

风力发电机叶片的雷击损伤与雷电保护

洪华芳¹,周歧斌²,边晓燕³

(1. 上海电力线路器材有限公司,上海 200235; 2. 上海市防雷中心,上海 201615;
3. 上海电力学院 电自学院,上海 200090)

摘要:随着风电机组容量和风电场规模的增大,雷击对风电机组安全运行的危害日益突出,风力发电机叶片是最容易遭受雷击损害的部件,而国内对此所作的研究较少,在参考大量国外研究资料的基础上,分析了风力发电机叶片遭受雷击损害的机理,整理并归纳了叶片的几种有效的雷电防护措施,介绍了国外开展的关于雷击叶片的模拟实验,有助于国内风力发电场对风机叶片进行有效地雷电防护。

关键词:风力发电机;叶片;雷电保护

基金项目:上海市教委科研创新项目(09YZ341);上海市优青基金项目(SD108010);上海市浦江人才计划项目(08PJ14060)

作者简介:洪华芳(1976-),工程师,从事企业管理、电力产品设计和材料研究。

中图分类号: TM315 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-9529(2009)10-1778-04

Lightning damages and protection for wind turbine blades

HONG Hua-fang¹, ZHOU Qi-bin², BIAN Xiao-yan³

(1. Shanghai Electric Power Line Equipment Co., Ltd., Shanghai 200235, China;

2. Shanghai Lightning Protection Center, Shanghai 201615, China;

3. School of Power and Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The impact of lightning on wind turbines is becoming more and more serious. While the turbine blades suffer mostly from lightning strokes, there can be found little studies on this topic in China. On the basis of widely reviewing relative literatures abroad, the damage mechanism of lightning strokes to blades was analyzed, and effective protection measures were concluded. A simulation experiment conducted in Japan about lightning strokes to blades was also introduced.

Key words: wind turbine; blade; lightning protection

随着风机容量的增大^[1,2],轮毂高度也从 50 m 增至 150 多 m,一个叶片就长达 30 多 m,加上风电机组一般安装在开阔地带或者山顶,风电机组遭受雷击机率越来越大。德国统计结果^[3]显示,德国风电场每百风机·年的雷击事故率在 8% 左右。风力发电机组雷击损坏的主要部件分别是叶片(15%~20%),电气系统(15%~25%),控制系统(40%~50%),发电机(5%)。其中风机叶片损坏对发电量的影响最大,所需的维修费用最多。

为验证风机叶片结构和雷电安全性^[4],丹麦的研究人员在实验室进行一系列的仿真测试^[5],研究表明:不管叶片是用木头或玻璃纤维制成^[6,7],或是叶片外裹导体,雷电损害程度取决于叶片的形式。叶片全绝缘并不减少被雷击的危

险,而且会增加损害的次数。研究还表明:多数情况下被雷击的区域集中在叶尖背面(或称吸力面)。研究结果促进了叶片防雷设计的迅速发展,在叶尖安装接闪器来拦截雷电,再通过叶片内腔的引下线将雷电流导入大地,保护叶片。这样的雷电保护系统设计简单、有效,如果接闪器或引下线发生故障,只需要机械性的改换。如今,风机叶片的防雷是按照 IEC62305-1 的 Ⅱ 级保护水平设计^[8],并通过有关的型式试验,所以叶片的防雷性能大有改善。

由于风力发电机通常安装在在开阔的平原地带或者海面上,比其他相邻物体高,风机和叶片最可能引发迎面先导,从而导致雷电直接击在风力发电机和叶片上。

目前,国内对风力发电机的雷电防护的研究

还处于起步阶段,本文结合国外的研究资料,分析了雷击对风力发电机叶片的损害机理,并且提出了相应的防护措施,可供国内风力发电场的雷电防护工作参考。

1 雷击对风机叶片的损害

(1) 风机叶片结构

风力发电机叶片是一个复合材料制成的薄壳结构^[9],结构上分 3 个部分: 根部,材料一般为金属结构; 外壳,材料一般为玻璃钢; 龙骨(加强筋或加强框),材料一般为玻璃纤维增强复合材料或碳纤维增强复合材料。

IEC/TR 61400-24^[10]根据不同的制动机构给出四种典型的叶片结构,如图 1 所示。

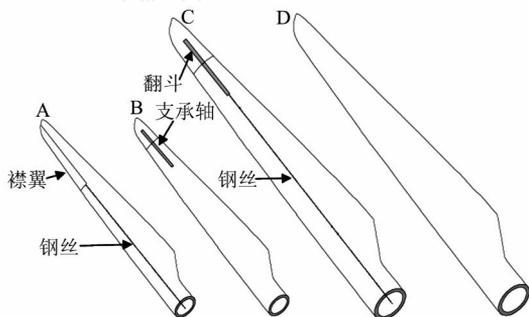


图 1 风机叶片的四种典型结构

类型 A 叶片在前缘外部采用襟翼(副翼)作为制动装置。对于类型 A 叶片,雷击点常常发生在不锈钢制的襟翼铰链上,因此经常发生严重的损坏。这是用于操纵襟翼的钢丝的截面太小,通常不足以用于传导雷电流。

类型 B 叶片采用尖端制动结构,雷击点基本上都发生在距最尖端数十厘米的范围内或在翻斗支承轴的边缘上。雷击时在翻斗支承轴的边缘与叶片根部的金属固定法兰之间形成电弧。这样的内部电弧将对叶片造成灾难性的伤害。A 型和 B 型叶片通常用于 100 kW 左右的老式风机。

类型 C 叶片是比较新型的叶片,具有由钢丝操纵的尖端制动结构,C 型叶片的雷击点也基本上发生在距最尖端数十厘米的范围内或在翻斗支承轴的边缘上(同 B 类似)。但由于 C 型具有钢丝连接翻斗支承轴与叶片根部法兰,使得雷电流可以流过。当钢丝不能流过全部雷电流时,将形成电弧并对叶片造成不同程度的损坏。实际经验表明对于 17 m 长的叶片当采用 10 或 12 cm 的钢丝时,该电缆能够流过大部分的雷电流,因此保护

主叶片免受损坏。

类型 D 叶片全部由绝缘材料构成。对于其他类型的叶片,雷击大部分发生在靠近叶片尖端处,雷击点随机分布在叶片沿长度方向上。雷击由绝缘材料构成的叶片可以解释为由于叶片在使用一段时间后会含有污秽及水分。高压试验也表明当叶片喷有盐水后,绝缘材料构成的叶片则类似于导体易于被雷击中。另一种解释是叶片本身就是雷电击中风机的通道,因为沿叶片表面放电比击穿空气放电更加容易。

(2) 雷击叶片的损坏机理

当雷电击中叶片时,雷电释放的巨大能量使叶片结构内的温度急剧升高,分解气体高温膨胀,压力上升造成爆裂破坏。文献[11]对叶片内水汽的热膨胀进行了实测研究,水蒸气在电阻加热下将产生体积增加。在叶片内部不同材料,不同部位,水蒸气分布也可能不同,材料内部的这种不平衡在雷电过程中高温以及内部电弧的作用下,引起急剧且不平衡的膨胀,导致各种叶片损伤:如层裂、粘结处裂开、泄漏、边缘开裂、纵向裂纹、润滑油起火等,即叶片部分或者全部损坏。现场叶片损坏案例如图 2 所示。

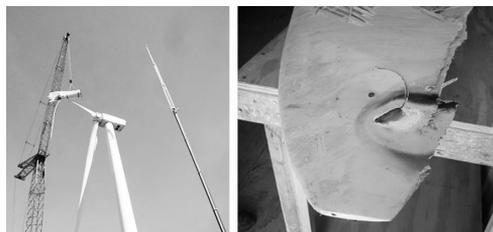


图 2 风机叶片遭雷击情况

雷电在风机叶片内形成电弧将导致最严重的损坏,电弧可能在叶片内充满空气的空腔内或者沿内部表面发生。其他类型的损坏可能是由于雷电流在复合材料层间的引下线导线上流过,而这些层间含有水汽,由发热引起水蒸气的不平衡膨胀,导致叶片表面撕裂等。在某些情况下,压力波会沿被雷击中的叶片传播,并通过轮毂传导到另一叶片上并致使其受损。

内部电弧常常发生在位于叶片尖部的雷击点与叶片内部的导体之间。对于图 2 中的 C 型叶片,受损部位通常集中在叶片尖端区域,而主叶片没有损伤。如果 C 型叶片发生主叶片损伤,意味着在叶片内部产生了电弧,也就是用于操作尖端制动器的钢丝不足以将全部雷电流从翻斗支承轴传导至轮毂。

2 叶片的雷电保护措施

防雷保护的主要思路是将雷电流安全地从雷击点传导到接地轮毂^[11-14],从而避免叶片内部雷电弧的形成。这可以通过在叶片外表面或内部安装金属导体将雷电流从雷击点传输到叶片根部来实现。另一种思路是在叶片表面材料里添加导电材料,从而使叶片本身能够将雷电流全部传到叶片根部。

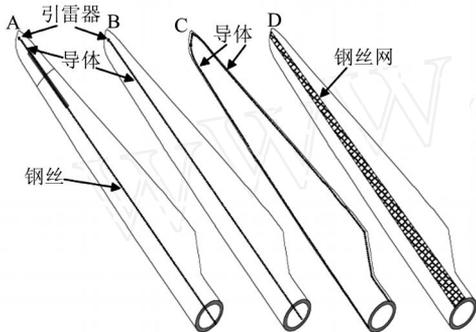


图3 现代大型风机叶片的雷电保护措施

(1) 安装在叶片表面或内部的雷电保护系统

图3显示了3种将与叶片根部相连的金属导体作为接闪器和引下线的雷电保护系统,分别为类型A,类型B和类型C。其中类型A和类型B将金属导体置于叶片内部作为引下线,在叶片表面尖端固定一只金属装置作为接闪器,其穿透叶片与内部的引下线导体相连。这种保护系统在航空飞行器上也较常见。置于叶片内部的引下线导体能够将雷电流从叶片尖端的接闪器传输到叶片根部。对于带有尖端制动结构的叶片,用于控制叶片尖端的钢丝也可以作为引下线,如类型A。如果叶片没有尖端制动结构,则采用一根铜线作为引下线,该铜线可固定在叶片内部的翼梁上,如类型B。当叶片长度为20m左右时,根据多年的运行经验,证明类型A和B雷电保护系统都具有显著效果。但是当叶片更长时,由于目前的实际运行经验还不足,其有效性还有待进一步验证。还有一种叶片雷电保护系统是将金属导体沿着叶片外沿与后缘放置安装在叶片表面或者置于叶片内部,如类型C。如果是置于叶片内部,可采用铜或铝的导线或编织带。如果在叶片表面安装有一些转向器,这些转向器都必须连接到沿着叶片边缘安装的金属导体上。

如果将叶片表面的金属导体作为接闪器系统

或引下线系统,这些金属导体必须有足够的截面积,能够承受直击雷电流。此外,为了能够将金属导体稳定地固定在叶片表面,必须对导体尺寸进行规定。例如要求铝导线截面不小于 50 mm^2 ,但在叶片上固定这么粗的导线可能会有问题。另外,在叶片表面安装导体时需要考虑叶片的空气动力问题,也可能产生巨大的噪音。

(2) 叶片表面改用导电材料

在航空工业中,机翼的雷电保护系统常在机翼外表添加导电材料,以便减少对雷击点的小面积的损坏。添加这些导电材料的方法可能是将金属材料直接喷涂在表面上,或者在外层的复合材料里混杂金属纤维,或者将金属线“织进”外层复合材料中,或者直接将金属网置于叶片表面。图3中的类型D就是一种使叶片表面导电的雷电保护系统。这种雷电保护系统将金属网置于叶片的表面漆的下边。有些叶片的最尖端用金属材料做成,或者覆盖上一层金属片。如图4所示的叶片在顶端铆装了一个不锈钢叶尖,再将铜丝网贴在叶片两面,从而将叶尖与叶根连为一组导体。铜丝网既可以作为引下线可将叶尖的雷电引导至大地,也可作为接闪器拦截雷击,从而防止雷击叶片主体而导致叶片损坏。

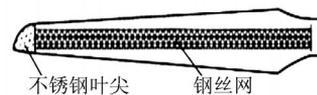


图4 带金属尖端的叶片

3 雷击叶片的实验研究

为了研究叶片上不同形式的接闪器对雷击点的影响,文献[15]对3m长的4只叶片模型进行了模拟雷击实验。4只的叶片模型如图5所示,编号为a,b,c,d。其特征见表1。

表1 4种类型的叶片模型的特征

模型	特征
模型 a	无接闪器与引下线
模型 b	叶片尖端覆盖有接闪器并带有内部引下线,接闪器为铝片,从叶片尖端覆盖到245 mm处。
模型 c	叶片带有小圆盘状的接闪器并带有内部引下线,接闪器直径为40 mm,材料为不锈钢。圆盘中心据叶片尖的距离为960 mm。
模型 d	叶片带有大圆盘状的接闪器并带有内部引下线,接闪器直径为110 mm,材料为不锈钢。圆盘中心据叶片尖的距离为960 mm。

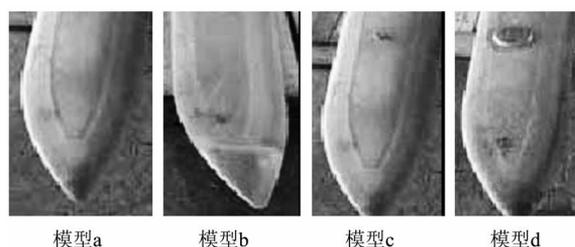


图 5 四种叶片模型

对上述 4 种叶片模型进行 12 MV 的模拟雷击实验,叶片以及内部发生闪络的次数见表 2。实验中产生的模拟雷击放电形态见图 6。

表 2 实验结果

叶片类型	模型			
	a	b	c	d
叶片发生闪络的次数	8	20	11	9
叶片内部发生闪络的次数	0	0	2	3



图 6 4种模型的模拟雷击放电实验

对于模型 a,实验中观察到对地放电发生次数最多,叶片表面上的沿面放电也发生数次,另外贯穿放电也发生几次,对于模型 b,大多数放电都发生在叶片尖部的接闪器上,但也有几次发生在接闪器的边缘和叶片表面,对于模型 c,多次闪电侵入叶片内部,在叶片尖部与小盘状接闪器间形成电弧,模型 d 的实验结果与模型 c 类似。实验结果表明,雷电可能不通过接闪器而侵入叶片内部。叶片尖部的接闪器最有效的拦截直击雷。当将圆盘状接闪器安装在叶片外表面时,雷电可能侵入叶片内部,并在侵入点与内导线间形成电弧。

4 结论

风力发电机组中的叶片最容易遭受雷击损坏。本文在国外大量研究资料的基础上,分析了叶片遭受雷击损坏的机理,归纳了风机叶片的几

种雷电防护措施,并且介绍了在日本开展的一个模拟叶片遭受雷击的实验,显示了在叶片尖部安装接闪器能有效的拦截直击雷,在叶片表面安装圆盘状接闪器则可能在叶片内部产生电弧。

参考文献:

- [1] 王成山,孙玮,王兴刚. 含大型风场的电力系统最大输电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2007, 131(2), 17-21.
- [2] 宫靖远,等. 风电场工程手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [3] Wind turbine operation: causes for failure[R]. <http://euwinet.iset.uni-kassel.de>
- [4] GL-Guideline for the Certification of Wind Turbines[S].
- [5] MCN IFF B. Wind Turbine Lightning Protection Project[R]. 2002.
- [6] MADSEN S F, et al Breakdown Tests of Glass Fibre Reinforced Polymers (GFRP) as a Part of Improved Lightning Protection of Wind Turbine Blades[C]. Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Sept 2004.
- [7] Lightning Strike Protection for Composite Structures: Ginger Gardiner, CompositesWorld[R]. July 2006. On the web at www.compositesworld.com/hpc/issues/2006/July/1366/3.
- [8] IEC 62305-1: 2006 Lightning Protection—General Principle[S].
- [9] 潘艺,周鹏展,王进. 风力发电机叶片技术发展概述[J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(3).
- [10] IEC 61400-24: Wind turbine generator systems - Part 24: Lightning protection, International Electrotechnical Commission[S], Technical Report, July 2002.
- [11] KIIH L R. Case Study of Lightning Damage to Wind Turbine Blade[J]. June 2008, National Lightning Safety Institute (NLSI). www.lightningsafety.com.
- [12] GLUSHAKOW B. Effective Lightning Protection for Wind Turbine Generators[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2007, 22(1).
- [13] TAKEHIRON, N LESH J V, SHIGERU Y, et al Study on Lightning Protection Methods for Wind Turbine Blades[J]. IEE Transactions on Power and Energy, Vol 125, No 10, pp. 993-999, 2005.
- [14] LEWKE B, KRÄMER S, KINDERSBERGER J. EMC Analysis of a Wind Turbine Blade's Lightning Protection System[J]. 2007 IEEE.
- [15] SHINJIA, KOSUKE I, Takatoshi Matsushita Experimental Study for Wind Turbine Blades Lightning Protection[C]. 再生可能エネルギー 2006 国際会議, 2006.

收稿日期: 2009-04-15

本文编辑:王志胜