DOI: 10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2020. 02. 012

综合能源背景下风电叶片雷击防护安全研究

Study on wind turbine blade protection against lightening applied in comprehensive energy

李新凯 刘蔚 张廷军 汪佩明 赵健 孙曼杰

LI Xinkai ,LIU Wei ZHANG Tingjun ,WANG Peiming , ZHAO Jian ,SUN Manjie

(中国华电科工集团有限公司,北京 100070)

(China Huadian Engineering Company Limited , Beijing 100070 , China)

摘 要: 雷击是造成风电叶片损坏的重要因素之一 综合能源背景下风电设备安全可靠性更加突出。以提高风电机组雷击安全为目的,设计了一种叶片外敷导体的风电叶片雷击防护方案,并从理论及实验角度验证了该方案的 雷击防护效果。重点以风力机专用翼型 DU93 - W - 210 翼型为研究对象,采用计算流体力学(CFD)方法,研究 了翼型外敷导体直径对翼型气动性能的影响规律。研究结果显示,随着导体直径的增加,翼型升力系数线性减 小,翼型阻力系数线性增加,升阻比下降。0°攻角时,带导体翼型升力系数下降最多,当导体直径为10 mm 时,升 力系数最多下降约10%。4°~16°攻角时升力系数下降相差不大,升力系数平均下降了约3%。研究结论可用于 指导风电叶片新型接闪系统设计,提高风电机组雷击安全可靠性。

关键词:综合能源; 雷击; 安全; 风电; 叶片; 翼型; 计算流体力学

中图分类号: TE 09: TM 614 文献标志码: A 文章编号: 1674 - 1951(2020) 02 - 0063 - 05

Abstract: Lightning stroke is an important reason for wind turbine blade damage , and the safety and reliability of wind turbine equipment is more prominent in comprehensive energy utilization. To improve the protection against lightning for wind turbines , an anti-lightning scheme that covers wind turbine blades with external conductors is designed. The effect of the scheme has been verified theoretically and experimentally. Taking the DU93 – W – 210 airfoil which is specialized for wind turbines as an research objective , using computational fluid dynamics (CFD) method , the influence of the external conductor diameter on the aerodynamic performance of this airfoil is studied. It is found that with the increase of the conductor diameter , the lift coefficient of the airfoil decreases linearly , and the drag coefficient of the airfoil increases linearly , and the lift-drag ratio decreases. At a 0° attack angle , the lift coefficient of the airfoil with conductor drops the most. When the diameter of conductor is 10 mm , the lift coefficient decreases by 10% at the most . At a 4° – 16° attack angle , lift coefficient reduces slight , which is roughly 3% on average. The research conclusion can be used to guide the design of new lightning arresting system for wind turbine blades and improve the safety and reliability of wind turbine units. **Keywords**: comprehensive energy; lightning; safety; wind turbine; blade; airfoil; CFD

0 引言

雷击是影响风电机组安全运行的主要因素之 一。风电机组的本体结构高耸突出,且常位于旷野 或山区地带,是地面上容易受到雷电直击的大型金 属性结构体^[1]。同时,由于风电机组叶片叶尖的对 地高度随机组单机容量的增大而不断增加,风电机 组在空间引雷的效果明显增强。这导致大容量机组 的雷击损坏事故率进一步上升^[2]。欧美以及日本等

收稿日期:2019-11-04;修回日期:2020-01-16 基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51806221) 国的运行数据表明^[3],风力发电机组所遭受的绝大 多数雷击的雷击点位于机组的叶片^[4]。巨大的雷电 流通常由风力发电机组的叶片注入机组,并常在叶 片的内部或表面形成电弧。现代风电机组的叶片都 是由复合材料,如玻璃纤维增强复合材料(俗称玻璃 钢),制成的大型中空结构体。这些复合材料耐受高 温的性能较差,因此电弧会造成叶片的严重损坏。 据统计,由雷击引起的风电机组叶片损坏的年故障 率约5%。大容量风电机组叶片的雷击防护已成为 制约风电机组运行可靠性水平提升的瓶颈问题 之一。 目前,风电机组叶片的防护设计主要依据国际 电工委员会 IEC 在 2002 年颁布的风力发电机组防 雷推荐标准 IEC/TR 61400 – 24^[5]进行。但依据 IEC/TR 61400 – 24 设计的风电机组雷电接闪防护 系统存在失效率高的问题。这是因为 IEC/TR 61400 – 24 仅给出了一般性和经验性的设计原则, 未充分考虑风力发电机组雷击过程上行先导产生机 理和上、下行先导接闪机理,因此无法给出定量化的 设计条款和具体的实施细则。

对雷击过程的机理研究最早可以追溯到 1760 年富兰克林发明了避雷针^[6]。雷击过程的机理研 究需以雷击模拟实验获得的雷击过程为基础。近年 来,由于高电压实验手段不断建立和完善,雷击过程 的机理研究取得了长足进展。特别是 20 世纪 60— 70 年代,高压长空气间隙放电实验极大地推动了人 类对雷击现象和雷击过程的认识。在此基础上,雷 击过程的某个阶段(如上行先导的起始和发展)也 已经被证明可以通过雷击模拟实验利用冲击高压发 生器产生的双指数冲击电压波制造空气放电来 模拟^[7-14]。

通过对国内外风电机组雷击接闪过程及机理研 究现状以及叶片接闪系统研究现状的全面分析,可 以得出目前的研究还存在不足^[15-16]。需要在明确 风力发电机雷击接闪机理的前提下研究新型雷击接 闪防护系统。

基于雷击接闪机理,本团队提出了一种在叶片 外表面敷设导体的方案^[17],用于屏蔽下引线起始上 行先导,从而达到保护叶片本体的目的。本文基于 上述研究成果,采用计算流体力学(CFD)方法研究 了外敷导体直径对风力机专用翼型 DU93 – W – 210 翼型气动性能的影响规律。

1 几何模型及数值方法

1.1 几何模型

数值计算对象为 DU93 - W - 210 翼型,相对厚度 21.0%,尾缘厚度 0.5%。计算几何模型如图 1 所示。



图1 计算几何模型 Fig.1 Computational geometry model 外置导体布置于翼型压力面(迎风面);导体距 前缘、尾缘为0.1 C(C 为翼型弦长 C = 1 m)。

导体直径用 *D* 表示,分别研究了 *D* 为 2 3 4 5, 6,7 8 9,10 mm 时对翼型气动特性的影响。

1.2 数值方法

计算网格:采用 ICEM(网格划分软件) 进行全 域结构网格划分 对翼型尾缘及下游部分进行网格 加密处理,计算翼型为 2D 网格,翼型周向布置 380 个网格,径向布置 357 个网格,第1 层网格高度 0.001 mm,保证 $y^+ < 1(y^+ 是壁面第1 层网格高度$ 的 1/3 与当地流体黏度长度的比值)。计算网格如图 2 所示。



图 2 计算网格 Fig. 2 Computing grid

边界条件: 计算域为 30C。采用速度进口、压力 出口边界条件,叶片表面及外置导体设置为无滑移 壁面。边界条件设置如图 3 所示。



图3 计算边界条件

Fig. 3 Boundary conditions

求解设置: 基于 Fluent 求解器 ,SA(Spalart Allmaras) 湍流模型 ,二阶精度; 计算攻角: 0° ,4° ,8° , 12° ,16° 20°; 计算雷诺数: *Re* = 1 × 10⁷ 。

2 计算结果分析

2.1 数值方法验证

以未加外置导体的洁净翼型为例进行数值方法 验证,风洞实验在华北电力大学风洞实验台完成,由 于风洞实验数据雷诺数为 1×10^6 ,所以验证时,计 算雷诺数也为 1×10^6 。图 4 为 DU93 – W – 210 翼 型气动特性,图 4 中: α 为翼型攻角,(°); C_1 为升力 系数,无量纲值; C_4 为阻力系数,无量纲值。从图 4 中可以看出,在翼型最大升力系数处(8°攻角),计 算值与实验值差别较大。在其余攻角时,无论是升 力系数还是阻力系数与实验值差别较小,从而验证 了数值方法的可靠性。



2.2 结果分析

图 5 翼型气动特性随攻角的变化规律,图例中: "无导体"表示未敷导体翼型; 2 mm β mm 等表示翼 型外敷导体直径。由图 5 可见,当翼型雷诺数为 1×10^7 ,无导体翼型失速攻角约 16°时,最大升力系 数可达 1.90 左右。当翼型外敷导体后,在翼型升力 系数的线性段,升力系数的绝对值差别较小,只有在 20°攻角时差别较大。阻力系数在 0° 20°攻角时差 别较大,其余攻角时阻力系数绝对值差别不大。升 阻比基本随导体直径线性降低,最大升阻比对应的 攻角为 4°。当 D = 10 mm,在攻角等于 20°时,翼型 升力系数下降,阻力系数增加,升阻比降低;当 *D*=2~9mm 在攻角等于 20°时,升力系数增加,阻 力系数变化较小。





图6为翼型气动特性随导体直径的变化规律。 图中 横坐标为不同导体直径 纵坐标分别为升力系 数、阻力系数、升阻比。由图6可见,随着导体直径 D的增加,翼型升力系数总体上呈下降趋势,阻力系 数呈上升趋势,升阻比下降;翼型升力系数、升阻比 基本与导体直径呈线性变化趋势;0°攻角时,升力系 数变化趋势与其余攻角相差不大,阻力系数增加斜 率变大,升阻比下降斜率最大。





图 7 是不同导体直径的翼型气动特性较洁净翼 型的变化率。横坐标是导体直径 纵坐标是变化率。 由图可见、0°攻角时,带导体翼型升力系数下降最 多 / 当导体直径为 10 mm 时 ,升力系数最多下降 10% 左右。4°~16°攻角时升力系数下降相差不多, 升力系数平均下降了 3% 左右。20° 攻角时,除了 D = 10 mm 时 其余导体直径对应的升力系数较洁净 翼型有所增加 究其原因是因为此时洁净翼型已经 失速,而带导体翼型类似于转捩带作用,一定程度上 抑制了翼型失速。对于阻力系数,当翼型攻角为0° 时 带导体翼型阻力系数增加最大 斜率也最大。除 了 20° 攻角 其余 攻角时阻力系数 变化斜率基本一 致 阻力系数增加的平均值在 7% 左右。对于升阻 比 除了 20° 攻角 其余攻角带导体翼型升阻比均有 所下降。0°攻角时,升阻比下降斜率最大,最大升阻 比在 D = 10 mm 时,下降约 56%。4°~16°攻角时升 阻比平均下降7%左右。



图 7 不同导体直径的翼型气动特性 较洁净翼型的变化率



图 8 为不同导体直径的翼型截面速度云图。由 图可见,导体对翼型绕流场的影响主要集中在导体 下游速度场。随着导体直径的增加,导体下游的低 速区范围逐渐扩大。

图9为4°攻角时,不同导体直径的翼型表面压 力系数分布(图中 横坐标为当地位置 *x* 与翼型弦长 *C*之比;纵坐标 *C*_p为翼型表面压力系数)。导体对 翼型一周压力系数的影响主要集中在导体上、下游。 由于导体存在,在导体上游翼型表面压力变高,导体 下游翼型表面压力变低。这是由于外置导体,在翼 型压力面导体下游产生了不同程度的分离旋涡,旋 涡尺度大小与导体直径成正比; 在翼型压力系数曲 线上,导体前由于流体集聚,压力增加,导体下游形 成的涡核为低压区。不同导体高度之间的压差变化 也较小。









3 结束语

针对目前大型风电机组叶片雷击损伤事故率高, 叶片现有雷击防护系统失效率高等问题,本文提出了 叶片外敷导体防雷方案,研究了外敷导体直径对风力 机专用翼型气动性能的影响规律,得出以下结论:

(1)随着导体直径 D 的增加,翼型升力系数总体 上呈下降趋势,阻力系数呈上升趋势,升阻比下降;翼型升力系数、升阻比基本与导体直径呈线性变化趋势;0°攻角时,升力系数变化趋势与其余攻角时相差 不大,阻力系数增加斜率变大,升阻比下降斜率最大。

(2)0°攻角时,带导体翼型升力系数下降最多, 当导体直径为10mm时,升力系数最多下降约 10%。4°~16°攻角时升力系数下降相差不大,升力 系数平均下降约3%。20°攻角时,除了D=10mm 时,其余导体直径对应的升力系数较洁净翼型有所 增加。对于阻力系数,当翼型攻角为0°时,带导体 翼型的阻力系数增加最大,增加斜率也最大。除了 20°攻角,其余攻角对应的阻力系数变化斜率基本一 致,阻力系数增加的平均值在7%左右。对于升阻 比除了20°攻角,其余攻角对应的带导体翼型的升 阻比均有所下降。0°攻角时,升阻比下降斜率最大, 最大升阻比在*D* = 10 mm 时,下降约56%;4°~16° 攻角对应的升阻比平均下降约7%。

(3)导体对翼型绕流场的影响主要集中在导体 下游速度场。随着导体直径的增加,导体下游的低 速区范围逐渐扩大。

参考文献:

- [1]赵江. 风电机的直接雷击及其防护[J]. 科技资讯 2019, 17(19):43-44.
- [2] 梅迪斯. 风力发电机组的综合防雷技术措施研究 [J]. 科 技风 2019(18):180.
- [3] CUMMINS K L ,QUICK M G ,RISON W ,et al. Overview of the Kansas Windfarm 2013 Field Program [C]. International Lightning Detection Conference 2014.
- [4]施广全 涨义军 ,陈绍东 ,等. 风力发电机组防雷技术进展综述 [J]. 电网技术 2019 43(7):2477-2487. SHI Guangquan ZHANG Yijun ,CHEN Shaodong ,et al. Review of lightning protection technique progress of wind turbines [J]. Power System Technology ,2019 A3(7):2477-2487.
- [5] IEC TR 61400 24. Wind turbine generator systems ,part 24: lightning protect [S]. 2002.
- [6] Golde R H. Lightning [M]. New York: Academic Press, 1977:44-45.
- [7] WAGNER C F, MCCANN G D, MACLANE G L. Shielding of transmission lines [J]. IEEE Trans on Pas ,1963 60(6): 313 – 328.
- [8]SUZUKI T , MIYAKE K , KISHIZIMA I. Study on experimental simulation of lightning strokes [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems ,1981 ,100(4): 1703 – 1711.
- [9]SUZUKI T ,MIYAKE K ,SHINDO T. Discharge path model in model test of lightning strokes to tall mast [J]. Power Engineering Review JEEE ,1981 PER - 1(7): 54 - 54.
- [10]王晓瑜. 雷电屏蔽性能的模拟试验和分析模型的研究
 [J]. 高电压技术 ,1994 20(2):48 54.
 WANG Xiaoyu. Simulation test and analysis model of lightning shielding [J]. High Voltage Technique ,1994 20(2): 48 - 54.
- [11] 钱冠军,王晓瑜,汪雁. 雷电屏蔽模拟理论与试验技术的研究[J]. 高电压技术,1998 24(2):26-28,31.
 QIAN Guanjun, WANG Xiaoyu, WANG Yan, The lightning shielding simulation theory and test technology [J]. High Voltage Technique, 1998 24(2):26-28,31. (下转第 71 页)

- [5] 王永强. 考虑环境影响的电容型设备绝缘监测与故障诊断研究[D]. 保定: 华北电力大学 2009.
- [6]刘希志 高开健 贾辉 ,等. 基于温度变化的油 SF₆ 型套 管介损值变化的研究 [J]. 变压器 2018 55(1):42-44. LIU Xizhi ,GAO Kaijian ,JIA Hui ,et al. Study on the change of dielectric loss of oil - SF₆ bushing based on temperature change [J]. Transformer , 2018 55(1):42-44.
- [7]陈利念.110 kV 变压器套管介损偏大的原因分析[J]. 变压器 2003(2):41-42.
 CHEN Linian. Analysis of causes of large dielectric loss of

110 kV transformer bushing [J]. Transformer ,2003 (2): 41 – 42.

[8]张鹏,侯睿,濯国柱.对主变套管介损偏大故障现有理论 解释的讨论[J].变压器 2016 53(8):68-72.

ZHANG Peng ,HOU Rui ZHAI Guozhu. Discussion on existing theoretical explanation of large dielectric loss failure of main transformer casing [J]. Transformer ,2016 ,53 (8): 68 – 72.

[9]田成凤. 变压器电容式套管电容量及介损的正确测量[J]. 电力自动化设备 2010 30(4):147-149.

TIAN Chengfeng. Correct measurement of capacitance and dielectric loss of capacitor casing of transformer [J]. Electric Power Automation Equipment 2010 30(4): 147 – 149.

[10] 吴鑫杰. 充氮气油浸式变压器取油样技术探讨 [J]. 华 电技术 2018 40(2):46-47.

WU Xinjie. Discussion on oil sampling technology of nitrogen filled oil immersed transformer [J]. Huadian Technology 2018 40(2):46-47.

[11]于文涛,黄文峰,马欣.500 kV 主变压器套管末屏漏油

(上接第67页)

[12] 钱冠军,王晓瑜 徐先芝,等. 输电线路绕击分散性的试验研究[J]. 高电压技术,1998 24(3):17-20.
 QIAN Guanjun, WANG Xiaoyu, XU Xianzhi et al. Study of

scatter of shielding failure on transmission line [J]. High Voltage Technique ,1998 24(3):17-20.

[13]陈维江,贺恒鑫,浅冠军,等.基于长间隙放电研究雷电 屏蔽问题的进展[J].中国电机工程学报,2012,32 (10):1-13.

CHEN Weijiang ,HE Hengxin ,QIAN Guanjun ,et al. Review of the lightning shielding against direct lightning strokes based on laboratory long air gap discharges [J]. Proceedings of the CSEE 2012 32(10):1-13.

[14]陈维江 陈家宏, 浅冠军,等. 正极性上行先导特性的模拟试验方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10):
 22-31.

CHEN Weijiang ,CHEN Jianhong ,QIAN Guanjun ,et al. A simulation test method for positive upward leaders [J]. Proceedings of the CSEE 2012 32(10):22-31.

原因分析与处理[J]. 华电技术 2018 40(2):25-28.

YU Wentao ,HUANG Wenfeng ,MA Xin. Causes analysis and treatment of end shield oil leak in 500 kV main transformer bushing [J]. Huadian Technology ,2018 ,40 (2): 25 - 28.

[12]马金平. 变压器油中含气量超标检查与处理[J]. 华电 技术 2018 40(7):35-37.

MA Jinping. Inspection and processing of excessive gas content in transformer oil [J]. Huadian Technology 2018 , 40(7): 35-37.

- [13]康振华.大型电力变压器油色谱在线监测技术与案例 分析[J].华电技术 2018 40(3):17-20.
 KANG Zhenhua. On-line monitoring technology and case analysis of large power transformer oil chromatography [J].
 Huadian Technology 2018 40(3):17-20.
- [14] 吴冬文 胡道明. 变压器高压套管介损现场试验的分析 与探讨[J]. 江西电力 2011 35(4):5-7.

WU Dongwen ,HU Daoming. Analysis and discussion on dielectric loss field test of transformer HV bushing [J]. Jiangxi Electric Power 2011 35(4):5-7.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

贾辉(1977—), 男, 吉林松原人, 高级工程师, 从事变压器检修及试验方面的工作(E-mail: jiahui291@163.com)。

曹浩(1996—),男,山东泰安人,在读硕士研究生,从事 供热管网仿真方面的研究工作(E-mail: 1979780899@qq. com)。

[15] 谭启德,潘超,陈铁,等.风机桨叶雷击灾害问题研究[J].电瓷避雷器 2019(1):44-49.

TAN Qide PAN Chao CHEN Tie et al. Study on the problems of lightning disaster faced by wind turbine blades [J]. Insulators and Surge Arresters 2019(1):44 – 49.

- [16]GLUSHAKOW B. 风电机组叶片、电子器件及人员防雷研究[J]. 风能 2018(12):60-65.
- [17]李新凯 石可重 ,李苏威 ,等. 风电叶片新型雷击防护系统的实验与模拟研究 [J]. 工程热物理学报 ,2019 ,40 (3):529-536.

LI Xinkai ,SHI Kezhong ,LI Suwei ,et al. Experimental and simulation study on a new lightning protection system for wind turbine blades [J]. Journal of engineering thermophysics 2019 40(3):529 – 536.

(本文责编:张帆)

作者简介:

李新凯(1984—),男,河北保定人,博士,工程师,从事 风电雷击防护安全工作(E-mail:lixinkai@chec.com.cn)。