

# 风电机组叶片载荷发散问题研究

## Research on the Load Divergence of Wind Turbine Blades

谢立

Li Xie

龙源陕西风力发电有限公司 中国·陕西 西安 710076

Longyuan Shaanxi Wind Power Generation Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710076, China

**摘要:** 随着社会用电需求的不断增大, 电力工程建设数量也逐渐增多。近年来, 风机厂商的竞争日益激烈。为降低度电成本, 提高竞争力, 长叶片大容量的机组成为了发展趋势。风力发电机组运转过程中, 气动力、弹性和惯性力相互耦合, 易引起叶片发散震荡。随着叶片的加长这种发散震荡更为明显。论文就风电机组叶片载荷发散问题展开探讨。

**Abstract:** With the increasing demand of social electricity, the number of power engineering construction is gradually increasing. In recent years, competition among fan manufacturers is increasingly fierce. In order to reduce the cost of electricity and improve competitiveness, long blade large capacity units have become a development trend. During the operation of the wind turbine unit, the aerodynamic force, elastic force and inertial force are coupled to each other, which can easily cause blade divergence and shock. This divergent shock is more pronounced as the blade grows. This paper discusses the load divergence of wind turbine blades.

**关键词:** 风力发电机组; 叶片; 发散; 载荷; 扭转刚度

**Keywords:** wind turbine unit; blade; diverging; load; torsional stiffness

**DOI:** 10.12346/etr.v3i8.4038

### 1 引言

随着中国社会的不断发展, 风电机组的投入数量也在逐渐增多, 但是在风电机组的运行过程中经常会出现一系列故障, 不仅影响风电机组的发电效率, 还会导致中国电站设备的运行受到影响, 因此必须保证能够对风电机组的运行状态进行检测, 并且及时对风电机组的故障进行诊断, 从而保障风电机组的运营维护。

### 2 风电机组气动特性分析

风力机是通过风能的推动而旋转的机构, 主要为发电机转子旋转提供动能<sup>[1]</sup>。虽然能量守恒, 但风能推动风力机旋转时由于机械摩擦力等因素存在能量损失, 通常用特定的参数即风能利用系数代表风力机吸收风能效率。大多数风电机组的风能利用率为 40%, 甚至更少, 风力机输出功率关系如式 (1) 所示。

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (1)$$

其中,  $P$  为风力机的机械输出功率,  $W$ ;  $C_p$  为风能利用系数;  $\rho$  为空气密度,  $kgm^3$ ;  $A$  为风力机旋转一周的扫掠面积,  $m^2$ ;  $V$  为风速,  $m/s$ 。考虑风向对风力机的影响, 通常将式 (1) 中风能利用系数表示成式 (2)。

$$C_p = \left[ (1-a)^2 + x^2 (1+a')^2 \right] x C_x \sigma \quad (2)$$

其中,  $a$  为轴向诱导因子;  $a'$  为轴向诱导因子;  $x$  为叶素所在处来流风速比;  $\sigma$  为叶片实度;  $C_x$  为切向力系数。风电机组装机后叶片实度为常量, 而切向力系数受到外界因素影响, 随着翼型升力系数  $C_l$  和阻力系数  $C_d$  的变化而变化, 即:

$$C_x = C_l \left( \sin \phi - \frac{1}{C_l/C_d} \cos \phi \right) \quad (3)$$

其中,  $\phi$  为叶素所在处来流角度, ( $^\circ$ );  $C_l$  为升力系数, 为升力与气流动压和弦长的乘积之比;  $C_d$  为阻力系数, 为

【作者简介】谢立 (1989-), 男, 中国陕西大荔人, 本科, 助理工程师, 从事变电一二次、风力发电机组研究。

阻力与气流动压和弦长的乘积之比。因此，依据气动力学分析，风能作用在风力机叶片上的力，主要包括升力和阻力<sup>[2]</sup>。升力和阻力随外界因素变化而动态变化的趋势依次用升力系数和阻力系数表示，通常升力系数与阻力系数的比值即升阻比  $e$  也作为分析风电机组气动性能的重要参数。翼型剖面上气动力受力情况如图 1 所示。图中  $\omega_r$  为翼型剖面的旋转速度，rad/s； $V_r$  为相对速度，m/s； $\alpha$  为攻角，( $^\circ$ )。

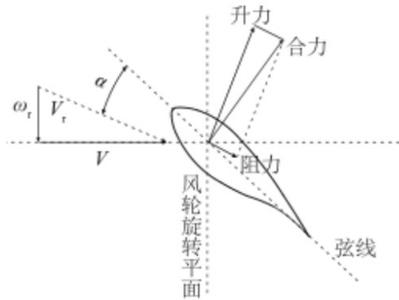


图 1 叶片的作用力

从图 1 可知，升力方向指向来流风速垂直的方向，风力机旋转方向垂直于气流相对速度方向；而阻力和升力在方向上垂直且平行于气流相对速度方向。根据叶素理论把风力机叶片从叶根到叶尖分成若干叶素，每个叶素截面存在差异导致不同叶素升力和阻力不再相等，通过积分原理分别将一个叶片所有叶素上分解的升力和阻力进行积分计算，即可得到叶片所受的升力和阻力<sup>[3]</sup>。在风能对各叶片所受升力共同作用下，风力机带动传动系统旋转，进而为发电机定子绕组切割磁感线提供动能。图 2 为风能利用率  $C_p$  和升阻比  $e$  的变化关系图。若叶尖速比  $\lambda$  不变，翼型升阻比  $e$  从 0 开始增大，风能利用系数  $C_p$  先迅速升高，然后逐渐稳定在一个范围内；若升阻比  $e$  不变，叶尖速比  $\lambda$  变化，风能利用系数  $C_p$  达到临界值又有所差异。

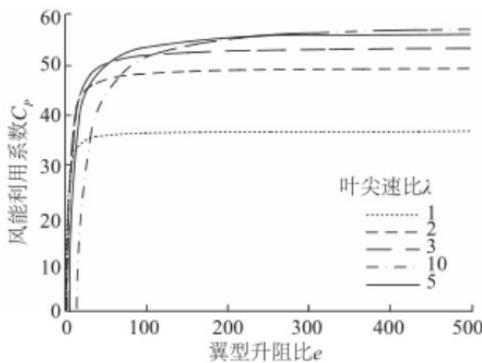


图 2 风能利用率随升阻比变化曲线

### 3 风电机组运行过程故障分析

①叶片故障。发电机运行过程中只有叶片能够正常转动才能不断产生电力能源，所以叶片转动为发电机稳定运行的关键。然而叶片转动时可能受到电机设备以及本身自重等因

素影响，若叶片处于不利环境当中运行可能受到损坏，还可能导致其他故障的发生。

②变流器故障。通常变流器中电流和电压存在异常问题时就可导致机组变流器故障，发电机工作时电流与电压如果过热可能出现欠压问题，导致机组中流经电流及电压高于极限值，长期下去可损坏变流器或使其出现故障。

③异常振动。当发电机运行时，异常振动问题主要有三方面原因：电机设计方面存在不足，其中零件精度和标准不符，这些不达标零件可能在电机转动期间产生偏移问题，最终导致异常振动；发电机在长期运行时零件出现松动，导致转子质心和发电机旋转中心难以重合，进而发生偏离问题，导致机器出现异常振动；发电机操作、维修和养护与标准不符，也容易出现此类问题。

### 4 风电机组的故障特征分析

目前风电机组出现故障，主要是因为风电机组的工作环境相对较为恶劣，并且因为风速在不断地变化，各个部件之间也会在不断变化的整合能力下，受到频繁的冲击，进而容易产生损坏，通过对风电机组中运营商进行台账数据的统计分析可以明确风电机组的故障损失，主要体现在以下几点，首先是风电机组中的叶片故障占有的比例最大，其次是齿轮箱也会发生较多的故障，同时发电机在运行的过程中，其发电机及变流器的故障占有的比例也相对较多，最后是风电机组中的主轴和电气设备等也会出现一定的故障。目前针对风电机组各个不同部分的故障，必须保证能够配备故障部件的备品备件库，从而使风电机组在发生故障的过程中，能够通过相应的检测和监控提高故障的维修效率，进而降低故障所带来的经济损失。所以目前根据风电机组的故障特征分析可以发现，确保能够选择更加合理的监控措施，加上故障的诊断以及故障的预知能力提高，是当前针对风电机组进行状态检测技术应用的主要发展趋势。

### 5 叶片发散现象与解决措施

机组配套叶片在设计过程中，需要与机组平台进行整机仿真计算分析，调整控制策略，并根据载荷计算结果校核叶片和机组平台安全性。某配套 71.5m 叶片，用于 2.5MW 机组平台，在运用 DNV-GL 商用软件 Bladed 进行载荷仿真计算过程中，出现了载荷震荡发散现象，机组模型的主要参数见表 1。

表 1 机组模型主要参数

模型参数	数值	单位
额定功率	2500	kW
风轮直径	147	m
轮毂中心高度	90	m
额定风速	8.9	m/s

仿真计算结果如图3所示，横轴为时间，纵轴为与12m/s时极大值的比值。

从图中可以看出叶根  $M_x$  和  $M_y$  在额定以下风速 6m/s 时不发散；在额定风速附近 8m/s、8.9m/s、10m/s 时发生了震荡发散，且在额定风速 8.9m/s 时震荡最严重；大风速

12m/s 时不发散。

叶片的扭转刚度对叶片发散具有很大的影响，对叶片的扭转刚度分布进行调整，并对调整的叶片重新进行载荷计算。载荷和转速均无出现震荡发散现象。调整扭转刚度对解决叶片发散问题具有明显的效果。

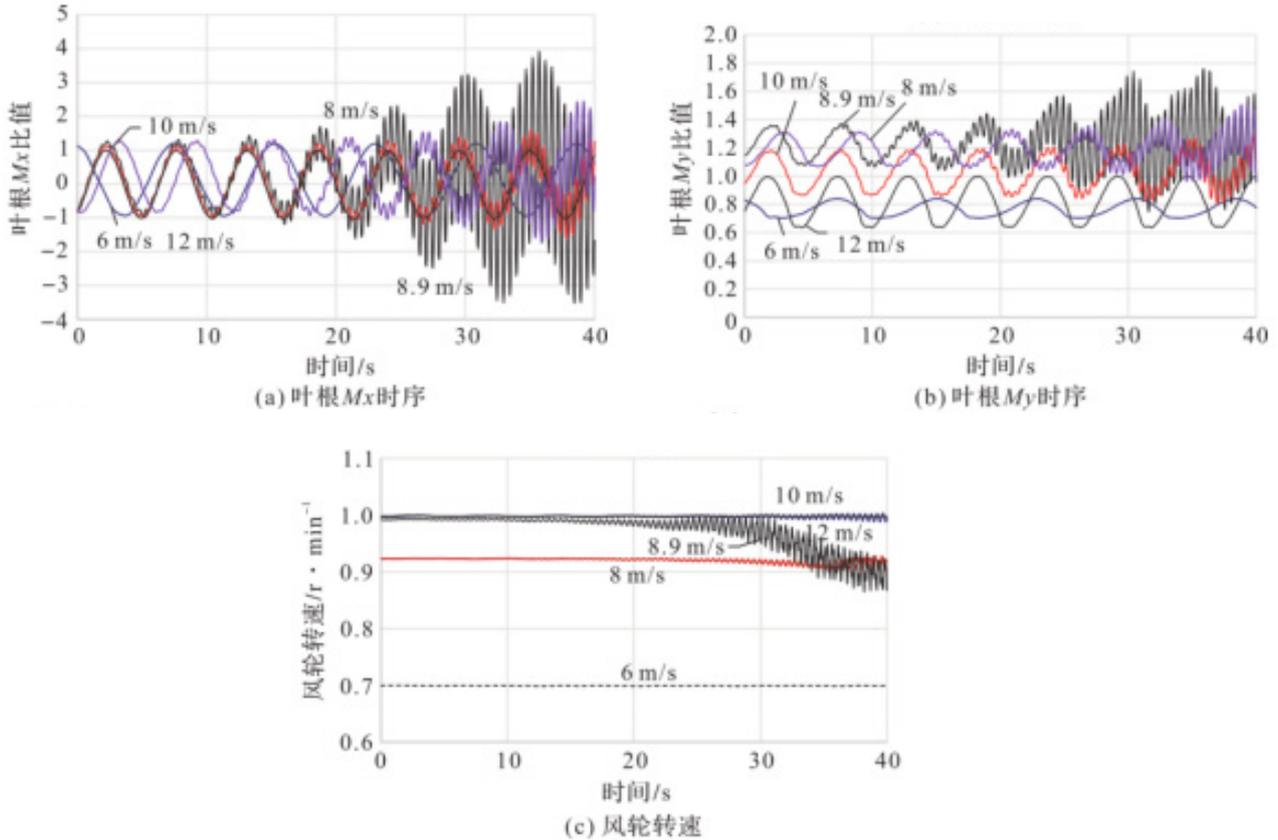


图3 叶片载荷发散现象时序分布

## 6 结语

总之，在风电场内发电机安全运行是风电场运行效率重要保障。因此机组运行问题十分重要，相关人员需高度重视并采取有效措施展开管理，降低机组发生故障率，使风电行业持续发展。通过调整叶片扭转刚度分布及多次仿真计算迭代，可有效解决叶片发散问题，为解决叶片稳定性问题提供方法。

## 参考文献

- [1] 孙丽萍,王昊,丁娇娇,等.风力发电机叶片的气动弹性及颤振研究综述[J].液压与气动,2019(10):1-5.
- [2] 李亮,李映辉,杨鄂川,等.风力机叶片挥舞—摆振气弹稳定性分析[J].噪声与振动控制,2019(5):30-34.
- [3] 魏峰.大型风电机组叶片颤振特性的研究[D].银川:宁夏大学,2019.