



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103410680 B

(45) 授权公告日 2016. 01. 20

(21) 申请号 201310242446. 0

(22) 申请日 2013. 06. 19

(73) 专利权人 中国科学院电工研究所

地址 100190 北京市海淀区中关村北二条 6 号

专利权人 中国人民解放军装备学院

(72) 发明人 邵涛 车学科 严萍 聂万胜

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251

代理人 关玲

(56) 对比文件

CN 102913386 A, 2013. 02. 06,
US 8162610 B1, 2012. 04. 24,
EP 2505782 A1, 2012. 10. 03,
JP 2012-193678 A, 2012. 10. 11,
EP 2514965 A2, 2012. 10. 24,
JP 2012-189215 A, 2012. 10. 04,
CN 102192083 A, 2011. 09. 21,

审查员 赵银凤

(51) Int. Cl.

F03D 1/06(2006. 01)

F03D 7/02(2006. 01)

F03D 80/40(2016. 01)

F03D 17/00(2016. 01)

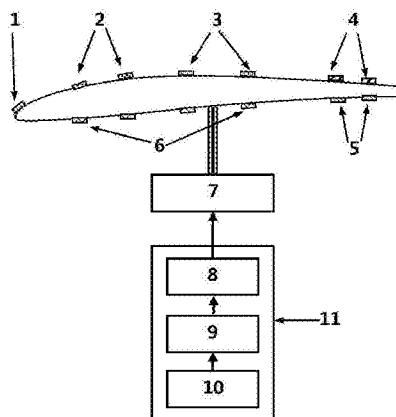
权利要求书3页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

用于风力发电机叶片的等离子体控制装置和方法

(57) 摘要

一种用于风力发电机叶片的等离子体控制装置和方法,其等离子体激励器由暴露电极、植入电极和介质阻挡层组成,暴露电极和植入电极分别粘贴在介质阻挡层的上下两面。暴露电极暴露于空气中,与激励电源(7)的高压端连接。植入电极表面包裹有绝缘材料,与地线连接。等离子体激励器光滑安装在风力发电机叶片表面。控制系统(11)根据风力发电机所处环境及叶片表面结冰参数,调节激励电源(7)的输出波形、电势、频率和占空比,对激励电源进行开通和关断控制。等离子体激励器在激励电源(7)的高电压作用下发生空气放电,产生的等离子体对环境空气产生冲击、加速作用和加热作用,抑制风力发电机叶片表面的流动分离以及进行防冰除冰。



1. 一种用于风力发电机叶片的等离子体控制装置,其特征在于,所述的装置包括等离子体激励器、激励电源和控制系统(11);

所述的等离子体激励器为介质阻挡放电等离子体激励器,由第一暴露电极(15)、第一植入电极(17)和第一介质阻挡层(16)组成,第一暴露电极(15)和第一植入电极(17)分别粘贴在第一介质阻挡层(16)的上下两面;所述的第一暴露电极(15)暴露于空气中,与激励电源(7)的高压端连接;所述的第一植入电极(17)表面包裹有绝缘材料,与地线连接;等离子体激励器光滑安装于风力发电机叶片表面;

所述的激励电源(7)的高压端和等离子体激励器的暴露电极连接,激励电源的低压端和等离子体激励器的植入电极连接,同时接地;所述激励电源(7)是为等离子体激励器提供放电能量的电源,为高压交流电源或高压脉冲电源,将高压电势施加于所述的等离子体激励器,所述等离子体激励器在高电压作用下发生空气放电而产生等离子体;

所述的控制系统(11)监测风力发电机所处环境的风速、风向、温度、湿度,以及叶片表面结冰参数,确定风力发电机叶片表面发生流动分离的区域范围、结冰的厚度和速度,确定并调节所述的激励电源(7)的输出波形、电势、频率和占空比,对所述的激励电源进行开通和关断控制;

所述控制系统(11)包含传感器、微处理器和作动器;所述传感器包含压力传感器、风速传感器、温度传感器、湿度传感器和结冰传感器,所述传感器实时测量风速、风向、温度、湿度风场环境参数以及叶片表面结冰参数,并将上述参数传递给所述微处理器,所述微处理器根据风场环境参数确定所述激励电源(7)的波形、频率、电压、占空比,并将上述激励电源(7)的参数传递给所述作动器,所述作动器根据微处理器指令对所述激励电源(7)进行开关、参数调整动作,使激励电源(7)驱动等离子体激励器系统而发生放电;所述微处理器内置有1个参考数据库,所述参考数据库是通过空气动力学实验建立的不同风速、风向环境下风力发电机叶片表面流动分离区的分布范围和强度的数据库。

2. 按照权利要求1所述的用于风力发电机叶片的等离子体控制装置,其特征在于,所述介质阻挡放电等离子体激励器为对称介质阻挡放电等离子体激励器,由第二暴露电极(19)、第二植入电极(20)和第二介质阻挡层(21)组成,第二暴露电极(19)的中心线和第二植入电极(20)的中心线重合。

3. 按照权利要求1所述的用于风力发电机叶片的等离子体控制装置,其特征在于,所述的介质阻挡放电等离子体激励器为非对称介质阻挡放电等离子体激励器,由第三暴露电极(23)、第三植入电极(24)和第三介质阻挡层(25)组成,第三暴露电极(23)的中心线(26)和第三植入电极(23)的中心线(27)不重合。

4. 应用权利要求1所述的等离子体控制装置的控制方法,其特征在于,所述的控制方法控制风力发电机叶片流动分离的步骤如下:

第一步,控制系统(11)的风速传感器实时监测风力发电机所处环境的风速、风向参数,将风速、风向参数与参考数据库比对,当比对结果表明风力发电机叶片不处于分离状态时,控制系统不作任何控制;当比对结果表明风力发电机叶片处于分离状态时,控制系统(11)初步判断出现流动分离的区域;压力传感器进一步对相关区域进行精确测量,将测量数据传递到控制系统的微处理器,微处理器通过计算判断该区域的流动分离情况,包括分离区域的具体范围和强度,然后确定需要开启的等离子体激励器及激励电源(7)的激励参

数,并向作动器发出作动指令;

第二步,控制系统(11)的作动器根据微处理器的作动指令,设定激励电源的电压、频率、占空比,然后启动激励电源;

第三步,等离子体激励器在激励电源(7)的高电压作用下发生空气放电,产生等离子体,等离子体产生的体积力和热量传递到环境空气,在体积力的加速作用和热量的冲击作用下,等离子体激励器开始对风力发电机叶片表面流动实施控制作用;

第四步,控制系统(11)的压力传感器继续测量风力发电机叶片表面压力,将测量数据传递到微处理器,微处理器再次通过计算判断上一时刻判定为流动分离区域的流动分离情况,若流动分离没有得到控制,则修改控制策略,增加参与流动分离控制的等离子体激励器数量,增大激励电源(7)的激励电压,并根据等离子体激励器负载变化情况调节激励电源的输出频率和占空比;

第五步,重复第四步,直至流动分离得到控制;

第六步,压力传感器、风速传感器实时监测风力发电机所处环境的大气压力、风速和风向参数,控制系统(11)将上述参数与参考数据库进行比对,当对比结果表明不需要进行流动控制风力发电机叶片也能够不出现流动分离时,控制系统(11)向作动器发出停止控制指令;

第七步,作动器关闭电源;

第八步,重复所述的第一步至第七步,直至风力发电机停止工作。

5. 应用权利要求1所述的等离子体控制装置的控制方法,其特征在于,所述的控制方法控制风力发电机叶片表面防冰除冰的步骤如下:

第一步,控制系统(11)的温度传感器、湿度传感器实时监测风力发电机所处环境的空气温度和湿度,控制系统(11)的微处理器根据温度传感器、湿度传感器输入的空气温度、湿度参数判断风力发电机叶片表面是否达到结冰条件,如果达到结冰条件则向控制系统的作动器发出作动指令;

第二步,控制系统(11)的作动器接到作动指令后,根据作动指令设定激励电源(7)的电压、频率和占空比,然后启动激励电源(7);

第三步,等离子体激励器在高电压作用下发生放电,等离子体产生的体积力对撞击到风力发电机叶片表面液滴产生吹除作用,使其不能在风力发电机叶片表面停留、粘附,等离子体在风力发电机叶片表面附近空间释放的热量一方面产生微型爆炸作用,冲击风力发电机叶片表面附近的液滴,使液滴无法接近叶片,另一方面对叶片及叶片附近的空气进行加热,使叶片附近的温度保持在冰点之上;通过加热、冲击、吹除三项作用,防止风力发电机叶片表面结冰;

第四步,当结冰条件进一步加强时,包括温度继续降低、湿度继续增大,风力发电机叶片表面结冰概率增大,此时控制系统(11)结冰传感器实时测量风力发电机叶片表面结冰厚度及速度,如果风力发电机叶片表面已经结冰,则控制系统微处理器向作动器发出调整指令;

第五步,所述作动器根据调整指令,将激励电源(7)调整到最短脉宽状态和高频状态;

第六步,等离子体激励器在高电压作用下发生放电,等离子体激励器的介质阻挡层损耗会产生大量热量,并通过热传导作用传递给紧贴叶片的冰层,等离子体欧姆加热直接将

热量传递给叶片表面的冰层,造成紧贴叶片的冰层融化;等离子体向风力发电机叶片附近空气释放热量,产生大量、密集、高频的微型爆炸冲击作用,对风力发电机叶片表面的冰层进行冲击,破坏冰层与风力发电机叶片的附着结构;在上述两种作用下,风力发电机叶片表面的冰层出现松动,最后在叶片旋转造成的离心力作用下被甩出去,达到除冰目的;

第七步,重复第一步至第六步,直至控制系统微处理器判断风力发电机叶片表面结冰条件消失,然后向控制系统作动器发出停止工作指令,控制系统作动器关闭等离子体激励器。

用于风力发电机叶片的等离子体控制装置和方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种利用等离子体控制风力发电机叶片流动分离,以提高风力发电机风能利用效率的装置和方法。

背景技术

[0002] 风能作为一种清洁、无污染的可再生能源越来越受到人们关注。风力发电机组是由叶片、传动系统、发电机以及电器系统等组成的发电装置。其中,叶片是风力发电机捕捉风能的部件,它直接将风能转化为机械能传递给发电机进行发电,是风力发电机中的关键部件。叶片对风能的利用率具有直接的影响,具有良好气动性能的叶片可提高整个机组的发电效率,但是大型风电叶片的雷诺数普遍较低,特别是在叶片与轮毂连接的区域,若直接采用适用于高雷诺数的航空翼型则很容易发生气流分离,造成气动力的显著损失和叶片失速,降低了叶片的能量捕获效率,同时导致叶片载荷增大。先进的叶片流动控制技术已成为制约风电技术大力发展的瓶颈技术之一。

[0003] 目前用于提高叶片气动性能的方法主要包括叶片翼型外形优化(基于 CFD 的大型风力发电机组叶片气动性能研究,哈尔滨工程大学学报,2012 年 5 月,盛振国,李陈峰,任慧龙,刘小龙;)、安装副翼(一种改型叶片对风力发电机功率影响的分析,航空动力技术,2009 年 3 月,王敏锋,李建锋;)、引入射流吹除(风力机翼型颤振及射流减振技术的气动弹性研究,太阳能学报,2002 年 8 月,金琰,袁新;)、采用智能材料(智能材料的风机叶片振动主动控制分析,机械研究与应用,2009 年第 1 期,乔印虎,易克传,易勇;)、变桨距(基于风速估计和风剪切的风力发电机组变桨距控制,河海大学学报(自然科学版),2012 年 9 月,杜静,谢双义,金鑫,钟翔,罗敏,何玉林;)。

[0004] 通过翼型外形优化对叶片气动性能的改善能力有限;在叶片前后缘安装副翼使得系统更加复杂,增大了叶片重量,且响应速度慢,维护保养多;利用射流吹除时,控制系统中包含大量射流管道,系统相当复杂,且吹气口容易堵塞,沙尘环境下难以正常工作,维护保养困难;智能材料提供的控制力小,存在滞后现象,而成本很高;变桨距需要复杂的控制系统,只能对桨叶进行整体控制,无法根据桨叶不同半径处的具体流动情况进行更加有针对性的控制。等离子体流动控制是一种新兴技术,在翼型转捩分离控制、激波控制以及降低表面摩擦阻力等方面具有很大的应用潜力(介质阻挡放电等离子体流动控制研究进展,力学进展,2012 年 11 月,聂万胜,程钰锋,车学科;),国内外正在研究利用等离子体提高低压涡轮泵(Unsteady plasma actuators for separation control of low-pressure turbine blades, AIAA Journal, July 2006, Junhui Huang, Thomas C. Corke, Flint O. Thomas;)、压气机(Control of the corner separation in a compressor cascade by steady and unsteady plasma aerodynamic actuation, Experiment Fluids, 2010, Ying-hong Li, Yun Wu, Min Zhou, Chang-bing Su, Xiong-wei Zhang, Jun-qiang Zhu;)、临近空间螺旋桨(等离子体提高螺旋桨桨根翼型气动性能的仿真研究,核聚变与等离子体物理,2012 年,程钰锋,聂万胜,车学科;)叶片性能的方法,用于控制风力发电机叶片流动分离的研究报道非

常少(A smart wind turbine blade using distributed plasma actuators for improved performance, AIAA2008-1312, Robert C. Nelson, Thomas C. Corke, Hesham Othman ;),国内还没有见到相关研究。

[0005] 安装在湿冷地区的风力发电机组,结冰是影响风力机安全可靠性的主要因素之一。桨叶大量覆冰时,使风力机的效率降低,机组的输出功率减少;严重覆冰时还将导致风力发电机组非计划停机,影响电网系统的安全稳定运行。目前,还没有成熟的风力机桨叶除冰技术,对于桨叶覆冰的风力机,一般采取停机处理。谭海辉等人(风力机叶片超声波除冰理论与方法,中国电机工程学报,2010年12月,谭海辉,李录平,靳攀科,李芒芒;),对风力机叶片超声波除冰理论与方法进行了研究。目前直升机旋翼多采用电热防/除冰技术,但其系统重量大、功耗高,其它方法包括液体除冰、气动除冰、电脉冲除冰以及微波除冰等因各种原因未能达到工程应用要求。

[0006] 综上所述,关于风力发电机叶片流动控制的研究较多,而防/除冰技术研究较少,尤其是同时具有流动控制与防/除冰能力的控制技术还没有见到。

发明内容

[0007] 本发明的目的是克服现有的风力发电机叶片流动分离以及湿冷环境下结冰的缺点,提出一种新的用于抑制风力发电机叶片流动分离的等离子体控制系统及控制方法。本发明利用等离子体控制风力发电机叶片流动分离,并同时具有防/除冰能力。本发明可以提高风力发电机风能利用效率。

[0008] 本发明在风力发电机叶片的表面安装等离子体激励器,等离子体激励器通过空气放电产生等离子体,等离子体诱导产生的电场力和释放的热量分别对叶片流场产生加速和冲击作用。不需要防/除冰时,等离子体的加速作用可提高叶片表面流场边界层能量,等离子体的冲击作用产生诱导漩涡,诱导漩涡将来流风的能量卷入叶片表面边界层流动中,这两种作用均可提高叶片表面边界层能量,从而达到抑制流动分离的目的。当本发明用于防冰时,等离子体激励器所产生的等离子体的加速和冲击作用会把撞击到风力发电机叶片表面的液滴吹除、吹散,使之无法在叶片表面停留,同时等离子体欧姆加热作用可将热量立体式加入液滴、液膜,使液滴、液膜温度保持在冰点之上;当用于除冰时,等离子体激励器介质层损耗加热以及等离子体欧姆加热可融化紧贴叶片表面的冰层,同时等离子体高频冲击作用破坏冰与叶片表面的附着构造,造成其附着能力下降,最终在叶片旋转离心力作用下破裂、甩出。

[0009] 本发明等离子体控制系统的结构如下:

[0010] 本发明等离子体控制系统主要包括等离子体激励器、激励电源和控制系统。所述的控制系统监测风力发电机所处环境的风速、风向、温度、湿度以等风场环境参数以及叶片表面结冰参数,确定风力发电机叶片表面发生流动分离的区域范围、结冰的厚度和速度,确定并调节所述的激励电源的输出波形、电势、频率和占空比,对所述的激励电源进行开通和关断控制。所述的激励电源和等离子体激励器连接,将高压电势施加于所述的等离子体激励器,所述的等离子体激励器在高电压作用下发生空气放电而产生等离子体。

[0011] 所述的等离子体激励器是一种通过空气放电产生等离子体的设备,即介质阻挡放电等离子体激励器,介质阻挡放电等离子体激励器由暴露电极、植入电极和介质阻挡层组

成,暴露电极和植入电极分别粘贴在介质阻挡层的上下两面。所述的暴露电极暴露于空气中,与激励电源的高压端相连接;所述的植入电极表面包裹有绝缘材料,与空气隔绝,与地线相连接。等离子体激励器光滑安装于风力发电机叶片表面。

[0012] 所述的激励电源是为等离子体激励器提供放电能量的电源,可以是高压交流电源或高压脉冲电源。激励电源的高压端和等离子体激励器的暴露电极连接,激励电源的低压端和等离子体激励器的植入电极连接,同时接地。

[0013] 所述的控制系统包含传感器、微处理器和作动器。传感器包含压力传感器、风速传感器、温度传感器、湿度传感器和结冰传感器,传感器实时测量风速、风向、温度、湿度等风场环境参数以及叶片表面结冰参数,并将上述参数传递给微处理器,微处理器根据风场环境参数确定激励电源的波形、频率、电压、占空比,并将上述激励电源的参数传递给作动器,作动器根据微处理器指令对激励电源进行开关、参数调整等动作,使激励电源能够实时、准确、快速驱动等离子体激励器系统而发生放电;所述的微处理器内置有1个参考数据库,所述的参考数据库是通过空气动力学实验建立的不同风速、风向环境下风力发电机叶片表面流动分离区的分布范围和强度的数据库。

[0014] 激励电源和控制系统中的微处理器、作动器集成为一个机箱,安装于风力发电机叶片的根部,每个叶片各安装一个微处理器-作动器-激励电源机箱,每个叶片上安装的传感器与相应叶片上的机箱相连并通过机箱获得工作电能,机箱的输入电线包括地线、火线,通过滑环与风力发电机输出端相连,从风力发电机产生的电能获得工作电能。

[0015] 本发明等离子体控制系统工作过程如下:

[0016] 一、控制风力发电机叶片流动分离工作

[0017] 第一步,控制系统的风速传感器实时监测风力发电机所处环境的风速、风向参数,将风速、风向参数与参考数据库进行比对,当比对结果表明风力发电机叶片不处于分离状态时,控制系统不作任何控制;当比对结果表明风力发电机叶片处于分离状态时,控制系统初步确定出现流动分离的区域。压力传感器进一步对相关区域进行精确测量,将测量数据传递到控制系统的微处理器,控制系统微处理器通过计算判断该区域的流动分离情况,包括分离区域的范围和强度,然后控制系统微处理器确定需要开启的等离子体激励器及激励电源的激励参数,并向作动器发出作动指令;

[0018] 第二步,控制系统作动器根据微处理器的作动指令,设定激励电源的电压、频率、占空比,然后启动激励电源;

[0019] 第三步,等离子体激励器在激励电源高电压作用下发生空气放电产生等离子体,等离子体产生的体积力和热量传递到环境空气,在体积力的加速作用和热量的冲击作用下,等离子体激励器开始对风力发电机叶片表面流动实施控制作用;

[0020] 第四步,控制系统压力传感器继续测量风力发电机叶片表面压力,将测量数据传递到控制系统微处理器,控制系统微处理器再次通过计算判断上一时刻判定为流动分离区域的流动分离情况,若流动分离没有得到控制,则迅速修改控制策略,增加参与流动分离控制的等离子体激励器数量,增大激励电源的激励电压,并根据等离子体激励器负载变化情况调节激励电源的输出频率和占空比;

[0021] 第五步,重复第四步,直至流动分离得到控制;

[0022] 第六步,压力传感器、风速传感器实时监测风力发电机所处环境的大气压力、风速

和风向参数,控制系统将上述参数与参考数据库进行比对,当对比结果表明不需要进行流动控制风力发电机叶片也可不出现流动分离时,控制系统向作动器发出停止控制指令;

[0023] 第七步,作动器关闭电源;

[0024] 第八步,重复所述的第一步至第七步,直至风力发电机停止工作。

[0025] 二、风力发电机叶片表面等离子体防冰除冰工作

[0026] 第一步,控制系统的温度传感器、湿度传感器实时监测风力发电机所处环境的空气温度和湿度,控制系统微处理器根据温度传感器、湿度传感器输入的空气温度、湿度参数判断风力发电机叶片表面是否达到结冰条件,如果达到结冰条件则向控制系统的作动器发出作动指令;

[0027] 第二步,控制系统的作动器接到作动指令后,根据作动指令设定激励电源的电压、频率和占空比,然后启动激励电源;

[0028] 第三步,等离子体激励器在高电压作用下发生放电,等离子体产生的体积力对撞击到风力发电机叶片表面液滴产生吹除作用,使其不能在风力发电机叶片表面停留、粘附,等离子体在风力发电机叶片表面附近空间释放的热量一方面产生微型爆炸作用,冲击风力发电机叶片表面附近的液滴,使液滴无法接近叶片,另一方面对叶片及叶片附近的空气进行加热,使叶片附近的温度保持在冰点之上;通过加热、冲击、吹除三项作用,防止风力发电机叶片表面结冰;

[0029] 第四步,当结冰条件进一步加强时,包括温度继续降低、湿度继续增大,风力发电机叶片表面结冰概率增大,此时控制系统结冰传感器实时测量风力发电机叶片表面结冰厚度及速度,如果风力发电机叶片表面已经结冰,则控制系统微处理器向作动器发出调整指令;

[0030] 第五步,所述作动器根据调整指令,将激励电源调整到最短脉宽状态和高频状态;

[0031] 第六步,等离子体激励器在高电压作用下发生放电,等离子体激励器的介质阻挡层损耗会产生大量热量,并通过热传导作用传递给紧贴叶片的冰层,等离子体欧姆加热直接将热量传递给叶片表面的冰层,造成紧贴叶片的冰层融化;等离子体向风力发电机叶片附近空气释放热量,产生大量、密集、高频的微型爆炸冲击作用,对风力发电机叶片表面的冰层进行冲击,破坏冰层与风力发电机叶片的附着结构;在上述两种作用下,风力发电机叶片表面的冰层出现松动,最后在叶片旋转造成的离心力作用下被甩出去,达到除冰目的。

[0032] 第七步,重复第一步至第六步,直至控制系统微处理器判断风力发电机叶片表面结冰条件已消失,然后向控制系统作动器发出停止工作指令,控制系统作动器关闭等离子体激励器。

[0033] 本发明等离子体控制系统,具有以下优点:

[0034] ①采用介质阻挡放电等离子体激励器作为控制致动器,等离子体激励器由贴附在介质阻挡层表面的暴露电极和植入电极构成,结构简单,无孔缝,不存在机械活动部件,响应速度快,功耗低等优点;

[0035] ②等离子体激励器可安装在风力发电机叶片表面任何位置,能够实时根据风场情况对风力发电机叶片不同位置的流场实施分布式最优控制;

[0036] ③本发明利用放电产生的等离子体作为加热负载,等离子体分布在风力发电机叶

片表面附近的空气、冰层中,不存在传统电热方法中热量从叶片到冰的热传导过程,因此热量利用效率高,加热速度快;

[0037] ④本发明具有风力发电机叶片流动分离控制和防 / 除冰控制两种功能,既可以单独用于风力发电机叶片流动分离控制,也可单独用于防 / 除冰控制,也可同时用于风力发电机叶片流动分离控制和防 / 除冰控制;

[0038] ⑤维护简单。主要维护工作是定期检查介质阻挡放电等离子体激励器暴露电极的磨损、腐蚀情况,达到更换条件时将原暴露电极去除,在原处重新贴附暴露电极即可;第二项维护工作是定期检查滑环磨损情况,并及时更换;

附图说明

[0039] 图 1 等离子体控制系统构成示意图;

[0040] 图 2 等离子体激励器在风力发电机叶片上表面的布置方式示意图;

[0041] 图 3 介质阻挡放电等离子体激励器立体结构示意图;

[0042] 图 4a 介质阻挡放电等离子体对称激励器剖面示意图;

[0043] 图 4b 介质阻挡放电等离子体非对称激励器剖面示意图;

[0044] 图 5 激励电源输电线路滑环连接方式示意图。

具体实施方式

[0045] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步说明。

[0046] 如图 1 所示,本发明等离子体激励器控制系统实施例包括分布在风力发电机叶片表面 6 个独立控制子区域 1、2、3、4、5、6 的等离子体激励器,等离子体激励器共用的激励器电源 7 和控制系统 11。

[0047] 所述的等离子体激励器为介质阻挡放电等离子体激励器。如图 3 所示,介质阻挡放电等离子体激励器由第一暴露电极 15、第一介质阻挡层 16 和第一植入电极 17 组成,其中第一暴露电极 15 和第一植入电极 17 分别贴附在第一介质阻挡层 16 的上下两个表面;第一暴露电极 15 暴露在空气中,第一暴露电极 15 与激励电源 18 的高压端连接。第一植入电极 17 与地线连接,第一植入电极 17 表面包裹有绝缘材料。第一暴露电极 15 和第一植入电极 17 均为长条形薄片,厚度为微米量级,均采用金属材料制作。第一介质阻挡层 16 厚度为 0.1 ~ 2mm,制作材料为 Teflon,或 Kapton,或陶瓷,或玻璃。当激励电源 18 将高压电势施加到第一暴露电极 15 和第一植入电极 17 之间时,第一暴露电极 15 击穿空气发生放电,产生等离子体。

[0048] 所述的等离子体激励器为对称介质阻挡放电等离子体激励器,如图 4a 所示,或为非对称介质阻挡放电等离子体激励器,如图 4b 所示。如图 4a 所示,所述的对称介质阻挡放电等离子体激励器由第二暴露电极 19、第二植入电极 20 和第二介质阻挡层 21 组成,第二暴露电极 19 的中心线和第二植入电极 20 的中心线重合,均为中心线 22。如图 4b 所示,所述的非对称介质阻挡放电等离子体激励器由第三暴露电极 23、第三植入电极 24 和第三介质阻挡层 25 组成,第三暴露电极 23 的中心线 26 和第三植入电极 23 的中心线 27 不重合。

[0049] 所述的等离子体激励器布设在风力发电机叶片表面。如图 2 所示,根据风力发电机叶片长度的不同,将其径向划分为 N 个控制区域,每个控制区域长度为 5 ~ 10m, N 的值由

叶片长度决定。如图 1 所示,每个控制区域内包含前缘 1、前部上表面 2、后部上表面 3、后缘上表面 4、后缘下表面 5、下表面 6 共 6 个控制子区域。如图 2 所示,该实施例叶片 $N = 3$,分别为控制区域 12、13 和 14;图 2 给出了叶片上表面的 3 个控制区域 12、13 和 14 的前缘 1、前部上表面 2、后部上表面 3、后缘上表面 4 子区域内等离子体激励器分布情况。等离子体激励器为长条形薄片,如图 3 所示。这里将激励器长边方向定义为走向。如图 2 所示,以控制区域 12 为例说明等离子体激励器在风力发电机叶片上表面的布设方式:前缘控制子区域 1 内布置 1 个等离子体激励器 45,等离子体激励器 45 的走向平行于前缘展向,等离子体激励器 45 的暴露电极位于等离子体激励器 45 的植入电极前方,等离子体激励器 45 的暴露电极前缘与叶片前缘驻点重合;前部上表面控制子区域 2 内,沿弦向间隔 10cm 布置两个等离子体激励器 46,两个等离子体激励器 46 的走向平行于前缘展向,两个等离子体激励器 46 的暴露电极位于等离子体激励器 46 的植入电极前方;其中一个等离子体激励器 46 的暴露电极的前缘距离前缘控制子区域 1 后缘 10cm,另一个等离子体激励器的植入电极的后缘与叶片厚度最大点重合;后部上表面控制子区域 3 内,沿弦向间隔 10cm 布置两个等离子体激励器 47,两个等离子体激励器 47 的走向平行于前缘展向,等离子体激励器 47 的暴露电极位于等离子体激励器 47 的植入电极前方,其中一个等离子体激励器 47 的暴露电极的前缘距离前部上表面控制子区域 2 后缘 10cm,另一个等离子体激励器 47 的植入电极后缘距离后缘上表面控制子区域 4 前缘 10cm;后缘上表面控制子区域 4 内,沿弦向从后向前间隔 5cm 布置 1~5 个等离子体激励器 48,等离子体激励器 48 的走向平行于风力发电机叶片后缘展向,等离子体激励器 48 的暴露电极位于等离子体激励器的植入电极前方,最右侧的等离子体激励器 48 的植入电极后缘距风力发电机叶片后缘 5cm。如图 1 所示,后缘下表面控制子区域 5、下表面控制子区域 6 位于风力发电机叶片下表面。后缘下表面控制子区域 5 内,沿弦向从后向前间隔 5cm 布置 1~5 个等离子体激励器,等离子体激励器的走向平行于风力发电机后缘展向,等离子体激励器的暴露电极位于等离子体激励器的植入电极前方,最右侧的等离子体激励器的植入电极后缘距风力发电机叶片后缘 5cm;下表面控制子区域 6 内,沿弦向间隔 10cm 布置 4 个等离子体激励器,等离子体激励器走向基本平行于前缘展向,可根据后缘角度适当调整,等离子体激励器暴露电极位于等离子体激励器的植入电极前方,第一个等离子体激励器暴露电极前缘距离风力发电机叶片前缘 20cm,第 4 个等离子体激励器的植入电极后缘距离后缘下表面控制子区域 5 前缘 10cm。前部上表面控制子区域 2、后部上表面控制子区域 3、下表面控制子区域 6 的宽度均由风力发电机叶片宽度决定,进而确定这 3 个控制子区域内等离子体激励器的数量,如图 1 和图 2 所示,本实施例中前部上表面控制子区域 2、后部上表面控制子区域 3、下表面控制子区域 6 内等离子体激励器的数量分别为 2、2、4。其他控制区域,如本实施例中的控制区域 13 和 14 具有与控制区域 12 类似的等离子体激励器布设方式。

[0050] 所述的激励电源 10 为风力发电机叶片表面等离子体激励器提供激励能源,可选用高压交流电源、或选用高压脉冲电源,电源电压均为 1kV-100kV,激励电源 10 的高压端和等离子体激励器的暴露电极连接,激励电源的另一端接地。激励电源 10 由风力发电机产生的电能直接驱动。风力发电机每个叶片的根部各安装 1 套激励电源,如图 5 所示,本实施例共有 3 个叶片,共安装 3 套激励电源。每套电源各有 1 条火线和 1 条地线作为输入,共有 3 条火线 35、3 条地线 40;3 条火线在风力发电机整流罩内合成 1 条总火线 36,3 条地线在风

力发电机整流罩内合成 1 条总地线 41 ;总火线和总地线通过安装在风力发电机轮毂中央的滑环 44 与风力发电机电源连接 ;滑环有 2 个滑动接头,分别为总火线接头 37 和总地线接头 42 ;滑环固定端与风力发电机轮毂固联,并通过一根火线 38 和一根地线 43 与风力发电机电源 39 连接。

[0051] 所述的控制系统 11,如图 1 所示,包括传感器 10、微处理器 9、作动器 8。传感器 10 实时获得测量参数,并将测量参数传递给微处理器 9,微处理器 9 根据测量结果判断风力发电机叶片流动分离和表面结冰情况,确定等离子体激励器控制策略,并将控制策略以激励电源控制指令形式发送给作动器 8,作动器 8 根据微处理器 9 的作动指令对激励电源 10 进行开启、关闭和参数调整,使激励电源 10 能够正确驱动风力发电机叶片表面的等离子体激励器进行放电。传感器 10 通过数据采集卡与微处理器 9 相连,微处理器 9 通过 CAN 总线向作动器 8 发送作动指令。

[0052] 所述的传感器 10 包括压力传感器、风速传感器、温度传感器、湿度传感器和结冰传感器。压力传感器布置在风力发电机叶片表面,用于实时测量风力发电机叶片表面静压 ;风速传感器安装在风力发电机机舱正前方,用于实时测量风速和风向 ;温度传感器安装在风力发电机机舱正前方,用于测量环境温度 ;湿度传感器安装在风力发电机机舱正前方,用于测量环境湿度 ;结冰传感器布置在风力发电机叶片表面,用于测量叶片表面结冰厚度及速度。

[0053] 所述的微处理器 9 用于根据接收到的传感器信息,实时判断风力发电机叶表面不同位置处的流动分离和结冰情况,然后依据参考数据库确定风力发电机叶片表面不同位置处等离子体激励器的开关以及激励参数,并将相应的作动指令发送给作动器 8。

[0054] 所述的作动器 8 用于驱动激励等离子体激励器所需功率、频率。

[0055] 下面结合 3 个实施例对本发明工作过程作详细描述,选用的风力发电机叶片翼型为 DU-25,长度为 39.1m,最大弦长 2.95m,扭角 $3.2^{\circ} \sim 15^{\circ}$,叶片投影面积 81.5 m^2 ,叶片数量为 3。

[0056] 实施例一 :控制风力发电机叶片表面流动分离

[0057] 步骤一、安装等离子体激励器系统

[0058] 根据实施例选用的风力发电机叶片长度 39.1m,将其径向划分为 6 个控制区域,从叶片根部到叶片尖部 6 个控制区域的长度依次为 5m、5m、7m、7m、7m、8.1m ;每个控制区域内包含前缘 1、前部上表面 2、后部上表面 3、后缘上表面 4、后缘下表面 5、下表面 6 共 6 个控制子区域 ;其中第 1 个控制区域内风力发电机叶片不需要施加流动控制,仅需要安装用于防 / 除冰控制的等离子体激励器 ;控制区域 1 内均匀安装 20 个等离子体激励器 ;控制区域 2、3、4、5、6 的前缘控制子区域 1 内布置 1 个等离子体激励器 ;控制区域 2、3、4、5、6 的前部上表面控制子区域 2 内,沿弦向间隔 10cm 布置等离子体激励器,等离子体激励器数量分别为 5、6、8、6、2 ;控制区域 2、3、4、5、6 的后部上表面控制子区域 3 内,等离子体激励器走向平行于前缘展向,沿弦向间隔 10cm 布置等离子体激励器,等离子体激励器数量分别为 3、3、4、3、1 ;控制区域 2、3、4、5、6 的后缘上表面控制子区域 4 内,等离子体走向平行与后缘展向,沿弦向从后向前间隔 5cm 布置 2 个等离子体激励器 ;控制区域 2、3、4、5、6 的后缘下表面控制子区域 5 内,沿弦向从后向前间隔 5cm 布置 2 个等离子体激励器 ;控制区域 2、3、4、5、6 的下表面控制子区域 6 内,沿弦向间隔 10cm 布置等离子体激励器,等离子体激励器数量分别为 8、10、

15、12、7。

[0059] 等离子体激励器光滑安装在风力发电机叶片表面。

[0060] 等离子体激励器的暴露电极和植入电极均采用不锈钢箔制作,厚度 0.1mm,暴露电极宽度 2mm,植入电极宽度 5mm,两个电极之间的距离为 1mm,介质阻挡层为 1mm 厚 Telfon 板,宽度为 10mm。

[0061] 等离子体激励器采用的激励电源为高频交流高压电源,每个桨叶根部各安装 1 套共 3 套激励电源。

[0062] 每个风力发电机叶片上各安装 1 套控制系统 11,控制系统 11 的微处理器 9 和作动器 8 集成在激励电源 7 中;控制系统 11 的压力传感器安装在风力发电机叶片表面,在风力发电机叶片表面 $r/R=0.2、0.3、0.5、0.8、0.9$ 处沿弦向分别安装一组压力传感器,弦向位置分别为 $b/c=0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9$, r 为风力发电机叶片某截面至转轴中心的距离, $R=31.9\text{m}$ 为风力发电机桨叶半径, c 为风力发电机叶片 r 处叶素的宽度, b 为风力发电机叶片 r 处叶素上某点到叶素前缘的距离,所有的压力传感器导线和信号线均预先埋入风力发电机叶片内。控制系统 11 的传感器 10 的结冰传感器安装在风力发电机叶片表面, $r/R=0.4、0.6$ 和 0.85 处各安装 1 个;控制系统 11 的传感器 10 的风速传感器、温度传感器、湿度传感器安装在风力发电机机舱正前方,测量信号通过滑环分别传递给风力发电机 3 个桨叶上的等离子体控制系统 11 的微处理器 9。

[0063] 步骤二、等离子体激励器系统控制流动分离工作

[0064] 当风力发电机所在场地风力突然降低 5m/s ,风力发电机功率下降,风力发电机叶片表面出现流动分离,需要开启等离子体控制系统对风力发电机叶片表面流场进行控制。

[0065] 压力传感器实时测量叶片表面静压,速度传感器实时测量风速,控制系统 11 中的微处理器 9 根据测量结果实时判断叶片表面各区域的流场情况,判断风力发电机叶片 $r/R=0.8 \sim 1.0$ 、 $b/c=0.6 \sim 1.0$ 处发生流动分离,确定开启第 6 控制区域中的前缘 1、前部上表面 2、后缘上表面 4 控制子区域的等离子体激励器,作动器 8 按照控制系统指令调节激励电源参数,然后开启第 6 控制区域中前缘 1、前部上表面 2、后缘上表面 4 控制子区域的等离子体激励器;在高电压激励下,第 6 控制区域中前缘 1、前部上表面 2、后缘上表面 4 控制子区域的等离子体激励器发生空气放电,对流动分离进行控制;此时压力传感器将控制后的压力参数传递给微处理器 9,微处理器判断流动分离得到完全抑制;当微处理器根据压力参数和风速参数判断流场中的自然流动分离消失时,即向作动器发出终止指令,作动器关闭激励电源以节省电能。

[0066] 实施例二:风力发电机叶片表面防冰

[0067] 风力发电机所在区域刚经历一场降雨,导致空气湿度迅速增大,而早、晚时候温度降低,使得风力发电机叶片表面出现结冰,需要开启等离子体控制系统进行防冰处理。

[0068] 步骤一、安装等离子体激励器系统

[0069] 等离子体激励器系统的布置方式与实施例一的步骤一相同。

[0070] 步骤二、等离子体激励器系统防冰工作

[0071] 控制系统 11 中的微处理器 9 根据温度传感器、湿度传感器测量判断风力发电机叶片表面达到结冰条件,确定风力发电机叶片表面 6 个控制区域的所有等离子体激励器全部开启进行防冰,启动激励电源;在高电压激励下,所有的等离子体激励器发生空气放电,对

撞击到风力发电机叶片表面的液滴进行吹除和加热；微处理器 9 根据温度传感器、湿度传感器测量判断风力发电机叶片表面失去结冰条件，即向作动器 8 发出终止指令，作动器关闭激励电源。

[0072] 实施例三：风力发电机叶片表面除冰

[0073] 风力发电机所在区域出现了连续较长时间的低温降雨，风力发电机叶片表面出现结冰现象，需要开启等离子体控制系统进行除冰。

[0074] 步骤一、安装等离子体激励器系统

[0075] 等离子体激励器系统的布置方式同实施例一。

[0076] 步骤二、等离子体激励器系统除冰工作

[0077] 等离子体控制系统 11 中结冰传感器测量得到风力发电机叶片表面的结冰达到 1mm，并正以 1mm/h 的速度增加，控制系统 11 的微处理器 9 确定风力发电机叶片表面 6 个控制区域的全部等离子体激励器均开启工作，其中前缘 1、前部上表面 2 控制子区域的等离子体激励器可以采用高压脉冲电源激励，后部上表面 3、后缘上表面 4、后缘下表面 5、下表面 6 控制子区域的等离子体激励器采用高频交流电源激励；等离子体控制系统 11 的微处理器 9 将上述激励参数发送给等离子体控制系统 11 的作动器 8，作动器 8 据此设定各激励电源参数并开启等离子体激励器。风力发电机叶片表面等离子体激励器在高电压激励下发生放电，前缘 1、前部上表面 2 控制子区域等离子体产生的空间加热、冲击作用在叶片前缘冰层中打开缺口，后部上表面 3、后缘上表面 4、后缘下表面 5、下表面 6 控制子区域的等离子体激励器放电，对紧贴叶片壁面的冰层进行加热，降低其附着强度。经过一段时间后，风力发电机叶片前缘冰层出现裂缝，随着叶片的旋转裂缝逐渐增大，同时等离子体加热作用导致冰层在风力发电机叶片表面的附着能力下降，在离心力作用下整个冰层被甩出。

[0078] 冰层被除去后，控制系统 11 中温度传感器、湿度传感器和结冰传感器继续获取温度、湿度和结冰参数，控制系统 11 的微处理器 9 根据测量结果判断是否需要继续进行实施例二中的防冰工作，或者进入下一轮除冰工作。

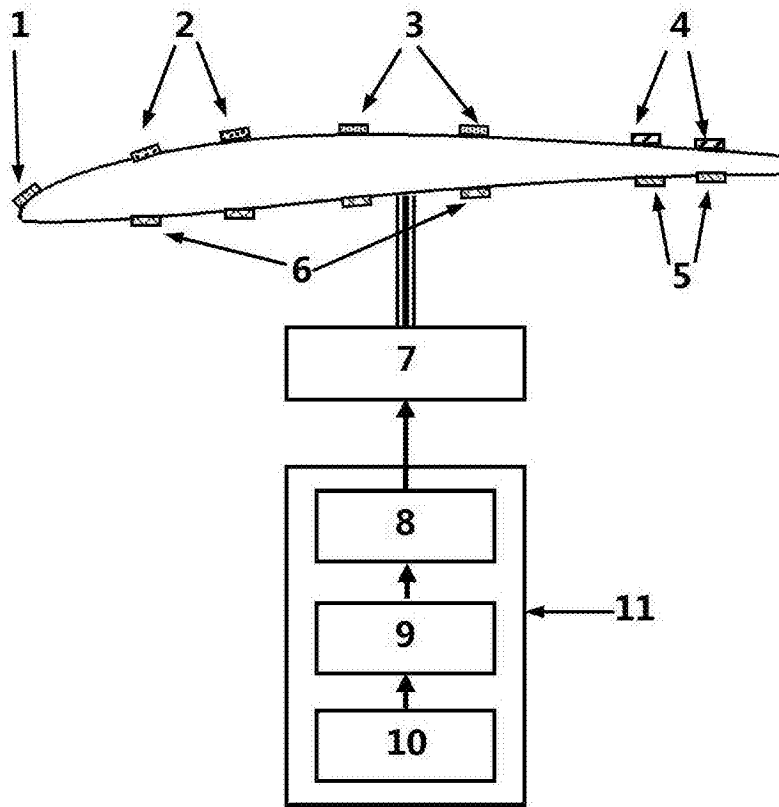


图 1

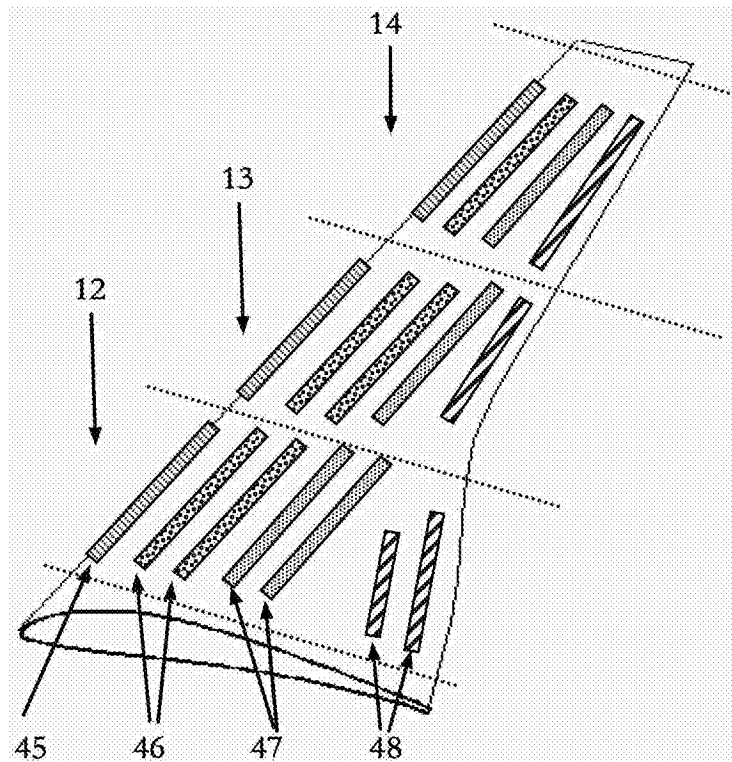


图 2

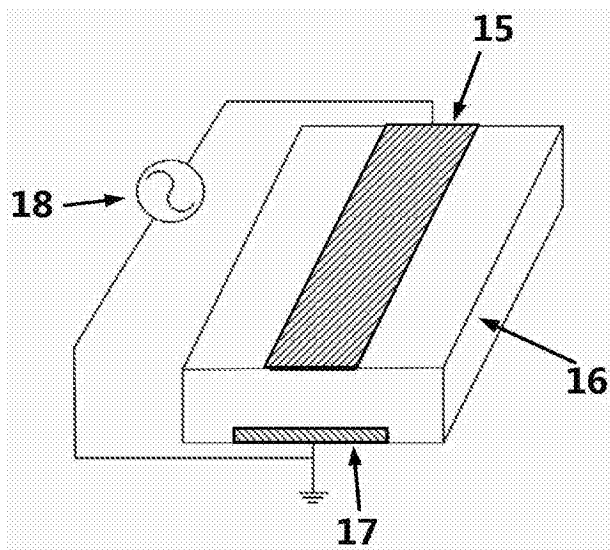


图 3

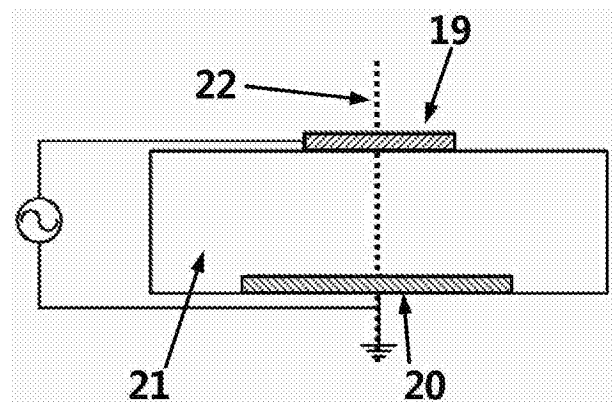


图 4a

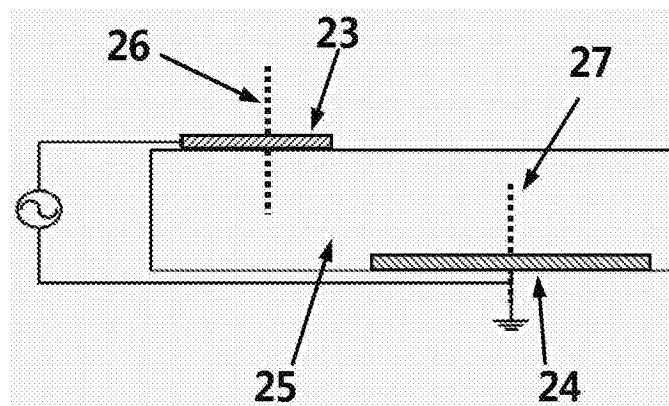


图 4b

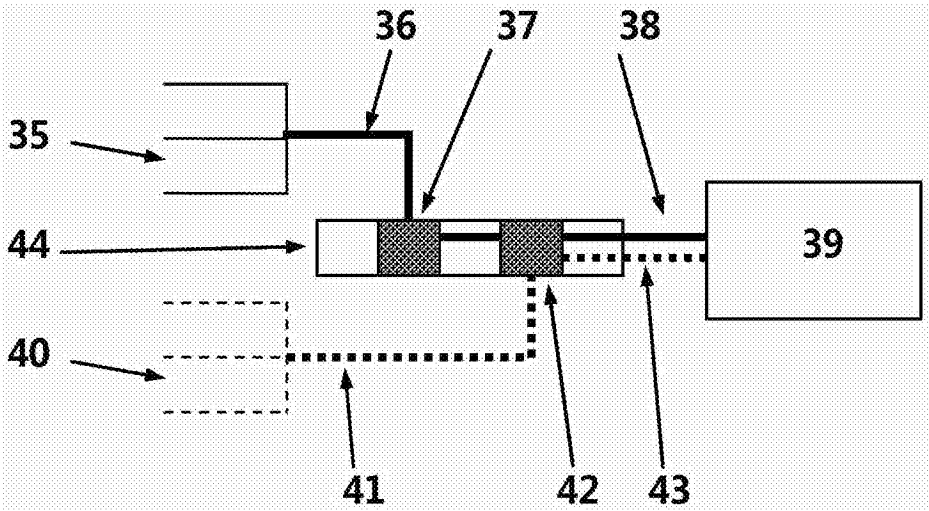


图 5