

风力发电机组的台风适应性设计方法研究

申新贺¹, 叶杭冶¹, 潘东浩¹, 张秀芝², 方郁锋¹

(1. 风力发电系统国家重点实验室 浙江运达风电股份有限公司, 杭州 310012; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

[摘要] 设计工况决定了风电机组的外部载荷和运行环境。由于目前的风电设计标准没有考虑台风环境的影响, 运行于台风地区的风电机组遭到破坏的风险增大, 制造和运营成本增加。利用观测到的热带气旋数据分析了台风过程中的湍流强度、阵风特性和风向变化特性, 提出了包括台风特性、台风工况、结构失效分析设计、台风控制策略和运维策略的系统性的风电机组台风适应性设计方法。文章基于上述方法, 计算分析了风电机组在不同工况条件下的载荷; 结果表明, 采用本文方法设计的风电机组, 应用于台风多发地区, 具有更好的经济性和安全性。

[关键词] 风力发电机组; 适应性设计方法; 台风; 控制策略

[中图分类号] TM315 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)03-0070-06

1 前言

经过一年的低谷期后, 市场对海上风电的热情被重新点燃。2013年初, 国家发展和改革委员会颁布了2013版的《产业结构调整指导目录》, “海上风电机组技术开发与设备制造”和“海上风电场建设与设备制造”进入鼓励发展的产品目录; 随后, 国家能源局召开了海上风电发展座谈会, 提出要加快推进我国海上风电开发。

但中国近海海域台风的肆虐成为海上风电开发的重要制约因素。我国沿海拥有丰富的风力资源, 但缺乏应对台风环境的风电设计技术, 这方面的研究更是欠缺。为更好开发利用我国近海区域的风能资源, 台风适应性技术成为我国海上风力发电技术研究的重要内容。

2 风电机组抗台风技术研究现状

国际上开展风电抗台风技术研究的主要有日

本、东南亚、中国以及中国台湾等台风盛行的国家和地区。在日本新能源和产业技术综合开发机构(NEDO)支持下, 2004年日本就开始了为期3年的风电机组抗台风设计技术的研究^[1-3], 根据研究成果制定了指导日本风电发展的技术指南^[4], 内容涵盖了载荷测试、极端风图谱、极端风速数据库以及风电场场址评估和机组选型指南等内容。该研究的着重点仍在于极端风速的计算和场址评估上, 对风电机组的台风适应性设计研究不够深入。2005年, 在欧盟的支持下, 丹麦国家能源实验室和菲律宾、越南等东盟国家开展了名为“EU-ASEAN wind project”的研究项目^[5], 研究在上述国家台风频发地区开发风电的技术可能性和对策。该项目通过对菲律宾全国极限风速的调查分析, 初步研究了台风地区风电机组结构的安全性设计要求, 对安全系数的提高导致的机组成本增加做了初步分析。该项目提出了如下结论: a. 在保证电力供应的情况下, 风电机组的偏航系统能够跟上台风风向的变化; b. 要保持

[收稿日期] 2013-06-08

[基金项目] 国家科技支撑计划课题项目(2012BAA01B00)

[作者简介] 申新贺, 1980年出生, 男, 河南驻马店人, 高级工程师, 研究方向为大型风电机组的总体设计技术, 海上风电和风特性分析研究;
E-mail: sxhjob@foxmail.com

与 IEC 61400-1 一致的安全性要求,将导致机组成本增加 20 %~30 %; c. 为了经济性更好,风电机组在罕见的超强台风中被破坏可以被接受。美国船级社在美国内政部的支持下研究了飓风环境下的海上风电场和海上风电机组的设计技术。根据报告^[6,7],应用在飓风地区的海上风电机组设计载荷计算风模型推荐采用 API(美国石油协会)标准模型。

上述项目对台风破坏机理的研究吸收了海洋工业标准、建筑行业规范等,侧重于台风的极端风速。但来自其他行业的标准不能完全适用于风电机组的设计,可能会遗漏运行工况对机组设计的重要性,而且这些标准通常局限于结构在风载下的静态表现,无法体现出与风电机组控制和安全系统相关的故障情况。当前风电机组设计依据的国际或国家标准没有考虑台风的特性,运行于台风地区的风电机组遭到破坏的风险增大;尽管采用更高的生存风速设计风电机组是可行的,但困难在于平衡风电机组的成本和可靠性。对台风造成的大量风电场事故分析表明^[8-10],台风对风电设备的破坏主要与台风登陆过程中的风况特性、风电场的地形环境和风电机组的结构设计与控制方法等因素有关,不仅仅取决于台风的极大风速。

我国的抗台风风电技术研究得益于中国-欧盟能源与环境合作项目“台风对近海风电开发的影响研究”项目,吸收了国内风电场的台风事故经验^[8-10],对我国近海台风登陆情况、台风影响下的极端风速分布以及台风的破坏机理等做了系统性的分析和研究^[11]。2010年4月,全国风力机械标准化技术委员会在上海组织召开了《台风型风力发电机组》国家标准的起草工作会议,浙江运达风电股份有限公司、国家气候中心等被指定作为该标准的主要起草单位。该标准是世界上第一部用于台风环境下的风力发电机组的产品规范。

3 台风特性分析

设计工况决定了风电机组的外部载荷和运行环境。与普通风况相比,台风的湍流、突变风向、阵风和极端风速^[12]是不同于已有风电机组设计标准^[13]的明显特性。因此,深入分析台风的特性和风电机组的失效机理,建立相应的台风风况模型,用于风电机组设计才能保证机组的经济性和安全性。

3.1 台风的湍流特性

台风过程中的强湍流常常是风电机组振动失效的主要原因。通过对海上测风塔观测数据的分析表明,由于风致波浪的影响,湍流对海上风电机组塔架下部产生的载荷效应大于上部,呈现明显的随高度变化的特性。湍流对风电机组的影响不仅与湍流的强度有关,还与机组所处的方位呈现相关性。图 1 是利用湍流风速 55 m/s 计算的偏航轴承的载荷,当风向在 120°方位时,载荷明显异常;进一步频谱分析发现,该方位下可能引发了结构共振。

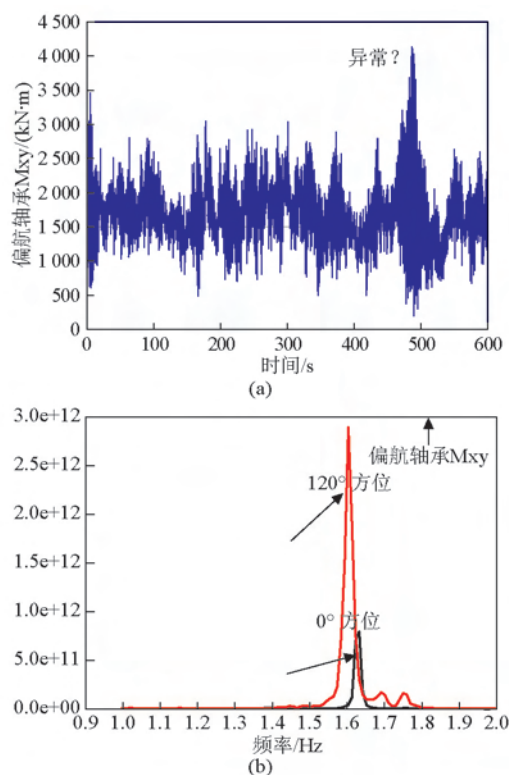


图 1 台风极端风速下的异常载荷
(湍流风,风速 50 m/s,风向 120°)

Fig.1 Abnormal load under typhoon
(turbulence wind 50 m/s, wind direction 120°)

日本的 Kogaki 等^[3]详细分析了日本复杂地形和台风影响下的风况与 IEC 标准的差异,指出多数情况下湍流强度分布与标准湍流模型 (NTM) 相似,但有 60 % 的湍流强度超过了 IEC 最强湍流强度级别。Cao 等^[14]对台风 Maemi 的观测数据进行了详细的分析,得出了相同的结论,并给出了台风湍流三个方向的分量 $\sigma_w/\sigma_v/\sigma_u = 1.8/1.5/1.0$ 的比值关系。

通过对我国近海大量台风观测数据进行分析,张秀芝等^[15]得出结论,当风速不断增大时,在台风中心及附近的纵向湍流强度逐步降低趋于稳定,台风的三维湍流大于 IEC 61400-1 标准的规定;台风湍流三个方向(纵向、横向、垂向)的比例关系为 1:0.86:0.51。

3.2 台风环境下的 50 年一遇设计极端风速

GB/T 19201—2006 规定了我国范围内的热带气旋等级划分原则,如表 1 所示。

表 1 我国热带气旋划分标准

Table 1 Tropical cyclone classification table

热带气旋等级	底层中心附近最大平均风速/($m \cdot s^{-1}$)	底层中心附近最大风力/级
热带低压	10.8~17.1	6~7
热带风暴	17.2~24.4	8~9
强热带风暴	24.5~32.6	10~11
台风	32.7~41.4	12~13
强台风	41.5~50.9	14~15
超强台风	≥ 51.0	16或以上

表 2 是萨菲尔-辛普森飓风分级模型,该模型相比我国的热带气旋分级标准,风速的观测时间不一样,对 50 m/s 以上的风速划分的更细。对于海上风电机组的台风适应性设计,这种分级方式的风速划分可操作性意义更强。但要解决我国近海环境下的海上风电机组设计极端风速,仍需要极端风速的分布图谱。

表 2 萨菲尔-辛普森飓风等级

Table 2 Saffir-Simpson hurricane scale

等级	风速/($m \cdot s^{-1}$)	中心最低气压/mBar	风暴潮/m
5	≥ 70	<920	>5.5
4	59~69	920~944	4~5.5
3	50~58	945~964	2.7~3.7
2	43~49	965~979	1.8~2.4
1	33~42	980	1.2~1.5

由于海上风电场离岸距离通常在 10~50 m 范围内,因此台风的近岸特性对海上风电场至关重要。文献[11]统计了 1949—2010 年以来影响我国近海的台风登陆情况,计算考虑台风影响的我国近海 50 年

一遇的最大风速,如图 2 所示。根据极端风速分布图谱的分析结果,设计参考风速为 50 m/s 的等级可以适用于我国大部分海域,55 m/s 的等级则基本涵盖了我国海上风电可开发海域。

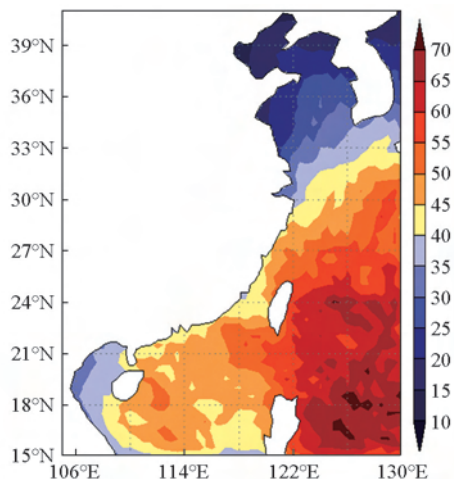


图 2 台风影响下的我国近海 50 年一遇风速分布图
Fig.2 Wind speed map with a recurrent period of 50 years in over the coastal waters of China

3.3 台风风向的变化

风向的瞬时变化值对风电机组安全性有重要的影响。笔者对收集到的 23 个台风观测数据的分析表明,台风过程中,当风速在 12~30 m/s 时,风向变化较大,但速率较慢,风电机组的偏航系统可以跟随上风向的变化。风向变化幅值基本小于 IEC 61400-1 Ed.2 规定的 50 年一遇 I A 幅值。当台风经过时,通常会带来较大的风速,有利于海上风电机组的发电运行,但风向的大范围变化给海上风电机组的运行带来困难。因此,设计海上风电机组时,应结合风电机组的运行状态,考虑风向、湍流和变桨、偏航等控制参数,进行综合分析。这也是风电机组台风适应性设计的关键内容之一。

3.4 台风过程中的阵风变化

笔者收集了 2003 年以来中国东南部沿海 88 个测风塔的观测数据进行计算分析,结果表明,台风过程中的阵风幅值大于 IEC 61400-1 Ed.3 的 I A 等级,但小于 IEC 61400-1 Ed.2 的 I A 等级。图 3 是台风“鲛鱼”不同观测地点的实测阵风值,伴随的阵风变化已经超出了 IEC 61400-1 规定的阵风幅值(图 3 中的粗实线所示,两条粗实线分别表示风速等于 V_{hub} 时对应的标准阵风特性曲线)。

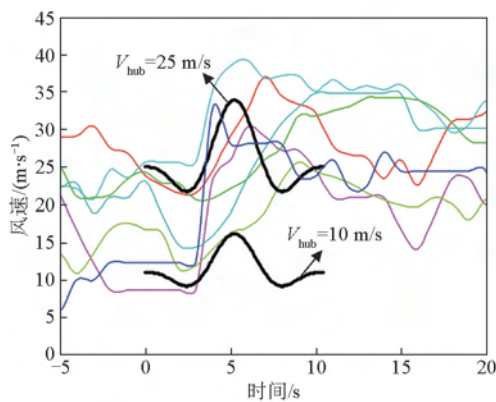


图3 台风“鲛鱼”实测阵风

Fig.3 Gusts during typhoon “MEGI”

4 台风环境设计工况

根据第三部分的台风特性分析结果,对 IEC 61400-1 Ed.3 的风况模型提出如下更改。

1) EWM_TC: 湍流风模型的纵向、横向和垂向分量比例更改为 1:0.86:0.5。

2) EOG_TC: 定义台风环境下的阵风幅值模型, 见式(1)

$$V_{\text{gust}} = 6.4 \left(\frac{\sigma_1}{1 + 0.2 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right) \quad (1)$$

表3 台风设计工况

Table 3 Typhoon design load cases

DLC	设计状态	风况	风速/ (m·s ⁻¹)	纵向湍流 强度	风向/(°)	DLC	设计状态	风况	风速/ (m·s ⁻¹)	阵风幅值 (m·s ⁻¹)	阵风偏向 量/(°)
9.1a	空转	EWM	50	0.11	0~360	9.3	正常停机	EDC_TC	25	—	±48.02
9.1b		EWM	55	0.11	0~360	9.4		EOG_TC	25	18.24	—
9.2	空转	EWM_TC	50	0.16	0~360	9.5	空转	EDC_TC	35	—	±44.89
—	—	—	—	—	—	9.6		EOG_TC	35	23.86	—

注:所有叶片顺桨

设计仿真考虑以下工况组合:a. 不考虑台风影响的 IEC 61400-1 Ed.3 标准设计工况;b. 表3的台风设计工况;c. 表3 (不包括 DLC9.1) + A。

5 仿真实验

采用 1.5 MW 变速变桨风力发电机组作为仿真研究对象, 机组数据如表4所示。

采用大型通用风力发电机组设计与分析软件 Bladed, 根据 IEC 61400-1 Ed.3 国际标准, 利用表3 设计的工况模型对表4所列 1.5 MW 机组进行了仿真分析。图4给出了不同风向、不同风速情况下叶

周期($T=14$ s)、风速方程与 IEC 61400-1 Ed.3 一致。

3) EDC_TC: 定义台风环境下的风向变化幅值模型, 见式(2)

$$\theta_e = \pm 6.4 \arctan \left(\frac{\sigma_1}{V_{\text{hub}} \left(1 + 0.2 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right) \right)} \right) \quad (2)$$

周期($T=6$ s)、极端风向瞬时变化方程与 IEC 61400-1 Ed.3 一致。

式(1)和式(2)中, V_{gust} 为阵风幅值; σ_1 为轮毂高度处的纵向风速标准偏差, 见 IEC 61400-1; D 为风轮直径; Λ_1 为湍流尺度参数; θ_e 为极端风向变化; V_{hub} 为轮毂高度处的风速。

为考察上述台风特性对风电机组设计载荷的影响, 考虑台风过程中风电机组可能的工作状态, 制定表3所列的台风工况。为评估湍流强度的增加对机组载荷的影响, 设置工况 DLC 9.2; DLC9.3、DLC 9.4 是考察台风时机组的可能停机过程; DLC9.5、DLC9.6 是考察台风时机组停机状态下受阵风、风向变化的影响。这里假定台风警报发出后, 风电机组采取顺桨、空转的控制策略。

表4 1.5 MW 风电机组数据

Table 4 1.5 MW wind turbine data

参量	机组数据
额定功率/kW	1 500
额定风速/(m·s ⁻¹)	11.5
轮毂高度/m	65
风轮直径/m	77
切入风速/(m·s ⁻¹)	3.5
切出风速/(m·s ⁻¹)	25
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.225
气流倾角/(°)	8

根和塔架底部的载荷。从图4可以看出,当风轮处于下风向时塔底载荷和叶根载荷最小,机组应尽量避开风向90°的方位角,即侧风向;随极限风速的增加,叶根扭矩无法通过调整控制策略得到有效降低,成为机组抗台风的薄弱环节。因此,结构设计上,应提高叶根的扭转刚度。

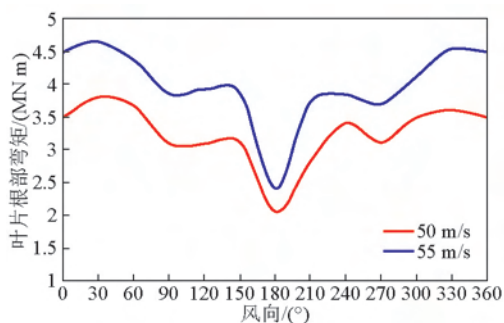


图4 不同方位角时的叶根弯矩(DLC9.1)

Fig.4 Blade root bending moment with different azimuth (DLC9.1)

表5是组合工况A和C的设计载荷仿真结果(DLC2.1、DLC6.2、DLC8.2来自于IEC 61400-1)。要保持与IEC 61400-1一样的安全余量,台风型风电机组的设计载荷将比IEC标准等级风电机组增大15%~40%。对于海上环境,纵向湍流强度要比陆上小,则台风导致的极限载荷要小于陆上环境。

表5 组合工况A和C下的风电机组部件极限载荷

Table 5 Extreme load of combination case A and C

风电机组部件		塔架底部			叶根		
		载荷/kNm	工况	比值	载荷/kNm	工况	比值
弯矩	A	47 722	DLC2.1	1	3 098.6	DLC8.2	1
	C	61 084	DLC9.2	1.28	3 802.1	DLC9.2	1.23
扭矩	A	4 979.5	DLC2.1	1	101.4	DLC6.2	1
	C	5 786.5	DLC9.2	1.16	144.8	DLC9.2	1.43

表6 叶片载荷比较

Table 6 Comparison of blade load

方向	弯矩/(kNm)	设计工况	比值
挥舞方向	3 799.6	DLC9.1A	1
	5 009	DLC9.2	1.32
摆阵方向	1 323.8	DLC9.1A	1
	1 547.5	DLC9.2	1.17

台风对风电场造成的事故中,叶片是损坏几率

最高的部件。表6分析了极端风速下不同湍流导致的叶片载荷,可见,由于台风过程中的异常湍流,叶片挥舞方向和摆阵方向的载荷增大,挥舞方向更容易损坏。

从表5、表6的结果也可以看到,湍流强度对极限载荷的影响非常明显;对海上风电场来说,气流恢复平稳很慢,在台风扰流下,排间风电机组的相互影响带来的湍流增大需要引起更多的重视。

6 结语

本文重点研究并建立了用于风电机组台风适应性设计的台风风况模型和工况模型,利用Bladed仿真软件验证了上述模型的正确性和合理性,通过对比常规机组的设计结果,指出风电机组在台风情况下的设计特点。风电机组的台风适应性设计,应采用系统性的本质安全设计方法,不应简单地加强结构部件,也不应单纯地更改控制策略,而应该从设计全过程综合考虑正确的台风特性描述、合理的结构安全余量和正确的安全控制策略;还需要从海上风电场的设计和运行维护策略等方面形成一套完整的体系。

对风力发电机组台风环境下的适应性设计提出如下的总体设计思路。a. 台风风模型。从设计输入的源头解决台风风特性源的准确描述问题,提供正确的环境参数输入。b. 设计工况。考虑充分利用台风发电的可能性,综合考虑台风、结构和控制状态,能够涵盖海上风电机组的整个运行周期。c. 控制策略。根据仿真结果,风电机组处于上风向或下风向时载荷最小。考虑不同方位下的台风湍流频率,应具备扇区管理功能,以避开仿真分析中出现不利载荷的风向。d. 结构分级失效原则。根据部件失效后果进行结构重要性分级,考虑各种不确定性导致的载荷变化,对关键部件进行余量分级设计。如叶片的首先失效,能够保证塔架和整机的稳定性。e. 台风预警功能。考虑充分利用台风,提高发电效益,海上风电机组的控制系统应能够接受台风预警信号,当风速达到预警值后自动转入对应的台风运行模式。f. 台风应急预案。应考虑台风来临前后的预防措施、运维方案、台风信息处理和监测等方案,提高台风环境下的风电设备抗台风能力。

参考文献

- [1] Takeshi Ishihara, Atsushi Yamaguchi, Keiji Takahara, et al. An analysis of damaged wind turbines by typhoon Maemi in 2003

- [C]// Proceedings of the Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-VI). Seoul, Korea; The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind engineering, September 2005: 1413-1428.
- [2] Matsumiya H, Takada K, Matsushita D, et al. J-Class wind characteristics—A study on extreme wind speed in tropical region [C]// Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition 2007. Milan, Italy: the European Wind Energy Association, 2007:637-645.
- [3] Kogaki T, Matsumiya H, Abe H, et al. Wind characteristics and wind models for wind turbine design in Japan[J]. Journal of Environment and Engineering, 2009, 4(3): 467-478.
- [4] NEDO.日本型风力发电指南·台风·乱流对策编[S].日本:新能源产业综合开发机构,2008.
- [5] Tarp-Johansen N J, Clausen N E. Design of wind turbines in typhoon area: A first study of structural safety of wind turbines in typhoon prone areas[R]. Denmark: EC-ASEAN Energy Facility, 2006.
- [6] ABS. Guide for building and classing offshore wind turbine installations [S]. USA: American Bureau of Shipping, 2010.
- [7] ABS. Design standards for offshore wind farms [R]. USA: Bureau of Ocean Energy Management, Regulation, and Enforcement, 2011.
- [8] 严圣标. 台风对风电场的危害及对策[J]. 能源与环境, 2012, 31(4):43-44.
- [9] 于午铭. 台风“杜鹃”的危害与思考[C]//中国电机工程学会2004年学术年会论文集. 北京: 中国电机工程学会, 2004.
- [10] 吴金城. “桑美”台风的影响和启示[J]. 中国风能, 2008, 2(2): 11-18.
- [11] 张秀芝, 闫俊岳, 杨校生, 等. 台风对中国近海风电开发的影响及对策[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [12] 吴金城, 张容焱, 张秀芝. 海上风电机的抗台风设计[J]. 中国工程科学, 2010, 12(11): 25-31.
- [13] International Electrotechnical Committee. IEC 61400-1: Wind turbines part 1: Design requirements[S]. International Electrotechnical Commission, 2005.
- [14] Cao Shuyang, Yukio Tamura, Naoshi Kikuchi, et al. Wind characteristics of a strong typhoon[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1):11-21.
- [15] 张秀芝, 宝乐尔其木格. 热带气旋影响下的三维脉动风特征分析[C]//第28届中国气象学会年会论文集. 北京: 中国气象学会, 2011.

Adaptive design method of wind turbine to Typhoon conditions

Shen Xinhe¹, Ye Hangye¹, Pan Donghao¹, Zhang Xiuzhi², Fang Yufeng¹

(1. State Key Laboratory of Wind Power System of Zhejiang Windey Co. Ltd., Hangzhou 310012, China;
2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

[Abstract] Design load cases determines the external loads and operating environment of wind turbine. Due to existing design guidelines or standards don't consider the impact of Tropical Cyclones (referred to as TC) or Typhoon, when wind turbine operating in TC areas, the destruction of the risk increases, manufacturing and maintenance costs increase. Using TC observed data, turbulence intensity, gust characteristics and wind direction characteristics were studied in TC landing process, a adaptive design method of wind turbine to typhoon conditions is suggested, including typhoon characteristics, typhoon design conditions, structural design, control strategy, operation and maintenance strategy. The typhoon design load is simulated based on the suggested method; The result shows that the suggested method of offshore wind turbine anti-typhoon design has a better economy and safety.

[Key words] wind turbine; adaptive design method; typhoon; control strategy