

山地湍流对风力发电机组偏航误差的影响机制及补偿策略研究

王建国

国华（赤城）风电有限公司 河北 张家口 075000

摘要：随着风力发电技术向高海拔山区扩展，由复杂地形引起的不均匀扰动已成为影响风力发电效率和安全运行的重要因素。本文采用理论分析、数值模拟和野外实验相结合的方法，对山区湍流特征及其对偏航误差的影响机理和补偿方法进行深入研究。通过计算流体动力学（CFD）与风电场实测，山区湍流“强度大，各向异性强，间歇性强”是其主要特点；从风向测量、气动载荷和系统响应三个维度，分析湍流致偏摆误差产生的内部机制。在此基础上，提出“LSTM前向预估-模糊PID”的融合补偿策略。通过云南一座山区风电场的实验结果表明：所提出的控制策略能够使平均的偏摆偏差由5.8度下降到2.1度，发电功率提高4.2%-6.5%，减少机组主要构件的疲劳负荷25%-32%，为山区风电的高效稳定运行提供技术支持。

关键词：山地湍流；风力发电机组；偏航误差；影响机制；补偿策略；LSTM神经网络

引言

随着世界能源结构的转变，风力发电的重点逐渐由平原地区转移到了高海拔地区。我国山区风力资源已超过45%，而山区（如峡谷、陡坡、复杂山区等）会导致气流运动轨迹发生明显变化，并产生与平地截然不同的湍流。该区域的非均匀、非均匀、非均匀等特点，会对风力发电系统的偏航控制产生严重的扰动。风力发电系统作为风力发电装置的关键组成部分，其对风力发电效率的影响很大。数据显示，偏航误差每增大1度，发电功率将减少0.5-1%；此外，该误差还会加剧风机的气动负荷波动，造成风机主轴、塔筒等关键零部件的疲劳破坏，从而降低风机的使用寿命。现有的研究主要集中在平缓的地形上，而以固定步长PI为代表的传统控制方法（以“来流稳定”为代表）很难适应山区湍流条件下水流方向的急剧变化。以山区风电场为例，在常规的控制方式下，偏航误差平均高达5.8°，年平均损失超过7%。因此，深入分析山区风场扰动特征，分析其对风场扰动的作用机理，并提出有针对性的补偿策略，是山区风力发电发展亟需解决的关键科学问题。

1 山地湍流特性分析

1.1 山地湍流的形成与时空特征

山地湍流的形成源于地形对气流的多重作用，其核心包含三个方面的影响：一是上升作用，即气流在遇到山体阻碍后沿斜坡上升，在垂直方向上产生流速梯度，而在此过程中，由于层间流的剪切而产生湍流。二是绕流效应，当气流绕山而行时，在背风坡附近会出现分离

涡和回流区，涡的产生、脱落和破碎等过程会使湍流脉动的间歇性加强，在背风区1-2倍的山地高度区域，紊动强度比迎风坡高30%-50%。三是狭窄的管道效应，山口和峡谷地形的存在，使得隧道内的空气流速在垂直方向上可增加20%-40%，同时由于流速梯度的增加，在水平方向上的紊动强度也随之增加，从而产生了“高风速-高湍动”的耦合区^[1]。另外，山区的昼夜热力差异也将进一步影响山区大气湍流特征：山区白天增温迅速，热对流加强了垂向紊动；在夜间，逆温层对垂向脉动有一定的抑制作用，而对横向湍流的不均匀性则有很大的促进作用。

基于云南某山地风电场（海拔2200m，地形坡度25°~35°）30天实测数据（采样频率10Hz）与ANSYS Fluent三维山地流场仿真，在时间尺度上，白天（8点-18:00）湍流度平均为0.28-0.42，晚上（18:00-8:00）下降到0.15-0.25；在多云、多雨条件下，大气湍流度的涨落范围由晴天+0.05增大到±0.12；在季节上，在冬季，平均湍流度在0.35-0.45之间，在夏季则比较平稳，在0.20-0.30之间。空间维度上，风轮毂高（60-120米）湍流度随着海拔升高而降低，80-100米（0.38-0.42）出现一个峰值（0.38-0.42），这一区域是山地隆升和高海拔自由流交汇区，具有最强烈的剪切力；在风速方向上，迎风坡的紊动强度逐渐增加，在峰顶处达到极大值，由于回流涡的作用，背风坡出现了明显的“波动下降”；在垂直于风方向上，河谷中部的紊动强度较两侧山坡高出20-30%，表现出明显的狭管效应。

1.2 山地湍流的核心量化指标

为了准确刻画山区湍流对偏航系统的作用,需要从以下几个方面对其特征进行定量表征:一是湍流度,它反映了风速脉动的强弱,常用风速标准偏差与平均速度之比来表征,山区湍流度一般为0.2-0.45,是平地(0.1-0.2)的2-2.5倍;二是湍流积分尺度,它反映了湍流大涡结构在空间上的大小,即在50-150米范围内,垂直方向上只有10-30米,且具有显著的横向和纵向比(5-8),具有显著的各向异性。三是风脉动频率,即表征来流方向的变动量,山区环境中其频率在0.1-0.6Hz之间,比平地上0.05-0.2Hz高出很多,极大地提高了船舶偏航系统的响应能力。四是湍流偏度,它体现了湍流的不均匀性,山区湍流偏度值一般在0.3-0.8之间,表明可能有“强脉冲事件”(如骤风),容易诱发偏摆系统瞬间过负荷^[2]。

2 山地湍流对偏航误差的影响机制

2.1 风向测量误差的诱发路径

风向传感器(例如风向标)作为船舶航向控制的“感知器官”,其测量结果的准确与否,将直接影响船舶航向判断的准确度。山区湍流会对实测数据造成两种影响,使实测结果与实际风况存在较大的偏差,约为30%-40%。其中一个原因是由于空间过滤效应。风向标对其敏感区(一般是0.5-1米的球面区)的平均风向进行测量,而山区湍流场中有许多5-20米大小的小涡系,可改变敏感区来流流向的不均匀性。在0.3Hz以上的湍流脉动下,传感器在测量过程中会出现0.2-0.5秒的迟滞现象,这段时间内实际风况已经发生了明显的改变,造成了测量误差。模拟结果表明,在湍流度由0.2增加到0.4后,实测风速的平均误差由1.2°增加到3.5°,振幅由 $\pm 0.5^\circ$ 增大到 $\pm 1.8^\circ$ 。另一种是湍流的扰动。山区湍流脉动在横向和纵向上存在着明显的差别,一般在水平方向上是两到三倍。传统的风标只对水平风向灵敏,而风速仪在垂直方向上的强烈脉动却能通过风速仪传输到传感单元,触发竖向振动,从而影响风向的测定。比如,在垂向湍流度为0.3的情况下,该振荡引起的横向风测误差可达到1.5°-2.0°,并且随着垂向湍流度的增加,该误差将呈现出线性增加的趋势。而山区的横向流动又会引起来流5-15°“倾斜角”,使得常规风向标不能分辨出水平风向和倾角,容易把倾角误认为是风向,从而导致观测结果的不准确^[3]。

2.2 气动载荷波动的干扰路径

风力发电机风力负荷是风力发电系统中的“负载源”,山区湍流会引起风力来流状态的变化,引起风力负荷的剧烈波动,对驱动装置的稳定性造成扰动,形成负荷耦合误差,这类误差约占整个偏航误差的25%~35%。在山区湍流条件下(0.1-1秒),气流扰动会

引起风力脉动(0.1-1秒)出现 $\pm 2-4\text{m/s}$ 的脉动,从而引起气动推力脉动幅度大于40%。偏航系统需提供充足的横摆力矩以抵消与推力成比例的空气阻力,而大幅度的推力波动会引起偏航力矩的频繁调节,使得偏航电机和减速器等执行机构极易发生“过调”甚至“欠调”。在1.5MW机组中,当风速由8米/秒增加到12米/秒时,风机的气动推力将由250kN增加到560kN,相应的空气阻力由120kN.m增加到270kN.m,如果偏航力矩的调节滞后0.3秒,将造成2.5°~3.0°的偏航误差。在非均匀来流条件下,山区湍流将引起风轮扫流场中速度分布的不均匀性(“入流剪切”)。如在河谷地区,风力机上部风力较下半部风力大15%-20%,造成风力机左部和右部出现较大的扭矩差异。这一差异将使风轮产生“被动偏转”,使其与目标对风的方向产生偏差,从而产生偏摆误差。通过数值模拟,得出了在不同风速条件下,风轮在不同风速下所产生的最大扭矩差异可达到80kN.m,这一差异已足够导致风力机发生1.8°-2.2°的被动偏转,并随着湍流度的增加而加剧。

2.3 偏航系统响应延迟的加剧路径

偏航系统的反应时滞主要由传感器信号处理、控制器运算和执行器动作三部分组成,其时延一般在0.3-0.8秒之间。山区湍流沿流向高速波动(0.3-0.6Hz),使得偏航系统难以“追赶”风场的变化,从而导致其在总体偏航误差中的25%-35%。在信号处理和计算时延两个角度,常规的偏航控制方法是基于“平均方向滤波”的,它要求对5-10秒的风速进行平滑。然而,山区湍流沿流向的变化周期很小(1.7-10秒),而过度的过滤时间将使得控制器的判断“滞后于”实际风场。比如,在风速为0.5Hz的情况下,5秒的滤波器将导致系统对风速的响应延迟2-3个周期,累计误差达到3.0-4.5°。对于执行器的工作滞后,由于受到电机功率和减速器的传动比等因素的制约,其最大偏转角速度一般在0.5°-1.5°/s之间。然而,在山区,水流沿流向的瞬间变动量可以达到2°-5°/s,远远超过了驱动器的最大响应速度。比如,1秒钟之内,风速发生3°的突然改变,使得执行器仅发生1.5°的偏转,从而导致1.5°的响应滞后误差,并且随着风速的增加,这种误差也会随着风速的增加而直线增大^[4]。

3 山地湍流环境下偏航误差补偿策略

3.1 基于LSTM神经网络的前瞻预测补偿

针对风场观测误差和偏航系统响应滞后的问题,基于LSTM(LSTM)神经网络,建立山区湍流预报模型,实现对来流风向的预报预报,实现对来流风向的预报由“被动追赶”到“主动应对”的转变。利用门控制单元

(输入门、遗忘门和输出门), LSTM神经网络能够很好地克服传统循环神经网络(RNN)对时间序列的依赖性,特别适用于山区湍流等时序数据。预报模式以10秒内的湍流度、风向、风速和风向脉动频率为输入。对未来0.5秒,1秒,1.5秒,2秒的风速进行了预报。该模型由两层LSTM网络(每个层32个神经元,每个层的激活函数是tanh)和一个完全连通的输出层。利用云南一座山区风电场采集的100000个实测数据(70%用于训练,15%用于验证,15%用于试验),得到的模型参数达到0.001,批量规模64,迭代100次。试验结果表明,在预报0.5秒内,风速预报的平均误差只有0.32度,预报精度达到94.5%;当预报时间增加到2秒时,预报精度达到88.2%,平均误差只有0.85°,能够很好地满足预报的要求。

3.2 基于模糊PID的实时反馈控制

为抵消气动载荷波动对偏航系统的干扰,在此基础上,利用模糊规则对PID参数(比例系数,积分系数,微分系数)进行了动态调节,以达到实时校正偏航误差的目的。以偏航角误差(范围 -10° - 10°)和误差变化量(范围 $-5^{\circ}/s$ ~ $5^{\circ}/s$)为输入变量,将模糊子集定义为{负大,负中,负小,零,正小,中,正大};以PID三个参量的增量作为输出变量,其模糊子集与输入相吻合。模糊规则基于工程经验制定,例如,在偏摆误差“正大”(较大)和“正大”(误差迅速增加)的情况下,需要增大尺度系数来提高响应速度,降低积分系数来避免积分饱和,增加微分系数来抑制过冲,从而保证系统在快速响应下仍能保持稳定性。利用MATLAB/Simulink建立了该系统的数学模型,并将其与常规PID控制器进行了比较。研究发现,常规PID在湍流强度0.3时,超调18.5%,调整时间2.8秒;采用模糊PID控制,其超调仅为5.2%,调整时间仅为1.5秒,动态特性明显提高,能够迅速消除因气动负载变化引起的误差^[5]。

3.3 基于地形特性的参数自整定

研究基于山区地形(坡度)和湍流度等因素的参数

自适应方法,实现LSTM的预测权值和模糊PID参数的自适应优化。首先,将山区划分为三种类型:缓坡($15^{\circ} < 15^{\circ}$)、中坡($15^{\circ} < 30^{\circ}$)和陡坡($< 30^{\circ}$);其次,针对大坡度+高湍流度条件,采用LSTM模型增强前向补偿能力,并结合模糊PID控制算法快速适应大负荷变化等特点,结合数值模拟方法,实现复杂地形-湍流条件下的优化设计。最终,通过实时获取实际地形和湍流信息,并根据相关参数映射关系,对控制参数进行动态调整,以保证该方法能够在复杂多变的山区环境下稳定有效地运行。

4 结束语

本文通过对山地湍流特性、偏航误差影响机制及补偿策略的系统研究,发现山区湍流强度大、各向异性强、间歇性强,会引起风向测量误差、气动负载波动、偏航系统响应滞后等“三重耦合作用”导致偏航误差。本文提出的“LSTM前向预估-模糊PID”相结合的综合补偿方法,能够有效减少山区风机的偏航误差,提高山区风机的发电效率和安全运行。后续研究可深入探究山区湍流和机组之间的耦合作用对船舶偏航误差的作用机理,完善多物理场耦合的补偿策略。本文研究成果将为山区风力发电系统的发展和推广应用奠定理论和技术基础。

参考文献

- [1]李翠萍,俞黎萍.湍流强度修正风力发电机组功率曲线方法的研究[J].可再生能源,2014,32(4):466-468.
- [2]李庆,王同光,黄彬彬.山地风电场湍流特性对风电机组载荷的影响[J].太阳能学报,2022,43(5):421-428.
- [3]张伟,刘颖明,赵振宙.风电机组偏航误差对发电效率的影响及优化[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4156-4165.
- [4]韩花丽,张根保,杨微.湍流强度对风电机组测量功率曲线的影响及修正[J].太阳能学报,2015,36(6):1442-1446.
- [5]魏梦飒,陆增洁,徐建清等.基于大数据模型的电网风电场群总功率预测[J].电子设计工程,2019,27(23):64-67+72.