基于平面螺旋线圈的风电机组引下线断线在线监测系统研究

张明熙[1]，李凌峰[2]，吴晓丹[2]，赵舒敏[2]，王金明[1]
(1.内蒙古科技大学 自动化与电气工程学院，内蒙古 包头 014000；2.内蒙古华电玫瑰营风力发电有限公司，内蒙古 乌兰察布 012200)

摘 要：风力发电机组桨叶引下线是风力发电机组防雷的重要设备，当引下线发生故障时，可能造成雷电流泄流受阻，严重时会导致桨叶变形、开裂，甚至爆炸。文章以风力发电机组桨叶引下线为研究对象，基于平面单线能量传输技术、无线射频技术、GPS 定位技术和 4G 通信技术，设计了一种风力发电机组桨叶引下线断线在线监测系统。该系统可实时监测桨叶引下线状态信息，工作人员可及时对风力发电机组进行停机维修，避免造成更严重的破坏。仿真及实验结果表明，平面单线能量传输系统可实现 55 m 信号传输，射频传输系统可实现 100 m 信号回传，通信系统可实现实时上传检出结果，系统可高效、稳定、准确地判断桨叶引下线断线故障。

关键词：平面单线能量传输技术；平面螺线圈；故障在线监测；防雷保护；风力发电机组桨叶引下线
中图分类号：TK83 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2026)01-0078-08

0 引言

全球许多国家，尤其是欧洲国家，对风电的建设和发展给予了高度重视。2015 年，丹麦累计风电装机容量已达 5.06 GW，是名副其实的“风电王国”。我国在激励政策的推动下，自上世纪 90 年代起开始大规模发展风电行业，并取得了显著进展[1,2]。截至 2023 年末，我国风电装机容量已达到 3.6 亿 kW，约占全球总装机容量的 40%[3]。

风电机组桨叶引下线是风电机组防雷的重要设备，引下线断线检测是风电场的定检项目之一[4,5]。目前，欧姆法被广泛地应用于国内外风电场中，该方法在检测时需要利用自爬机器人或下吊篮的方式，在桨叶尖端的接闪器处连接一根导线，该导线与引下线形成回路，检修人员在轮毂处使用欧姆表对该回路的电阻值进行检测。当引下线发生断线故障时，该回路呈现出无穷大的电阻值。

在风机桨叶引下线断线检测中，欧姆法存在无法精确定位故障点、需要停机检测、对天气和环境要求苛刻及需要人工登塔等缺点，这些问题限制了欧姆法在实际应用中的效率和准确性。

参考电缆断线检测方法[6,7]，王金明[8,9]提出了一种基于行波法的桨叶引下线断线检测方法。该方法可在轮毂内实现引下线的断线检测，具有安全性高、检测速度快等优点。然而，该方法仍需登塔作业，是一种离线检测方式。

随着智慧风场的发展和现场管理需求的提升，对风力发电机组叶片引下线断线实施在线智能诊断已显得尤为迫切。对于在线检测方法的研究，菲尼克斯公司推出了基于 PLCnext2152 控制平台的桨叶引下线断线检测系统[10]。虽然，该检测系统相比于离线检测的方法取得了进步，但仍然无法实现在避雷线的主动实时监测，仅能进行被动式的监测，这可能导致检测结果的时效性不足。郭靖[11]基于柱形特斯拉线圈搭建了单线能量传输系统，并通过该系统对风力发电机组桨叶引下线进行断线检测。由于柱形特斯拉线圈可以产生更集中的磁场，减少能量损失，并且顶端有电容球，可以使线圈能够在较低的频率下高效工作。但柱形结构体积较大，无法满足现场实际安装需求。

本文在前人工作的基础上，采用平面单线能量传输（Planar Single-Wire Power Transmission，SWPT）系统对引下线状态进行在线检测。对 SWPT 系统平面线圈的结构参数和传输信号的检

收稿日期：2025-01-02。
基金项目：内蒙古自然科学基金项目(2024LHMS06002)；内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0048)。
作者简介：张明熙(1998-)，男，工程硕士，研究方向为单线能量传输技术应用。E-mail：2042661916@qq.com
通信作者：王金明(1980-)，男，博士，副教授，研究方向为无损检测、机电设备故障检测。E-mail：yb15661510224@163.com

出系统进行了设计，同时采用智能传感器和无线传输系统实现信号的传递。该系统可以实现在线监测引下线的通断状态，对风电场运维具有重要意义。

1　引下线断线在线监测系统方案设计

1.1　断线检测系统方案设计

本文将SWPT系统、射频识别（Radio Frequency Identification，RFID）系统、中央处理系统、GPS定位系统和4G无线通讯系统相结合，构建了一个完整的桨叶引下线断线在线监测系统，系统整体框图如图1所示。

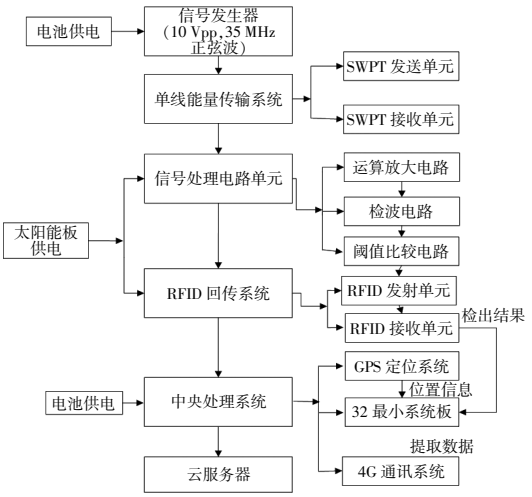


图1　引下线断线检测系统整体框图

Fig.1 Overall block diagram of the line breaking detection system

在叶根和叶尖处分别布置平面特斯拉线圈，与引下线共同组成SWPT系统。通过叶根的信号发生模块向平面特斯拉线圈发送特定频率和幅值的正弦波信号，平面特斯拉线圈产生谐振。如果桨叶引下线保持完好，正弦波信号传输至叶尖处。

为避免影响风力发电机组正常运行，在叶尖处要尽可能少的布置电路的情况下，考虑将该信号由叶尖传输至叶根。叶尖的SWPT接收单元接收到能量后，信号处理单元对该信号进行处理，叶尖处的RFID发射系统识别信号处理系统的检出信号。当SWPT系统输出的电压低于电压比较器的阈值电压时，输出为低电平，意味着引下线出现断线故障，反之则输出高电平，意味着引下线未出现断线故障。通过识别高、低电平判断引下线的状态，叶尖的RFID发射单元判断引下线状态，将判断结果发送到叶根。

叶根处的中央处理系统由RFID接收单元、STM32F407ZGT6单元（后续统称ZGT6）、GPS定位单元和4G通讯单元共同组成。RFID接收单元天线捕获引下线通断状态信号，通过SPI通讯接口传输到ZGT6，ZGT6使用DMA接收数据，并获取GPS定位信息，与检出结果一同通过4G无线通讯单元实时上传至上位机，以获取引下线状态信息，以此实现对风力发电机组桨叶引下线断线在线实时监测的功能。

1.2　在线监测系统硬件架构

系统硬件部分包括叶尖的尖端检测单元系统、轮毂处的中央处理系统。尖端检测单元系统包括：SWPT接收单元、信号处理单元、射频信号发送单元及供电单元。中央处理系统包括：SWPT发送单元、射频信号接收单元、GPS定位与4G通讯单元。文献[11]中介绍了断线检测系统结构，本文在其基础上，分别在叶尖和叶根处布置系统单元，以实现对风电机组引下线的监测功能。图2为引下线状态监测系统示意图。

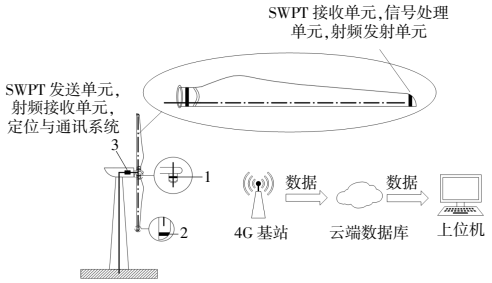


图2　引下线状态监测系统示意图

Fig.2 Drawing down condition monitoring system diagram

如图2所示，风电机组叶尖处布置尖端检测单元系统，叶根处布置中央处理系统。为了将引下线检测结果与风电机组定位信息同时通过通讯系统传输，尖端检测单元与中央处理系统共用一块微处理器（MPU），并将相关检测信息传输到云端。

1.3　在线监测系统软件架构

SWPT接收端处理接收到的信号后，通过RFID回传系统将信号从叶尖传输到叶根。叶根处中央处理系统的MPU识别传输信号，以此获取桨叶引下线状态的检测结果。

GPS定位单元获取风力发电机组的地理位置，与引下线状态信息存储在寄存器中，4G通讯单元将以上数据一同传输到上位机，以确定风力

发电机组引下线的断线情况，从而实现引下线的在线监测。单只桨叶单次检测框图如图 3 所示。

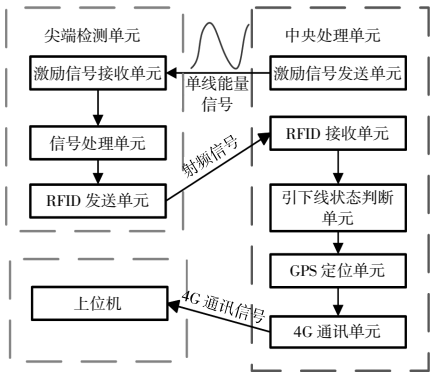


图 3　单只桨叶单次检测框图

Fig.3 Single blade single test block diagram

2　平面 SWPT 系统设计

2.1　SWPT 系统工作原理

SWPT 系统的概念最早可追溯至 19 世纪末，尼古拉·特斯拉是 SWPT 系统的主要先驱之一[12]。他进行了广泛的研究和实验，提出了关于单线能量传输的理论和概念，试图实现单线能量传输[13]。

特斯拉提出的 SWPT 系统原理图如图 4 所示[14]。该系统由调频升压变压器和调频降压变压器组成。

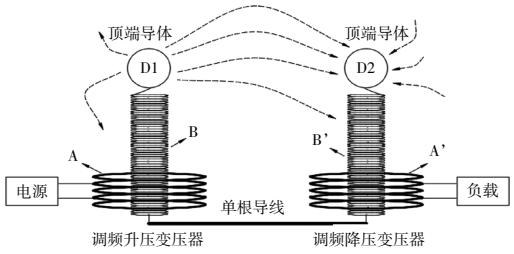


图 4　单线电能传输系统原理图

Fig.4 Schematic diagram of single-wire power transmission system

升压变压器中 A,B,D1 和降压变压器中 A',B',D2 称为柱形特斯拉线圈[15,16]。以升压变压器为例，匝数较多的次级线圈 B 具有电感，而顶端导体 D1 具有对地电容，两者构成一个 LC 并联振荡电路。特斯拉设想利用大地的导电性以及顶端导体之间的电容效应，实现全球范围内广义的“无线电能传输”[17]。

圆柱形特斯拉线圈传输效率高、稳定性好，但现场应用时安装困难。基于在线监测系统的安装需求，本文选择平面螺旋线圈[18]作为 SWPT 系统的感应线圈。表 1 为 100 匝次级线圈，40 m 同等条件下，柱形结构和平面结构搭建的单线能量传输系统接收端检测的电压峰峰值对比。

表 1　两种结构的电压峰峰值对比

Table 1 Comparison of voltage peak-to-peak values between the two structures

结构	次级线圈匝数	传输距离/m	电压峰峰值/V
柱形结构	100	40	2.04
平面结构	100	40	0.2

由表 1 可以看出，相较于柱形结构，平面结构接收信号低一个数量级。若采用平面结构须要对平面特斯拉线圈进行参数设计，以提升平面 SWPT 系统传输效率，同时由于传输过程中能量损失较大，无法通过 SWPT 系统为叶尖检测单元系统供电，系统采用太阳能板供电，仅将 SWPT 系统信号作为常规检测信号进行处理。

为了确保 SWPT 系统能够顺利应用于监测系统中，对其进行仿真和实验。

仿真研究采用 COMSOL Multiphysics 软件中的 RF 模块，通过电磁波物理场对平面单线能量传输系统进行仿真分析。在仿真模型中，使用幅值为 100 V、内阻为 50 Ω 的高频交流端口进行激励，接收端口设置为 50 Ω 的电阻负载。具体建模如图 5 所示。

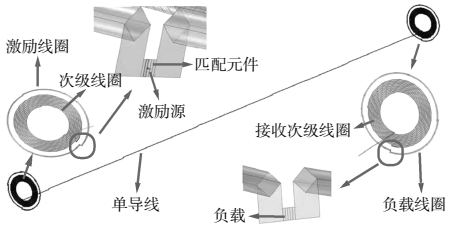


图 5　单线电能传输系统几何模型

Fig.5 Geometric model of single-wire power transmission system

为保证仿真结果的准确性与真实性，模拟系统真实的工作环境，几何模型被置于立体空气域中，并在最外围添加完美匹配层，模拟实验中的无限远空间。

为研究 SWPT 系统传输效率受频率的影响，采用表 2 中的参数建立仿真模型。设置频率为

表 2　仿真模型参数数据

Table 2 Simulation model parameter data

参数	数值
激励/负载(初级线圈)	1 匝
发射/接收(次级线圈)	10 匝

续表 2

参数	数值
初级线圈匝间距	5.5 mm
次级线圈匝间距	4 mm
初级线圈线半径	2.54 mm
次级线圈线半径	1.27 mm
线圈内径	50 mm
频率	1~70 MHz(步长 2 MHz)

1~70 MHz，步长为 2 MHz；传输距离为 1~15 m，步长为 1 m。

SWPT 系统在不同频率下的传输效率如图 6 所示。

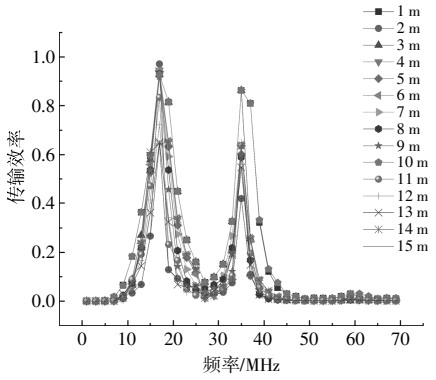


图 6　SWPT 系统不同频率下的传输效率

Fig.6 Transmission efficiency of SWPT system at different frequencies

由图 6 可知,系统出现了两个共振频率点,第一个波峰为基频谐振,是系统的主工作频率,即系统实现最佳能量传输效率的频率点。第二个波峰为高频谐振,在特定高频条件下,系统能量传输效率局部提升。随着传输距离的变化,最佳传输效率的频率点相对稳定,即在不同传输距离下,系统存在一个可以实现较高的传输效率的频率范围。

在传统特斯拉线圈中，初级线圈的匝数远少于次级线圈,通常初级线圈匝数为 1~2 匝。在 2.1 节的仿真中,使用 10 V,1~70 MHz 的正弦波作为激励源,可以看到系统在 15 MHz 和 35 MHz 分别出现共振频率点,此时能量传输效率最大。因此,选择用 10 V,15 MHz 和 35 MHz 的正弦波作为激励源,传输距离为 10 m,分别对 1 匝和 2 匝的初级线圈进行试验,次级线圈的输出电压见图 7。

从图 7 可以看出,在激励信号均为 10 V、频率为 11~40 MHz 的情况下,2 匝初级线圈的输出电压高于 1 匝初级线圈。同时,在 35 MHz 时,输

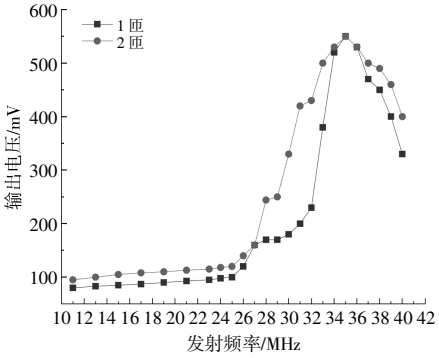


图 7　初级线圈匝数与次级线圈输出电压关系

Fig7 Relation between the number of turns of primary coil and the output voltage of secondary coil

出电压达到峰值，这表明 35 MHz 是系统的最佳传输频率点,即此时的传输效率最高,故本文选用频率为 35 MHz 的正弦波信号进行能量传输。

2.2　系统传输实验

本文采用具有更高的空间利用率，且更易于安装和集成的平面特斯拉线圈，在实际搭建的 SWPT 系统中,发射线圈和接收线圈相同,均为初级线圈 2 匝,次级线圈 100 匝。传输距离为 55 m,传输频率为 35 MHz。

图 8 为 SWPT 系统示意图。信号发生器为系统提供特定频率与幅值的正弦波信号，示波器则用于显示 SWPT 系统的能量传输状态。

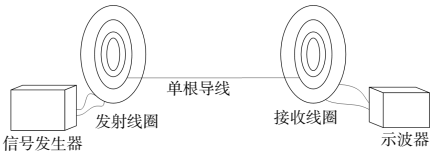


图 8　SWPT 系统示意图

Fig.8 SWPT system schematic diagram

图 9 为实物搭建的 SWPT 系统。由固纬

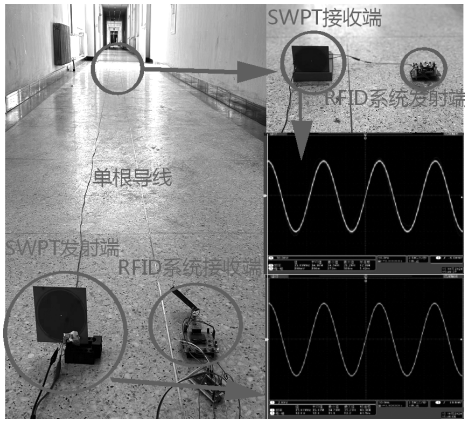


图 9　搭建 SWPT 系统实物图

Fig.9 Physical picture of SWPT system

MFG-2260M 信号发生器为 SWPT 系统提供频率为 35 MHz，幅值为 10 Vpp 的正弦波信号。若在 SWPT 接收端可检测到该正弦波信号,说明 SWPT 技术可通过单根引下线进行信号的传输。

SWPT 系统检测到的传输信号为 35 MHz，252 mV,波形如图 10 中 a 波形所示。

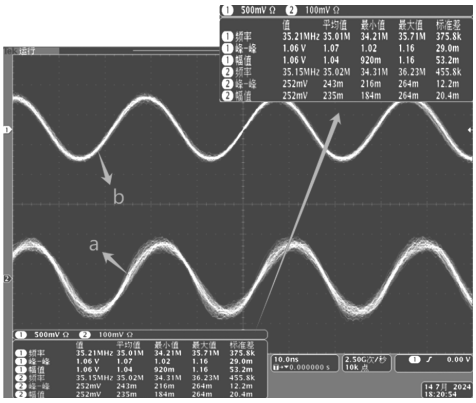


图 10　示波器数值显示

Fig.10 Oscilloscope value display

3　在线监测系统设计与实现

3.1　硬件设计

3.1.1　尖端检测系统

SWPT 系统虽然可以实现信号的远距离传输，但在 SWPT 接收端检出的信号为高频低幅值信号(图 10 中 a 波形所示)。为避免影响风力发电机组正常运行,考虑将该信号由叶尖传输至叶根，在叶根的中央处理系统处将检测信号上传至上位机。为实现检出信号由叶尖传输至叶根,须要对高频低幅值信号进行处理，信号处理单元包括可处理高频信号的运算放大电路、检波电路及电压比较电路。

运算放大电路采用 LTC6228 低失真轨到轨输出运算放大器，将高频低电压信号的幅值放大 5 倍。放大后的正弦波信号为 35 MHz,1.06 V,放大后波形如图 10 中 b 波形所示。

将放大后的正弦波信号通过二极管检波电路,对高频信号进行包络检波,使交流信号变为直流信号,将直流信号通过阈值比较电路,设定阈值电压,当高于阈值电压时,阈值比较电路输出高电平,否则输出低电平。信号处理整体电路如图 11 所示。

信号回传系统用于无线传输桨叶引下线的通断信息。UM2010 是一款工作于 200 ~960 MHz

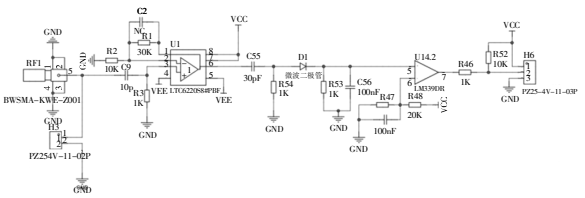


图 11　信号处理整体电路图

Fig.11 Overall circuit diagram of signal processing

的低功耗、高性能、单片集成的无线收发机芯片。UM3213 是基于 ARM Cortex-M0+内核的超低功耗，宽电压工作范围的 32 位 loTP 处理器 SoC 芯片。用 UM2010 和 UM3123 设计射频发射和接收单元。

在布置尖端检测系统时，考虑风力发电机组桨叶固有设计,为避免影响风机正常运行,所以设计柔性 PCB 板,使得设计的电路可以紧密贴合于风力发电机组桨叶表面。尖端检测系统如图 12 所示。

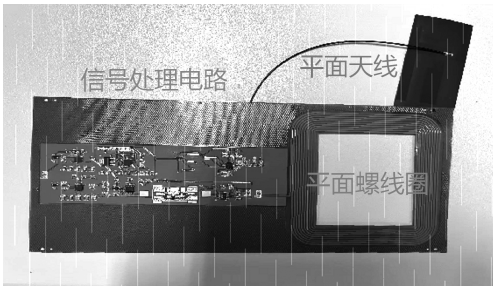


图 12　尖端检测系统

Fig.12 State-of-the-art detection systems

3.1.2　中央处理系统

在叶根处布置射频接收单元，目的是接收尖端检测系统发送的引下线状态检出结果，其结构与尖端检测系统的射频发射端相同，射频接收单元如图 13 所示。

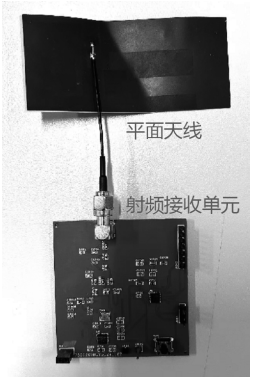


图 13　射频接收单元

Fig.13 RF receiver unit

为提升风电场运维效率，当中央处理系统检测到风力发电机组桨叶引下线出现断线故障时，须要及时向上位机提供故障风力发电机组的准确地理位置。系统应用 GPS 定位单元,获取故障风力发电机组的地理信息。本文选择使用正点原子提供的 ATK-MO1218 GPS 芯片,作为定位模块的核心部分。

为实现上位机实时显示引下线状态检出结果，利用 M750C 4G 通讯将检测结果上传至上位机。

最后,射频接收单元将叶尖处回传的信号发送至 ZGT6 系统板。系统板接收到检出信号后,会结合 GPS 定位信息,通过 4G 通讯将引下线的状态信息传输至上位机。

3.2　RFID 信号回传调试

分别搭建信号回传系统中的射频发射单元和射频接收单元,并进行测试。图 14 为发射功率对接收率的影响。

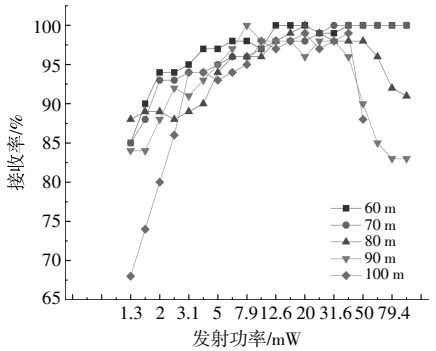


图 14　发射功率对接收率的影响

Fig.14 Effect of transmit power on receive rate

如图 14 所示,当传输距离为 60~100 m 时,随着发射功率增大，接收率均可达到 95%及以上，但随着距离增大，接收率随着发射功率增大而衰减。

目前,风电机组叶片长度可达到 100 m,故在 100 m 处研究发射频率对接收率的影响。速率是速率值 D(kbps)和频偏 F(kHz)的总称,在 100 m 距离下分别对 D1.2~F2.5 K,D2.5~F5 K,D5~F10 K 3 种工作频段,分别对这 3 种频段进行实验。实验结果如图 15 所示。

由图 15 可以看出,当速率为 D1.2~F2.5 K,发射功率为 31.6 mW 以上时,接收率可达到 98%以上。综上所述,射频系统选择速率为 D1.2~F2.5 K,

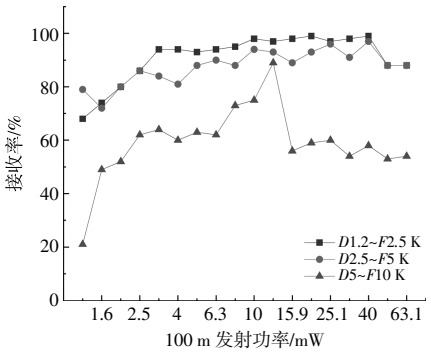


图 15　相同发射功率下,3 种工作频段接收率对比

Fig.15 Comparison of receivables in three operating frequency bands at the same transmit power

发射功率为 31.6 mW，此时射频接收系统可实现最佳接收率。

3.3　定位功能调试

为保证工作人员能够及时对故障机组进行停机检修，避免受损机组继续工作而造成更严重的损坏,须要获取故障机组的准确位置信息。因此,使用 GPS 单元来实现定位,该单元可提供准确的经纬度和海拔信息，将这些定位数据与引下线状态信息整合后,打包发送至云服务器,从而实现故障机组的定位。该单元具有较高的定位精度,能够准确定位到实验室的位置，为风力发电机组的故障检测提供了可靠的技术支持。

3.4　云传输功能调试及上位机显示

中央处理系统将检测结果和风力发电机组的地理信息整合后，通过 4G 通讯单元将整合信息传输至云服务器。为测试引下线断线监测系统能否将检测结果上传至云端，正点原子提供了相应的云服务器，以显示该芯片与服务器之间的信息传输。在 M750 C 芯片中插入 SIM 卡，经过调试后,可建立与云服务器通讯连接,以实现该芯片与服务器之间的信息传输，从而确保检测数据可靠上传，实现实时监控与故障定位。通讯结果如图 16 所示。

由图 16 可知:当风力发电机组引下线未出现断线故障，则显示 Signal Yes；否则显示 Signal No,并显示 GPS 定位的经纬度。测试结果表明,中央处理系统可实现将引下线状态检出结果上传至云端。

为验证系统信号检出率是否为 100%,在 SWPT 发送单元持续发送 300 s 信号。云服务器信

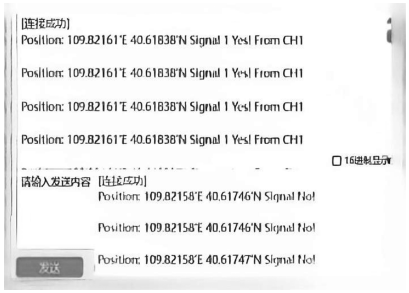


图 16 ATK-M750C 接收到原子云信息

Fig.16 The ATK-M750C receives atomic cloud information

号检出结果如图 17 所示。

Position:109.82240'E 40.61809'N Signal1 Yes! cou:197	Position:109.82153'E 40.61843'N Signal1 Yes! cou:197
Position:109.82240'E 40.61809'N Signal1 Yes! cou:198	Position:109.82153'E 40.61843'N Signal1 Yes! cou:198
Position:109.82240'E 40.61809'N Signal1 Yes! cou:199	Position:109.82153'E 40.61843'N Signal1 Yes! cou:199
Position:109.82240'E 40.61809'N Signal1 Yes! cou:200	Position:109.82153'E 40.61843'N Signal1 Yes! cou:200
Position:109.82200'E 40.61820'N Signal1 Yes! cou:197	Position:109.83103'E 40.61951'N Signal1 Yes! cou:197
Position:109.82200'E 40.61820'N Signal1 Yes! cou:198	Position:109.83103'E 40.61951'N Signal1 Yes! cou:198
Position:109.82200'E 40.61820'N Signal1 Yes! cou:199	Position:109.83103'E 40.61951'N Signal1 Yes! cou:199
Position:109.82200'E 40.61820'N Signal1 Yes! cou:200	Position:109.83103'E 40.61951'N Signal1 Yes! cou:200

图 17 云服务器信号检出结果

Fig.17 Cloud server signal detection result

由图 17 可知,在 4 个不同检测点,当 SWPT 发送单元持续发送 300 s 信号时,4G 通讯单元每次均向云服务器传输 200 组数据，因此 4G 系统检出率为 100%。

为判断每片桨叶引下线的状态信息，分别对风电机组桨叶射频发射单元进行编号，在中央处理系统的射频接收单元识别编号，并将该编号引下线状态信息上传至上位机，监测结果传输至上位机,如图 18 所示。

风机编号	风机类型名称	叶片编号	断线情况
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	2	正常
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	1	断线
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	3	正常
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	2	正常
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	1	断线
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	3	正常
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	2	正常
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	1	断线
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	3	正常
3ae4526c1ca5450585sd2db5cd137206	-	2	正常

图 18 上位机显示监测结果

Fig.18 Upper computer displays monitoring results

4 结论

本文通过仿真实验和实物实验，对单线能量传输系统与引下线断线在线监测系统进行了分析与实测,得出以下结论。

①基于对平面螺旋线圈的研究，证明了平面 SWPT 系统通过单根引下线进行能量传输的可行性。在风力发电机组叶根处，将 10 Vpp,35 MHz 高频正弦波信号通过单根引下线传至桨叶的尖端检测单元处，检测单元可接收到 250 mV,35 MHz 的能量。

②为不影响风力发电机组正常运行，叶尖处不宜布置较多电路，考虑将检出信号通过 RFID 单元回传至叶根,并上传至上位机,将低幅值、高频率的正弦波信号进行放大、检波和阈值比较处理。将检出结果通过射频信号发送单元回传至中央处理系统的射频信号接收单元，中央处理系统 MPU 通过识别回传的信号来判断引下线是否断线。

③为准确判断引下线断线的叶片，将 3 个叶片分别编号，将判断结果与 GPS 定位信息通过 4G 通讯单元发送到上位机,实现了风力发电机组引下线的在线实时监测。

参考文献:

[1] 唐英杰,张哲任,徐政.基于单向电流型 AAMC 的海上风电直流送出方案[J].电力系统自动化,2022,46(14):129-139.

[2] 刘钟淇,吕循岩,王哲,等.海上风电开发潜力与外送经济性分析[J].可再生能源,2024,42(11):1498-1503.

[3] 乔左江,杜欣慧,薛晴.大规模风电参与系统调频研究综述[J].电测与仪表,2023,60(7):1-12.

[4] 刘健,杨仲江,卢慧慧.风力发电机雷击次数的改进计算模型与方法[J].电力科学与技术学报,2016,31(4):149-154.

[5] 肖琼,何相勇,冯学斌,等.风电叶片新型防雷设计的仿真和试验研究[J].可再生能源,2021,39(6):784-789.

[6] 李宏博,李庆民,郭子炘,等.基于纳秒脉冲反射定位的风机叶片引下线断裂故障检测方法[J].高电压技术,2021,47(3):1100-1108.

[7] 金磊,于景斌,李强,等.矿用电缆单相接地故障行波特性及测距方法研究[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(12):71-79.

[8] 王金明,马高晨.基于风力发电机桨叶避雷线断线检测系统研究[J].绿色科技,2020(6):233-234.

[9] 王金明,刘磊,张飞,等.应用脉冲回波的避雷线断线检测系统研究[J].中国测试,2024,50(3):111-115.

[10] 菲尼克斯(中国)投资有限公司.基于 PLCnext 平台的风机叶片智慧综合监控系统[J].自动化博览,2019(8):44-45.

[11] 郭靖,张飞,王金明,等.风力发电机组桨叶引下线断线在线检测系统研究[J].太阳能学报,2023,44(10):407-413.

[12] N Tesla. System of transmission of electrical energy[P]. USA Patent:645576,1900-03-20.

[13] N Tesla. World system of wireless transmission of energy [J]. Telegraph and Telephone Age,1927,20:457-460.

[14] Tesla N. The true wireless [J]. Electrical Experimenter, 1919,2(5):28-32.

[15] Shu X J, Zhang B. Single-wire electric-field coupling power transmission using nonlinear parity -time -symmetric model with coupled -mode theory [J]. Energies, 2018,11(3):1-10.

[16] Chen X Y, Chen J H, Li G L, et al. Electric-field-coupled single -wire power transmission -analytical model and experimental demonstration [C]. Novi Sad: IEEE,2017.

[17] Basar M R,Ahmad M Y,Cho J,et al. Stable and high-efficiency wire-less power transfer system for robotic capsule using a modified helmholtzcoil [J]. Industrial Electronics,IEEE Transactions on,2017,64(2):1113-1122.

[18] 梅远腾,李旻.基于平面螺旋发射线圈的胶囊机器人无线供能系统的设计与优化[J].电测与仪表,2023,60(6):19-25.

Research on online monitoring system of wind turbine downline break based on planar spiral coil

Zhang Mingxi[1], Li Lingfeng[2], Wu Xiaodan[2], Zhao Shumin[2], Wang Jinming[1]

(1.School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, China; 2.Inner Mongolia Huadian Rose Camp Wind Power Co.,LTD. Wulanchabu 012200, China)

Abstract: The blade down conductor of a wind turbine is a critical component for lightning protection. When the down conductor fails, it can impede the discharge of lightning current, potentially leading to severe consequences such as blade deformation, cracking, or even explosion. This paper focuses on the blade down conductor of wind turbines and designs an online monitoring system for down conductor breakage based on single-wire power transmission technology, radio frequency technology, GPS positioning, and 4G communication technology. The system can monitor the status of the blade down conductor in real time, enabling timely shutdown and maintenance by the staff to prevent more severe damage to the wind turbine. Simulation and experimental results demonstrate that the single-wire power transfer system can achieve signal transmission over 55 m, the radio frequency transmission system can achieve signal return over 100 m, and the communication system can upload detection results in real time. The system can efficiently, stably, and accurately detect down conductor breakage faults.

Keywords: single -wire power transmission technology; planar spiral coil; online fault monitoring; lightning protection; wind turbine blade down conductor