

风电机组抗冰冻设计

陈棋, 罗勇水, 刘伟江, 周民强

(浙江运达风电股份有限公司 风力发电系统国家重点实验室, 杭州 310012)

摘要: 我国南方高海拔风电场冬季温度低、湿度大, 风电机组受冰冻影响非常普遍, 且较为严重, 冰冻现象导致风电机组发电量损失, 甚至引发严重的安全事故。针对南方风电场环境, 提出风电机组抗冰冻设计。桨叶同时采用被动式涂层技术和主动式加热技术; 风速风向仪选用抗冰冻超声波式; 导流罩和机舱罩外壳采用流线型设计; 控制程序采用机组冰载报警和主动除冰控制策略等。采用的抗冰冻设计应用于云南某风电场样机, 有效地解决了风电机组覆冰现象, 发电量明显高于同类型其他机组, 为风电机组抗冰冻设计提供了一定的指导。

关键词: 桨叶; 风速风向仪; 抗冰冻; 控制策略

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.05.007

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)05-0032-04

Anti-freezing Design of Wind Turbine Generator

CHEN Qi, LUO Yong-shui, LIU Wei-jiang, ZHOU Min-qiang

(State Key Laboratory of Wind Power System, Zhejiang Windey Co., Ltd, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Because of low temperature and high humidity in high altitudes wind farms in south China, the wind turbine generators were affected by freezing frequently and heavily, which causes total power generation losing and even safety problems. According to these reasons, anti-freezing design of wind turbine generator was proposed. The passive coating technique and the active heating technique were introduced in blade design; ultrasonic anemometer was chosen in wind turbine; the nacelle and the cover of hub were designed in streamlined; and the anti-freezing control strategy was added in the master control program. These designs were tested in a Yunnan wind farm. The result showed that the freezing problem was solved successfully; the total power generation is significantly higher than the other units. The purpose was to provide reference for anti-freezing design of wind turbine generator.

Key words: blade; anemometer; anti-freezing; control strategy

风电作为新型绿色能源一直受到国家高度重视, 截止2011年底, 全国累计装机量达62.36 GW^[1], 总装量保持全球领先的地位。然而, 由于我国南方风电场冬天温度低、湿度大, 风电机组受冰冻影响非

收稿日期: 2013-07-31

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAA01B01)

作者简介: 陈棋(1981-), 男, 浙江富阳人, 工程师, 主要从事大型风力发电机组设计工作。

常普遍,且较为严重,致使风电机组运行存在严重的安全隐患,机组大面积停机,对发电量、电网调度和运行可靠性产生一定程度的影响^[2-3]。

机舱罩内部、导流罩内部和机舱控制柜内已安装加热器或其他温度调节设备,不存在结冰现象,但是桨叶、机舱、风速风向仪等部件暴露在湿度大、温度低的环境下,极易发生冰冻现象。目前,国内对风电机组抗冰冻设计方法非常匮乏,普遍采用人工除冰,此方法不能从根源上解决问题,费工费时,效果不理想,且存在人身安全隐患。

针对南方气候特点,对机组外部易结冰设备进行抗冰冻设计。通过云南某风电场的实际应用,验证此抗冰冻设计能有效地缓解风电机组冰冻问题。

1 风电机组抗冰冻设计

1.1 桨叶抗冰冻设计

桨叶是风电机组最为重要的部件之一,是将风能转化为机械能的关键部件,当桨叶表面覆冰时会

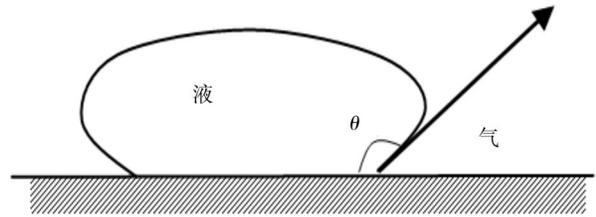
- 导致:
- 1) 改变桨叶的叶型进而降低风能利用系数,减小机组功率^[4];
 - 2) 改变桨叶的气动翼型造成失速特性推迟,引起机组过载;
 - 3) 桨叶额外承受冰载,严重时会有折断风险;
 - 4) 三片桨叶冰载荷不平衡,机组载荷变化,影响传动系统疲劳寿命,增加整机晃动水平;
 - 5) 桨叶覆冰厚度较大时,冰块可能会脱落,会造成机组附近人员、设备的意外伤害和损失等。

桨叶表面结冰、覆冰除了受温度、湿度影响之外,桨叶的表面能(对水的吸附能力)以及表面的疏水性(与水互相排斥性)对其也有较大影响。这两方面因素,给抗冰冻提供了两种不同的思路,即被动式涂层技术和主动式加热除冰技术。

1.1.1 被动式涂层技术

冰晶在吸附力作用下,才能粘附在桨叶表面,并不断沉积,这种吸附力的大小取决于冰晶与结冰表面的表面润湿性,如果桨叶外表面表面能低、且疏水性强,则表面润湿性差,可极大地减小表面对冰晶的吸附力,从而有效防止或减少结冰^[5-6]。

桨叶采用被动式涂层技术,增大水滴与接触表面的接触角 θ ,见图1。接触角越大,其表面能越小,则水滴越容易滴落,能有效控制桨叶表面结冰现象。桨叶采用被动式涂层技术后,接触角从原先的 $75^\circ \sim 80^\circ$ 增大至 90° 以上,表面能在 $25 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 范围内,说明抗冰冻效果明显,见表1。试验表明,采用被动涂层技术后水滴附着圆润,更容易滴落,见图2。



固

图1 接触角示意

Fig. 1 Sketch map of contact angle

表1 接触角测试

Table 1 Contact angle test

检测项目	测试内容	参考标准	结果/($^\circ$)
常规桨叶	KRUSS接触角分析仪	ASTM	78
采用被动式涂层技术桨叶	表面接触角测试	D724-99	95.25

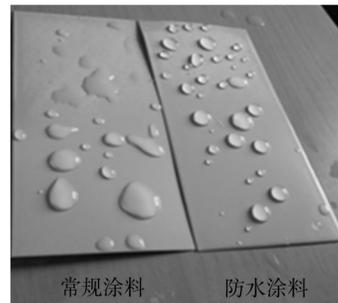


图2 滴水试验

Fig. 2 Dropping water test

常规涂料表面附冰在冲击下,很难脱落,而且脱落层仍有大量残冰附着在表面;采用被动式涂层技术的表面在同等冲击下更容易产生裂纹并从表面脱落,脱落后只有少量残冰,如图3所示。

试验表明,采用被动式涂层技术可以减少桨叶表面水滴附着,从而降低结冰的可能;另一方面,在

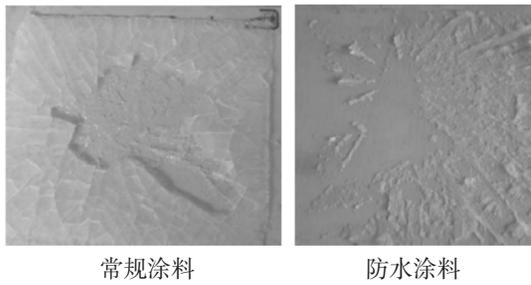


图3 除冰试验
Fig. 3 Deicing test

极寒天气, 桨叶表面结冰, 采用被动式涂层技术的桨叶表面冰层更容易脱落, 减少停机时间。

1.1.2 主动式加热除冰技术

另一方面, 可以通过加热的方式, 提高桨叶的温度来防止冰冻, 故在被动式涂层技术的基础上, 增加主动式加热除冰的方式, 使桨叶外表面温度超过结冰临界温度, 从而解决桨叶冰冻、覆冰现象。主动式加热除冰实现方法为在桨叶根部安装一个加热风机, 对桨叶内部空气进行持续的加热, 使叶片表面温度超过结冰临界温度, 桨叶内部温度最高可达 72 °C, 从而防止桨叶表面结冰, 如图 4 所示。

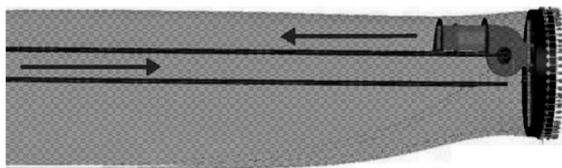


图4 主动式加热风机示意
Fig. 4 Sketch map of active heating fan

1.2 风速风向仪的抗冰冻设计

风速风向仪是保证机组正常运行的关键部件之一, 结冰会造成风速、风向数据失真, 影响机组的运行和控制, 导致机组功率减小, 甚至出现安全事故。风电机组普遍采用金属材质机械式风速风向仪, 内置固定功率的加热器, 但在冰冻严重的地方还是容易结冰, 导致停机。

超声波式风速风向仪较机械式风速风向仪具有更强的防冰冻性能, 该设备没有转动部件、坚固耐用、维护简单。加热装置分上、下两部分, 分别位于传感器顶部和底部, 利于整体加热, 其加热温度、加热功率、加热形式实现多档位调节, 便于现场人员根

据现场实际情况对加热参数进行修正, 从而解决冬季设备冰冻现象。

1.3 机舱罩与导流罩的抗冰冻设计

机舱罩和导流罩外表面冰冻、覆冰现象导致冰块频繁从高空掉落, 可能会危及现场维护人员或附近人员并造成设备的损坏。同时, 由于设备外表面严重冰载, 还会使得机舱罩与导流罩受到额外的承重压力。机舱罩和导流罩优化方案如下。

1) 流线型设计: 机舱罩和导流罩外壳采用流线型设计^[7-8], 尽可能从附着力上解决覆冰的形成, 见图 5—6。

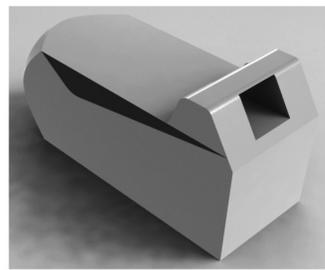


图5 机舱罩示意
Fig. 5 Sketch map of nacelle



图6 导流罩示意
Fig. 6 Sketch map of hub cover

2) 机舱罩通风设计: 优化通风口及排风装置, 减少或消除表面的覆冰。

3) 外表面防冰冻涂层技术: 机舱罩和导流罩所用涂层同桨叶涂层, 具有可持续性的疏水性, 从本质上减少或消除机舱罩及导流罩表面的覆冰。

1.4 控制系统的抗冰冻设计

考虑到因桨叶、风速风向仪等设备结冰、覆冰现象给机组运行带来安全隐患, 针对南方风电场控制程序, 新增冰载报警策略和主动除冰策略, 根据设备

受冰载影响,造成小风大功率、大风小功率等偏离功率曲线的情况,结合机舱外部温度传感器等综合因素评判机组设备冰载情况,及时发出报警信号,有效预防和防止结冰和覆冰现象的继续发展。

根据机舱外部温度传感器实时监测环境温度,同时监控机组风速、功率等运行参数,比对机组保证功率曲线或历史长期运行数据,发出指令动作。主要有以下3种情况:

- 1) 如果实测输出功率平均值低于功率曲线波动范围值,说明桨叶可能结冰,导致翼型改变,影响其气动性能;
- 2) 如果实测输出功率平均值高于功率曲线波动范围值,说明风速风向仪结冰,所测风速小于实际风速;
- 3) 如果额定功率下,相同风况下,桨叶变桨角度低于或高于正常角度范围值,则说明桨叶可能结冰。

由于功率输出波动范围较小,监测30 min运行数据对比正常值。根据机舱外环境温度,自动控制桨叶根部加热器和风速风向仪加热器功率,实现主动除冰。当数据确认机组已受冰载影响,且加热功率已达最大值,则执行正常停机,控制流程如图7所示。待现场人员确认机组状态后,恢复机组运行或采取除冰措施。考虑到机组停机状态受冰载影响,以30 min为间隔定期启动桨叶根部加热器和风速风向仪加热器,保证桨叶和风速风向仪表面温度高于结冰临界温度。

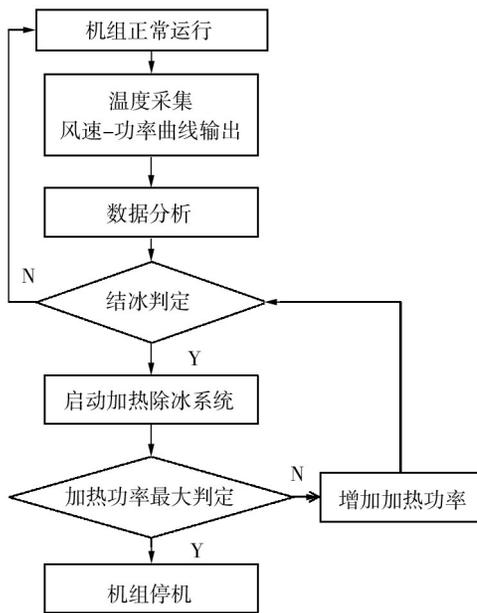


图7 控制策略

Fig. 7 Control strategy

2 工程应用

挑选云南某风电场10#机组进行工程实施,该风电场海拔较高,湿度较大,桨叶和风速风向仪冰冻现象严重。通过实地考察结合工程改造的可实施性,将各个部件的抗冰冻技术应用于该风场,经历过整个冬季恶劣天气的残酷考验,结果是桨叶和风速风向仪未发现冰冻、覆冰现象,机组运行可靠,如图8—9所示。

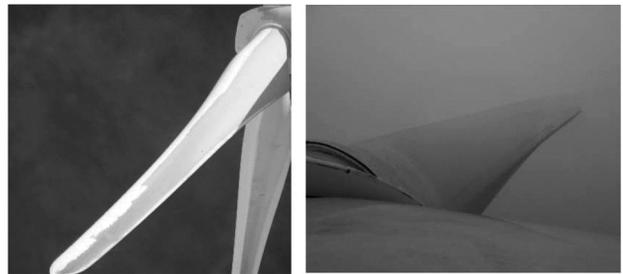


图8 桨叶防冰冻效果

Fig. 8 Effects of blade anti-freezing design



图9 风速风向仪防冰冻效果

Fig. 9 Effects of anemometer anti-freezing design

对比邻近机组的发电量,10#机组在冬季冰冻期1月、2月的发电量明显高于未进行抗冰冻设计的9#机组,如图10所示。这说明机组抗冰冻设计能有效缓解桨叶、风速风向仪冰冻、覆冰问题,减少发电量损失。

3 结语

我国南方风电场冬天温度低、湿度大,造成风电
(下转第57页)

缓慢分解,攻击C=C不饱和双键,使得C=C双键含量降低是HTPB推进剂老化失效的主要原因。

参考文献:

- [1] 郭风华,常新龙,杨月诚. 贮存老化条件下固体火箭发动机内弹道性能变化[J]. 装备环境工程, 2005, 2(3): 13—17.
- [2] 解红雨,吴勋,成跃,等. 高能推进剂老化对发动机内弹道性能的影响研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 13—17.
- [3] CHEVALIER S, PERUT C, BILLON L, et al. Antioxidant Selection Methodology for Hydroxy Terminated Polybutadiene Type Solid Propellants, 25th International Annual Conference of ICT[C]. Karlsruhe, Germany, 1994.
- [4] JUDGE M D. The Application of Near-infrared Spectroscopy For the Quality Control Analysis of Rocket Propellant Fuel Premixes[J]. Talanta, 2004, 62(4): 675—679.
- [5] DEACON P, GARMAN R. Nonisothermal Ageing of Nitro-

cellulose Based PBX Compositions, 37th International Annual Conference of ICT[C]. Karlsruhe, Germany, 2006.

- [6] JOHNSON J L. Data Collection Requirements for Quality Evaluation (Aging Analysis) of Energetic Materials and Methods, 37th International Annual Conference of ICT [C]. Karlsruhe, Germany, 2006.
- [7] 吴丰军,彭松,池旭辉,等. NEPE推进剂/衬层粘接界面XPS表征[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(2): 192—196.
- [8] 李疏芬,吴建新. 光电子能谱和X射线能谱在推进剂催化燃烧研究中的应用[J]. 含能材料, 1997, 5(1): 26—30.
- [9] 宋华杰,董海山,郝莹. 对用XPS技术评价塑料粘结炸药造型粉包覆度的几点看法[J]. 兵工学报, 2002, 23(1): 132—135.
- [10] GALFETTI L, DELUCA L T, SEVERINI F, et al. Nanoparticles for Solid Rocket Propulsion[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2006, 18(33): 1991—2005.
- [11] 侯林发. 复合固体推进剂[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.

(上接第35页)

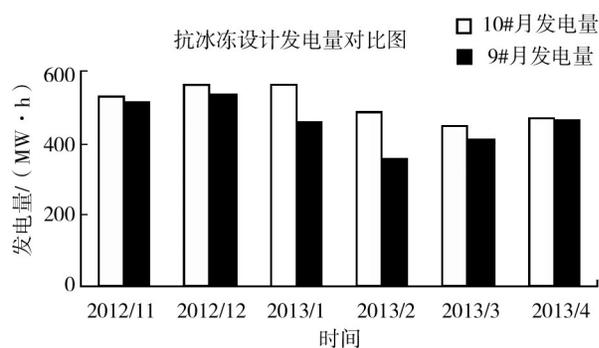


图10 抗冰冻设计发电量对比

Fig. 10 Power generation effects of wind turbine anti-freezing design

机组受冰冻、覆冰现象非常广泛且严重,导致风电机组运行存在严重的安全隐患,造成大面积风电机组停运,对当地电网造成很大冲击。针对此现象,文中提出对风电机组进行抗冰冻设计,对桨叶同时采用被动式涂层技术和主动式加热技术;风速风向仪选用抗冰冻超声波式;导流罩和机舱罩外壳采用流线型设计;控制程序采用冰载报警和主动除冰策略等措施。

样机试验结果表明,本研究提出的风电机组抗冰冻设计能有效解决风电机组冰冻、覆冰等问题,为风电机组抗冰冻设计具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 李俊峰. 中国风电发展报告2012[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 1—5.
- [2] LLOYD Germanischer. Guideline for the Certification of Wind Turbines Edition 2010[G]. Germany, 2010.
- [3] 贺德馨. 风力工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [4] 朱程香. 风力机叶片翼型的结冰数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(4): 522—528.
- [5] 王国刚. 基于分级结构超疏水表面的防冰冻性能初探[C]// 中国科学技术协会. 2008 防灾减灾论坛论文集. 郑州: 中国科学技术协会, 2008.
- [6] 施政余. 聚酰亚胺基超疏水涂层的制备及其润湿性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [7] 周立. 流线型地铁列车车头设计及其气动性能分析[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [8] 李秀娟. 流线型曲线曲面构造关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.