

多物理场仿真为风力发电机 免受雷击提供解决方案

美国 NTS 公司的工程师借助多物理场仿真揭开雷电击中风力发电机时的神秘面纱。

作者 GARY DAGASTINE

随着全世界不断减少对化石燃料的依赖，全球的风力发电市场迎来蓬勃发展，在未来几年，其年均市场规模预计可达到 700 亿美元。风力发电规模如此之大，可谓是一项伟大的成就；然而，一股强大的力量正在成为该产业发挥全部潜力的障碍：雷电，这是自然界最具破坏性的力量之一。

雷击是引起风力发电机意外停机的最主要原因，它不仅带来数以兆瓦计的电力损耗，还会产生巨大的运行和维护成本。

由于风力发电机拥有巨大的旋转叶片、高耸入云，并且长期暴露的自然环境中，因此特别容易遭受雷击。闪电几乎可以直接或

间接地对风力发电机的所有组件造成严重破坏，包括叶片、控制系统和其他电子元器件。然而，由于后勤条件的限制，不仅维修费用高，对实际的维修操作也提出了巨大考验。



图 1. NTS 运营的高压发生器 (2.4 MV 的马克思发生器)。

NTS 的子公司 Lightning Technologies 是复杂防雷系统设计及验证的全球领导者，主要面向航空航天领域，包括飞机、航天器和发射设备；同时还为风力发电场、工业中心、高尔夫球场、主题公园以及其他高风险场所提供专业服务。

国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, 简称 IEC) 是国际性电工标准化机构，他们制定了叶片的耐雷击水平和防雷击要求；NTS 工程师一直是其分委员会的积极成员。工业标准 IEC 62305 要求风力发电机制造商在叶片制造中加入雷击防护设计。为了提供最有效的保护，工程师必须能够判断当叶片遭受雷击时，其中流过大电流，以及准确的电流流向。但问题是，对雷击电流特性的简单假设得出的结论往往

并不准确。

⇒ 深入剖析雷电流

在美国马萨诸塞州皮茨菲尔德，一栋约 1672 平方米的建筑设施中，NTS 运营着世界上功能最齐全的雷电模拟实验室之一，高约 4.3 米和 7.6 米的闪电发生器伫立其中，可产生高达 2.4 MV 的电压 (图 1)。

几十年来，NTS 一直致力于风力发电机叶片保护系统的设计和研发。由于风力发电机叶片为翼型，该公司可以将航空航天应用方面的深厚知识基础直接应用到这一领域。

NTS 皮茨菲尔德分公司模拟分析团队的负责人 Justin McKennon 表示，传统的风力发电机是通过添加表面保护层 (surface protection layer, 简称 SPL) 覆盖采用轻质、高强度碳纤维复合材料制成的

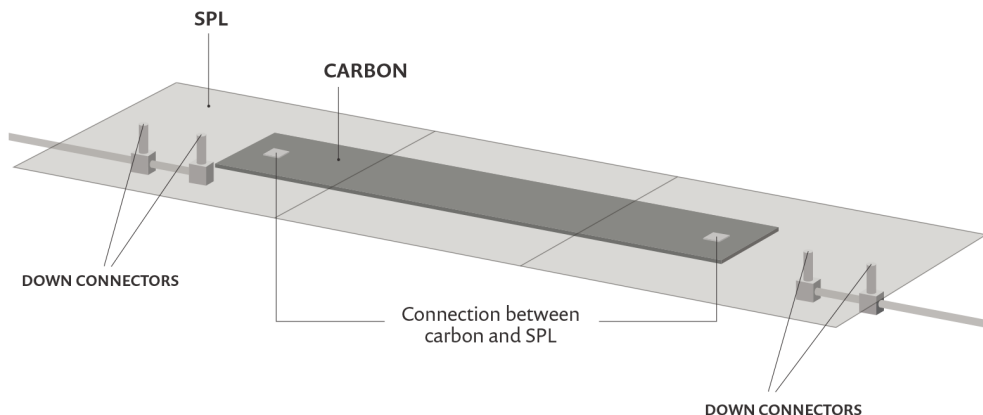


图 2. 碳堆叠层上方覆盖的薄型铝表面保护层 (SPL) 的几何结构。图注: SPL - 表面保护层; CARBON - 碳层; DOWN CONNECTORS - 引下线连接; Connection between carbon and SPL - 碳层与 SPL 之间的电连接

叶片, 以此实施保护措施。SPL 一般由导电网构成, 可将叶片上雷电“附着”(雷击)点的电流安全引导至地面。

“很多叶片结构都包含与表面保护层平行排列的碳纤维结构层, 它们叠加起来形成碳层, 并沿叶片长度在碳堆叠层和 SPL 之间建立了周期性电连接。这样做是为了防止在两者之间产生过高的电压差, 因为一旦出现高压差, 就可能产生电弧, 进而损坏叶片。电连接虽然可以降低电压差, 但也会使电流流入碳纤维复合材料, 这无形中增加了叶片的设计难度。” McKennon 解释说。

确定碳堆叠层对不同电流的负载能力, 预测可能出现的雷电附着点和击穿的可能性等因素, 这些并不是无关紧要的小问题。McKennon 解释说, 叶片物理测试的成本(有些叶片长达 70 米甚至更长)十分昂贵, 对雷电效应进行数值模拟已经成为设计过程中的一个关键环节。

McKennon 表示: “由于雷电现象涉及的物理场非常复杂, 工程师很容易做出不恰当的假设, 从而在很大程度上影响模型的准确性。”

⇒ 仿真减少过度设计

人们常常容易做出这样一个错误假设: 碳堆叠层的电导率在各个方向都是相同的。而实际上, 碳纤维的电导率在不同方向上可能截然不同。

在图 2 显示的几何结构中, 碳堆叠层上方 5 mm 处覆盖了由铝片制成的 SPL 导电网, 其厚度约为 500 μm, 电导率根据实验测量值进行设置; 碳纤维的电导率同样采用了实验值。工程师在 COMSOL 模型中同时分析了理想各向同性特性和实际各向异性

特性两种情况。

工程师使用 IEC 标准电流波形的解析表达式, 将电流注入 SPL 的一端, 电流会通过铜

质引线在另一端流出。SPL 与碳层之间的所有电连接均由铜材料制成。

在研究设计和模拟电磁脉冲传播的过程中, McKennon 使用 COMSOL 软件求解了磁矢势的时域波动方程。他根据仿真结果确定了雷电附着点处的相关电流、电场和其他数据值, 从而深入分析了整个结构中电流的总体特性。

各向同性假设低估了流经 SPL 的电流量, 据此得出的结论是: 碳层中流过的电流更多, 而 SPL 中的电流更少(图 3)。碳层由许多独立的纤维层组

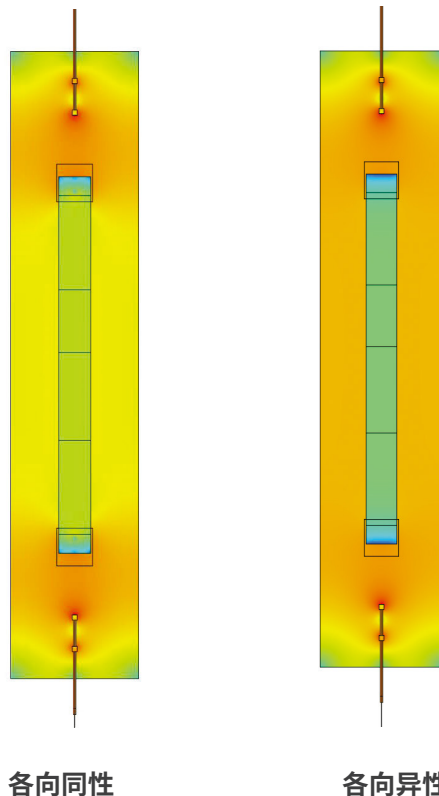


图 3. 仿真结果显示, SPL 在各向同性理想情况下的电流量明显小于各向异性实际情况的电流量。

成。纤维层内沿纤维方向具有极强的导电性，但要使电流在其中流入和流出，却是一项极具挑战的工作。如果碳层与其他物质的界面通过大电流，则许多独立的碳纤维会因为过热和/或电弧而烧毁（图 4）。由于碳层承受着主要的结构载荷，这种损坏会大幅缩短叶片的使用寿命，严重时甚至会导致叶片出现灾难性故障。这就是为什么工程师一直希望尽力避免碳层中存在过多电流的原因。

各向同性假设严重高估了碳层中的电流密度，这是因为它忽略了碳纤维中的电阻实际上具有很强的方向性（图 5）。如果忽略这种特性，仅考虑碳层在体积和长度上的优势，碳层似乎比 SPL 更适合作为电流路径，然而这与事实完全不符。这种错误的高估很可能使工程师面临一些其实根本不存在的问题，延缓开发进程，造成产品过度设计。

McKennon 总结道：“在模拟复杂的物理场时，你必须明确哪些是关键因素，哪些是干扰项，然后循序渐进地逐步建立模型，才能避免引入错误或采用不恰当的假设，确保仿真结果的准确性和可靠性。”

⇒ 根据精确结果做出明智的商业决策

“现在，我们已经具备了快速建立并优化仿真模型的能力，这不仅帮助我们大大降低了项目风险，还让按需应变地获取工程级数据变成了现实。” McKennon 评论道，“我们无需花费大量时间和资金来制作复杂的测试样品，而是使用 COMSOL 模拟各种物理现象，这明显缩小了项目中潜在问题涉及的范围。在很多情况下，我们无法使用实物样品测得关键数据，此时就需要利用数值仿真分析来弥补这些不足。”

“时间就是金钱，在我们行业尤其如此。借助软件提供的强大功能，我们能够为客户提供优质高效的服务。事实上，一些客户对仿真的有效性充满信心，他们甚至会完全依赖我们的仿真结果来制定大批量生产的业务决策，很少再进行实验验证。面对如此的利害关系和客户的高度信任，我们不允许自己犯错，也无法承担任何错误造成的后果。COMSOL 作为一款建模仿真工具，为我们带来了无穷的价值。我们也相信，COMSOL 模型能够准确地反映真实世界。” ❖

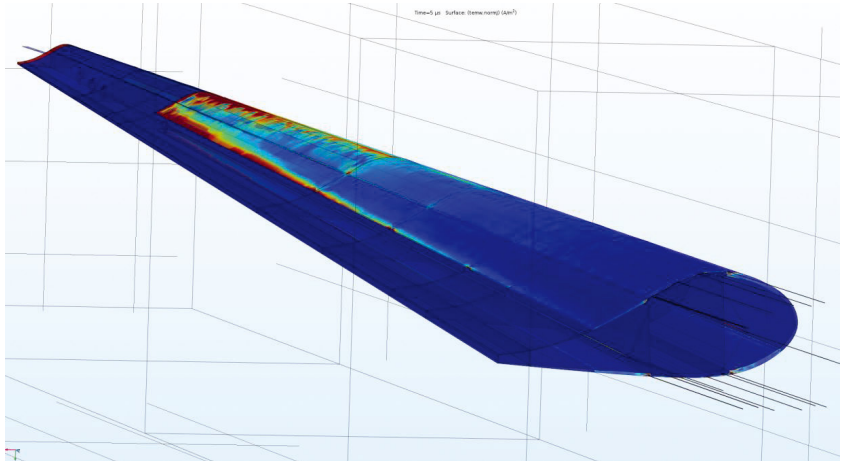


图 4. 仿真结果显示了由碳纤维复合材料制成的风力发电机叶片样品中的电流密度。

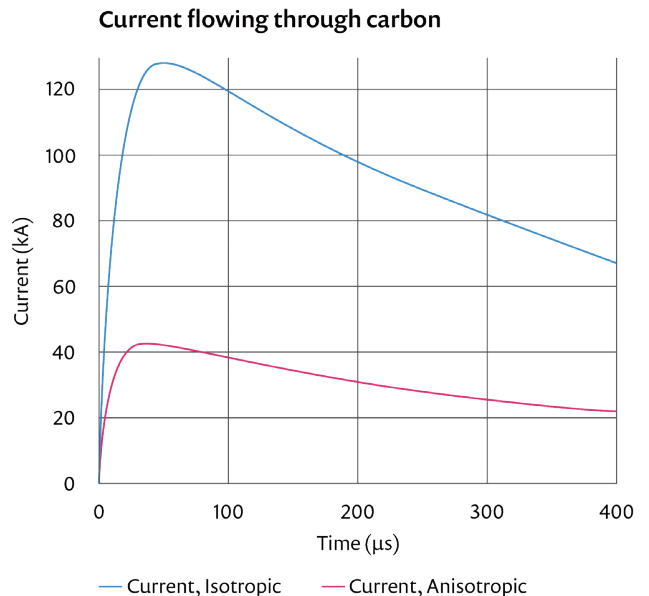


图 5. 绘图显示了各向同性和各向异性碳纤维中的电流水平。



Justin McKennon, NTS 建模分析团队负责人。