

# 抗震设计条件下的风电机组载荷计算

李声茂, 赵伟

(东方电气新能源设备(杭州)有限公司, 德阳 618000)

**摘要:**按照 GB50011-2010 建筑抗震设计规范的要求, 对有抗震设计要求的风场所用的风电机组进行地震载荷计算。根据中国风场的地质条件, 用 GB2010 规范生成设计目标反应谱, 再利用三角级数法将之合成为地震动加速度时程, 考虑双向水平地震作用并进行时域分析。结合工程实例, 借助 Bladed 软件对项目所用风电机组进行地震载荷计算, 对比设计载荷和地震载荷, 结果表明, 地震时风电机组载荷大幅增大, 但没有超过风电机组设计极限载荷, 项目所用风电机组安全可靠。

**关键词:** 风电机组载荷 ; 抗震 ; 三角级数法 ; 双向水平地震作用

中图分类号 : TM614    文献标识码 : A    文章编号 : 1674-9219(2013)02-0072-06

## Load Calculation for Wind Turbines Under the Condition of Anti-seismic Design

Li Shengmao, Zhao Wei

(DongFang Electrical New Energy Equipment(Hang Zhou) Co.,Ltd.,Deyang 618000, China)

**Abstract:** According to the requirement of GB50011-2010, the seismic load calculation was carried out for the wind turbines which request for anti-seismic design. Based on the special geological conditions of wind farms in China and the requirements of GB50011-2010, the aim design acceleration response spectrum was generated, and then transformed to seismic acceleration time history using trigonometric series method. The domain analysis was carried on considering the bi-directional seismic action. A project, and the software Bladed was used to simulate the seismic of wind turbines, the design and seismic load of wind turbines were compared finally. The results showed that the seismic load of wind turbines was increased, but didn't exceed the limit of design load of wind turbines. therefore, the wind turbine in this project was safe and reliable.

**Keywords:** wind turbine load; anti-seismic; trigonometric series method; bi-directional seismic action

## 0 引言

近年来, 中国的风电事业发展迅速, 装机容量迅猛增加, 但资源优质的风电场也愈发减少, 如三北地区。人们的目光开始转移到了我国的内陆地区, 内陆地区风能资源分布较分散, 但也不缺乏一些风能资源可利用区域, 比如四川、云贵高原。但四川、云贵地区处于喜马拉雅 - 地中海地震带, 地震灾害多发, 如果风电机组这种大型设备处于地震多发区域, 则有可能受到风力、地震的双重影响, 风电机组的安全将受到考验。

目前, 国内针对地震作用下的风电机组安全研究大多存在于理论阶段, 没有实际工程经验, 对风电工作者来说, 一套经过实际检验的地震计算方法尤为重要。GH bladed 是通过 GL 认证的国际专用的风电计算软件, 是研究风电机组结构动力的重要工具, 国内风电研究人员也往往基于 GH bladed 的计算结果验证自己的研究方法的正确性<sup>[1]</sup>。但是 GH bladed 的地震模块是以欧版规范 Eurocode8 为基础的, 而中国抗震设计应用的是最新颁布的 GB50011 - 2010 建筑抗震设计规范 (以下简称 GB2010 规范)<sup>[2]</sup>, 两者在抗震设防目标、场地类别以及地震作用的计算上有很

多不同,考虑到欧洲和中国的断裂构造、地震背景、土质等区别,中国的风场抗震设计应该按照 GB2010 规范要求执行<sup>[3-4]</sup>。

本文按照 GB2010 规范、GL 规范要求<sup>[5]</sup>,借助 GH bladed 软件进行风电机组地震载荷计算,介绍了风电机组地震载荷计算的方法原理,对比风电机组设计载荷,分析地震后风电机组载荷的变化,应用于工程实例并实现抗震设计要求,对以后有抗震设计要求的风电机组安全优化工作有指导意义。

## 1 计算方法

在 GH bladed 软件计算中,地震载荷以加速度时程的方式作用于风电机组,因为条件限制,在本文中不考虑竖向地震载荷影响,只考虑水平双方向上地震载荷影响,x 和 y 方向成 90°,两正交方向反应谱为 0.85 倍关系<sup>[6]</sup>。根据 GB2010 规范,先按照风场条件生成设计目标加速度反应谱,再利用三角级数法将设计目标加速度反应谱拟合合成地震动

加速度时程。

### 1.1 地震水平加速度反应谱

在 GB2010 规范中只规定了地震水平影响系数曲线,根据反应谱理论,地震水平加速度反应谱可以表示为:

$$S_A = [0.45(1-10T) + 10T\eta_2] \alpha_{\max} g, 0 \leq T \leq 0.1 \quad (1)$$

$$S_A = \eta_2 \alpha_{\max} g, 0.1 \leq T \leq T_g \quad (2)$$

$$S_A = \left(\frac{T_g}{T}\right)^\gamma \eta_2 \alpha_{\max} g, T_g \leq S_A \leq 5T_g \quad (3)$$

$$S_A = [\eta_2 0.2^\gamma - \eta_1(T - 5T_g)] \alpha_{\max} g, 5T_g \leq T \leq 6 \quad (4)$$

$S_A$ ——地震水平加速度反应谱;

$\alpha_{\max}$ ——地震影响系数最大值;

$\eta_1$ ——直线下降段下降斜率调整系数;

$\eta_2$ ——阻尼调整系数;

$\gamma$ ——衰减指数;

$T_g$ ——特征周期;

$T$ ——结构自振周期。

在这其中,当建筑结构的阻尼比不等于 0.05 时,阻尼调整系数和形状参数应按以下公式确定:





$$\gamma = 0.9 + \frac{0.05 - \xi}{0.3 + 6\xi} \quad (5)$$

$$\eta_1 = 0.02 + \frac{0.05 - \xi}{4 + 32\xi} \quad (6)$$

$$\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \xi}{0.08 + 1.6\xi} \quad (7)$$

其中， $\xi$  是阻尼比。

### 1.2 三角级数法

三角级数法提出时间较早，经过多年的发展和改善，在计算精度、算法收敛性等方面均有长足的进步。其基本思想是用三角级数之和构造一个近似的平稳高斯过程，然后乘以强度包线，以得到非平稳的地面运动加速度时程<sup>[7]</sup>。它的基本步骤是：

(1) 生成一组在  $(0, 2\pi)$  区间内均匀分布的随机数作为相位角  $\varphi_k$  的初始值；

(2) 以加速度反应谱作为模拟的目标谱，用反应谱与功率谱的近似转换关系，将目标反应谱转换为功率谱：

$$S_x(\omega) = \frac{\xi}{\pi\omega} S_A^2(\omega) \left/ \left\{ -\ln \left[ \frac{-\pi}{\omega T_l} (1-r) \right] \right\} \right. \quad (8)$$

$S_x(\omega)$ ——功率谱；

$T_l$ ——持续时间；

$r$ ——反应谱概率水平。

(3) 做傅里叶变换，生成零均值的平稳高斯过程：

$$X(t) = \sum_{k=0}^n A_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (9)$$

其中：

$$\begin{cases} A_k = [4S_x(\omega_k)\Delta\omega]^{1/2} \\ \Delta\omega = 2\pi/T_l \\ \omega_k = 2k\pi/T_l \end{cases}$$

上式中， $A_k$ 、 $\omega_k$ 、 $\varphi_k$  分别是第  $k$  个傅里叶分量的振幅、频率和相位角； $n$  为计算的反应谱与功率谱所在频域中的频率的分隔点数。

(4) 将平稳时程乘以非平稳强度包线，得到非平稳的加速度过程：

$$a(t) = X(t) \cdot f(t) \quad (10)$$

强度包线函数  $f(t)$  可以取为以下形式：

$$f(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & t < t_1 \\ 1 & t_1 < t \leq t_2 \\ \exp[-c(t-t_2)] & t \geq t_2 \end{cases}$$

其中， $t_1$  为地震动时程上升段时间， $t_2$  为下降段起始时

间,  $c$  为衰减系数。

(5) 计算  $a(t)$  的反应谱并与目标反应谱比较, 对于不满足要求的反应谱控制点, 修正其响应的傅里叶分量, 合成地震波的反应谱接近目标反应谱, 再回到步骤 (3), 重新迭代, 直到所有控制点的反应谱都满足允许误差为止。

迭代计算结束后, 如果依然有个别顽固点反应谱不收敛于目标谱, 则在 GH bladed 中用下式对其在时域上做傅里叶变换<sup>[8]</sup>:

$$V_{g(new)} = V_{g(old)} \left( \frac{S_A}{S_a} \right) \quad (11)$$

其中  $V_g$  是时域加速度傅里叶变换,  $S_A$  是目标加速度反应谱,  $S_a$  是实际计算的加速度反应谱。

最后一步是修正加速度峰值, 它最后应等于目标反应谱的 0 周期值; 均值也需要修正, 使得地震动结束时, 地面速度为 0。

## 2 工程实例

### 2.1 工程背景

工程所在风场位于四川南部, 属高原河谷地带, 地形北高南低, 海拔高度在 1440m~1470m 之间, 地势较开阔平坦; 轮毂高度年平均风速为 6.5m/s, 风向稳定, 风能资源较丰富, 具备较高的开发价值。为满足对该工程的抗震设计要求, 本文生成了 475 年回归周期, 50 年内超越概率为 10% 的地震水平加速度时程, 借助 GH bladed 软件进行地震载荷计算。

### 2.2 风电机组参数

某 1.5MW 风电机组选为该工程所用机型, A 设计, 但设计初始未考虑抗震设计要求。该机型为三叶片上风向结构, 变桨变速。风电机组主要参数如表 1 所示。

### 2.3 地震动波谱

经过权威机构对风场进行场地地震安全性评估, 根据 GB 50223 - 2008 建筑工程抗震设防分类标准规定, 该工程为标准设防类, 按照本地区抗震设防烈度确定其抗震措施和地震作用, 确定工程场地地震基本烈度为 度, 50 年超越概率 10% 的设计基本地震加速度值为 0.20g, 设计基本地震水平影响系数  $\alpha_{max}$  为 0.45, 场地特征周期为第三组, 场地类型为软弱土质, 所以反应谱特征周期为 0.9s, 阻尼比定为 0.05, 衰减系数为 0.9, 直线下降段斜率调整系数为 0.02, 阻尼调整系数为 1, 地震持续时间为 30s, 频率分点为 30。根据以上条件, 生成地震水平加速度反应谱及 x

和 y 向的地震水平加速度时程, 如下图所示:

### 2.4 载荷分析

为了保证风电机组安全, 该工程计算生成了 6 组地震动加速度时程, 地震波从风电机组正面和侧面两个方向输入, 对风电机组进行地震载荷计算, 选择叶片根部、塔筒底部、塔筒顶部、动轮毂、静轮毂和偏航轴承 6 个部位进行极限载荷统计分析。

将风电机组载荷设计时的极限载荷统计出来, 与地震后的风电机组极限载荷做对比, 结果如表 2、表 3 所示。

具体来看, 风电机组叶片根部、动轮毂、静轮毂的安全余量比较大, 基本保持 20%~40%, 塔底、塔顶和偏航轴承的安全余量则不是很大, 地震后塔顶和偏航轴承的  $F_y$  都超过了设计极限 2.72%, 塔底  $M_x$ 、 $F_y$ 、 $F_{xy}$  接近设计极限。所以这 3 个部位将成为风电机组抗震设计时的重点考虑部

表1 1.5MW风电机组主要参数

参数	单位	数值
功率	(kW)	1500
叶片长度	(m)	38
风轮直径	(m)	78
轮毂高度	(m)	70
额定风速	(m/s)	11
额定转速	(rpm)	17.3
最小桨距角	(°)	-0.5
最大桨距角	(°)	89.5

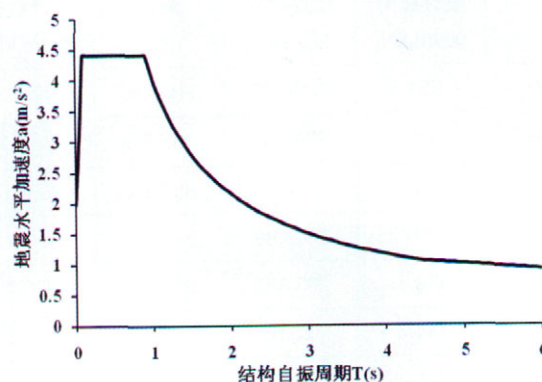


图1 地震水平加速度目标反应谱

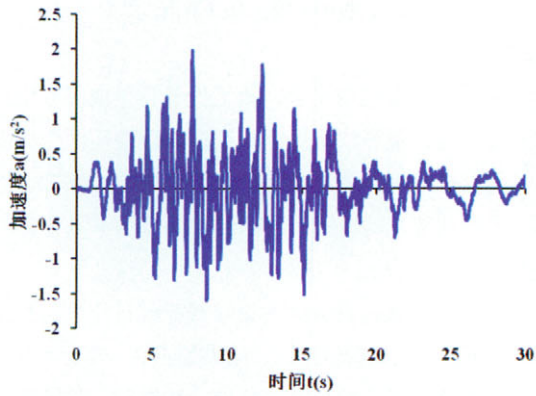


图2 地震水平x方向加速度时程

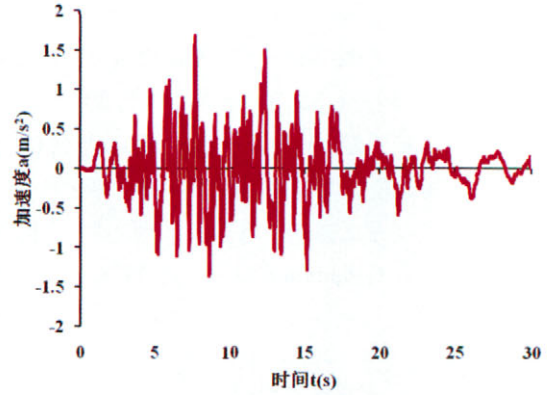


图3 地震水平y方向加速度时程

表2 地震极限载荷与设计极限载荷（叶根、塔底、塔顶）

	叶根			塔底			塔顶		
	设计载荷 [kNm,kN]	地震载荷 [kNm,kN]	余量 [%]	设计载荷 [kNm,kN]	地震载荷 [kNm,kN]	余量 [%]	设计载荷 [kNm,kN]	地震载荷 [kNm,kN]	余量 [%]
Mx	3094.7	1695.35	45.22%	35351	32761.2	7.33%	4013.7	1565.57	60.99%
My	4381.3	3322.66	24.16%	49868	28492.5	42.86%	5902.9	4234.45	28.26%
Mxy	4501.6	3515.38	21.91%	49868	37392.3	25.02%	5972.2	4315.58	27.74%
Mz	111.1	49.2228	55.70%	3773.1	3146.01	16.62%	3763.5	3145.31	16.43%
Fx	179.9	142.982	20.52%	655.8	492.95	24.83%	610.3	372.28	39.00%
Fy	168.6	104.832	37.82%	597.8	560.662	6.21%	388	398.536	-2.72%
Fxy	197	159.867	18.85%	656.2	651.07	0.78%	610.4	468.394	23.26%
Fz	701.5	399.137	43.10%	2977.4	2072.18	30.40%	1520.7	1101.08	27.59%

表3 地震极限载荷与设计极限载荷（动轮毂、静轮毂、偏航轴承）

	动轮毂			静轮毂			偏航轴承		
	设计载荷 [kNm,kN]	地震载荷 [kNm,kN]	余量 [%]	设计载荷 [kNm,kN]	地震载荷 [kNm,kN]	余量 [%]	设计载荷 [kNm,kN]	地震载荷 [kNm,kN]	余量 [%]
Mx	1551.3	1094.93	29.42%	1551.3	1094.93	29.42%	1835.6	1565.57	14.71%
My	4406.2	2796.51	36.53%	4398.3	2758.98	37.27%	5902.9	4234.45	28.26%
Mz	4046.1	2614.25	35.39%	3534.8	2964.52	16.13%	5972.2	4315.58	27.74%
Myz	4414	2999.92	32.04%	4414	2999.92	32.04%	3763.5	3145.31	16.43%
Fx	479.7	293.337	38.85%	479.7	293.337	38.85%	610.3	372.28	39.00%
Fy	444.3	320.88	27.78%	260.6	146.503	43.78%	388	398.536	-2.72%
Fz	471.4	322.278	31.63%	471	329.397	30.06%	610.4	468.394	23.26%
Fyz	471.9	329.475	30.18%	471.9	329.475	30.18%	1520.7	1101.08	27.59%

位, 不过设计极限和风电机组各部位材料极限也有一定的安全余量, 所以该风电机组符合风场的抗震设计要求。

结果表明, 地震后风电机组载荷大幅增大, 但相对于设计载荷仍有安全余量。这是因为设计极限载荷往往出现在极端条件下, 而按照 GL 规范, 地震载荷设计工况都发生在正常湍流模型风或正常风轮廓情况下, 这也是风电机组运行时间内发生概率最大的风况 (风电机组运行寿命为 20 年, 而地震发生是小概率事件), 所以说对于此风电机组来说, 极端风速条件对风电机组载荷的影响比地震大的多。

### 3 结语

本文详细介绍了抗震设计条件下的风电机组载荷计算方法 and 原理, 并以一工程实例为背景, 按照 GB2010 规范生成目标加速度反应谱, 用三角级数法将其拟合合成地震动加速度时程, 考虑地震水平双向作用, 用 GH bladed 软件完成了风电机组地震载荷的计算, 结果表明, 该风电机组满足风场的抗震设计要求, 风电机组塔底、塔顶和偏航轴承在抗震设计时是重点考虑部位。经实际工程验证, 此方

法可用于风电机组抗震设计工作。✘

### 参考文献

- [1] 吴春艳, 金鑫, 何玉林等. 风力发电机在地震 - 风力作用下的载荷计算 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(18) : 36-40.
- [2] GB50011-2010 建筑抗震设计规范 [S]. 2010.
- [3] 薄俊晶, 蒋欢军. Eurocode8 与 GB50011—2010 关于抗震设防目标、场地和地震作用等的比较 [J]. 结构工程师, 2011, 27(5) : 90-95.
- [4] 张翔. 中国建筑抗震设计规范与欧洲规范 Eurocode8 关于抗震设计反应谱的比较 [J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(2) : 183-186.
- [5] Guideline for Certification of Wind Turbines, Germanischer Lloyd[S], Edition 2003\2004.
- [6] 姬淑艳, 李英民, 刘立平等. 考虑双向水平地震作用的结构设计问题研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5) : 68-72.
- [7] 史家平. 地震动合成方法比较与研究 [D]. 大连 : 大连理工大学, 2008.
- [8] Bladed theory manual[R].2011.

收稿日期 : 2012-12-13.

作者简介 :

李声茂 (1985-), 男, 工程师, 东方电气新能源设备 (杭州) 有限公司, 主要从事风电机组载荷强度工作。

赵伟 (1983-), 男, 工程师, 东方电气新能源设备 (杭州) 有限公司, 主要从事风电机组载荷强度工作。



摄影: 赵霄