

新的大型叶片导雷质量鉴定试验程序

Flemming Moeller Larsen
(LM Glasfiber AIS)
Troels Sorensen
(Energi E2)

摘要

本文对 LM 公司针对大型叶片开发的导雷质量鉴定试验程序进行了详细的讲解，它的标准是（草本）（美国）SAE ARP5416 和（欧洲）EUROCAE ED105 航空器材导雷测试标准。开发这个程序的目的是开发一个高压导雷部件测试程序，用于对风机叶片的雷电阻截系统（接收器）中导雷部件的效率进行全面确认。

风机叶片上的高压导雷部件测试到目前为止以美国 MIL-STD-1757 A 为基础，MIL-STD-1757 A 是对航空器材尤其是由纤维复合材料制造的航空部件的测试程序。但是，当测试叶片在自然条件下遭到雷击时，基于上述 MILSTD 得到的结果往往与实际情况偏差较大，无法切实利用。在测试航空部件时也会遇到类似问题。由于这些原因航空工业开发了一种新的测试程序，它融合进了新的（美国）SAE 和（欧洲）EUROCAE 航空导雷测试标准。新测试程序的改进之处主要是，它高度再现了雷电在击中叶片前几百微秒内测试物体所经受的电击情况。

2002 年，LM 公司开发了一种针对风机叶片的导雷部件测试程序，并基于新的（草本）SAE ARP5416 和 EUROCAE ED105，在一个 LM 35.0 米的叶片上进行了高压电击下的全程测试。

符号和公式

C02	Carbon dioxide
kV	Kilo Volt
kW	Kilo Watt
m	Metre
MW	Mega Watt
€	Euro
ts	Micro second

1 背景

目前风机不断发展和尺寸的不断增长。过去 10 年间现代的风力发电开始遍及全球。随着可再生能源的商业化生产，为满足将来的能源需求，以及降低 CO₂ 的排放量，使风机近年来发展得非常快。

从 90 年代初到现在，典型风机的发电量已经增长了 10 倍，从 150 千瓦到 2 兆瓦。图表 1 列举了风机的主要参数。随着塔架高度不同，既定风机的发电总量会在一定范围内有所不同。可以看到大型风机的总高度翻了一番，现在已经超过了 100 米。可以想象，这种高度极易遭雷击，现代风机安装在空旷区域，诸如开阔地、海岸、山脊、高原和海边，很容易被雷电击中。

图表 1：风机的典型参数

Rated power [kW]	Range of hub height [m]	Blade length [m]	Price excluding foundation [1000€]
发电功率[千瓦]	轮毂高度[米]	叶片长度[米]	不包括底座的费用 [1000欧元]
150	35—60	12-13	-----
600	45—80	19-23	450-600
1,000	50—90	26-29	850-1250 *
1,500	60—110	31-37	1350-1800 *
2,000	60—100	34-39	1650-1950 *

* Excl, medium voltage — transformer 不包括普通电压-转换器

现在随着风机的发展，其总高度已经超过了 160 米，叶片长度达到 61.5 米，发电功率为 5MW（装有 LM 叶片的样机预计在 2003 年竖立起来）

现在旋翼（3 个叶片）的费用占到风机总费用的 15-20%。一旦叶片遭雷击损坏，维修费用会很高，特别是吊车和运输费用，以及产量的损失。

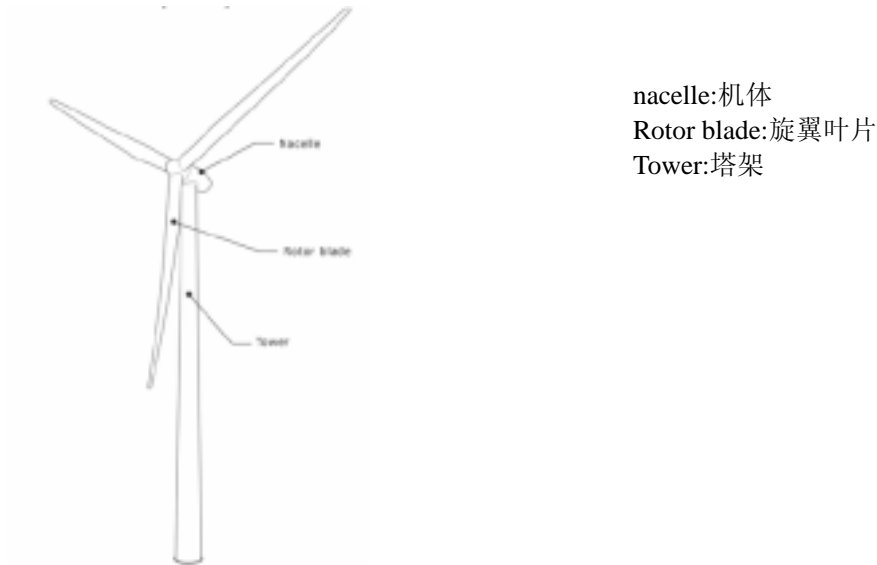
因此对于大型风机，和竖立在雷电频发的地区或岸边的风机，人们很关注其叶片的雷电保护系统。

现在，风机制造商、保险公司和客户经常要求风机叶片的制造商记录风机叶片上的导雷系统的效率，甚至包括最大的雷击也要记录。实验室的测试证明：完整的雷电

保护系统和单个系统要素的能力都是文件的重要组成部分。

为满足这种对导雷部件效率的文件化的要求，LM 公司针对近年来开发的“多接收器系统”，按照新的（草本）SAE ARP5416 和 EUROCAE ED105 对（附录 1）高压雷击部件的测试要求，对 LM 35.0 米叶片进行了全程测试。

图 1：典型的现代风机的设计草图



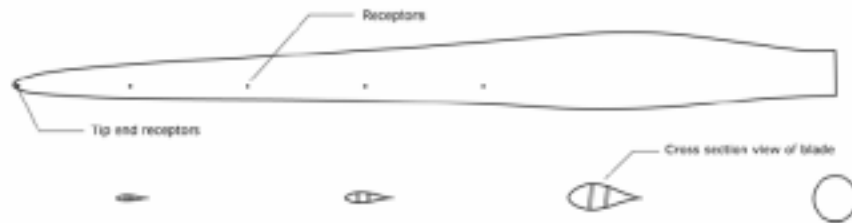
从雷击损坏中获得的经验。实际上风机叶片由绝缘的纤维复合材料组成，若没有安装任何导雷部件经常会遭雷击，尤其在叶片最外端。并且，安装了不完备的雷电保护系统的叶片受损较严重。

从北欧（德国、瑞士和丹麦）风机遭雷击的统计数字上看，每 100 个风机年中据报道有 4-8 次问题由雷击引起。随着地理位置的不同，遭雷击的情况有所不同，比如，在德国南部矮山区每 100 个风机年中据报道会有 14 次雷电造成的问题，而在丹麦和瑞士每 100 个风机年中仅有 4-6 个类似问题发生。

报道中由雷击对叶片造成的损坏占三分之一，其他三分之二的问题则是雷击对电力和通讯系统造成的损害。

报道中的问题有 7-10%涉及到风机叶片，对受损的叶片的维修属于维修费用中最昂贵一种，并且维修需要的时间最长（附录 2）。

图表 2: LM 风机叶片的结构



Receptors:

接收器 Tip end receptors:叶尖端接收器 Cross section view of blade: 叶片的剖面图

当然，这些损坏情况的统计报道包括各种型号、类型和代系的风机叶片，包括从 1990 到 1998 年之间 9 年间的情况。这些统计数字中，大多数由雷电造成损坏的叶片没有防雷保护，是在 1996 年前生产的叶片。

可惜的是，统计中的数字没有报道损坏的风机叶片是否装有雷电保护系统，因此对 1996 到 97 年间在叶片上安装雷电保护系统的效果没法直接从这些数据上看出来。

未来的统计中更具体的，有关叶片运转、有可能的损坏的情况将会非常有用。

90 年代中，雷电对风机叶片造成的损坏相当多，甚至雷击最少的地区，比如北欧也如此。那时候，实际情况是：压力，尤其是来自保险公司的压力迫使风机工业针对风机叶片开发了雷电保护系统。过去的 10 年间，它们被改造成为目前的 state-of-the-art 系统。

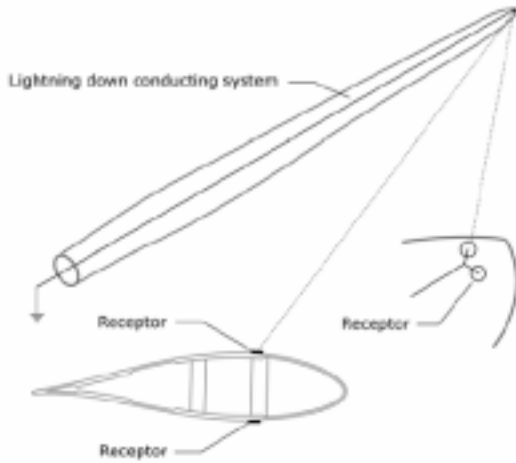
从那时候开始，随着风机尺寸的不断增长，以及相关费用的大额投资的不断增多，人们对风机叶片雷电保护系统的可靠性和效率的要求越来越高，安全和可靠地运转风机变得越来越重要。

标准的 LM 雷电保护系统。雷电保护系统要求在叶片上指定的接收器上安装可靠的导雷部件，雷电从这些接收器向风机轮毂上叶片的翼根端安全传导。

过去，风机叶片上曾用过几种雷电保护系统，以免雷击损坏。

作为世界上位于领先水平的风机叶片制造商，LM 公司在（图表 3）所示的雷电系统的处于领先的位置。从 90 年代中期开始，这个系统被成功安装在 4 万多个长度从 17 米到 40 米不等的叶片上。

图表 3: 标准的 LM 雷电保护设计



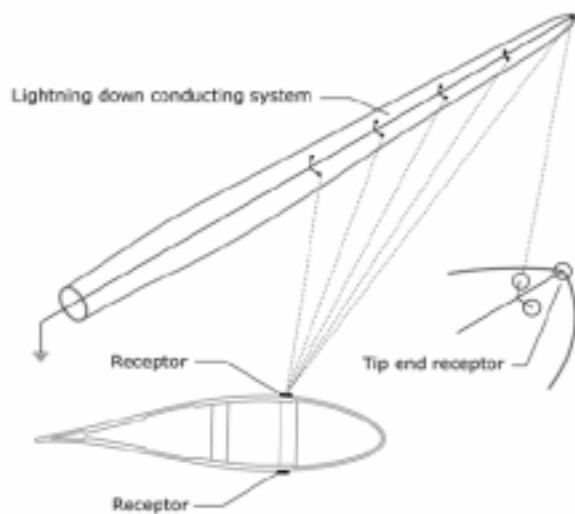
Lightning down conducting system:
雷电传导系统
Receptor:
接收器

雷电保护系统由安装在叶片尖端表面一侧上的接收器组成，这些接收器通过内部的传导部件与叶片翼根法兰盘相连。

新的雷电保护设计。LM 公司安装在大型风机叶片上的新的多接收器雷电保护系统是“标准 LM 公司雷电保护设计”的一个改进版，它还在叶片两侧（如图表 4）装接收器。并且，在独立的叶尖还有一个叶尖端接收器。

这个系统是对标准的雷电保护系统设计进行改进的结果，因而不仅满足了客户的需要，也是为大型叶片提供安全和彻底经过测试的雷电保护系统的一种挑战。

图表 4: 新的 LM 雷电保护设计



Lightning down conducting system:
雷电传导系统
Receptor:
接收器
Tip end receptor:
叶尖端接收器

2 试验室测试

在研发过程中，LM 通过所有雷电保护系统进行导雷测试，也包括高电压导雷部件测试。这些测试使 LM 能为风机制造商提供雷电保护系统功效的技术文件

导雷电流测试：LM 在所有 LM 的叶片的雷电保护部件上进行高电流测试

所有的测试依照 IEC 61313-1 附件 C 的要求执行，至于 1 级导雷电流在 IEC 61024-1 中有定义。

所设计的测试可证明系统部件能够经受最剧烈的雷电电流，同样使 LM 能为风机制造商，保险公司和客户提供导雷保护系统部件的技术文件。

高电压导雷质量鉴定试验：以前，风机叶片雷电保护系统的导雷质量鉴定试验是基于 MIL-STD-1757 A (Ref. 5) 标准，或它的相等标准。测试程序规定，一个棒型高电压电极不能超过测试物体表面 1 米。当一个风机叶片执行这一测试程序 (Ref. 6, 7 和 8)，高电压电极指向未被保护的表面且距离接收器（或其他雷电保护表面）超过 1 米，放电电流刺破表面薄层，这是因为强烈的局部电流区域直接地出现在高电压电极地前面测试物体的表面上。

由于野外数千叶片的雷电保护已证明相当成功。但也清楚的表明 MIL-STD-1757 A 程序不能完全代表风机叶片能承受外界自然的雷电冲击。

MIL-STD-1757 A 是通过航天器的导雷质量鉴定试验研发的，由于航天工业经历过试验结果和实际情况的不同，美国 (SAE) 和欧洲 (EUROCAE) 航天器权威机构已研发了新型导雷质量鉴定试验程序，它在较大程度上证实能代表航天器的飞行导雷部件经受的自然条件。

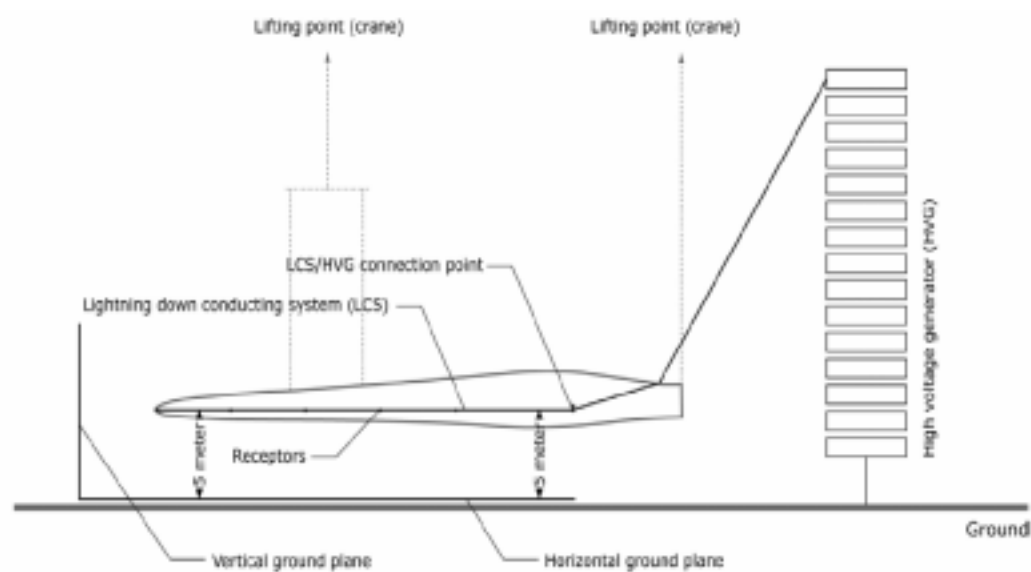
在 2002 年，LM 采用了上述的 SAE-EURPCAE 测试程序并且在 LM35.0 叶片上进行全程高电压冲击部件测试。测试在加拿大蒙特利尔的 IREQ 高电压实验室中进行。

高电压测试设立。所测试叶片的标准和以后生产的 LM35.0 叶片完全一致，除了叶片顺风面放置的有特殊安排

导雷接收器与那些 LM 通常放置在叶片的逆风面完全一致，而且叶尖的新接收器构造与叶尖最远端所使用的雷电接收器相同。

测试叶片被安装在叶根终端的一个特殊导雷连接器因而可连接高压发生器。这一特殊向下导体是一个被设计与通常的向下导体相同，这种构造使得接收器在测试的同时轻松的更换接收器。

测试物体（图 5）通过尼龙编织物和两个 5 米长的玻璃纤维悬挂杆悬挂在离地面 5 米的空中。



Lifting point (crane):起吊点 LCS/HVG connection point:LCS/HVG 连接点
Receptors:接收器

Lightning down conduction system (LCS):导雷系统 High voltage generator:
高压发生器

Vertical ground plane:与地面垂直的平面 Horizontal ground plane:水平面
Ground:地面

在叶尖前方 5 米悬挂一张垂直地面网。这张网的目的是确保叶尖有足够压力从叶尖终端接收器放电。另一目的是控制叶片前方带电区域，否则会受到实验室墙壁和放置在地面上的设备的影响。一个被放置在叶片下面的地面上。

叶片安置在高于地面 5 米的地方，这样叶片被置于一个最恶劣的环境中，叶片的接收器要比在自然环境中的风机叶片更多的暴露在外面。

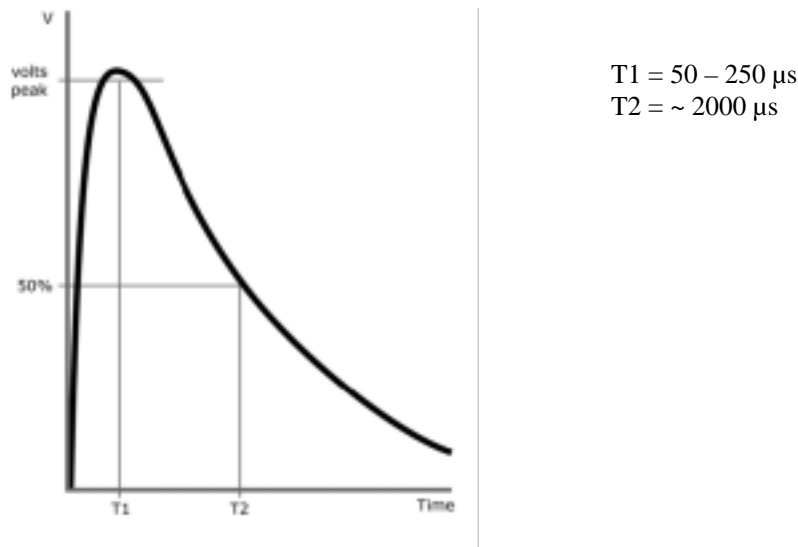
高电压测试设立

叶片的导雷保护系统通过 Marx 型高电压发生器经一个绝缘的高电压电缆连接在叶根的向下导体上并施加电压。

所应用的测试波形是电压波形 D(图 6)，转换脉冲的上升时间在 50 到 200 μs 之间，是电弧从物体表面逐步展开的允许时间。它将在低概率部件区域给测试物体一个更高的冲击。电弧应该发生在脉冲波前面并且接近最高峰。

测试符合最初 SAE-EUROCAE 程序的电火花部件测试 A

图 6 波形 D



测试照片和电弧的图形是(图 8 和 9)

依照 SAE-EUROCAE 程序，测试中必须考虑的四项条件：

1. 叶片导雷保护系统的任何部分距离地面至少 1 米。
2. 叶片的任何部分距离地面至少 0.5 米。
3. 电弧的回合点应该出现在空中且远离叶片。
4. 来自地面的电弧不必是从地面边缘发生的。

高于地面 5 米悬挂的风机叶片的测试明显的符合条件(1)和(2)。

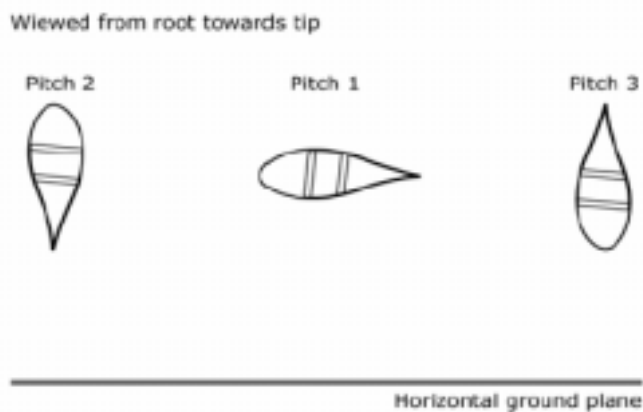
确认所有测试放电的照像和录像记录符合条件(3)和(4)的要求。

测试程序：最初叶片以逆风面朝向地面悬挂，并且覆盖金属网(小孔防护网)从而在确

认脉冲形态和确定每个极性的电弧电压时，保护它免受损坏。一旦完成，移开金属网。当给叶片电压导电保护系统施加正极脉冲时，出现的电弧大约为 1400KV，负极脉冲大约为 2500KV。

依照 SAE-EUROCAE 程序，测试电压应被加在两级并且在每个极性的两次放电通常应该出现在测试物体每个方位(电极方位)。

叶片之所以在三个不同斜度方位测试是为了包括所有相关的环境。如下所示(图



7)

Viewed from root towards tip:从翼根朝叶尖方向看 Horizontal ground plan:地平面

图 7 叶片测试斜度角度

斜截面 1-叶片逆风面朝向地面

斜截面 2-叶片尾边朝向地面

斜截面 3-叶片导向边朝向地面

在三种位置中，接收器和地平面之间保持 5 米的垂直距离。

在每个位置中，测试所执行的接收器内部间距为 1，3，5 和 7 米。

最初 3 个测试电弧全都发生在从叶尖接收器水平面到叶片顶端前面 5 米与地面垂直的平面上。之所以移动到叶片顶端前面 7.5 米的位置为了促进负极电弧的逐步展开从叶片接收器到地面。

下列为测量和数据记录

1. 为每个测试拍照

2. 每个电压脉冲的波形，极性和振幅
3. 用多个照相机与录像记录，保证包括整个叶片。
4. 实验室环境数据记录(温度，压力和湿度)，日期和测试时间

3 结论

正极脉冲电压：按照负极雷电环境总共做了 30 个测试(自然界超过 90%的雷电来自负极)。叶尖末端的接收器和叶片表面的接收器都会有电弧到达地面。

在任一接收器和任一地面之间放电的成功率是 100% (即叶片的表面和构造没有损坏)。

不仅没有发现对叶片的桨距方向有影响，而且也不会对接收器内部造成损坏。在一些试验中，从录像记录中也许可以确定，电弧经过一个电火花从叶片上的接收器到地平面或者从地平面遇到短应答电火花而扩展开来。大多数情况下，正闪流是在同样脉冲期间是从几个接收器中产生的。

负的脉冲电压：将负脉冲电压作用在叶片导雷系统上做过总共 29 个试验，结果与正的脉冲(不到 10%的自然雷电流是正极性的)一致。到达地面的电弧会发生在叶尖接收器和叶片侧面的接收器。

在 2 个试验中，穿过复合层的放电发生在叶尖接收器附近。目前记录的成功率是 92%。

对桨距方向的一些影响有可能从这里看出来，因为当叶片叶缘的一边朝地面停放时都会穿过复合层表面/结构发生放电，而在 11 个将叶片风面朝向地面的试验中没有发生损坏。

负脉冲电压试验中在叶尖上产生小孔的原因很可能是叶尖内部雷电保护部件的绝缘不足引起的。

因此要对相应的部件进行改进。但是，这些需要改进的部件在这篇文章出版前还没有完成。

在一些试验中，从录像记录中也许可以确定，电弧经过一个电火花从叶片上的接

收器到地平面或者从地平面遇到短应答电火花发展开来。大多数情况下，正闪流是在同样脉冲期间由几个接收器产生的。

需要局部改善的辅助试验。用高度直到 1 米的 Franklin 棒型电极直接放在叶片下接收器之间的中点上。将叶片悬在 5 米高的位置上，迎风面朝向地面。

这样做的目的是调查局部加强电场的影响，这一测试可以看作是 MIL-STD-1757 A 和新 SAE-EUROCAE 测试程序的结合。

加在叶片导雷块上的正脉冲电压产生 14 个电弧。这些放电全都不受 Franklin 棒的影响，因为所有这些电弧都发生在一个接收器和地平面之间。

有 9 个电弧是由作用在叶片导雷块上的负脉冲电压引起的。这些电弧中的 7 个，在从一个 Franklin 棒中产生的加强的电场出来的一个电火花，导致了穿过远离接收器的叶片表面/结构层的放电。

附加的盐水测试。在对模拟叶片表面特殊区域人为污染的情况下进行了一些附加测试。污染物是用于高电压绝缘体测试的导电物质 (NaCl 1.45 g/l, 瓷土和水中的膨润土)，将它们喷涂在叶片表面的特殊区域。

人们发现这种表面污染物促进了污染区中部和边缘电火花的产生。还发现如果这个污染区没有接触到雷电接收器，电火花会从污染区发展到未污染区进而穿透远离接收器的复合层放电。

附加的局部测试。按照 SAE-EUROCAE 的测试程序，应该对每一极都进行两次放电。但是，在自然条件下，风机叶片要能承受强烈的外部电场，无论暴风雨何时来临。这些事实显现了风机叶片中的复合材料的作用，尤其是包裹雷电保护系统部件的材料。因此复合材料要能承受长期疲劳损坏的影响，这与自然界中高电压系统绝缘材料的长期风化类似。

这也证明了要对长期受多脉冲影响的叶片上的暴露部件和雷电保护系统进行研究。

4 对进一步工作的建议

可靠的重要性和风机叶片的雷电保护证据已经备有证书。风机越来越高, 加大了雷击的风险, 目前陆上风机的发展趋势暗含了一种潜在的风险: 与雷击相关的运转和维修费用变大了。这些发展促使我们呼吁:

提议将风机叶片的雷电测试鉴定程序归入 IEC 61400 标准中。这将为这个行业提供一套标准的测试要求, 帮助产生具有可靠性的和质量过硬的终端产品。

这项倡议最先由工业部发起, 国家终端用户组织和保险公司收集和分析雷电保护系统的数据和它们在现有水平上的效果。

这将使本行业有可能齐步向前发展, 以确保风机叶片拥有尽可能好的雷电保护系统。

结论

鉴于这篇文章所描述的有关雷电测试的良好的经验, 得出以下对风机叶片的雷电鉴定测试程序:

所有雷电保护系统的部件及其组装件都应遵守雷电电流的测试

完整的叶片雷电保护系统要遵从高电压原型测试, 这个测试符合在新 SAE ARP5416 和 EUROCAE ED105 程序中描述的高电压袭击附加测试。

对部件进行的补充局部高压测试必须要面临强电场情况下。

在高压测试中, 风机叶片应该:

在较大的地平面上矗立, 雷电保护系统在叶片根部导雷块末端应该通有高电压转换脉冲。

在足够大的地平面上一定高度上停放以确保电弧长度与闪电航空集散站设计特征尺寸相匹配 (例如雷电接收器的间距确定)。

在几个桨距位置进行测试以考虑完整的雷电保护系统所有相关的方向, 相对于外界的叶片内和叶片外。

在高电压的测试中, 地平面应该足够大以确保放电尽可能避免发上在地平面的边

缘。

这样的雷电鉴定测试程序会使制造商：

连续生产前校验新的雷电保护系统的设计

提供风机雷电保护系统、保险公司和客户等文件

参考文献

- 1 SAE ARP5416 EUROCAE ED105, 飞机雷电测试方法, 第 5 部分。#2002 年 12 月, 起草
- 2 IEC 61400-24, 风机发电系统, 雷电保护第 24 部分, 国际电力技术委员会, 2002-7
- 3 IEC 61312-1, 抗电磁波保护—第 1 部分—通用原则—1995-02 第一版
- 4 IEC 61024-1 抗雷电结构的保护, 国际电力技术委员会, 1990
- 5 MIL-STD 1757A, 空气动力学工具及部件的抗雷资格测试技术, 1983
6. H. W. Gewehr, 复合材料的叶片雷电保护, 美国风能协会会议第 8 期—11 期, 1980 年 6 月, Pittsburg PA, USA.
- 7 I. Cotton, 风机的雷电保护, 曼彻斯特科技大学提交, 曼彻斯特联合国, 1998
- 8 R. Schmid, 关于雷电保护对风能公司的 GRP 叶片样品的调查, 第 24 次雷电保护国际会议, 9c. 1, pp. 955-959, 英国伯明翰, 1998 年 9 月 14-18 日

作者地址

Flemming Moeller Larsen. LM Glasfiber A/S, Rolles Moellevej 1, DK-6640 Lunderskov, Denmark.

Troels Sorensen. Energi E2, Teglholmegade 8, DK-2450 Copenhagen SV, Denmark.

图 8: 脉冲 (电弧电压为 1484KV, 时间为 $137\mu s$)



图 9：正脉冲（电弧电压为 1511KV 时间为 141 μ s）



