

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.03.005

提高切出风速限功率运行对 MW 级风机的影响研究

刘晓辉,耿丽红,曹胜平,李成晨,程林志
(许昌许继风电科技有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:针对提高风电机组切出风速增大发电量会造成机组载荷过大等问题,基于叶素理论、惯性定律等力学基本理论对机组各部件载荷进行了理论计算研究,提出了一种提高切出风速限功率运行的方法,以 NWP 和 NTM 风模型作为仿真条件,利用 bladed 载荷仿真软件,对某公司 2 MW 风电机组开展了提高切出风速限功率运行的仿真试验研究。研究结果表明,在机组设计载荷范围内,通过提高切出风速限功率运行的方法可以提高理论年发电量约 0.76%,机组各部件等效疲劳载荷随功率的增加而增大,极限载荷随输出功率的变化呈不同变化趋势,其与理论分析基本一致。该研究结果为计算 MW 级风电机组包络载荷、设定切出风速提供了参考。

关键词:风电机组;限功率;切出风速;载荷;年发电量

中图分类号:TH123.3;TM614

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)03-0235-05

Effect of power limited above cut out wind speed on MW wind turbines

LIU Xiao-hui, GENG Li-hong, CAO sheng-ping, LI Cheng-chen, CHENG Lin-zhi
(Xuchang XJ Group Wind Power Technology Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the wind turbine's loads would be increased when the cut out wind speed was increased to improve the energy production, the theoretical calculation based on blade element momentum and inertia law about components loads of the turbine were conducted, a method of power limited above cut out wind speed was proposed, the power limited simulation test research on a 2 MW wind turbine of a company based on BLADED software was performed, using the NWP and NTM wind model as the simulation external condition. The results indicate that this method can improve the theoretical annual energy production about 0.76%, and the fatigue loads increase with the increasing output power, while the ultimate loads show the different changing trends, which consistent with the theoretical calculation. The results can provide some reference for the envelope loads calculation and cut out wind speed setting.

Key words: wind turbine; power limited; cut out wind speed; loads; energy production

0 引言

依据国家“十三五”对能源建设的规划,确定 2020 年非化石能源占比达到 15% 以上,其中作为清洁可再生绿色能源的风能在能源领域起到越来越重要的作用^[1-2]。目前对风资源利用的主要形式是采用风力机组发电,随着机组向大型化、轻量化、通用化方向的发展,风电机组的市场竞争愈来愈激烈,如何在保证机组安全可靠运行的基础上提高机组经济效益增加发电量成为各整机厂家的一个重要的研究方向。

本研究主要采用提高机组切出风速的方法实现机

组发电量的提高以增加经济效益。而机组运行在复杂的自然环境中,所承受的载荷非常复杂^[3-4],提高切出风速必然会导致机组载荷增加^[5]。通过研究提高切出风速限功率运行对机组载荷的影响可以提高机组发电量具有重要的现实意义。

本研究基于叶素理论惯性定律等力学基本理论对机组各部件载荷进行理论计算研究,提出一种提高切出风速限功率运行的方法。

1 风力机组各零部件载荷的确定

风电机组依靠风轮将风能转换成机械能,机械能

收稿日期:2016-09-30

作者简介:刘晓辉(1987-),女,河南许昌人,工程师,主要从事风电机组载荷计算及风电场校核方面的研究。E-mail:liuxiaohui87@163.com

经过传动链传递到发电机,由发电机将机械能转化为电能。矗立在高空中的风电机组在运行过程中承受复杂的力和力矩的作用,主要有风剪切、重力、塔影、风轮周期性转动、偏航运行产生的周期性载荷,风速随机变化及复杂的湍流产生的随机载荷,启动、停机、脱网及变桨动作产生的瞬态载荷,塔架形变、叶片形变、传动链的振动等产生的谐振载荷,以上载荷在控制策略的调节下融合在一起形成机组各部件所受载荷^[6-7],以下假设机组只承受空气动力、重力、离心惯性力作用,分析机组各部件所承受理论载荷。

1.1 风电机组叶片的基本载荷

1.1.1 空气动力载荷

根据叶素理论,参考叶素截面的受力分解,在叶片坐标系(S)中,参见 GL2010^[8],叶片每个单位长度的截面空气动力为:

$$F_{y-sa} = \frac{1}{2}\rho W^2 C(C_1 \sin\alpha - C_d \cos\alpha) \quad (1)$$

$$F_{x-sa} = \frac{1}{2}\rho W^2 C(C_1 \cos\alpha + C_d \sin\alpha) \quad (2)$$

同理,叶根坐标系(B)中,参见 GL2010,叶根空气动力为叶片各个截面空气动力的累加。

空气动力剪力:

$$F_{y-ba} = \int_r^R \frac{1}{2}\rho W^2 C(C_1 \sin\theta - C_d \cos\theta) dr \quad (3)$$

$$F_{x-ba} = \int_r^R \frac{1}{2}\rho W^2 C(C_1 \cos\theta + C_d \sin\theta) dr \quad (4)$$

空气动力弯矩:

$$M_{x-ba} = \int_r^R \frac{1}{2}\rho W^2 C(C_1 \sin\theta - C_d \cos\theta)(r_1 - r) dr_1 \quad (5)$$

$$M_{y-ba} = \int_r^R \frac{1}{2}\rho W^2 C(C_1 \cos\theta + C_d \sin\theta)(r_1 - r) dr_1 \quad (6)$$

空气动力扭矩:

$$M_{z-ba} = - \left[\int_r^R R_r F_{y-ba}(X_p - X_c) dr + \int_r^R F_{x-ba}(Y_p - Y_c) dr_1 \right] \quad (7)$$

式中: ρ —空气密度; W —垂直旋转平面来流风速; C —叶片弦长; C_1, C_d —剖面翼型升力系数和阻力系数; θ —入流角; α —攻角; R —风轮直径; r —叶根距离风轮中心的距离; P —翼型压力中心; C —叶片各截面变桨扭转中心,假设叶片安装角减小的方向为 M_{x-ba} 的正方向。

1.1.2 重力载荷

叶片在转动过程或者静止中均受到重力作用,重力在叶根坐标系(B)中的分力随着叶片的方位角 ωt 的变化而变化,同时也与叶片的安装角 δ 相关。

重力拉力或压力:

$$F_{z-bg} = \int_r^R \rho A g \cdot \cos\omega t \cdot \cos\theta dr \quad (8)$$

重力剪力:

$$F_{y-bg} = \int_r^R \rho A g \cdot \sin\omega t \cdot \cos\theta dr \quad (9)$$

重力弯矩:

$$M_{x-bg} = - \int_r^R (r_1 - r) F_{y-bg} dr \quad (10)$$

重力扭矩:

$$M_{z-bg} = \int_r^R \rho A g (X_c - X_g) dr_1 \quad (11)$$

式中: ρ —叶片材料密度, ωt —叶片方位角, θ —叶片安装角, A —叶片沿 r 到 R 各个截面面积, g —重力加速度, R —风轮直径, r —叶根距离风轮中心的距离, G —叶片各截面重心位置, C —叶片各截面变桨扭转中心。

1.1.3 离心惯性载荷

由于当风轮沿主轴旋转时,叶片各个截面在旋转平面内产生离心力,在叶根坐标系(B)中,离心力作用对叶根的主要作用为如下,

离心作用产生的拉力:

$$F_{z-bp} = \int_r^R \rho A g \cos\theta dr \quad (12)$$

离心惯性作用产生的推力:

$$F_{x-bp} = \int_r^R \rho A g \sin\theta dr \quad (13)$$

离心力扭矩:

$$M_{z-bp} = \int_r^R R_r \rho A g \cos\theta (Y_B - Y_R) dr \quad (14)$$

离心力弯矩:

$$M_{y-bp} = \int_r^R \rho A g \sin\theta (Z_B - Z_R) dr + \int_r^R \rho A g \cos\theta (X_B - X_R) dr \quad (15)$$

式中: ρ —叶片材料密度, ω —叶轮旋转角速度, θ —叶片安装角, A —叶片沿 r 到 R 各个截面面积, g —重力加速度, R —风轮直径, r —叶根距离风轮中心的距离, B —叶根坐标系原点, R —轮毂坐标系原点。

综上所述,在叶根坐标系(B)中,叶根载荷分别为:

$$F_{x-b} = F_{x-ba} + F_{x-bp} \quad (16)$$

$$F_{y-b} = F_{y-ba} + F_{y-bp} \quad (17)$$

$$F_{z-b} = F_{z-ba} + F_{z-bp} \quad (18)$$

$$M_{x-b} = M_{x-ba} + M_{x-bp} \quad (19)$$

$$M_{y-b} = M_{y-ba} + M_{y-bp} \quad (20)$$

$$M_{z-b} = M_{z-ba} + M_{z-bg} + M_{z-bp} \quad (21)$$

1.2 风电机组风轮的基本载荷

将 3 个叶片的叶根载荷折算到轮毂转动坐标系(R)中,风轮所受载荷如下:

$$F_{x-r} = \sum_{i=1}^3 (F_{x-bi} \cos(\theta + \delta) + F_{z-bi} \sin(\theta + \delta) + G_R \sin\delta) \quad (22)$$

$$F_{y-r} = (F_{y-b1} - F_{y-b2} * \sin 30 - F_{x-b3} * \cos 30) + G_R \cos \delta \sin \omega t \quad (23)$$

$$F_{z-r} = \sum_{i=1}^3 (F_{x-bi} \sin(\theta + \delta) + F_{z-bi} \cos(\theta + \delta)) + G_R \cos \delta \cos \omega t \quad (24)$$

$$M_{x-r} = \sum_{i=1}^3 \{ [F_{x-bi} \sin(\theta + \delta) + F_{z-bi} \cdot \cos(\theta + \delta)] (Y_{Bi} - Y_R) \} + \sum_{i=1}^3 \{ [F_{y-bi} \cos(\theta + \delta) + F_{s-bi} \cdot \sin(\theta + \delta)] (Z_{Bi} - Z_R) \} + G_R \cos \delta (Y_G - Y_R) \quad (25)$$

$$M_{y-r} = \sum_{i=1}^3 \{ [F_{x-bi} \cos(\theta + \delta) + F_{z-bi} \cdot \sin(\theta + \delta)] (Z_{Bi} - Z_R) \} + \sum_{i=1}^3 \{ [F_{z-bi} \cos(\theta + \delta) + F_{x-bi} \sin(\theta + \delta)] (X_{Bi} - X_R) \} + G_R \cos \delta (X_G - X_R) \quad (26)$$

$$M_{z-r} = \sum_{i=1}^3 \{ [F_{x-bi} \cos(\theta + \delta) + F_{z-bi} \cdot \sin(\theta + \delta)] (Y_{Bi} - Y_R) \} + \sum_{i=1}^3 \{ [F_{y-bi} \cdot \cos(\theta + \delta) + F_{x-bi} \sin(\theta + \delta)] (X_{Bi} - X_R) \} \quad (27)$$

式中: $i=1,2,3$ —叶片1,2,3; ω —叶轮旋转角速度; θ —叶片安装角; δ —主轴倾角; G_R —风轮重力; G —风轮重心位置; B —叶根坐标系原点; R —轮毂坐标系原点。

1.3 风电机组塔架的基本载荷

塔架主要承受作用在风轮上的空气动力、离心力,机舱和叶轮的重力,风切变引起的俯仰力矩及偏航动作产生的陀螺力矩,塔架坐标系中(T),塔顶承受的载荷如下:

$$F_{x-t} = F_{x-r} \cos \delta \quad (28)$$

$$F_{y-t} = F_{y-r} \cos \delta \cos \omega t \quad (29)$$

$$F_{z-t} = \frac{F_{z-r}}{\cos \delta} + G_h \quad (30)$$

$$M_{y-t} = M_{x-r} + G_h (Y_G - Y_T) \quad (31)$$

$$M_{y-t} = G_h (X_G - X_T) + F_{z-r} (X_R - X_T) + F_{x-r} (Z_R - X_T) + M_{y-rF} \quad (32)$$

$$M_{z-t} = M_{d1} + M_{d2} + F_{x-r} \cos \delta (X_R - X_T) + F_{x-r} \cos \delta (Y_R - Y_T) \quad (33)$$

式中: ω —叶轮旋转角速度; δ —主轴倾角; G_h —包含风轮和机舱的机头重力; G —机头重心位置; R —轮毂坐标系原点; T —塔顶坐标系原点。

风速差造成的俯仰力矩:

$$M_{y-rF} = \frac{8}{81} \rho \pi R^3 (V_1^2 - V_2^2) \quad (34)$$

式中: ρ —空气料密度; R —风轮直径; V_1, V_2 —塔顶和塔底风速; M_{d1}, M_{d2} —叶片变桨产生的陀螺力矩和机

舱偏航产生的陀螺力矩。

2 降功率运行仿真试验

以某公司生产的 2 000 kW 变速变桨双馈风电机组为例进行仿真分析,该机组的主要参数如表 1 所示。

表 1 机组的主要参数表

设计名称	参数	单位
叶轮直径	93.13	m
叶片数目	3	片
轮毂中心高度	80	m
主轴倾角	4.5	°
叶片安装角度	3	°
齿轮箱速比	114.65	
年平均风速	7.5	m/s
切入风速	3	m/s
切出风速	20	m/s
额定风速	10	m/s

依据机组的功率/转矩-转速曲线,如图 1 所示,设置运行功率限值为 2 000 kW, 1 800 kW, 1 600 kW, 1 200 kW, 800 kW, 将机组切出风速提高至 25 m/s, 风速分别设置为 21 m/s、22 m/s、23 m/s、24 m/s、25 m/s, 风模型分别选择均匀风(NWP)和湍流风(NTM), 风速、风模型与机组设置的运行功率交叉做全因素仿真分析, 工况设置参考 GL2010。

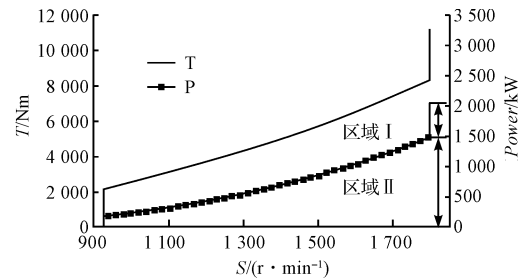


图 1 机组的功率/转矩-转速曲线

3 仿真计算与结果分析

机组满功率运行在设计切出风速以上时,机组的风能捕获量会提高,同时必然导致机组极限和疲劳载荷增加,影响机组寿命^[9-12]。本研究主要是通过降低运行功率的方法使机组安全运行在切出风速以上,这样可以在保证机组安全运行的前提下最大限度捕获风能。

3.1 机组年发电量

风电机组所吸收的风能取决于功率-风速特性曲线及机位点所在位置的风速分布情况。本研究采用提高切出风速的方法,在保证机组安全前提下,仿真计算出切出风速以上各风速段内最大输出功率,绘制静态功率-风速特性曲线,如图 2 所示。

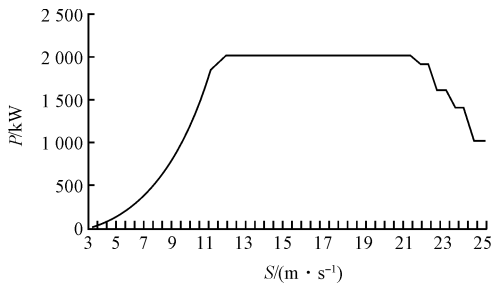


图2 静态功率-风速特性曲线

假设该机位点风速服从 Rayleigh 分布,则该机组的理论年发电量较提高切入风速以前提高了 0.76%。

3.2 均匀风下机组载荷变化

本研究统计出不同运行功率情况下机组不同位置处如:叶根、轮毂中心和塔顶处主载荷变化趋势,如图 3(a~c)所示,其中图示各数据点为 5 个风速 21 m/s ~ 25 m/s 下的平均值。

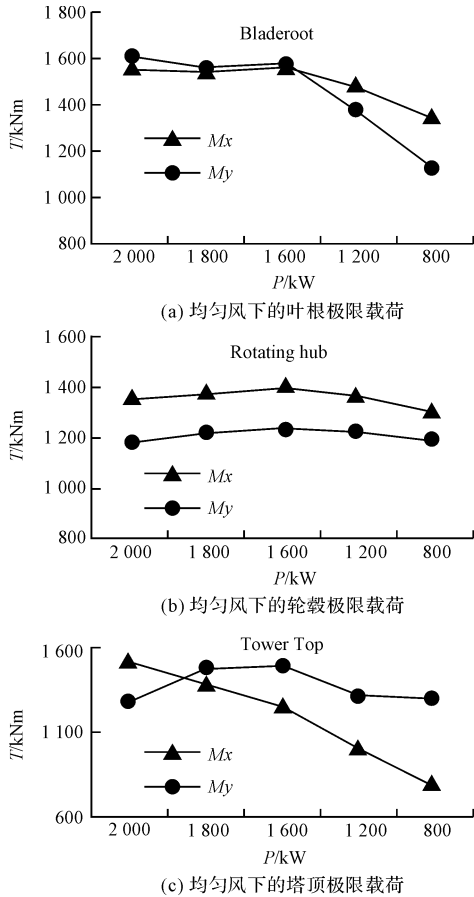


图3 abc 均匀风下机组极限载荷变化

由图 3(a~c)可知:叶根 M_x 、 M_y 、塔顶 M_x 随机组输出功率的降低而降低,输出功率范围 II 下降速率明显大于范围 I; 轮毂 M_y 、 M_z 及塔顶 M_y 在输出功率范围 I 内随输出功率的降低而升高,输出功率范围 II 内,随功率的降低而降低。造成图 3 变化趋势的主要原因是输出功率范围 I 内机组转速不变,入流角不变,攻角

随桨距角的增大而减小,各部件所受的气动载荷变化比较小,使得载荷波动比较小;输出功率范围 II 内风轮转速发生变化,叶片入流角、攻角及桨距角均变化,载荷随功率降低迅速减小。

3.3 湍流风下机组载荷变化

(1) 极限载荷变化

仿真所采用的湍流风模型与实际现场的风比较接近,其风速和风向在时刻变化,需要调整桨距角和偏航角度以保证机组所需的扭矩和转速,仿真过程中载荷既与第 2 节所提到的基本载荷有关,还与机组的振动、控制策略等相关,是一个比较复杂的时间序列。

本研究统计出不同运行功率情况下机组不同位置处如:叶根、轮毂中心和塔顶处主载荷变化趋势,如图 4(a~c)所示,其中图示各数据点为 5 个风速 21 m/s ~ 25 m/s 下的平均值,其趋势与均匀风下机组极限载荷的变化趋势相一致。在输出功率区域 I 内,降低机组运行功率对降低机组极限载荷作用不明显,在区域 II 内,限功率对机组载荷的影响显著。

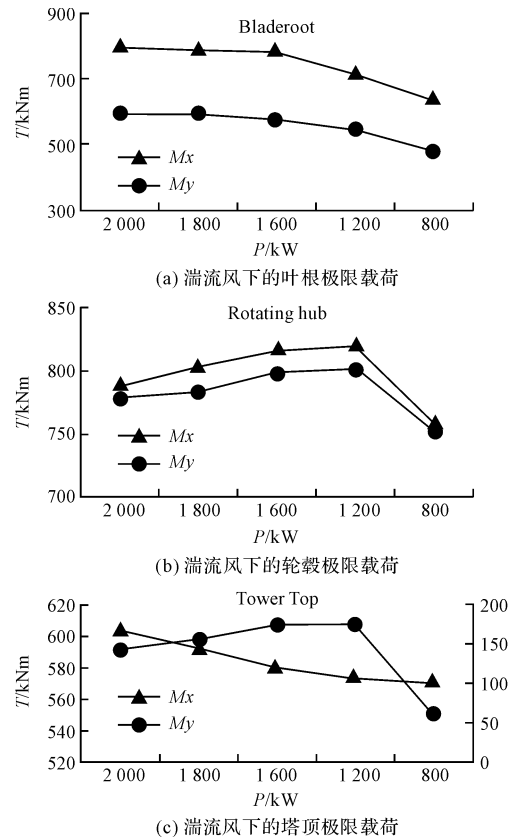


图4 abc 湍流风下机组极限载荷变化

(2) 等效疲劳载荷

本研究将仿真所得时间序列载荷等效为频率为 1 Hz 的等效疲劳载荷。等效疲劳载荷 L_{eq} 计算方法如下:

$$L_{eq} = \left(\frac{\sum R_i^m \times n_i}{N_{eq}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (35)$$

式中: R_i —第*i*个级别的应力幅值; n_i —第*i*个级别的应力循环次数; N_{eq} —等效应力循环次数, $N_{eq} = 600\text{ s} \times 1\text{ Hz}$ 。

不同风速不同输出功率时轮毂中心等效疲劳载荷如图5所示,其他部件处载荷变化趋势同轮毂中心处。由图5可知:在同一输出功率下,等效疲劳载荷随风速的增大而增大;当平均风速不变,等效疲劳载荷随输出功率的增加而增大。

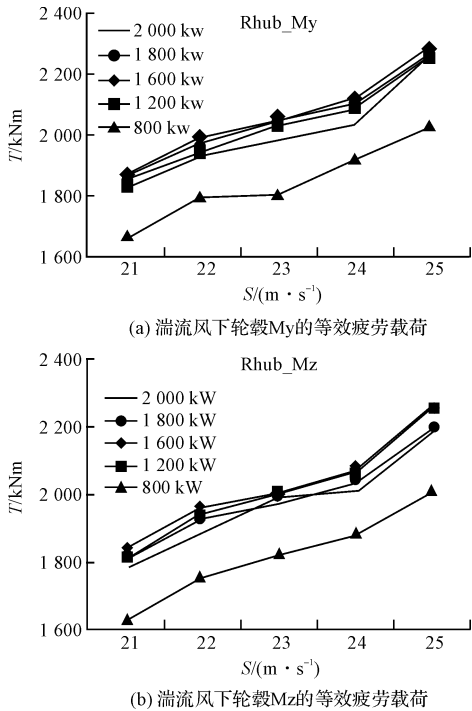


图5 ab 湍流风下机组等效疲劳载荷

4 结束语

本研究分析提高切出风速限功率运行对风电机组各部件极限载荷、疲劳载荷的影响,及其对机组年发电量的贡献。主要结论如下:

- (1) 采用提高切出风速限功率运行的方法,可以提高机组的理论年发电量,以仿真用机组为例,提高约0.76%。
- (2) 调节输出功率不一定要求风轮转速变化,因此在输出功率范围 I、II 内,如图1所示,机组载荷变化不一致:叶根 M_x 、 M_y ,塔顶 M_x 等随机组输出功率的降低而降低,输出功率范围 II 下降速率明显大于范围

I;轮毂 M_y 、 M_z 及塔顶 M_y 在输出功率范围 I 内随输出功率的降低而升高,输出功率范围 II 内,随功率的降低而降低。湍流风作用下机组的极限载荷与均匀风作用下的变化趋势一致。

(3)在同一湍流风作用下,风电机组等效疲劳载荷随输出功率的增加而增大,在同一输出功率下,疲劳载荷随平均风速的增大而增大。

参考文献(References):

[1] 孔屹刚,顾浩,王杰,等.基于风剪切和塔影效应的大型风力机载荷分析与功率控制[J].东南大学学报,2010,40(Z1):228-233.

[2] 霍娟,唐贵基,张穆勇,等.基于输出功率波动性的风电机组性能分析方法[J].可再生能源,2015,33(12):1809-1815.

[3] MA L, LUAN S Y, JIANG C W, et al. A review on the forecasting of wind speed and generated power[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2009, 13(4):915-920.

[4] 吴治坚,叶枝全,沈辉.新能源和可再生能源的利用[M].北京:机械工业出版社,2006.

[5] 韦微,陈冉,陈家伟,等.基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制[J].中国电机工程学报,2011,31(17):121-126.

[6] 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.

[7] 李本立,宋宪耕,贺德馨,等.风力机结构动力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,1999.

[8] Grmanischer Lloyd Industrial Services GmbH. Guideline for the Certification of Wind Turbines[M]. Vetersen: Heydorn Drackerei and Verlag, 2003.

[9] 孙春顺,王耀南,李欣然.飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J].中国电机工程学报,2008,28(29):111-116.

[10] 张立强,练敏,张婧芳,等.液压型风力发电机的恒转速控制[J].液压气动与密封,2015(2):37-39.

[11] 周丹.大功率风力机叶片模态及气动特性分析[J].流体机械,2015,43(12):33-36.

[12] ROOHOLLAH F, GERRY M, MEHRDAD M. The impact of tower shadow, yaw error, and wind shears on power quality in a wind-diesel system[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2009, 24(1):102-111.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

刘晓辉,耿丽红,曹胜平,等.提高切出风速限功率运行对MW级风机的影响研究[J].机电工程,2017,34(3):235-239.

LIU Xiao-hui¹, GENG Li-hong, CAO sheng-ping, et al. Effect of power limited above cut out wind speed on MW wind turbines[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(3):235-239.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>