

基于风况的风力发电机组选型设计

周民强¹, 陈世堂^{1*}, 周 季²

(1. 浙江运达风电股份有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 杭州杭重威施诺机械科技有限公司, 浙江 杭州 311305)

摘要:为解决目前风力发电行业机组设计和选型存在的较多问题,本研究以风况各参数作为关键依据,结合风资源测量技术,将风况分析应用到机组选型设计中。通过对风况各参数的分析,确定风况与风力发电机组性能和载荷的关系,提出了基于风场实际风况的风力发电机组选型设计方法。利用先进的风力发电机组专用设计软件进行了机组在各工况下的载荷分析,结合实际风电场数据进行了选型设计评估,研究表明:通过该方法可有效地保证各风场机型选择的合理性和在各风况参数下风力发电机组设计载荷的正确性。

关键词:风力发电;可靠性设计;选型;校核

中图分类号:TH122;TK83

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0610-06

Wind turbine design and type selection on the basis of wind condition

ZHOU Min-qiang¹, CHEN Shi-tang¹, ZHOU Ji²

(1. Zhejiang Windey Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;

2. Hangzhou HZ-vislord Machinery Technology Co., Ltd., Hangzhou 311305, China)

Abstract: In order to solve the problems on wind turbine design and type selection, the wind conditions which were the important parameters of wind turbines were investigated. After the analysis of wind conditions, the relation between wind conditions and loads was established. A method was presented to design and select wind turbines based on out the actual wind conditions in the specific wind farm. The loads on wind turbine were evaluated on simulation by professional software with the actual data which were tested in wind farm. The experimental results show that the type selection and the design load on wind turbine are more reasonable by using this method.

Key words: wind power; reliability design; selection; check

0 引 言

风力发电作为一种绿色的能源受到了我国政府的高度重视,据统计,截至 2009 年,我国累计风电机组装机数量已达 21 581 台^[1]。目前经典的风力发电机组仍是三桨叶、上风向、水平轴机型,大容量的风力发电机组往往要求更大的风轮直径和更高的塔架高度,从而获得更大的发电量收益。然而很多风力发电机组设计单位为增加机组的发电性能,盲目地加大风轮直径、增加塔架高度,而忽略对风电场风资源的评估,因而也导致风力发电机组的可靠性降低。国内不乏由于选型

不当等因素而带来风力发电机组故障的例子。

目前国内风电机组设计大多依靠国外许可权技术,直接照搬国外图纸。而风力发电机组设计时需考虑大量的工况,包含机组自身状态及机组外部因素^[2-3],并且我国幅员辽阔,各地风况也不尽相同,应根据有关标准在场址中立塔测风,搜集完整、可靠的风电场现场实测资料,在搜集现场实测风资料后,应进行数据验证、数据订正和数据处理,对风能资源作出评估^[4-5]。

为更好地与设计匹配,应根据我国的实际情况进行风力发电机组选型设计。本研究提出了基于风况的

风力发电机组相应的选型设计方法和检测技术。

1 主要风况参数的确定及机型选择

1.1 年平均风速

由于地表粗糙度、障碍物、地球自转及公转周期的影响,平均风速将随高度和时间而变化:

(1) 平均风速随高度变化—风切变。通常,年风速随高度的变化可用指数分布来表示:

$$\bar{V}(z) = \bar{V}(z_s) \cdot \left(\frac{z}{z_s}\right)^\alpha \quad (1)$$

式中: $\bar{V}(z)$ —离地高度 z 处的年平均风速, $\bar{V}(z_s)$ —离地参考高度 z_s 处的年平均风速, α —风速廓线指数(或称风切变指数)。

风速廓线指数与地表粗糙度有关,不同地区 α 的取值也不同,以 α 取 0.16 为例,风速随高度变化如图 1 所示。

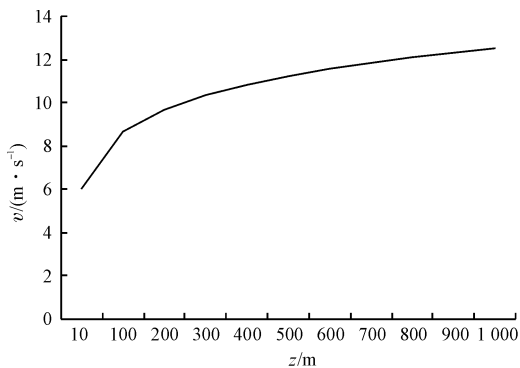


图 1 风速随高度分布

图 1 表明,离地高度越大,年平均风速越大。

(2) 平均风速随时间变化。由于地球自转和公转、热带气旋等因素的影响,平均风速在一定时间段上都会发生变化,日、月、季、年平均风速变化都有一定的规律。

(3) 平均风速的分布—风频。在一个整年时间段中,可用威布尔分布概率密度函数来描述各风速出现的频率^[6]:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

式中: $p(v)$ —风速的威布尔分布概率密度, k —威布尔形状参数, c —威布尔尺度参数。

取威布尔形状参数 $k = 2$, 此时称为瑞利分布,威布尔分布概率密度等价于:

$$p(v) = \frac{v\pi}{2\bar{v}} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \frac{v^2}{\bar{v}^2}\right] \quad (3)$$

式中: \bar{v} —风电场年平均风速。

取风电场轮毂高度年平均风速为 6 m/s, 则瑞利分布概率密度曲线如图 2 所示。

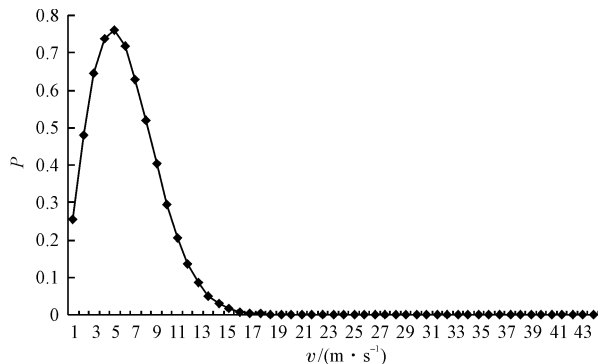


图 2 平均风速瑞利分布概率密度

从图 2 中可以看出:不同风速在一年内出现的频度也不相同。

《Guideline for the Certification of Wind Turbines Edition 2003 with Supplement 2004》规范中(以下简称 GL 规范)将风力发电机组等级进行了分类,如表 1 所示。

表 1 风力发电机组分级表

机组等级	I	II	III	IV	S
$-V_{ref}$	50	42.5	37.5	30	由设计者定义
$-V_{ave}$	10	8.5	7.5	6	由设计者定义
$-AI_{15}(-)$	0.18	0.18	0.18	0.18	由设计者定义
$-a(-)$	2	2	2	2	由设计者定义
$-BI_{15}(-)$	0.16	0.16	0.16	0.16	由设计者定义
$-a(-)$	3	3	3	3	由设计者定义

注: V_{ave} —年平均风速; V_{ref} —参考风速; A 、 B —湍流强度等级。

年平均风速的大小将主要影响风力机组的疲劳载荷,机组选型时,应确保:

(1) 风电场实测年平均风速应小于各级别机型相应的设计年平均风速;

(2) 风电场各风向上的风廓线指数和极限廓线指数应小于 GL 规范中定义的值;

(3) 风电场平均风速在 $0.2V_{ref} \sim 0.4V_{ref}$ 之间的所有概率分布密度应小于对应风力发电机组等级的概率分布密度值。

1.2 50 年一遇 10 min 平均最大风速及 3 s 极端阵风

GL 规范中风力发电机组分级的另一个重要参数是 50 年一遇 10 min 平均最大风速,如表 1 中的 V_{ref} 所示。

受极端气候因素影响,有些年份会出现极端风况,其风速远远大于正常的风速,将可能带来破坏性影响。在风力发电机组选型过程中,最大风速是必须考虑的因素。

一般采用当地气象站采集的多年历史数据为依据

进行相关性分析,并得出最大风速预测与评估。标准机型最大风速与极端风速采用以下风速模型:

$$V_{e50}(z) = 1.4V_{\text{ref}} \left(\frac{z}{z_{\text{hub}}} \right)^{0.11} \quad (4)$$

$$V_{e1}(z) = 0.8V_{e50}(z) \quad (5)$$

式中: V_{ref} —参考风速, $V_{e50}(z)$ —50 年一遇 3 s 平均极端阵风, $V_{e1}(z)$ —1 年一遇 3 s 平均极端阵风。

对于特定的风电场,若 50 年一遇最大风速符合 GL 规范中分级,可按特定等级选择机组,若最大风速超过最高等级,需进行机组校核或 S 级特殊设计,如抗台风机型。

1.3 湍流强度

湍流又称紊流,自然界的风速并不是恒定的,而是随时间实时变化。瞬时风速由平均风速和脉动风速组成:

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) \quad (6)$$

式中: \bar{V} —某个时长的平均风速, $V'(t)$ —脉动风速。

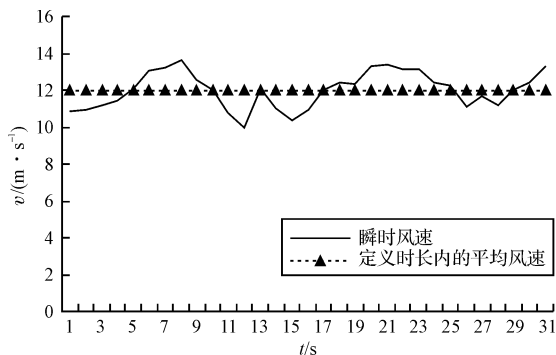


图 3 瞬时风速随时间变化

湍流强度受地表粗糙程度的影响较大,反映了脉动风速的相对强度。由于脉动风速存在不确定性,它将使风力发电机组产生随机载荷,影响零部件的强度。

1.3.1 GL 规范中对湍流强度的分级

机组设计时应考虑风电场湍流强度,GL 规范中(如表 1 所示)按平均风速为 15 m/s 时的湍流强度对机组进行分级:

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

$$T_{\text{hub}} = \frac{\sigma_1}{V_{\text{hub}}} = I_{15} \left(\frac{15}{V_{\text{hub}}} + a \right) / (a+1) \quad (8)$$

式中: V_{hub} —轮毂高度处的平均风速, σ_1 —轮毂高度处的湍流强度, I_{15} —湍流特征值,即平均风速为 15 m/s 时的湍流强度, T_{hub} —轮毂高度处湍流强度值, a —斜度参数。

风速标准差、湍流强度与风速的关系如图 4、图 5 所示。

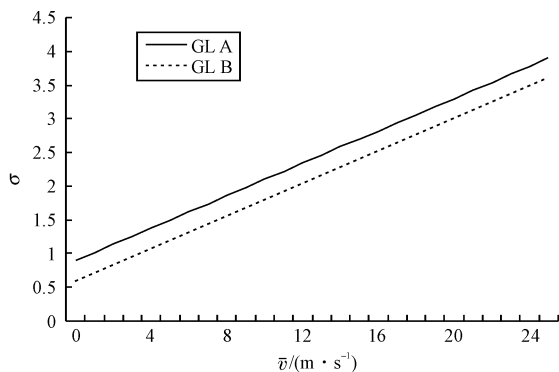


图 4 风速标准差与平均风速的关系

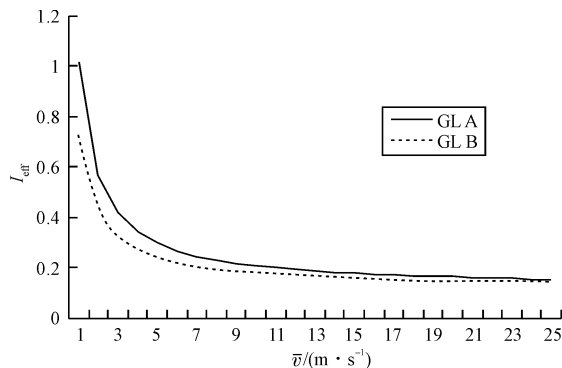


图 5 湍流强度与平均风速的关系

1.3.2 风电场环境标准差

风电场标准差可通过以下方法计算得到:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{599} \sum_{t=1}^{600} (V(t) - \bar{V})^2} \quad (9)$$

式中: σ_i —第 i 次测量样本的标准差; $V(t)$ —实测瞬时风速; \bar{V} —规定时长(10 min)平均风速; t —时间,s,采集周期取 1 s; i —测量样本序号。

相同平均风速下,风电场实测的标准差并不是一个固定值,对 N 次实测标准差取算术平均,得到风电场环境标准差为:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (10)$$

式中: N —测量样本数, $\bar{\sigma}$ —风电场环境标准差。

风电场机组选型时,不能简单地将平均风速为 15 m/s 时的湍流强度与 GL 规范中相应的湍流特征参数作对比,而应该将平均风速为 $0.2V_{\text{ref}} \sim 0.4V_{\text{ref}}$ 之间的所有环境标准差与 GL 规范中定义的相应值作对比。又考虑到 $\bar{\sigma}$ 是一个平均值,本身也存在一定的不确定度,而 $\bar{\sigma}$ 基本服从正态分布,为保证 90% 置信度,《IEC 61400-1 Wind turbines—part1: design requirements (2005)》(以下简称 IEC 61400-1)给出了以下对比方法:

$$\sigma_1 \geq \bar{\sigma} + 1.28\sigma_{\bar{\sigma}} \quad (11)$$

式中: $\sigma_{\bar{\sigma}}$ —环境标准差的标准差。

1.3.3 风电场有效湍流强度

事实上,风力发电机组安装完成后,由于机组存在尾流效应,它将导致风电场计算湍流强度时发生畸变,产生附加湍流,机组选型时,应考虑有效湍流强度(综合考虑环境标准差和尾流因素)。

GL规范中规定:为了评估尾流带来的影响,还应将平均风速为 $0.8V_r \sim V_{out}$ 之间的所有湍流强度或标准差与规范中定义的相应值做对比。

丹麦国家风能实验室 S. Frandsen(参考 IEC 61400-1 附录 D)提出了风电场湍流模型,当存在尾流影响时,式(11)改写成:

$$\sigma_1 \geq I_{eff} V_{hub} + 1.28 \sigma_{\bar{\sigma}} \quad (12)$$

式中: I_{eff} —风电场有效湍流强度。

I_{eff} 可以通过以下方法计算得到:

(1) 当最近的相邻风机间距大于等于 10 倍风轮直径时:

$$I_{eff} = \frac{\bar{\sigma}}{V_{hub}} \quad (13)$$

代入式(12)得 $\sigma_1 \geq \bar{\sigma} + 1.28 \sigma_{\bar{\sigma}}$,显然这种情况等价于式(11)。

(2) 当相邻风机间距小于 10 倍风轮直径时^[7]:

$$I_{eff} = \frac{\sigma_{eff}}{V_{hub}} = \frac{1}{V_{hub}} \left[(1 - Np_w) \bar{\sigma}^m + p_w \sum_{i=1}^N \bar{\sigma}_T^m(d_i) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (14)$$

式中: p_w —等于 0.06 的常数; σ_{eff} —有效标准偏差; d_i —机组间距; $\bar{\sigma}_T$ —轮毂高度最大中心尾流标准偏差, $\bar{\sigma}_T = \sqrt{0.9V_{hub}^2 / (1.5 + 0.3d_i \sqrt{V_{hub}/c})^2 + \bar{\sigma}^2}$; c —等于 1 的常数; m —关联结构的材料 Wöhler 曲线指数; N —邻近风机数,取值如表 2 所示。

表 2 风机排布与邻近风机数的关系

风机排布	N
2 台机组	1
1 列机组	2
2 列机组	5
超过 2 列机组的风电场	8

(3) 风电场对环境湍流强度的影响:

在一个大的风电场中,若:被考虑的风力发电机组到风电场边界机组数超过 5 台;与主风向正交的机组行列之间的距离小于 3 倍风轮直径,机组将影响环境湍流,此时环境标准偏差需作以下修正:

$$\bar{\sigma}' = \frac{1}{2} (\sqrt{\sigma_w^2 + \bar{\sigma}} + \bar{\sigma}) \quad (15)$$

其中:

$$\sigma_w = \frac{0.36V_{hub}}{1 + 0.2 \sqrt{\frac{d_r d_f}{C_T}}}$$

式中: C_T —推力系数; d_r, d_f —行间距和列间距分别与风轮直径的比值。

此时式(14)可写成:

$$I_{eff} = \frac{\sigma_{eff}}{V_{hub}} = \frac{1}{V_{hub}} \left[(1 - Np_w) \bar{\sigma}'^m + p_w \sum_{i=1}^N \bar{\sigma}_T^m(d_i) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (16)$$

以一个 10 台 1 500 kW 风力发电机组矩形分布(间距小于 3 倍风轮直径)的风电场为例,环境湍流强度、有效湍流强度(最大)及 GL A/B 级湍流强度如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,虽然环境湍流强度小于 GL B 级湍流强度值,但有效湍流强度大于环境湍流强度,且部分风速下,有效湍流强度值超过了 GL B 级要求。

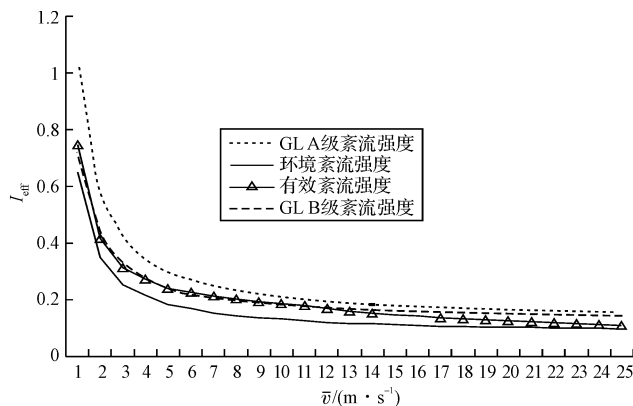


图 6 环境湍流强度、有效湍流强度与 GL A/B 级湍流强度的关系

(4) 复杂地形对湍流强度的影响:

当实际风电场特殊机位属于复杂地形时,湍流强度将受到影响,GL 规范中对复杂地形进行了定义,如表 3 所示。

表 3 复杂地形定义

距风机距离 x	倾角 ϕ	偏差 Δh
$< 5h$		$< 0.3h$
$< 10h$	$< 10^\circ$	$< 0.6h$
$< 20h$		$< 1.2h$

注: h —轮毂中心高度。

当风电场实际机位所处地形条件不符合表 2 中的要求时,称为复杂地形。如果此时没有精确的湍流强度测量和计算数据,应对湍流强度进行一定的增加(一般不超过 25%)。

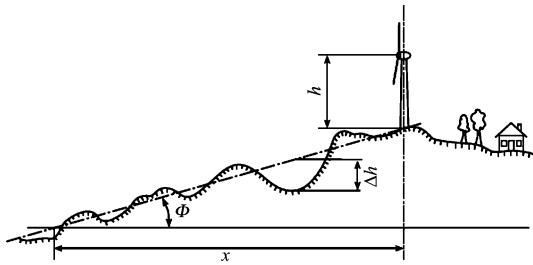


图 7 复杂地形定义

湍流强度影响机组出力及载荷,过大的湍流强度将缩短机组使用寿命,而目前大多数可研报告中仅有风电场环境湍流强度数据,有些可研报告中甚至只有一个地区的环境湍流强度数据;另外,即使有充分的湍流强度数据,部分风力发电机组厂家只是简单地将平均风速为 15 m/s 时的湍流强度与标准中的湍流特征值作对比,这显然是不合理的。因而,在机组选型时,应综合考虑环境、风电场地形及机位布置等因素来确定机组实际湍流强度值。

2 基于风况的机组校核在机组选型中的应用

通过上述方法可以进行风况分析和机组选型,若风场实际风况参数无法满足标准中的规定,应根据风况进行载荷计算和校核评估。

目前风力发电机组设计大多采用 Garrad Hassan and Partners Limited(GH)公司开发的 BLADED 软件。

以下采用 BLADED 3.82 版本对内蒙古某风场风力发电机组选型设计进行分析。

2.1 年平均风速

在 BLADED 中,年平均风速主要用于计算平均风速分布和雨流计数。该风场平均风速为 6 m/s,威布尔分布形状参数为 2,通过计算可知各风速的概率和一年内的总时长,如表 4 所示。

表 4 各风速概率及其一年内的总时长

平均风速/(m · s ⁻¹)	概率/(%)	一年内的总时长/h
4	0.116 378 277	2582.928 198
6	0.249 408 554	2186.315 381
8	0.208 418 006	1826.992 244
10	0.134 666 261	1180.484 441
12	0.069 639 942	610.463 735 8
14	0.029 316 562	256.988 984 1
16	0.010 143 808	88.920 616 76
18	0.002 902 11	25.439 898 08
20	0.000 689 233	6.041 814 747
22	0.000 136 253	1.194 394 005
24	2.246 52E - 05	0.196 929 717

各风速的总时长用于进行机组疲劳强度计算。

2.2 极限风速

极限风速的工况设置参考 GL 规范中的规定,设定完整的风况后,通过 BLADED 软件可进行极限风速下的机组载荷计算。

2.3 湍流强度

GL 规范中规定的需要考虑湍流的工况应采用湍流风进行仿真。

仿真过程中可采用“Von Karman”、“Kaimal”或“Mann”湍流模型,通过这些模型,可以生成不同风速、不同湍流强度的随机风文件。

该风场某时刻,平均风速为 12 m/s 时,机组包络面内各位置处的瞬时风速 Von Karman 模型如图 8 所示,从图中可以看出,瞬时风速是一个随机量,它将随时间的变化而变化。

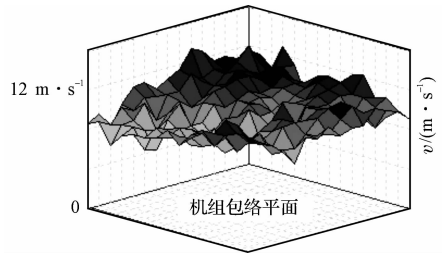


图 8 某个时刻机组迎风包络面内各点的瞬时风速

通过软件模拟得到的各种风况下的风文件进行机组载荷仿真。

2.4 结构强度分析

根据 GL 规范的要求,风力发电机组定义了多达上千个工况,通过 BLADED 软件可计算这些工况下机组的随机载荷谱和极限载荷表。

以风力发电机组塔架载荷计算和强度分析为例:

(1) 静强度分析。机组极限载荷并不一定出现在某个特定的工况,因而需对所有工况下的载荷进行统计,得到极限载荷表,通过极限载荷来进行塔架的静强度校核,应当注意的是,载荷存在一定的不确定度,应按 GL 规范中的要求乘以相应的载荷安全系数。

(2) 疲劳寿命分析:①先进行风力发电机组结构建模,然后通过有限元方法分析塔架危险部位在施加的载荷作用下的应力响应;②通过 BLADED 进行结构载荷计算,得到各工况随机载荷谱;③将结构随机载荷谱和结构应力响应进行合并,得到各工况下的应力谱;④采用雨流计数的方法,从设计寿命内的随机载荷中提取不同幅值、不同均值的应力循环,通过适当的修正方法和估算方法,结合疲劳理论和 SN 曲线进行疲劳寿命计算。

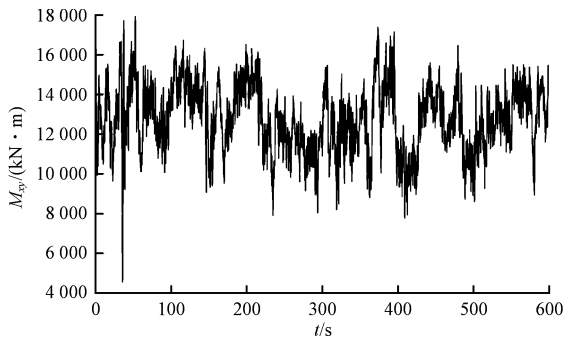


图9 某个工况下的随机载荷谱

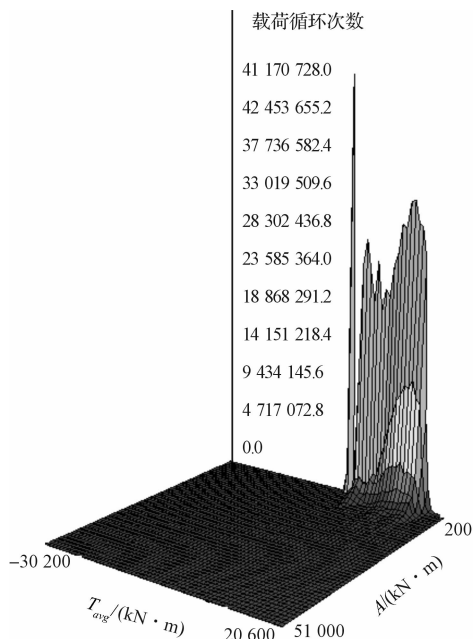


图10 雨流统计结果

T_{avg} —循环载荷均值;A—循环载荷幅值

将雨流统计结果通过累积损伤的方法进行疲劳寿命评估,若实际校核结果不符合设计要求,需进行设计改进。

3 基于检测的风力发电机组改进设计

为验证设计工况与实际运行工况的一致性,任何一款机型需在特定风况场地安装样机,并保证样机至少运行一年以上,样机需配备专用的监测系统进行载荷评估,如在重要结构如桨叶、塔架、主轴等部位安装应变片或测力传感器、扭矩传感器,在合理位置安装风速、风向、温度、湿度及气压等传感器,通过专用的数据采集系统,实时采集风况与机组载荷数据,利用大量的

统计数据来分析设计与实际运行情况下的载荷是否存在差异。

测试设备的精度应满足 IEC61400-12 及 IEC61400-13 的要求,若相同工况下,载荷设计值与实际运行情况存在明显差异,应对载荷设计的正确性进行评估。

4 结束语

本研究以风电场的风况参数为依据,根据理论分析和软件仿真,得出了风况对机组实际载荷的影响和基于风况的风力发电机组选型设计方法。

研究表明:经过该方法得到的风况更符合风电场的实际风资源情况,通过基于该风况的分析方法进行风力发电机组的选型设计,可以避免风力发电机组设计和选型进入误区,保证了设计有据可依,选型科学合理,从源头上防止风力发电项目运营过程中出现重大损失,对风电场的机组设计和选型有实际应用价值。

另外,由于国内对于风力发电机组的测试技术还很不完善,建议风力发电行业相关技术人员及科研院所对该领域进行深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2009 中国风电装机容量统计[R]. 中国可再生能源学会风能专业委员会, 2010.
- [2] Germanischer Lloyd Wind Energie GmbH. General Certification of Wind Turbine [S]. Germany, Steinhoeft 9, 20459 Hamburg, 2003.
- [3] IEC 61400-1: 2005. Wind Turbine—Part 1: Design Requirement [S]. International Electrotechnical Commission, 2005.
- [4] 叶杭冶. 风力发电机系统的设计、运行与维护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [5] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [6] TONY B, SHARPE D, NICK J, et al. Wind Energy Handbook [M]. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- [7] FRANDSEN S. Turbulence and Turbulence Generated Fatigue Loading in Wind Turbine Clusters [R]. Danmark: Risso National Laboratory, 2003.

[编辑:柴福莉]