

式中(y, z)为以风轮中心为原点的风力机风轮扫掠面上点的横向坐标和垂直坐标。

横向速度分量：

$$v_2(t) = A_3 \sin(2\pi(f_4 t + 1/4 \sin(2\pi f_5 t))) \dots\dots\dots (C-2)$$

假定横向风速分量在整个风轮扫掠面上是均匀的。

上面的风速模型，幅度和频率参数由下列关系式给出：

幅度参数：

$$A_1 = 2.0 \sigma_1$$

$$A_2 = A_1 / D$$

$$A_3 = 0.8 A_1$$

频率参数：

$$f_1 = 0.0194 v_{hub} / A_1$$

$$f_2 = 4.0 f_1$$

$$f_3 = f_1 / 10.0$$

$$f_4 = 0.6 f_1$$

$$f_5 = f_4 / 10.0$$

式中： $\sigma_1$ ——轮毂高度风速标准偏差；

$A_1$ ——湍流尺度参数；

$v_{hub}$ ——10 min 平均轮毂高风速；

$D$ ——风轮直径。

注：横向风速分量和纵向风速分量二者一起决定轮毂高瞬时风速，采用下列关系式计算：

$$v_{hub}(t) = ((v_1(0,0,t))^2 + (v_2(t))^2)^{0.5}$$

$$\theta_{hub}(t) = \arctan \frac{v_2(t)}{v_1(0,0,t)} \dots\dots\dots (C-3)$$

---