

基于叶尖延长的2 MW风电机组发电量提升 设计方案及验证

段豪祥, 张 超, 朱兴龙

(国家电投集团江苏新能源有限公司, 江苏 盐城 224005)

摘要: 早期投入的风电机组因生产技术、设计水平等方面的落后, 导致年发电量偏低、风场效益不高等问题。相对于机组换新等方法, 在投入更新成本不高的基础上, 叶尖延长是提升 2 MW 级风电机组发电量的最好方法之一。分析了基于叶尖延长的风电机组发电量提升基本原理, 设计了叶尖延长总体方案, 并从气动设计、结构设计、粘接设计和防雷设计四个方面详细介绍了叶尖延长段设计方案, 搭建了基于 Bladed 和 Focus 软件的系统仿真平台。仿真实验结果表明, 通过叶尖延长后风电机组年发电量最高可提升 9.5%, 额定风速可降至 9.1 m/s, 为低风速区域风电场兆瓦级风电机组提升发电量提供了一种可行的方案。

关键词: 风电机组; 发电量; 叶尖延长

Design and verification of increasing power generation for 2 MW wind turbine based on blade tip extension

DUAN Haoxiang, ZHANG Chao, ZHU Xinglong

(SPIC Jiangsu New Energy Co., Ltd., Yancheng 224005, China)

Abstract: Due to the disadvantage of production technology and design level, some problems are created to the wind turbines built in early, such as annual power output is low and of wind field efficiency is not high. Compared to using whole new wind turbines, blade tip extension technology is a promising and economic method to increase the power output of 2MW level wind turbines built in early. The basic principle of power generation improvement of wind turbine based on blade tip extension technology is analyzed. The overall scheme of blade tip extension is designed. The design scheme of blade tip extension section is introduced in detail from four aspects, such as pneumatic design, structure design, bonding design and lightning protection design. The system simulation platform based on Bladed software and Focus software is built. The simulation results show that the annual power generation of the wind turbines can be increased by up to 9.5% by the developed blade tip extension. The rated wind speed of the wind turbines can be reduced to 9.1 m/s. It provides a feasible scheme for MW wind turbines to increase the power generation in wind farms during low wind speed field.

Key words: wind turbine; power generation; blade tip extension

0 引言

随着“双碳”战略目标的提出,风力发电在我国经过几十年的快速发展后,将进一步获得极大关注。截至2021年底,我国风电总装机容量高居世界第一^[1]。然而,在我国风电早期发展阶段,受当时风电技术与经验的限制,很多早期已投运的风电机组呈现风轮直径不大、设计安全裕度大等特点,从而导致风电机组发电量偏低、风电场效益不高等问题。为适应当前平价上网、降低运维成本的需求,如何提高这些早期风电机组风轮捕风能效及其发电量,成为风电场运营商最迫切解决的难题之一^[2]。相对于投入大、性价比不高的机组换新,对旧风电机组叶片通过技改来提升其发电量,是实现当前风电场保值增效的有效方式之一^[3-4]。

目前通过叶片改造提升风电机组叶片发电量的研究成果不少,主要分为加装气动附件和叶片延长两种方案。加装气动附件主要是通过叶片表面增加涡流发生器、扰流板和襟翼等附件来叶片表面流动特性,从而提高叶片风能利用率与风电机组发电量^[5]。高超等研究了涡流发生器形状、高度和安装位置等参数对风力机叶片薄翼型气动性能的影响^[6]。相对于基于提高叶片风能利用系数的增加气动附件方式,叶片延长方式因其大幅提高了风轮扫风面积,从而能更高地提升风机发电量水平、效益增量显著,尤其是有效应用于低风速区风机年发电量的提升^[7]。叶片延长主要包括叶根延长和叶尖延长两种方式,其中叶根延长因为原材料用量大、安装复杂且成本高的特点,导致其应用受限;而叶尖延长成本投入低、功率增加显著,已被证明是提高风机发电量经济性最好的方式之一^[8]。德国Energiekontor公司分别于2009年、2011年对1.0 MW和1.3 MW的两种风机进行了叶片延长的仿真设计与现场安装测试,验证了叶片延长后风机功率曲线得到改善,提高了风机发电量^[9]。

以上研究成果主要针对1.5 MW及以下风机进行叶尖延长仿真计算及经济性分析,而2 MW及以上风机叶尖延长的理论研究及设计方案仍不成熟。本文在分析风电机组发电量提升基本原理基础上,着重阐述了基于叶尖延长的风电机组发

电量提升方案,搭建了系统仿真平台,并进行了仿真验证。

1 基于叶尖延长的风电机组发电量提升的基本原理

叶片作为风电机组捕获风能的关键部件,其对风能捕获量直接决定了风电机组的发电量,评估叶尖延长的效果目前主要通过叶尖延长后的风电机组年发电提升量来衡量。

1.1 风电机组年发电量

为表征风电机组的实际发电性能,根据IEC 61400-12-1标准规定^[10],风电机组年发电量主要取决于一年时期内风电机组输出功率与风电场风速分布概率,具体计算公式为

$$P_{AE} = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (1)$$

式中, N_h 为年小时数,一般取值为8 760; N 为风速区间数; V_i 为第*i*个风速区间内标准化的平均风速; P_i 为第*i*个区间的平均输出功率; $F(V)$ 为风速概率分布函数。

当采用瑞利分布函数进行年发电量计算时,计算式为

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{4} \left(\frac{V}{V_{AVE}}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中, V 为风速; V_{AVE} 为轮毂高度处的平均风速。

1.2 风电机组输出功率

基于传统叶素动量理论的风电机组叶尖延长,可有效提升风轮扫风面积,在风电机组叶片设计中,风力机捕获风能可简化为致动盘模型,风电机组的输出功率为

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 S C_p(\lambda, \beta) = \frac{1}{2} \rho V^3 \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (3)$$

式中, ρ 为空气密度; S 为风轮扫风面积; C_p 为风能利用系数; λ 为叶尖速比; β 为叶片桨距角; R 为风电机组叶轮半径。

由式(1)~式(3)可知,当风速和空气密度一定时,风电机组的发电量主要取决于 C_p 和风轮扫风面积,当通过优化叶片设计使 C_p 达到最大时,风轮扫风面积成为影响风电机组发电量的唯一因素,即增加风电机组叶轮半径 R ,可有效

地增大风轮扫风面积, 进而提高风电机组的年发电量。

2 基于叶尖延长的风电机组发电量提升方案设计

2.1 叶尖延长总体设计方案

叶尖延长设计主要分三个阶段, 包括前期设

计、主体设计以及后期施工和验证, 其中前期设计主要包括评估原叶片气动及结构设计余量、叶尖套概念设计、叶片气动和结构设计、载荷计算以及 N 次安全评估与优化, 主体设计主要包括叶尖套设计、工装和模具设计以及生产制造等, 后期施工和验证主要包括叶尖延长施工、测试与验证及效果估计等, 图1为叶尖延长总体设计方案。

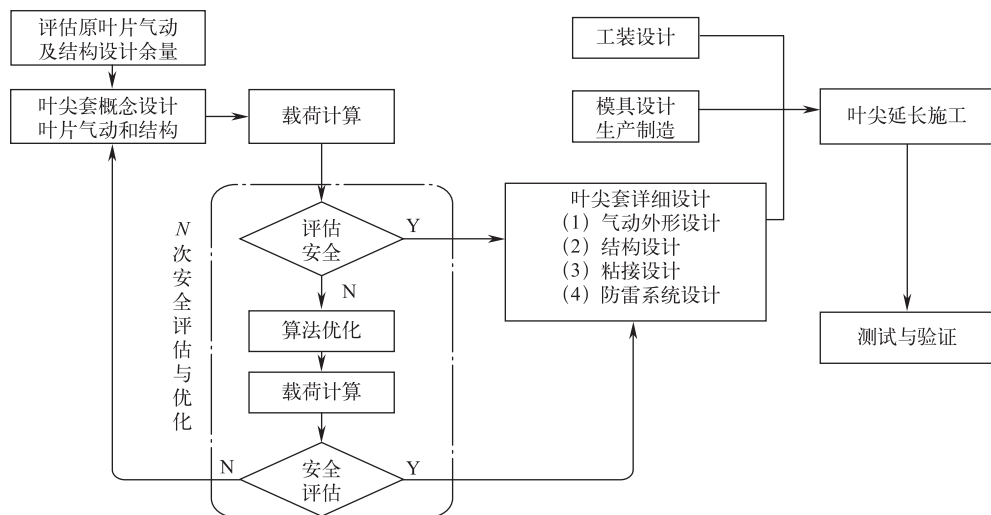


图1 叶尖延长总体设计方案

Fig. 1 The trend of peak changes in electric field intensity at different times

2.2 叶尖延长段(套)详细设计

(1) 气动外形设计

在气动设计中, 以满足整机载荷要求、保证叶片增功(发电量)效果为原则, 选取原叶片使用的基础翼型, 结合成熟的叶片气动外形设计方法, 采用叶素动量理论进行优化设计, 并确定叶尖延长段外形。同时, 综合考虑叶尖延长段与原叶尖的匹配性, 进行外形优化, 最终形成了一套外形匹配性优良、增功效果明显以及载荷满足风电机组整机要求的叶片气动设计方案, 图2为叶尖延长段模型示意图。



图2 叶尖延长段模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of blade tip extension section model

(2) 结构设计

由于叶尖延长段长度不长, 为确保叶片整体结构安全性, 延长段结构应与原叶片结构类似, 采用工字梁结构, 叶尖延长段采用蒙皮与剪腹板空心薄壁复合构造的结构形式, 如图3所示。



图3 叶尖延长段结构形式

Fig. 3 Structural form of blade tip extension section

由于壳体不但需要满足叶片的气动性能, 而且还要承担弯曲载荷和剪切载荷, 所以壳体采用三向布和单向布铺设, 三向布用于敷设内外蒙皮部分, 主要提高叶片抗剪刚度; 单向布用于敷设梁帽, 主要提高挥舞刚度, 提供一部分摆振刚度; 同时, 为了提高叶片稳定性和满足工艺性,

在壳体局部区域敷设芯材。剪腹板采用双向布和芯材组成夹芯结构，支撑吸压力面壳体，提高叶片稳定性。吸压力面壳体与剪腹板通过采用环氧结构胶粘接。

(3) 粘接设计

叶尖延长段粘接设计采用有限元粘接分析法，主要内容：在三维软件中建立原叶片叶尖段模型和延长段模型，进行划分网格，叶片壳体采用壳单元，粘接部分采用实体单元模拟结构胶。

采用 $m=4 \sim 14$ 取挥舞和摆振两个方向等效疲劳载荷最大值进行分析，疲劳要求应小于 1 MPa；结构胶极限分析采用极限包络载荷，极限要求结构胶剪切应力小于 7 MPa。同时，在完成延长段安装后，会对外部进行手糊或者其他成型的加强，从而进一步保证延长段粘接质量，同时也保证外形光顺。

考虑在实际操作中可能会出现空胶现象，致使粘接区域达不到理论要求。因此，会在有限元分析过程中，同时进行部分空胶情况下的粘接性能评估。

(4) 防雷系统设计

延长段吸力面制作完成后，在叶尖位置安装铝叶尖，同时，在原叶尖对应延长段位置的吸力面上安装接闪铝块，通过电缆将铝叶尖和接闪铝块连接。延长段制作完成后标记出接闪铝块位置，在风电场安装时在预装接闪铝块位置进行打孔，安装接闪铝柱，将接闪铝柱与铝块和原叶尖通过螺纹啮合在一起，以保证在风机运行过程中不会旋出。同时，在叶尖延长段安装完成后，进行叶尖延长段到新装接闪铝柱的电阻值检测，以保证防雷引雷效果，图4为接闪器布置示意图。

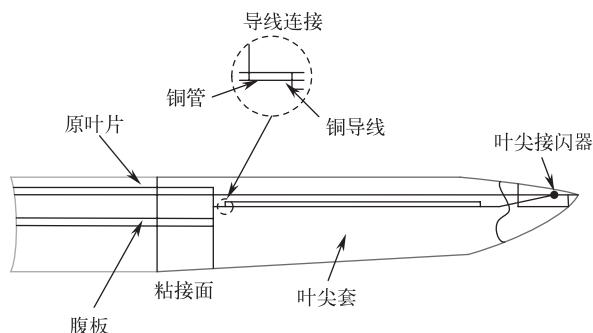


图4 接闪器布置示意图

Fig. 4 Layout diagram of lightning arrester

3 仿真结果分析与验证

根据江苏徐州某风电场 2 MW 风电机组所处的地理位置及风况，对该风电场已安装运行的 W2000-111 机组叶片进行叶片延长设计。原风电机组系统参数见表 1。针对总体设计方案，采用 Bladed 软件进行叶片气动性能评估对比；同时采用 Focus 软件建模模拟叶尖延长段，使叶片频率避开机组共振频率范围，确保叶尖延长段的结构特性参数（Bladed 建模使用）满足结构强度和粘接强度，从而最终确定叶片延长至 56.88 m，叶尖套 3 m（含 0.5 m 重叠部分）。

(1) 叶片气动性能评估对比分析

叶片气动性能参数是叶尖延长后提升其发电量的关键性能指标，直接影响叶尖的延长长度、延长起点及延长套外形等，图 5 为叶尖延长前后各气动性能参数对比情况。由图 5a~c 可知，叶片前段（约 52 m 前）延长前后的升力系数、入流角和攻角等气动性能参数基本相似，但在叶片后段（约 52 m 后）延长前后气动性能参数因叶片被延长而产生不同。由图 5d 可知，叶尖延长后风电机组叶片功率系数增大，最大功率系数由 0.478 提升到 0.81，从而可使风电机组在更低的风速下达到额定功率。

表 1 原风电机组系统参数

Tab. 1 Original wind turbine system parameters

系统参数	参数值	系统参数	参数值
额定功率 / MW	2	湍流强度	$I_{15}=0.14$
额定转速 / (r/min)	14.5	年平均风速 / (m/s)	7
轮毂高度 / m	80	气流平均倾斜角度 / (°)	± 8
叶片数目	3	3 s 阵风风速 (1 年) / (m/s)	47.6
叶片长度 / m	54.38	10 min 阵风风速 (1 年) / (m/s)	34
额定风速 / (m/s)	9.5	3 s 阵风风速 (50 年) / (m/s)	59.5
切入风速 / (m/s)	3	10 min 阵风风速 (50 年) / (m/s)	42.5
切出风速 / (m/s)	22		

(2) 额定风速及风电机组发电量对比分析

图 6 为叶片延长前后风电机组输出功率曲线。由图 6 可知，叶片延长后风电机组额定风速由 9.5 m/s 降至 9.1 m/s，这是因为叶尖延长后风轮扫风面积及风电机组叶片最大功率系数均增大了。

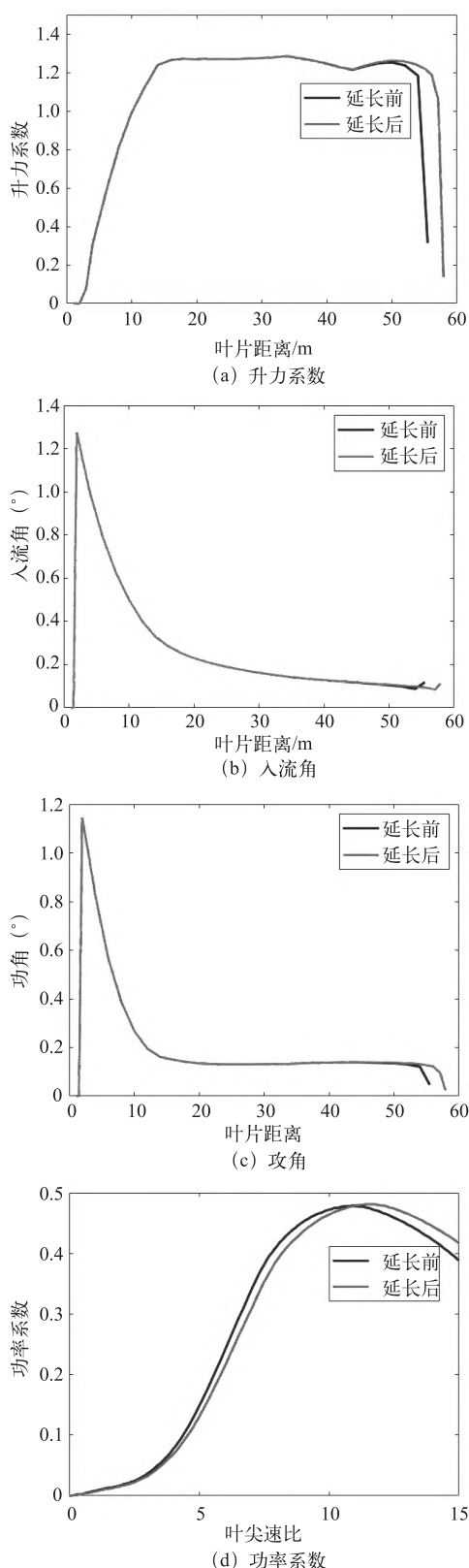


图5 叶尖延长前后各气动性能参数对比

Fig. 5 Comparison of aerodynamic performance parameters before and after blade tip extension

根据功率曲线及式(1)~式(3)可计算得到叶尖延长后不同年平均风速下风电机组年理论发电量及其提升率,见表2。由表2可知,风电机组年发电量提升率随着年平均风速增加而减少,当年平均风速为5.5 m/s,年发电量提升率最大,为9.5%,进一步表明叶尖延长方案可有效提高低风速地区风电机组的发电量及其提升率。

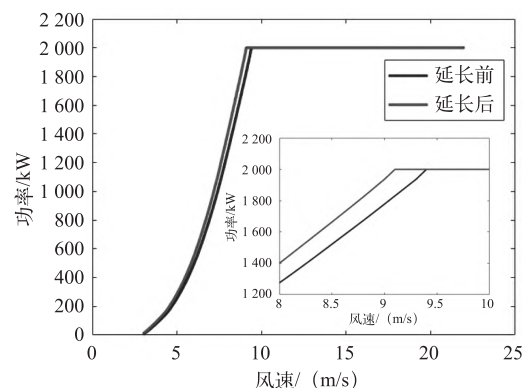


图6 叶尖延长前后风电机组输出功率曲线

Fig. 6 Wind turbine output power curve before and after blade tip extension

表2 叶尖延长后不同风速下理论年发电量及提升率

Tab. 2 Theoretical annual power generation and improvement rate under different wind speeds after blade tip extension

年平均风速 / (m/s)	延长前发电量 / (MW·h)	延长后发电量 / (MW·h)	提升率 (%)
5.5	2 709 685.87	2 967 455.02	9.5
6	3 331 963.13	3 618 517.48	8.6
6.5	3 946 696.25	4 254 405.89	7.8
7	4 538 774.39	4 860 915.02	7.1
7.5	5 098 674.01	5 429 710.59	6.5
8	5 621 099.19	5 956 676.06	6.0
8.5	6 103 558.73	6 440 383.28	5.5
9	6 545 271.89	6 880 892.14	5.1
9.5	6 946 289.93	7 278 933.37	4.8

4 结束语

本文针对早期风电场中2 MW风电机组发电量偏低、设计安全裕度大的问题,首先分析了提升风电机组年发电量的基本理论,设计了基于叶尖延长风电机组发电量提升总体方案,从气动、结构、粘接和防雷四个方面详细介绍了叶尖延长段(套)设计方案,并采用Bladed软件进行

叶片气动性能评估对比,同时采用Focus软件建模模拟叶尖延长段。通过仿真分析可以看出,叶片由54.38 m延长至56.88 m后,风电机组叶片的最大功率系数由0.478提升到0.81,额定风速从9.5 m/s降至9.1 m/s,同时在年平均风速为5.5m/s时,年发电量提升率最大为9.5%,表明通过叶尖延长后可提高风电机组年发电量及提升风电机组对风速的适应性。尤其是低风速地区,为低风速地区风电场中2 MW及其以上风电机组进行技术改造以提高经济效益的控制与应用提供一种有效方案。

参考文献

- [1] 许淳瑶,葛立超,冯红翠,等.风力发电现状及叶片组成与回收利用综述[J].热力发电,2022,51(9): 29-41.
- [2] 韩斌,赵文超,刘庆元,等.风电机组改造后的评估技术及方法[J].船舶工程,2019,41(S1): 372-374.
- [3] 袁振强,刘壮.风电机组叶尖延长技术研究及应用[J].应用能源技术,2020,274(10): 50-54.
- [4] ACHILLES M B, THANASIS K B, HERRICOS S. Active control of wind turbines through varying blade tip sweep [J]. Renewable Energy, 2019(131): 25-36.
- [5] HUANG X, MOGHADAM A S M, MEYSONNAT P S, et al. Numerical analysis of the effect of

flaps on the tip vortex of a wind turbine blade [J]. International journal of Heat and Fluid Flow, 2019 (77): 336-351

- [6] 高超,贾娅娅,刘庆宽,等.涡流发生器对风力机叶片薄翼型气动性能影响的试验研究[J].太阳能学报,2021,42(5): 364-372.
- [7] 袁巍华,张菊芳,陈文光,等.风电叶片延长节结构胶疲劳有限元分析方法研究[J].复合材料科学与工程,2022(4): 27-31.
- [8] 邹立伟,魏敏,宋之燕.风力发电机组叶尖延长增效技术的经济性分析[J].风能,2018(3): 80-82.
- [9] 王飞.国外典型风电机组叶片技术改造方法简介[J].水电与新能源,2015(11): 69-71.
- [10] IEC 61400-12-1 Wind turbines-part 12-1: power performance measurements of electricity producing wind turbines (Draft CDV) [S].

作者简介

段豪祥(1981—),男,工程师,主要研究方向为风力发电及储能系统控制。

张超(1993—),男,本科,助理工程师,主要研究方向为风力发电控制与设计。

朱兴龙(1986—),男,本科,工程师,主要研究方向为风力发电及智能电网控制与设计。

(收稿日期:2022-12-01)