

环境适应性设计与分析

台风型风电机组塔架轻量化设计研究

赵进

(山西焦煤集团机电部, 太原 030000)

摘要: **目的** 实现台风型风电机组塔架的轻量化设计。**方法** 对风电机组台风环境载荷工况和台风期运行控制策略进行研究, 提出在基于 GB/T 31519—2015《台风型风力发电机组》的台风型风电机组基础上, 开发台风控制策略, 使机组在台风期间持续处于对风状态。**结果** 利用 BLADED 软件计算机组各关键部位的载荷, 结果表明, 台风控制策略降低了 23.5% 的机组塔基载荷, 重新设计塔架, 塔架质量降低了 13%, 实现了塔架轻量化设计, 单个风电场节省约 416 万元, 具有很好的经济效益。通过机组现场实测, 在摩羯台风期间, 采用台风控制策略的台风型风电机组塔基载荷, M_{xy} 理论仿真值与实测值的相关性达 94.1%, 高度一致。**结论** 验证了理论仿真计算的准确性和轻量化塔架应用的可行性, 助力于我国风力发电行业沿海地区及海上型风力发电机组的发展。

关键词: 台风控制策略; 风电机组; 塔架; 轻量化

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.04.011

中图分类号: TK83

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)04-0065-06

Lightweight Design of Typhoon Wind Turbine Tower

ZHAO Jin

(Mechanical and Electrical Department of Shanxi Coking Coal Group, Taiyuan 030000, China)

ABSTRACT: The work aims to realize the lightweight design of typhoon wind turbine tower. The typhoon environment load cases and the typhoon control strategy were researched. Based on the typhoon wind turbine according to GB/T 31519—2015 Wind Turbine Generator System under Typhoon Condition Standard, the typhoon control strategy was developed to keep the wind turbine in the opposite state during the typhoon. The loads on key parts of the wind turbine unit were calculated by software BLADED and the results indicated that the tower base load was reduced by 23.5% with typhoon control strategy. The tower was redesigned and the weight of tower was reduced by 15%, realizing the lightweight design, saving about RMB 4.16 million for one wind farm and having good economic benefit. According to the field measurement of the wind turbine unit, during the period of typhoon Capricorn, the correlation between the theoretical simulation value of the tower base load M_{xy} of the typhoon type wind turbine unit adopting the typhoon control strategy and the measured value was 94.1%, which was highly consistent. It verifies the accuracy of the theoretical simulation calculation and the feasibility of the application of the lightweight tower, and contributes to the development of the wind turbine units in the coastal areas and offshore areas of China's wind power industry.

KEY WORDS: typhoon control strategy; wind turbine unit; tower; lightweight

收稿日期: 2019-11-06; 修订日期: 2019-12-18

Received: 2019-11-06; Revised: 2019-12-18

作者简介: 赵进(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为风力发电技术、工程机械技术等。

Biography: ZHAO Jin (1983—), Male, Master, Engineer, Research focus: wind power generation technology and mechanical engineering technology.

随着我国风电行业的快速发展,大批风电机组安装在东南沿海。我国东南沿海地域台风频繁登陆,对风电机组以及风电场带来很大的危害。如浙江省自从1997年大规模开发风电以来,共计受到22次台风影响,其中7次台风给风电设备带来损失高达百万元,2次台风造成的损失更是高达千万元以上^[1]。随着新建风电场单机容量的不断扩大,特别是风电场在海上安装时所受的影响更加明显,一旦遭遇台风,将造成巨大损失。因此在风电机组上开展抗台风能力研究的必要性越发凸显。

国际上开展风电机组抗台风技术研究的国家和地区主要有东南亚、日本、美国和中国等。早在2004年,日本就开始了风电机组抗台风设计技术的研究。主要研究内容为极端风图谱、载荷测试、极端风速数据库以及风电场址评估和机组选型等。

2005年,丹麦国家能源实验室联合菲律宾、越南等东盟国家开展了相关研究项目。通过对菲律宾国内极限风速以及风电机组结构安全性设计要求的调查研究,分析了安全系数提高导致的机组成本增加的相关内容。

美国船级社对台风环境下的海上风电场和海上风力发电机组的设计技术进行了研究,获得美国政府大力支持。据报告^[2-3],应用在台风地区的海上风力发电机组设计载荷计算模型,建议采用API(美国石油协会)标准模型。

目前,对台风型风力发电机组进行研究的国际知名风电机组制造商主要有三菱、VESTAS和GE。其重点研究内容侧重于极端风速和极端风载及其危害等方面,根据机组原有条件,在结构设计、策略控制等方面持续优化和改进。

我国基于对近年来沿海登陆台风影响下极端风速分布及其破坏机理的深入研究^[4-7],最终颁布了第一部台风环境下的风电机组产品标准——GB/T 31519—2015《台风型风力发电机组》^[8]。在此基础上,开发台风控制策略,通过载荷计算,优化塔架结构设计,实现塔架轻量化设计,由此可以带来巨大的经济效益。通过现场载荷测验,验证理论设计的准确性和可行性,将助力于我国风力发电行业沿海地区及海上型风力发电机组的发展。

1 标准台风型风电机组设计

1.1 研究对象

挑选浙江某沿海风场为研究对象,该风电场采用FD2000台风型机组,基本参数见表1。

1.2 载荷计算

台风型风电机组载荷工况根据GB/T 18451.1—

2012《风力发电机组 设计要求》规定的载荷工况DLC1.1—DLC8.2,结合GB/T 31519—2015《台风型风力发电机组》规定的台风环境载荷工况,共同组成台风型风电机组载荷工况DLC9.1—DLC9.14。

表1 FD2000台风型机组的基本参数

Tab.1 Basic parameters of FD2000 typhoon unit

参数名称	参数值
额定功率	2000 kW
轮毂中心高度	65 m
轮毂高度额定风速	9.9 m/s
轮毂中心高度运行风速范围	3~25 m/s
空气密度	1.225 kg/m ³
湍流强度平均风速15 m/s时的特征值 I_{15}	18%
轮毂中心高度50年一遇3 s极大风速	52.5 m/s

各载荷工况含义简要说明: DLC9.1为发电兼有故障; DLC9.2—DLC9.4为正常停机; DLC9.5—DLC9.12为空转; DLC9.13—DLC9.14为停机兼故障。利用BLADED载荷仿真软件,计算机组叶根、轮毂中心、塔架顶部、塔基等主要部件的载荷,结果见表2。

表2 台风型风电机组载荷计算结果

Tab.2 Load calculation results of typhoon wind turbine unit

载荷坐标	方向	参数
叶根 B-Root	M_{xy}	8962.7 kN·m
	M_z	208.2 kN·m
	F_{xy}	455.1 kN
	F_z	1145.3 kN
旋转轮毂 R-Hub	M_x	3283.8 kN·m
	M_{yz}	7825.1 kN·m
	F_x	717.09 kN
	F_{yz}	944.2 kN
固定轮毂 S-Hub	M_x	3283.8 kN·m
	M_{yz}	7825.1 kN·m
	F_x	717.09 kN
	F_{yz}	944.2 kN
塔基 T-base	M_{xy}	98 785 kN·m
	M_z	6172 kN·m
	F_{xy}	1451.3 kN
	F_z	4741.4 kN
塔架顶部 Ttop	M_{xy}	9053.9 kN·m
	M_z	6169 kN·m
	F_{xy}	933 kN
	F_z	2070 kN

注: F 代表合力; x 、 y 、 z 代表各个方向; M 代表载荷

按照表 2 的载荷结果对各部件进行结构设计和强度计算, 这里主要对塔架进行详细阐述。根据塔基及各截面载荷, 计算得塔架质量约 199 t。

2 台风控制策略风电机组设计

2.1 台风控制策略设计

对台风型风电机组塔基载荷进行分析可知, 塔基极限载荷出现在 DLC9.10 工况。当风向处于 0° 或 180° 时, 即机组处于上风向或背风向时, 塔基载荷较小, 约为最大值的 50%, 如图 1 所示。若台风期间可保证机组持续处于对风状态, 则塔基承受的载荷大幅下降, 可实现机组轻量化设计。基于此思路, 开发台风控制策略, 如图 2 所示。

台风控制策略主要由 SCADA 系统开发、机组控制优化、供电备用系统、风速风向仪等四大部分组成。

2.1.1 SCADA 系统开发

SCADA 承担了偏航备用系统的三项主要任务: 实现台风预警、台风过境提示功能; 允许远方控制全风场进入偏航备用模式; 保证在台风中电网失电时远程启动供电备用系统。

根据气象预报信息, 在台风到达 48 h 之前, 系统发出预警信号。在台风登陆前 24 h, 偏航备用准备状态准备就绪, 并对风场电网、通讯网络、柴油机状态等进行检查。在台风登陆时, 当系统判定风速大于设定值时, 机组进入偏航备用模式。台风过境后, 系统判定风速小于设定值时, 机组、电网线路、通讯网络等各项风场运行的必要项目开始自检, 并恢复机组正常运行。

2.1.2 机组控制优化

实现功能主要包括: 当风电机组运行在偏航备用

模式时, 能够对机组自动偏航的预警和告警信号进行屏蔽阻止, 确保不对人员和机组设备造成安全影响。在台风过后, 当机组在未完成自检以前, 确保机组不能自动切换到运行状态。如果 SCADA 操作者发出人为运行指令, 系统仍能够对该指令进行阻止。

2.1.3 供电备用系统

对风电机组而言, 保持持续偏航状态非常重要。在供电备用电源设计时, 考虑到在电网失电情况下, 可以使用柴油发电机组向整个风电场提供动力电源。在容量设置上, 需要对风电场内供电线路数据、机组型式数量以及柴油机的功率因数等因素进行综合考虑。

2.1.4 风速风向仪

在本机组上使用的风速风向仪最高只能测到 50 m/s 的风速。台风期间风速大、风向改变快, 为使偏航备用系统得到更高风速及风向信息, 在选取合适的风速风向仪和测量方法方面需要进一步研究。

2.2 载荷计算

基于 GB/T 31519—2015《台风型风力发电机组》设计的机组塔基载荷如图 3 所示。由图 3 可知, 在 DLC9.10k-3 工况下, 塔基极限载荷 M_{xy} 的最大值为 98 805 kN·m。在 DLC9.9a-4 工况下, 塔基载荷 M_{xy} 第二高值为 68 347 kN·m。

在台风环境下, 台风控制策略主要影响的载荷工况是 DLC9.10, 原塔基极限载荷最大值为 98 805 kN。由图 1 可知, 对风状态下的塔基载荷约为 50 000 kN·m, 所以采取台风控制策略可有效降低极限载荷。该值小于 DLC9.9a-4 工况下的第二载荷高值 68 347 kN·m, 所以在各台风载荷工况下, 塔基极限载荷值应为 68 347 kN·m。结合 GB/T 18451.1—2012 工况 DLC1.1—DLC8.2 可知, 在 DLC1.5 工况下, M_{xy} 达到最大值,

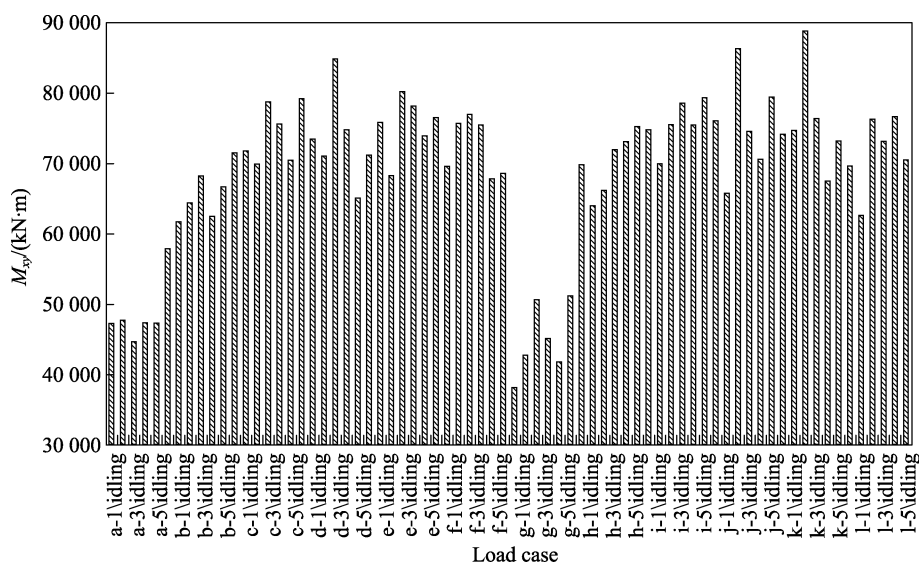


图 1 DLC9.10 工况下不同对风角度下的塔基载荷

Fig.1 Tower base load at different wind angles under DLC9.10 working condition

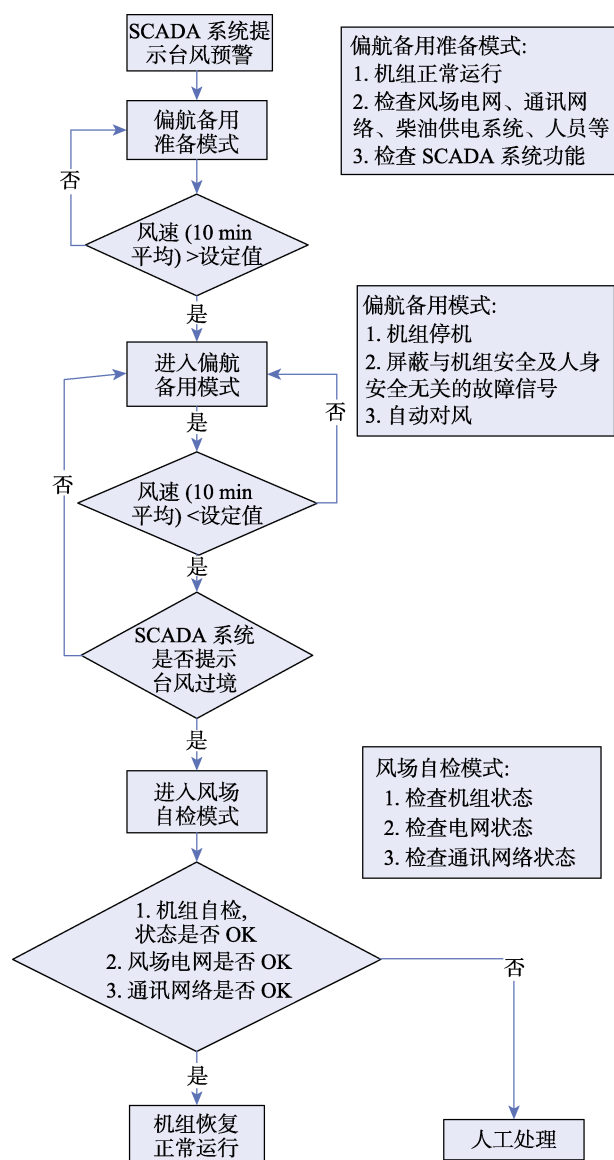


图2 台风控制策略流程

Fig.2 Flow chart of typhoon control strategy

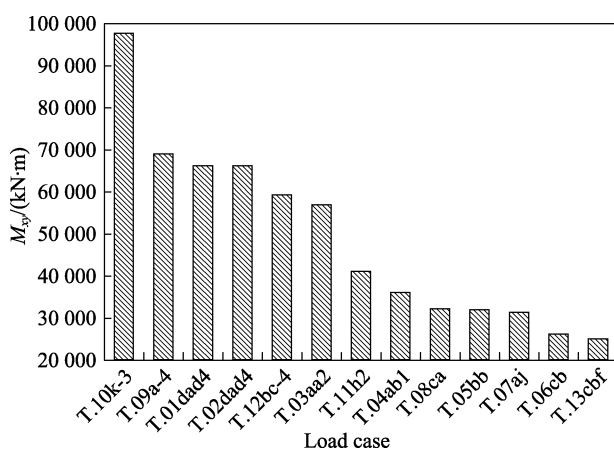


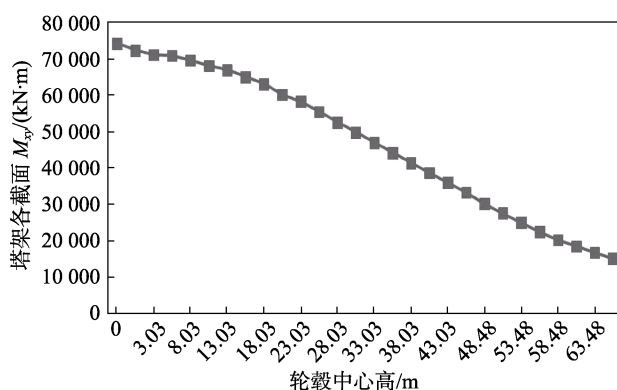
图3 台风荷载工况下塔基载荷

Fig.3 Tower base load under typhoon load

为 75 549 kN·m。综合分析可知, 台风控制策略下的台风型机组塔基极限载荷为 75 549 kN·m。

3 塔架轻量化设计及经济效益分析

经过载荷计算得出, 采用台风控制策略的台风型风电机组在降低塔架载荷, 增加塔架设计安全裕度方面效果显著。采用台风控制策略后, 塔基 M_{xy} 载荷降低了 23.5%。根据塔基极限载荷和各截面载荷分布 (如图 4 所示), 重新设计塔架结构, 实现塔架的轻量化设计, 塔架质量约 173 t, 减轻了 13%。

图4 新塔架随着塔架高度变化的 M_{xy} Fig.4 M_{xy} of new tower with height of tower

以浙江某沿海风电场为例, 风电机组台数按 24 台计算, 采用台风控制策略对机组塔架进行设计后, 质量约为 173 t, 而原来的台风型机组的塔架质量约为 199 t。塔筒加工、运输单价为 0.8 万元/t, 则每个风场的塔架节约建设成本 499 万元。

采用台风控制策略的台风型风电机组, 在台风期间需要偏航系统不断对风运行, 备用电源采用三台 200 kW 的柴油发电机, 以保证供电连续性。预计在风电机组 20 年寿命内, 柴油发电机购置费、油耗费、维护等费用总和约为 83 万元。由此可知, 节约成本约为 416 万元。

综上所述, 台风型风电机组通过采用台风控制策略, 在实现塔架轻量化设计的同时, 还能带来良好的经济效益, 对于降低投资风险以及减少投资成本方面大有裨益。

4 现场载荷测试与分析

对浙江某沿海风电场上 A05 和 A06 两台样机塔架进行现场测试, 其中 A05 机组为基于 GB/T 31519—2015《台风型风力发电机组》设计的台风型机组, A06 为采用台风控制策略的台风型机组。

在进行机组载荷测试时, 主要考虑叶片根部载荷、风轮载荷、塔架载荷等主要载荷量。台风控制策略针对如何降低塔基载荷进行研究, 本次试验只对机组塔基载荷进行测试。

采用电阻应变片对塔基的弯矩进行测量^[9-10], 应变片安装在距离塔基法兰上平面 4.0 m 处。实验测试

的数据采集模块组成: 德国 IMC 集成测控有限公司的 IMC CANSAS 模块 2 个 (SC16, DI16); IMC CS7008 主机模块 1 个。利用实验数据处理系统对 2018 年 8 月摩羯台风过境收集的数据进行处理, 获得 2 台机组对风状态数据 (偏航误差角) 和塔基载荷每个通道的统计数据, 通过实测数据通道间的实时计算, 得到塔基的合成弯矩 M_{xy} 。

4.1 偏航误差角对比分析

摩羯台风期间, 通过现场实测数据, 该风电场最大风速约 36 m/s (10 min 平均)。A05 机组的对风误差如图 5a 所示, 可以看出, A05 机组对风偏差基本处在 $\pm 50^\circ$ 区间内, 最大值为 169° 。A06 机组的对风误差如图 5b 所示, 可以看出, A06 机组对风偏差基本处在 $\pm 9^\circ$ 区间内, 并持续处在对风状态下。两组风机数据对比说明, 运用台风控制策略的机组能够实时处于对风状态, 也证明了对该策略的有效性。

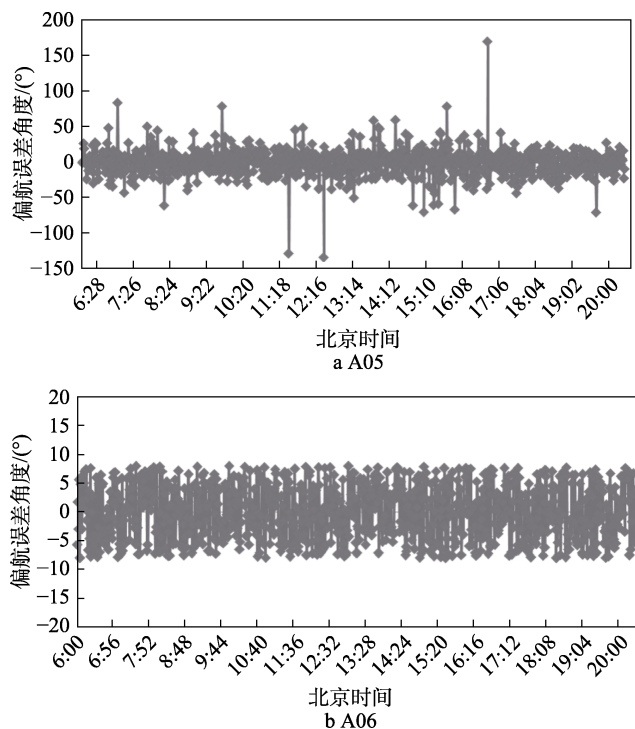


图 5 两机组台风期间对风误差数据

Fig.5 Data of wind error of two units during typhoon

4.2 塔基载荷对比分析

通过 A05 和 A06 号机组塔基在台风期间 M_{xy} 载荷数据的对比分析 (如图 6 所示)^[11], 得出普通台风型机组塔基 M_{xy} 值保持在 40 000~50 000 kN·m 区间, 而运用台风策略的台风型机组塔基 M_{xy} 值保持在 22 000~34 000 kN·m 之间, 从而得出 A06 机组载荷值比 A05 机组载荷减小约 16 000 kN·m。说明采用台风控制策略的风电机组能有效降低塔基载荷, 对塔架结构优化设计作用明显, 可实现机组轻量化。

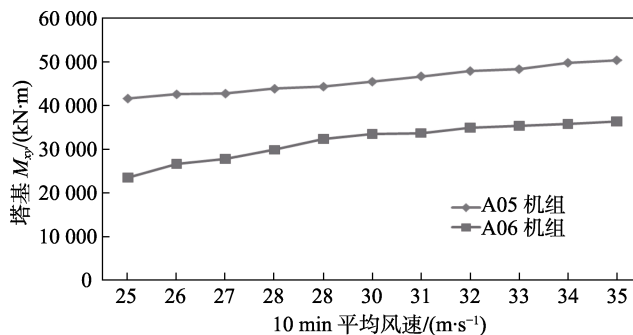


图 6 A05 和 A06 两台机组塔基 M_{xy} 值统计

Fig.6 M_{xy} value statistics of tower base of A05 and A06 units

4.3 实测载荷与理论载荷对比分析

摩羯台风期间, 机组处的最大风速为 36 m/s, 未达到设计的最大风速 42 m/s (10 min 平均值)。为了对 A06 机组在台风期间实测值与理论值的相关性进行评估, 对比分析 BLADED 软件计算的 DLC9.10 工况下的载荷数据与 A06 机组塔基 M_{xy} 实测值, 如图 7 所示。对比可知, A06 机组塔基载荷实测值与仿真计算值相比略高, 但基本走势一致, 处在 25~34 m/s 风速区间段, 相关性达到 94.1%。这显示了理论仿真计算结果与实测结果的高度一致性, 同时也充分验证了台风控制策略及塔架轻量化设计的可行性^[12]。

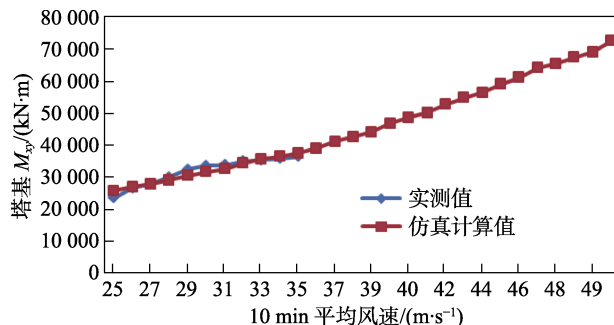


图 7 A06 机组塔基 M_{xy} 值实测值与仿真计算值对比

Fig.7 Comparison between the measured value of M_{xy} of tower base of A06 unit and the simulated value

5 结论

在基于 GB/T 31519—2015《台风型风力发电机组》设计的台风型风电机组的基础上, 开发台风控制策略, 进行载荷计算, 并优化塔架, 实现塔基轻量化设计。最后通过对浙江某沿海风电场 2 台台风型风电机组进行现场测验, 对比分析载荷数据, 获得如下结论。

1) 采用台风控制策略的台风型风电机组, 较台风型机组的塔基载荷降低了 23.5%。重新设计塔架, 塔架质量降低了 13%, 实现了塔架的轻量化设计。单个项目节省资金 416 万元, 对投资者降低投资风险非常有利。

2) 在摩羯台风期间, 采用台风控制策略的台风型风电机组的对风误差在 $\pm 9^\circ$ 区间内, 而台风型风电机组偏航误差普遍在 $\pm 50^\circ$ 区间内, 说明台风控制策略可实现机组在台风期间持续准确对风。

3) 采用台风控制策略的台风型风电机组塔基 M_{xy} 理论仿真值与实测值的相关性达 94.1%, 验证了理论仿真计算的准确性和轻量化塔架应用的可行性, 这有助于我国风力发电行业沿海地区及海上型风力发电机组的发展。

参考文献:

- [1] 王力雨, 许移庆. 台风对风电场破坏及台风特性初探[J]. 风能, 2012(5): 74-79.
WANG Li-yu, XU Yi-qing. Typhoon Damage to Wind Farm and the Typhoon Characteristics[J]. Wind Power, 2012(5): 74-79.
- [2] BS. Guide for Building and Classing Offshore Wind Turbine Installations[R]. USA: American Bureau of Shipping, 2010.
- [3] ABS. Design Standards for Offshore Wind Farms[R]. USA: Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement, 2011.
- [4] 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.
YAN Sheng-biao. Typhoon Harm to Wind Farm and Countermeasures[J]. Energy and environment, 2012, 31(4): 43-44.
- [5] 于午铭. 台风“杜鹃”的危害与思考[C]// 中国电机工程学会学术年会论文集. 北京: 中国电机工程学会, 2004.
YU Wu-ming. The Damage and Thought of Typhoon “Dujuan”[C]// Chinese Institute of Electrical Engineering Academic Essays. Beijing: Chinese Society of Electrical Engineering, 2004.
- [6] 吴金城. “桑美”台风的影响和启示[J]. 中国风能, 2008, 2(2): 11-18.
WU Jin-cheng. The Influence and Enlightenment of “Saomai” Typhoon[J]. China Wind Power, 2008, 2(2): 1-18.
- [7] 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.
WU Jin-cheng, ZHANG Rong-yan, ZHANG Xiu-zhi. The Typhoon Design of Offshore Wind Turbines[J]. China Engineering Science, 2010, 12(11): 25-31.
- [8] GB/T 31519—2015, 台风型风力发电机组[S].
GB/T 31519—2015, Wind Turbine Generator System under Typhoon Condition[S].
- [9] 廖高华, 乐韵斐, 周文. 风电桨叶疲劳加载综合测试系统[J]. 仪表技术与传感器, 2015(2): 43-45.
LIAO Gao-hua, LE Yun-fei, ZHOU Wen. Comprehensive Test System of Wind Turbine Blade Fatigue Loading[J]. Instrument Technology and Sensor, 2015(2): 43-45.
- [10] 梁颖. 风电叶片疲劳测试动态应变受温度的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(6): 82-84.
LIANG Ying. Dynamic Modeling and Simulation Analysis of Wind Turbine[J]. FRP/Conforming Material, 2016(6): 82-84.
- [11] 辛金明. 风力发电机组动力学建模及仿真分析[J]. 中国新技术新茶品, 2017(5): 10-11.
XIN Jin-ming. Dynamic Modeling and Simulation Analysis of Wind Turbine[J]. New Technology and Tea Products in China, 2017(5): 10-11.
- [12] 陈祺. 台风型风力发电机组关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
CHEN Qi. Key Technologies of Typhoon Wind Turbine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.