

风电叶片载荷稳定性优化设计方法研究

游慧鹏¹, 李国华^{1,2}, 张一楠^{1,2}, 高 猛¹, 孙安康¹, 郑 冰¹

(1. 中车山东风电有限公司, 济南 250104; 2. 中车科技创新(北京)有限公司, 北京 100192)

摘 要: 通过优化叶片的气动外形和结构设计提供一种降载方法。采用GH-Bladed计算平台验证6.25 MW风电叶片性能和机组载荷。研究发现,减小叶片迎风面积可有效降低叶片的载荷水平;减小叶片弦长对降低叶片根部载荷的影响最为显著,而减小叶片相对厚度对降低载荷的效果并不显著,减小叶片相对厚度是一种提高气动性能降低载荷的有效手段。此外,主梁厚度可改变叶片刚度进而影响叶片挥舞方向的变形,通过调整叶片主梁的厚度来释放集中应力进而扩大叶片挥舞变形可实现叶片的降载。

关键词: 风电叶片; 发电量; 载荷分析; 稳定性; 气动外形; 主梁结构

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引 言

风能作为清洁能源的重要组成部分,在当前的能源市场中起到至关重要的作用^[1]。近年来,风能利用量呈指数级发展以满足不断增长的可再生能源需求。风电叶片是吸收风能的主要载体,也是风电机组的主要载荷来源^[2]。随着叶片尺寸达到百米级,开展长柔叶片设计已成为不断提高风能转换效率、降低发电成本的主要途径。由于风电机组的功率容量和叶片尺寸的增加,以及整机开发周期的大幅压缩,如何实现风电机组的高可靠性已成为风电行业面临的主要挑战^[3]。为提高风电机组的可靠性和安全性,减少风电机组每个组件(包括传动轴、发电机、机舱、塔架等)的载荷至关重要^[4-5]。风电机组主要部件上的载荷大都来自叶片^[6]。叶片疲劳载荷的降低有助于降低风电机组的制造成本,而叶片极限载荷的降低则有助于提高风电机组运行的稳定性。因此,探索降低叶片载荷的方法是提高风电机组安全性的核心问题^[7]。

叶片产生的载荷与其发电性能正相关,发电效率高的叶片必然会伴随着较高的载荷。因此,在风电叶片的设计过程中不能盲目考虑低载荷要求,将叶片载荷保持在较低水平的同时确保高发电性能是较为困难的。为降低风电机组的发电成本,风电叶片的设计长度不断增加^[8-9],导致载荷更高。同时,为保持市场竞争力,叶片的生产成本应不断降低。叶片结构的设计需减轻质量以保持较低的生产成本,但这也导致叶片的柔性不断增强^[10-11]。长柔叶片增加了叶片载荷分布的复杂性,并伴随着严重的气动弹性问题^[12-13]。然而,绝大多

数风电机组正逐渐采用更长、更轻的叶片设计以确保优异的风能利用效率并降低风电机组的发电成本,这给叶片带来巨大的安全风险^[14]。

叶片载荷稳定性主要通过优化外形设计完成,目前国内外学者对叶片外形设计的研究主要集中在优化风力机翼型的气动性能,以此来提升叶片发电效率^[15-18]。同时,以风电机组最大年发电量为目标开展了多目标优化设计研究工作,获得最优的叶片气动外形参数^[19-20]。在此基础上,相关学者考虑叶根受力与载荷对叶片性能的影响,进一步提升了叶片优化结果的可靠性^[21-22]。然而,这些传统方法更多地关注风电叶片本身的气动性能,并未充分考虑风电机组安全稳定性的设计需求。同时,结构铺层设计也会对叶片载荷稳定性产生一定影响。

完成叶片降载设计的同时保持优异的气动性能可有效避免过载或发电效率低的问题。叶片在降载优化过程中需确保叶片的发电量不会过多损失,这样才能具有更好的整机适应性和更突出的市场竞争力。本文通过平衡风电机组的发电量和载荷安全需求进行叶片改型设计。通过优化叶片的气动外形和结构设计匹配风电机组发电量和载荷水平的需求。通过优化叶片设计提高风电机组的发电性能和运行稳定性,以期为大功率风电叶片的设计提供一种安全可靠的解决方案。

1 叶片设计与整机载荷要求

本研究基于自主研发的大功率风力发电机组平台,采用变速变桨、偏航控制调节策略,表1为该机组运行参数。GH-

Bladed 是一款广泛应用于风力发电领域的风力发电机载荷仿真软件。本文基于 6.25 MW 风电机组构建 GH-Bladed 计算平台,用于评估发电性能和载荷水平。

表 1 风电机组参数

Table 1 Geometrical and operational parameters of wind turbine

参数	数值	参数	数值
设计风况	IEC III C	切出风速/(m/s)	20
叶片数量	3	额定风速/(m/s)	12.2
额定功率/MW	6.25	风轮直径/m	200
旋转方向	顺时针	轮毂高度/m	115
功率调节方式	变速、变桨	使用寿命/a	20
切入风速/(m/s)	3		

风电叶片在设计过程中需满足发电效率和载荷的要求,以匹配风电机组的开发指标。6.25 MW 风力发电机叶片设计要求如表 2 所示。根据整机设计要求,完成叶片初步选型,叶片的主要设计参数以及整机性能指标如表 3 所示。目前的叶片设计可满足总质量和发电量的要求,但叶根载荷为 29317 kN·m,超出风电机组设计所需的 27500 kN·m。由于运行过程中叶片根部载荷过大,叶片的疲劳和极限载荷水平都会给风电机组载荷带来更多的不确定性。因此,有必要通过调整叶片的气动外形和结构设计来优化降载。

表 2 风电叶片设计要求

Table 2 Design requirements for wind turbine blade

设计指标	叶片
功率系数	≥ 0.44
质量/t	≤ 27
叶根载荷(M_{xy})/(kN·m)	≤ 27500

表 3 叶片设计参数及性能指标

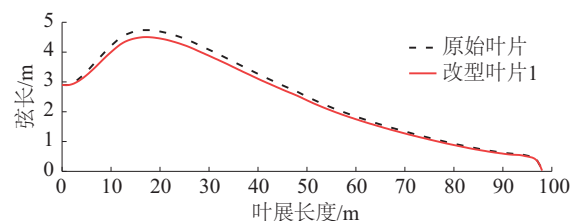
Table 3 Design parameters and performance indicators of blades

参数	数值	参数	数值
长度/m	98	一阶挥舞频率/Hz	0.3029
叶根节圆直径/mm	2800	二阶挥舞频率/Hz	0.7803
最大弦长/m	4.739	一阶摆阵频率/Hz	0.5119
叶尖预弯/m	5.6	二阶摆阵频率/Hz	1.3241
叶根扭角/(°)	20	一阶扭转频率/Hz	5.9955
稳态功率系数	0.442	叶根载荷(M_{xy})/	29317
质量/t	26.3	(kN·m)	

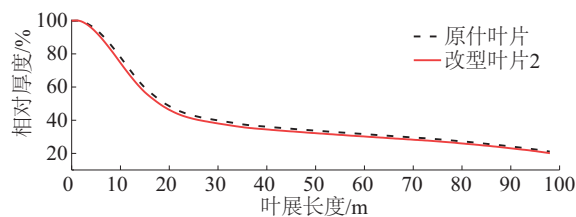
2 结果与讨论

2.1 叶片气动外形优化

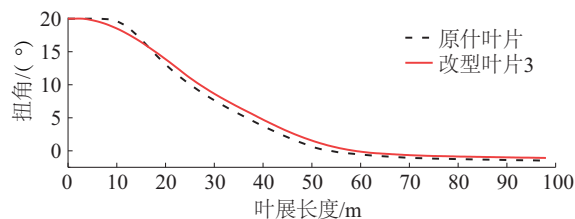
气动外形直接影响叶片受力分布的变化,因此调整叶片外形可有效控制载荷。通过减小叶片的迎风面积降低叶片所受载荷,根据的 3 种外形修改方法完成叶片降载调整(如图 1)分析原始叶片与改型叶片的载荷水平,改型方法:减小弦长(改型叶片 1)、减小相对厚度(改型叶片 2)、增加扭角(改型叶片 3)。



a. 弦长



b. 相对厚度



c. 扭角

图 1 叶片改型方法

Fig. 1 Comparison of blade configuration adjustments

2.2 叶片气动性能分析

采用 GH-Bladed 计算平台,分别对叶片、轮毂、传动链、发电机、塔架等部件进行参数设置,同时考虑入流风速与空气密度等风场环境参数以完成整机计算模型的构建,利用该整机模型对稳态工况进行计算并提取叶片性能分析所需参数。根据图 2 可看出,减小叶片弦长和增加叶片扭角都会导致发电量损失。此外,叶片功率系数的不足要求风电机组在更高的风速下达到额定功率,额定风速前的发电量也相应减少。改型叶片 1 和改型叶片 3 对应的功率系数分别为 0.427 和 0.431,而 6.25 MW 风电机组的设计要求功率系数高于 0.44,如表 1 所示。通过减小叶片的相对厚度,功率系数增加到 0.453,且在额定风速之前有助于提升风电机组的发电量。

相对较薄的叶片具有更好的气动性能,这提高了叶片的整体发电效率^[23-24],但叶片气动性能的提升会引起载荷水平的增加。然而,叶片的实际入流方向是机组来流风速 U_∞ 与风轮旋转速度 Ωr 的合成速度方向,与叶片弦长方向夹角为 α ,在该速度方向上叶片的受力会受到叶片的厚度影响,如图 3 所示。因此,减小叶片厚度可减小叶片的实际迎风面积,产生降低载荷的效果,这在一定程度上弥补了由于发电性能提升带来极限载荷突出的负面影响。

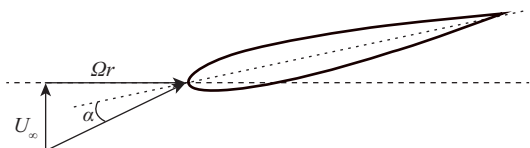
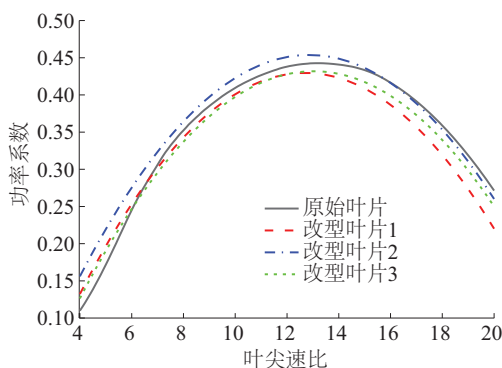
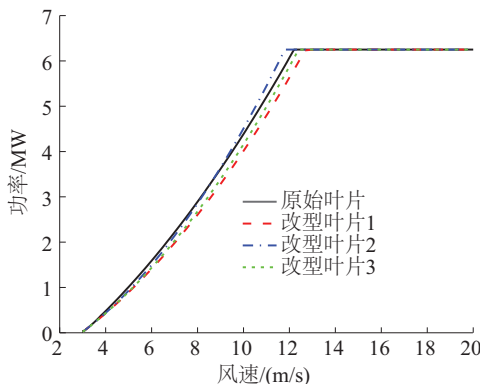


图2 叶片实际入流速度方向

Fig. 2 Actual inflow velocity direction of blade



a. 叶片功率系数



b. 机组功率

图3 不同改型方法的叶片功率系数及机组功率

Fig. 3 Power coefficient and power with different configuration adjustments

机组达到额定风速后采用变桨距控制来调整桨距角以减小叶片入流攻角,从而有效降低叶片失速的风险^[25-26]。如图 4 所示,在额定风速下改型叶片 1 和改型叶片 3 都会导致叶片入流攻角增加,这大大增加了叶片失速的风险^[27-28]。然而,减小叶片的相对厚度对叶片的入流攻角无明显影响,也有助于促进叶尖附近入流攻角的减小。

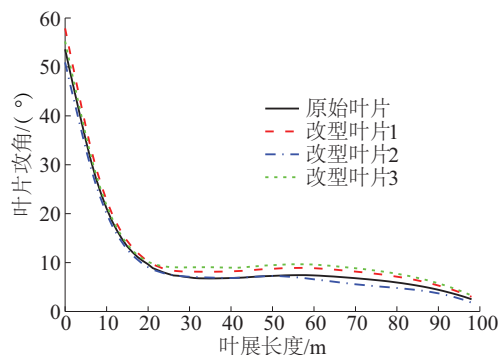


图4 不同改型方法的叶片攻角

Fig. 4 Blade attack angle with different configuration adjustments

2.3 叶片载荷分析

叶片迎风面积的减小导致气流对叶片施加的力减小,作用在叶片上的合力集中在叶片根部,如图 5 所示,叶片外形调整方法会引起叶片根部载荷的下降。其中,改型叶片 1 对降载效果最为显著,额定风速下叶片根部载荷达到最大值 27973 kN·m。减薄叶片相对厚度对降载的效果并不显著,最大载荷保持在约 29973 kN·m。虽然减小叶片厚度并不能显著改善高载荷问题,但可确保叶片的发电性能处于良好状态。因此,考虑到发电的设计指标,使用改型叶片 1 和改型叶片 3 的叶片降载方法无法满足 6.25 MW 风力发电机的设计要求。

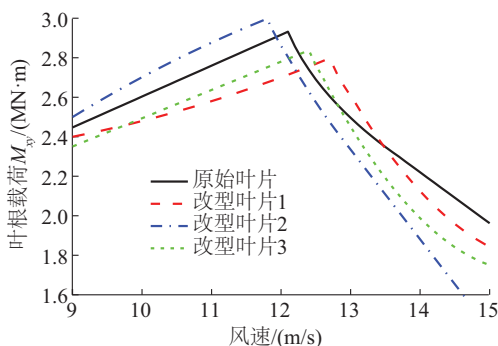


图5 不同改型方法的叶根载荷

Fig. 5 Blade root load with different configuration adjustments

为了满足叶根载荷不超过 27500 kN·m 的风电机组开发要求,根据改型叶片 2 的叶片相对厚度分布,图 6 设计了 3 种较薄的叶片厚度改型叶片 2-1、改型叶片 2-2 和改型叶片 2-3。然而,改型叶片 2-3 的根部载荷结果存在明显的发散问题,表明叶片厚度的过度减小已导致结构强度不足^[29],如图 7 所示。同时,过薄的叶片会导致刚度严重损失,从而增加叶片极端变形或断裂的风险。因此,改型叶片 2-2 的厚度已接近满足 6.25 MW 风电机组载荷要求的最小值。改型叶片 2-2 在额定风速下的叶根载荷为 27965 kN·m。虽然它特别接近设计要求,但叶片根部载荷仍高于 27500 kN·m 的设计预期。由于风电机组发电性能的限制,简单地调整叶片气动外形已

不足以进一步降低载荷水平。因此,需调整叶片的内部结构设计,以实现进一步降低载荷的目标。

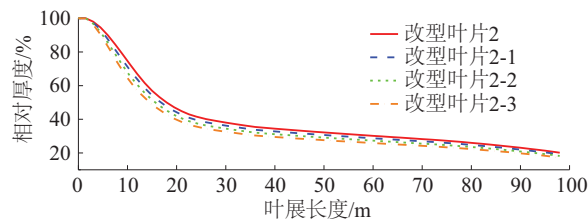


图6 不同叶片厚度调整方法

Fig. 6 Comparison of blades with different thickness adjustments

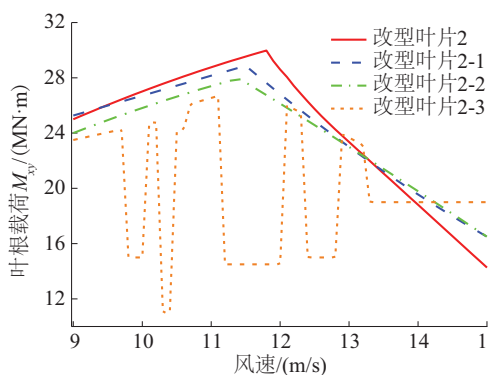


图7 不同叶片厚度调整方法的叶根载荷

Fig. 7 Blade root load with different thickness adjustments

2.4 叶片主梁结构调整

叶片主梁占其总质量的 21% 以上,提供 90% 的挥舞刚度,是风电叶片中重要的承重结构。此外,主梁的铺设厚度也对叶片的挥舞刚度有一定影响。叶片可通过挥舞变形释放集中应力,叶片上的载荷也会相应降低。根据改型叶片 2-2 叶片的结构设计,如图 8 所示,减小叶片迎风侧和背风侧的主梁铺设厚度以降低叶片的挥舞刚度。原改型叶片 2-2 的叶尖净空余量为 3.51 m,主梁厚度调整后的叶尖净空余量为 2.46 m,满足净空要求。

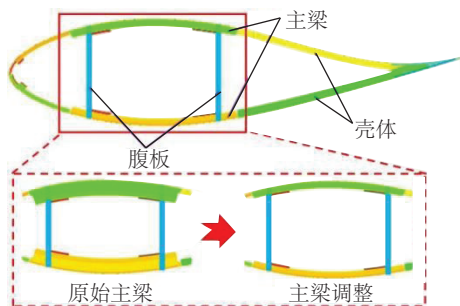


图8 叶片主梁调整示意

Fig. 8 Schematic diagram of blade spar cap adjustment

叶片在挥舞、摆阵和扭转方向上的结构频率如表 4 所示。叶片主梁厚度的减小伴随着挥舞和扭转频率的降低,而摆阵频率几乎不受影响。较薄的主梁结构应用可降低挥舞

刚度从而降低挥舞频率。采用有限元方法对叶片结构校核,重点对挥舞方向结构稳定性进行分析,结果如图 9 所示。最大挥舞方向上极限,最大拉应变 $+4123 \times 10^{-6}$ (μ 为应变单位)在压力面 5.65 m 蒙皮主梁区域,最大压应变 -4770×10^{-6} 在吸力面 46.5 m 蒙皮主梁前缘侧;挥舞方向疲劳工况,最大拉应变 $+1139 \times 10^{-6}$ 在压力面蒙皮主梁区域 6.2 m 处,最大压应变 -1123×10^{-6} 在吸力面蒙皮主梁偏后缘 5.6 m 处。经评估获得失效因子均小于 1,满足设计要求。此外,最大挥舞方向与最小挥舞方向的屈曲因子分别为 2.099 和 2.0968,均大于 2.042,满足风电叶片 GL 2010 设计标准要求。

表4 调整叶片结构频率

Table 4 Structural frequency of adjusted blades

参数	原始叶片	改型叶片 2-2	主梁调整叶片
一阶挥舞频率/Hz	0.3029	0.2731	0.2418
一阶摆阵频率/Hz	0.5119	0.5107	0.5101
一阶扭转频率/Hz	5.9955	5.8271	5.8246

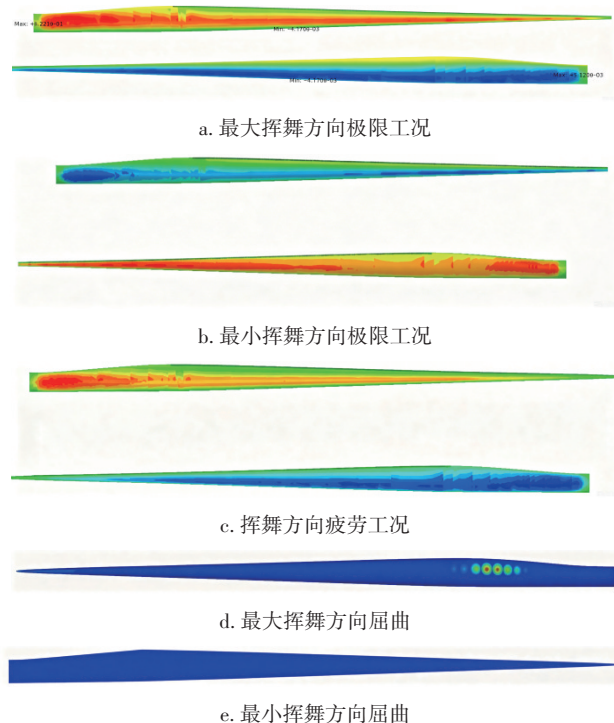


图9 叶片挥舞方向结构校核结果

Fig. 9 Structural verification results of blade flapping direction

2.5 叶片性能分析

通过调整主梁结构使叶片载荷降低的手段并未影响到叶片的气动外形,仅对叶片的结构刚度产生影响,即使叶片在挥舞与扭转方向的变形量增加,但对叶片原本的气动性能几乎不产生影响,因此对发电效率产生的影响很小。如图 10 所示,结构调整后的叶片功率系数在最佳叶尖速比附近降

低,风电机组达到额定功率的时间相对延迟,最关键的优点是通过调整叶片主梁结构可降低叶根载荷,额定风速下叶片的最大叶根载荷为 27418 kN·m,符合风电机组的设计要求。因此,通过调整主梁厚度可降低叶片的挥舞刚度,达到降低叶根载荷的目的。

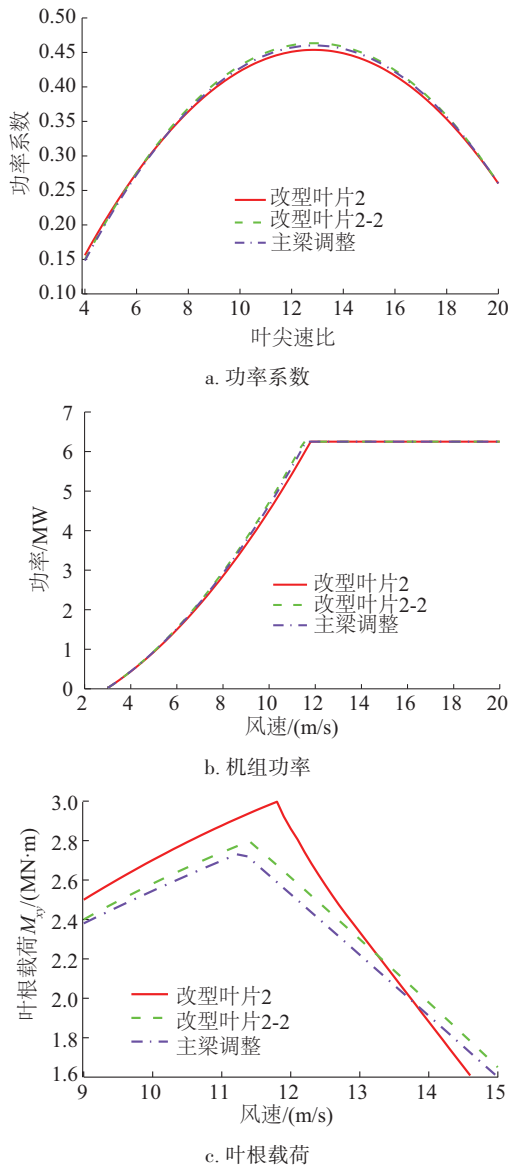


图10 不同主梁厚度叶片的功率系数、机组功率及叶根载荷

Fig. 10 Power coefficient, power and blade root load with different laying thickness of spar cap

3 结 论

本文通过平衡风电机组的发电量和载荷安全需求来进行叶片改型设计。通过优化叶片的气动外形和结构设计,为大功率风电机组叶片的设计提供一种安全可靠的解决方案,得出如下主要结论:

1)通过减小叶片弦长或相对厚度以及增加叶片扭角,叶

片迎风面积减小,有助于促进叶片载荷的降低。

2)减小叶片弦长和增加叶片扭角都会导致叶片功率系数和和机组发电量下降,而减小叶片相对厚度是一种可提高叶片气动性能同时降低叶片失速风险的外形调整方法。

3)减小叶片弦长对降低载荷的影响最为显著,而减小相对厚度对叶片载荷的降低并不明显。

4)主梁铺设厚度的变化对叶片的气动性能无影响,通过减小主梁的厚度可减弱叶片的挥舞刚度,叶片可通过挥舞和扭转变形释放集中应力,降低叶片载荷。

[参考文献]

- [1] 焦佳明, 毕俊喜, 葛新宇, 等. 基于优化LSTM模型的风力机叶片剩余使用寿命预测[J]. 太阳能学报, 2024, 45 (6): 495-502.
JIAO J M, BI J X, GE X Y, et al. Remaining useful life prediction of wind turbine blades based on optimized LSTM model [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45 (6): 495-502.
- [2] HOKSBERGEN T H, AKKERMAN R, BARAN I. Liquid droplet impact pressure on (elastic) solids for prediction of rain erosion loads on wind turbine blades [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2023, 233: 105319.
- [3] LI M Y, DIRIK Y, OTERKUS E, et al. Shape sensing of NREL 5 MW offshore wind turbine blade using iFEM methodology[J]. Ocean engineering, 2023, 273: 114036.
- [4] KURNIAWATI I, LUPI F, SEIDEL M, et al. Vortex shedding load on a full-scale wind turbine tower at transcritical Reynolds numbers [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2024, 252: 105821.
- [5] FITZGERALD B, MCAULIFFE J, BAISTHAKUR S, et al. Enhancing the reliability of floating offshore wind turbine towers subjected to misaligned wind-wave loading using tuned mass damper inerters (TMDIs) [J]. Renewable energy, 2023, 211: 522-538.
- [6] HOGHOOGHI H, CHOKANI N, ABHARI R S. A novel optimised nacelle to alleviate wind turbine unsteady loads [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2021, 219: 104817.
- [7] WANG B X, WANG L Z, LIANG X, et al. 3D multiscale dynamic analysis of offshore wind turbine blade under fully coupled loads[J]. Renewable energy, 2024, 223: 119985.
- [8] STANISLAWSKI B J, THEDIN R, SHARMA A, et al. Effect of the integral length scales of turbulent inflows on wind turbine loads [J]. Renewable energy, 2023, 217: 119218.

- [9] HORCAS S G, MADSEN M H A, SØRENSEN N N, et al. Influence of the installation of a trailing edge flap on the vortex induced vibrations of a wind turbine blade [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2022, 229: 105118.
- [10] VESEL R W, MCNAMARA J J. Performance enhancement and load reduction of a 5 MW wind turbine blade [J]. *Renewable energy*, 2014, 66: 391-401.
- [11] REZAEIHA A, KALKMAN I, BLOCKEN B. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine [J]. *Applied energy*, 2017, 197: 132-150.
- [12] YAN C, ARCHER C L. Assessing compressibility effects on the performance of large horizontal-axis wind turbines [J]. *Applied energy*, 2018, 212: 33-45.
- [13] GAO R Z, YANG J W, YANG H, et al. Wind-tunnel experimental study on aeroelastic response of flexible wind turbine blades under different wind conditions [J]. *Renewable energy*, 2023, 219: 119539.
- [14] TORREGROSA A J, GIL A, QUINTERO P, et al. On the effects of orthotropic materials in flutter protection of wind turbine flexible blades [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2022, 227: 105055.
- [15] 王威, 王军, 梁钟, 等. 基于熵产理论设计方法的多目标翼型优化 [J]. *空气动力学学报*, 2019, 37(5): 827-833.
- WANG W, WANG J, LIANG Z, et al. Entropy generation theory based design methodology for multi-objective airfoil shape optimization [J]. *Acta aerodynamica sinica*, 2019, 37(5): 827-833.
- [16] WEN H, SANG S, QIU C H, et al. A new optimization method of wind turbine airfoil performance based on Bessel equation and GABP artificial neural network [J]. *Energy*, 2019, 187: 116106.
- [17] 陈刚, 陈进, 孙振业, 等. 基于静气弹性能的风力机翼型设计 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(6): 8-15.
- CHEN G, CHEN J, SUN Z Y, et al. Airfoil design for wind turbines based on static-aeroelastic performance [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2020, 41(6): 8-15.
- [18] 姜海波, 曹树良, 李艳茹. 水平轴风力机叶片扭角和弦长的理想分布 [J]. *太阳能学报*, 2013, 34(1): 1-6.
- JIANG H B, CAO S L, LI Y R. Optimal twist and chord of the blades of horizontal axis wind turbine [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2013, 34(1): 1-6.
- [19] 刘雄, 陈严, 叶枝全. 水平轴风力机风轮叶片优化设计模型研究 [J]. *汕头大学学报 (自然科学版)*, 2006, 21(1): 44-49.
- LIU X, CHEN Y, YE Z Q. Research on the HAWT rotor blades optimization [J]. *Journal of Shantou University (natural science edition)*, 2006, 21(1): 44-49.
- [20] 陈进, 王旭东, 沈文忠, 等. 风力机叶片的形状优化设计 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(3): 131-134.
- CHEN J, WANG X D, SHEN W Z, et al. Optimization design of blade shapes for wind turbines [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2010, 46(3): 131-134.
- [21] 吴江海, 王同光, 赵新华. 风力机叶片优化设计目标 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(5): 661-666.
- WU J H, WANG T G, ZHAO X H. Design targets for wind turbine blade optimization [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(5): 661-666.
- [22] 王珑, 王同光, 吴江海, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的风力机叶片多目标优化设计 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(5): 672-676.
- WANG L, WANG T G, WU J H, et al. Multi-objective optimization design of wind turbine blades based on improved NSGA-II [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(5): 672-676.
- [23] TIRANDAZ M R, REZAEIHA A. Effect of airfoil shape on power performance of vertical axis wind turbines in dynamic stall: symmetric airfoils [J]. *Renewable energy*, 2021, 173(C): 422-441.
- [24] VAN TRUONG K. Blade aerodynamic model for thick airfoils of the series NACA00xx in pre-stall conditions [J]. *Journal of renewable and sustainable energy*, 2024, 16(2): 023312.
- [25] 田德, 方建驹, 刘枫, 等. 大型风电机组模型预测独立变桨控制器设计 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(4): 461-467.
- TIAN D, FANG J J, LIU F, et al. Design of model predictive individual pitch controller for large-scale wind turbine [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(4): 461-467.
- [26] 韩万里, 茅大钧, 蔡晔, 等. 基于数据融合的风电变桨系统故障预警研究 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(12): 236-241.
- HAN W L, MAO D J, CAI Y, et al. Research on fault warning of wind power pitch system based on data fusion [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(12): 236-241.
- [27] 李星星, 李成良, 毛晓娥, 等. 风电叶片低粗糙敏感性厚翼型优化方法研究 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(7): 395-401.
- LI X X, LI C L, MAO X E, et al. Optimization method of thick wind turbine airfoils with low sensitivity to surface roughness [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(7): 395-401.

- [28] 李治国, 高志鹰, 张雅静, 等. 基于Theodorsen理论的新型动态失速预测模型及其应用[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 409-414.
- LI Z G, GAO Z Y, ZHANG Y J, et al. Novel dynamic stall prediction model based on theodorsen theory and its application [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43 (8): 409-414.
- [29] MENG H, WU J X, CAO G C, et al. Study on the nonlinear structural coupling for wind turbine blade under large deflections by using novel finite difference method [J]. Renewable energy, 2024, 223: 120095.

RESEARCH ON OPTIMIZATION METHOD FOR LOAD STABILITY OF WIND TURBINE BLADES

You Huipeng¹, Li Guohua^{1,2}, Zhang Yi'nan^{1,2}, Gao Meng¹, Sun Ankang¹, Zheng Bing¹

(1. CRRC Shandong Wind Power Co., Ltd., Ji'nan 250104, China;

2. CRRC Technology Innovation (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: A load reduction method was provided by optimizing the aerodynamic configuration and structural design of the blades in this paper. The GH-Bladed computing platform was used to verify the blade performance and turbine load based on 6.25 MW wind turbine. The study finds that reducing the blade chord length has the most significant effect on reducing the blade root load, while the effect of reducing thickness on load reduction is not prominent. However, reducing blade thickness is a convenient method to improve aerodynamic performance while also weakening load. In addition, the laying thickness of the spar cap structure can change the blade flapwise stiffness to affect flapwise deformation. Expanding the blade flapwise deformation by adjusting the thickness of the blade spar cap to release concentrated stress is a novel method to promote the reduction of blade load generation.

Keywords: wind turbine blades; power generation; load analysis; stability; aerodynamic configuration; spar cap structure