

# 基于雷电预警技术的风电设施防雷技术

李强<sup>1</sup> 王婷婷<sup>2</sup> 李楠<sup>3</sup>

## 摘要

风力发电技术迅猛发展,单机发电量不断增加,风电机组高度已增加到上百米,风电机组叶片遭受雷击风险也随之加大.通过雷电损害实例分析风机叶片雷击灾害机理,分析雷电击中风机叶片的形成和发展过程,总结大型风机叶片的特点和风电场的环境因素,以大气电场仪的预警数据为基础,结合前沿的等离子体防雷新技术,针对风力发电机的具体情况进行改进,提出实现风电叶片主动避雷的防雷技术构想,探索一种实现风电机组设备避雷的新思路.

## 关键词

风电叶片;雷电预警;等离子体;防雷

中图分类号 TK89;TM862

文献标志码 A

收稿日期 2011-10-07

资助项目 公益性行业科研专项(GYHY2008-06014)

## 作者简介

李强,男,硕士生,主要从事雷电防护研究.1205127787@qq.com

## 0 引言

从20世纪70年代开始,风力发电首先在美国、西欧等发达国家发展起来,风力发电从低功率小型发电机发展到现在的兆瓦级风电机组,不断地朝大型化方向发展,风电机组的高度也由过去的几十米增加到现在的一百多米,其中6 000 kW风电机组高度已接近200 m.风电机组单机发电量增加要求轮毂高度和叶轮直径随之增加,风电机组遭受的雷击率也不断增加.风电机组在雷雨天气时能否正常工作,风电机组本体及机内的各种设备是否易受雷电损害显得尤为重要.风电机组发电量的增加同时会导致整个风电产业的零部件研发制造、运输组装费用增加,直接导致雷击破坏程度和维修成本直线上升.由于风能因素的地域限制,很多风电场分布在山口、高原地区、沿海等雷雨多发地区,遭受雷电损失的风险极大.目前风电机组防雷设计大都是参照国际电工委员会(IEC)推出的《风力发电机组的防雷保护(试行本)》(IEC 61400—24),主要防雷保护思路是将雷电流安全地从雷击点传导到接地轮毂<sup>[1-2]</sup>,利用风电机组的叶片作为接闪器,将雷电流泄放.这种设计思路可以有效地降低雷击造成的损失,但是由于风电机组本身条件的限制,在接闪泄放的同时也会增加雷电击中风机叶片的概率,对风机叶片本身和风电机组内部的精密设备造成损害.对于风电机组这种特殊设备的避雷保护需要一种更为有效的防雷措施,而等离子避雷系统是通过减小雷电击中受保护物的几率来实现防雷保护的,可以满足这一要求.目前国内对于等离子避雷器的研究已经很有成效,在庄洪春等<sup>[3]</sup>的多年努力下已经成功设计出产品,其防雷效果已经通过诸多试验验证.本文在对国内风机雷击事故进行分析的基础上,根据雷电流特征和风电机组叶片的特点,借鉴绝缘避雷的理念,结合等离子体避雷技术,提出基于大气电场仪预警技术的风机叶片防雷设计新构想.

## 1 雷击事故分析

近十几年风电产业在我国飞速发展,由于我国的特殊气候条件,很多风电场选址建设的过程中没有考虑到雷电对于风电机组的破坏作用,导致建成后发生很多严重的雷击事故.浙江苍南风电场遭受灾害较为频繁,最严重的一次是在1995年的雷击过程中,一台风电机组遭受雷击,从叶尖到叶根开裂损坏报废.沈阳康平富饶山风电场遭受

1 南京信息工程大学 大气物理学院,南京,210044

2 三明市气象局,三明,365001

3 聊城市气象局,聊城,252000

的一次雷击,使1块风机叶片完全损坏另外2块断裂.海南东方风电场遭受的雷击灾害更为频繁,近年来仅仅风机叶片的雷击损坏率就达5.56片/(100片·年)<sup>[4]</sup>.风机叶片的更换成本相当大,雷电对叶片造成的损失占雷电灾害损失的15%~20%,更换1个1500 kW的风机叶片需要100万元.

雷电击中并流过被击物时会导致该物体在瞬间产生极大的热量.雷击风机叶片尖部时,由于雷电流在泄放路径中形成高电位和高能量,致使接闪器和金属引线与叶片之间产生强电位差,极易形成电弧,致使叶片的泄放通路熔断,叶片材料内部气体高温膨胀爆裂.另外,雷击发生时产生的巨大声波会对叶片造成冲击波破坏.雷电击中风叶后,除了热效应之外,雷电流包含很多高频成分,具有很强的冲击特性<sup>[5]</sup>,在泄放过程中会产生雷电感应过电压,其破坏作用与雷电流波形的陡度密切相关,陡度越大感应电压就越高.感应过电压沿各种电源和信号线路进入风电机组内部设备,损坏机组的控制系统和敏感的电子原器件<sup>[6]</sup>.因此,若能从源头上消除或减少雷电击中风叶的风险,将大大减轻雷电对风电系统的损害.

## 2 风机叶片防雷设计现状及存在问题

传统的风电机组叶片防雷设计是在风机叶片上加装接闪器,嵌装在桨叶的叶尖、中间等部位,接闪器的盘面与叶面齐平,在桨叶内部跨接到引下导体.这种接闪方式接闪面积较小,很难保证接闪器是桨叶上的唯一雷击点,现场运行经验表明,对于长度超过20 m的桨叶无法做到有效保护<sup>[7]</sup>.将接闪圆盘用金属网带代替镶嵌在桨叶表面,这种方法克服了圆盘接闪面积过小的缺点,但是在桨叶表面嵌装的金属网带很难保证在整个桨叶长度范围内与其表面的完全紧密电气接触和牢固黏合,在长期恶劣天气的影响下这一问题会进一步加剧,金属网带上传导的雷电流将会在接触不紧密的脱离部分产生热效应,对桨叶材料造成损伤.

目前大型风电机的叶片普遍较大,单机功率为1.5~2.5 MW的风电机,叶片长度已达50 m,单机功率5 MW的风电机叶片长度更是达到60 m以上,叶片质量将达到30 t,之前的一些防雷接闪方法已经完全不适合此类叶片.在风机叶片上增加多个接闪器,对于各个接闪器之间做电气连接,并与内置引下导体连接,这样做可以改善接闪器对于雷电下行

先导的拦截机率.这种设计可使风机叶片本身不受雷击,但是雷电对风电破坏作用仍大量发生,其原因主要有两个方面:首先是接闪不充分,桨叶的接闪面积和位置不足以实现对叶片的全方位保护,接闪器与叶片的接合处存在间隙为雷击提供了泄放通道;其次是由于风机桨叶和机舱都是旋转的,雷电流沿引下线泄放通道的电气连接是通过各种导流线、连接器和防雷刷实现的,这种情况下导流不畅,不仅无法将雷电流顺利泄放到大地,反而会增加通路阻抗,增大雷电流的热效应.

此外,由于风能资源的分布限制,大多风电场分布在地质条件复杂、土壤电阻率很高的地区,要使接地电阻达到要求往往很困难,投入大量人工接地体、联合接地甚至使用降阻剂都无法实现良好的接地效果.尤其是在高原气候寒冷地区,冻土层比较厚,土壤电阻率高,风电机组接地电阻更难达到要求.这使得风电机叶片的防雷陷入了一个极为尴尬的局面,一方面通过电气连接使得叶片更容易吸引雷击,另一方面泄放通道、接地电阻很难达到要求,这反而可能增加雷电造成的损失.

## 3 基于大气电场预警技术的叶片主动防雷系统

### 3.1 风电叶片接闪的过程分析

雷云在风电场上方形成后,由地面产生的感应电荷,使得风电机叶片相对于雷暴云形成一个极不均匀电场极,同时由于风电机的高度较高以及叶片长度加大,使之等同于一个大曲率电极,造成附近空气发生游离,而具备自持放电条件形成流注,流注发展到足够长度后,有较多电子沿流注通道流向电极,所有电子都将通过通道的根部进入电极,由于剧烈的摩擦产生高温,出现热游离过程,这个通道逐渐形成一个不断伸长的先导,先导持续加强前方电场,最终场强足够高时产生主放电,这就是雷电击中风电机叶片的击穿过程.

### 3.2 大气电场仪的预警原理

大气电场仪根据探头上的电场感应信号测量大气电场及其变化,当云中发生电荷分离时,在近地面的电场随之发生相应的变化,通过大气静电场仪探头的动片旋转,使得定片产生感应电荷,并将其转换为与大气电场成正比的电压量,通过处理转换计算出电场值.大气电场强度是大气电学的基本参数,在雷暴和闪电监测中具有重要作用<sup>[8]</sup>.在大气中雷雨

云层形成或靠近的过程中,近地面的大气电场强度开始发生变化,大气电场仪能够在雷电发生前监测到云内带电物质的变化,地面大气电场曲线在雷电发生前 15 ~ 50 min 会发生抖动,达到阈值时触发报警<sup>[9]</sup>.

### 3.3 风电机组雷击报警阈值的选择

近距离雷暴云经过上方时,大气电场仪的感应变化很明显,可以根据雷暴发生时近地面电场曲线的变化特征来进行局地雷暴的监测与预警.大气电场仪监测到的电场强度值是其附近一定范围内大气的电场强度.晴天的电场仪示值几乎不超过 1 kV/m,曲线基本趋近于零值附近<sup>[10]</sup>.在大气电场发生快速抖动的情况下,电场值(绝对值)持续在 6.5 min 内超过 3.5 kV 时,约 15.9 min 以后在大气电场仪防护区内很有可能出现闪电<sup>[11]</sup>,所以一般设置 3.5 kV/m 为第 1 级阈值,当大气电场强度绝对值超过此阈值时,可以判断为雷雨正在现场或者距离几千米外形成.由于风电场地处环境都是风力资源比较丰富,容易形成强烈大气对流的地方更容易形成雷暴,在大气电场仪探测强度达到 3.5 kV/m 时,就可以判断为有雷暴风险.使用这一阈值时,在强雷暴区域需要根据现场观测记录进行适当调整.

### 3.4 基于雷电预警的主动避雷系统构想

该系统将雷电预警与等离子避雷相结合,在雷击到来前,根据大气电场测试仪的实时监测数据显示,判断雷暴云所形成的电场强度及极性,提前预警并通过向风叶及其表面接闪器上输送与雷暴云相同极性的电荷,对消那里的感应电荷所产生的雷击危险性,并且通过不断转动的风叶改变风电机组附近电场强度分布,实现主动避雷.

#### 3.4.1 主动避雷系统设计理念

首先要求风电叶片与风电机本身连接处绝缘,将风叶与接闪器作为风机防雷的一个整体,根据地面大气电场仪预警数据,通过等离子发生器对风叶进行保护,使风机叶片不产生上行先导,并且通过风叶的转动改变风机附近电场分布,减少雷电对风叶的击中概率,同时在风电机舱与塔体的接合处设立相对较高的避雷针,通过电刷直接与塔体进行接地,这样就可以使得避雷针上更容易产生上行先导,使得雷电击中风叶的几率大大降低.

#### 3.4.2 绝缘防雷的局限性

针对雷电击中风叶的过程提出一个假设,假设叶片能够做到完全绝缘,大曲率电极的形成条件难

以达成,没有了电极的差异就不会形成流注、先导,不会有雷电击穿的过程,更不会发生因为雷电流的引入导致的过电压损失.雷电灾害的损失中,80%以上是在雷电流泄放到大地过程中产生的过电压造成与引下线相连的其他设备损坏<sup>[12]</sup>.但是由于叶片本身就处于一个复杂的环境中,加之叶片本身的加工工艺水平的限制,单纯的使叶片绝缘的条件很难达成.首先在实际运行中,机组叶片表面无法保证做到光滑、均匀,例如在叶片制造时会有纤维丝突出表面,在表面上出现某些粗糙之处,受风化侵蚀出现伤痕,这些缺陷一方面会直接引起雷击时电场沿浆叶表面的分布畸变,另一方面也容易将大气环境中的潮气吸附和淤积,在此处形成水膜,水膜中包含的离子受强大电场的影响沿叶片表面移动汇集,造成沿叶片表面分布的电场更加不均匀,沿面闪络电压的下降使得放电击穿变得更为容易发生;其次由于叶片长期暴露在大气环境中,其表面会受到大气中工业排放气体、自然盐碱水雾和飞尘等的污染,在其表面形成污层,这个表面污层在周围环境湿度很高时就会被湿润,电阻率大幅度下降,导致沿面闪络电压下降,在雷击发生时就容易产生沿面闪络.因此绝缘防雷在理论上很有优势,但是对于材料和环境的要求过于苛刻,无法运用到实际工作中.

#### 3.4.3 等离子避雷系统针对风叶防雷的改进

雷暴形成前空间电荷在雷暴云中集中,形成一个以集中区为中心的辐射状的电场结构,在这种结构的电场作用下,同极性电荷远离集中区向外辐射移动.等离子避雷系统是通过向大气中释放异号电荷,将会聚到集中区中和掉空间电荷,以达到降低电场强度的目的,防止导体尖端效应的产生<sup>[3]</sup>.等离子避雷的作用原理是基于等离子体中,正负带电粒子会在雷暴云电荷或先导电荷产生的脉冲电场作用下极化迁移,把被保护物表面产生的感应电荷散布到空气中,使得在空气中电荷更加均匀,使得被保护物处于在等离子体覆盖下,其附近电场强度和电流密度无法达到击穿空气的强度,以达到减少雷击的目的.另外,对于被保护物表面未被等离子体覆盖的部分上产生的感应电荷,由于等离子体极化作用产生的同号电荷也能将其中和,可使未被覆盖表面附近的电场强度消失或减弱,从而使未被等离子体覆盖表面免遭雷击.

目前国内外所研制的等离子避雷系统适用于建筑物或者重要保护物的上端保护,而且不具备提前



- detection data from electric field meter on ground to lightning warning technique[J]. Meteorological Monthly, 2005,31(9):30-33
- [ 8 ] 许小峰. 雷电灾害与监测预报[J]. 气象, 2004, 30(12):17-21  
XU Xiaofeng. Lightning induced disasters and its detecting and forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(12):17-21
- [ 9 ] 朱男男, 宫全胜, 易笑园. 地面大气电场资料在强对流天气预报中的应用[J]. 气象科技, 2010, 38(4):423-426  
ZHU Nannan, GONG Quansheng, YI Xiaoyuan. Application of atmospheric electric field data in severe convective weather forecasting[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(4):423-426
- [10] 王林斌, 李永才, 王伟, 等. 雷暴过程中大气电场变化规律的研究[J]. 气象水文装备, 2008(4):1-4  
WANG Linbin, LI Yongcai, WANG Wei, et al. Research on variation regulations of atmospheric electric field during the thunderstorm[J]. Meteorological and Hydrological Equipments, 2008(4):1-4
- [11] 柴瑞, 王振会, 肖稳安, 等. 大气电场资料在雷电预警中应用[J]. 气象科技, 2009, 37(6):724-728  
CHAI Rui, WANG Zhenhui, XIAO Wenan, et al. Application of atmospheric electric field data in lightning warning[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(6):724-728
- [12] 洪华芳, 周歧斌, 边晓燕. 风力发电机叶片的雷击损伤与雷电保护[J]. 华东电力, 2009, 37(10):1778-1781  
HONG Huafang, ZHOU Qibin, BIAN Xiaoyan. Lightning damages and protection for wind turbine blades[J]. East China Electric Power, 2009, 37(10):1778-1781

## Lightning protection of wind turbine facilities based on lightning warning technology

LI Qiang<sup>1</sup> WANG Tingting<sup>2</sup> LI Nan<sup>3</sup>

1 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information science & Technology, Nanjing 210044

2 Sanming Meteorological Bureau, Sanming 365001

3 Liaocheng Meteorological Bureau, Liaocheng 252000

**Abstract** With the rapid development of wind power technology, the power generation capacity of single machine is increasing and the wind turbine height has been increased to 100 meters. However, the lightning strike risk suffered by the wind turbine also increased. This paper analyzes the mechanisms of lightning strike damage on wind turbine blades, explains the causes and formation of blade damage after lightning strike through examples, and summarizes the characteristics of large turbine blade and environmental factors of wind farm. Some improvements on wind turbine against lightning risk are proposed based on warning data of atmospheric electric field instrument and combined with the latest plasma lightning protection technology. The concept of active lightning protection of wind turbine is proposed, with the purpose to promote development of new lightning protection technology.

**Key words** wind turbine blades; lightning warning; plasma; lightning protection