

基于贝叶斯推理的风电机组风轮偏航协同智能控制方法

邬伟骏, 吴江波, 周强, 姜文兵

(国家电投集团江西赣州新能源有限公司, 江西 赣州 330000)

摘要: 风向的变化对风电机组的偏航控制是一个挑战。对于风向的频繁变化,如果风电机组的反应速度过慢,无法及时调整偏航角度,将会影响发电效率。为了准确控制风电机组风轮偏航问题,文章提出了一种基于贝叶斯推理的风电机组风轮偏航协同智能控制方法。在考虑风速随机性的情况下,分析风向信号,获取风向样本数据。引入贝叶斯分类器,结合风向正态分析模型,计算服从上一批样本分布的风向样本后验概率,将其作为警戒值调节基准,建立基于贝叶斯推理的网络警戒值调节机制,通过爬山算法调节警戒值,完成风电机组风轮偏航协同智能控制。实验结果表明,所提方法对风电机组风轮偏航展开协同智能控制后,机舱位置出现偏航的次数为0,且偏航控制时间短,表明该方法可以完成风电机组风轮偏航协同智能控制。

关键词: 考虑风速随机性; 风电机组; 风轮偏航; 协同智能控制

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)09-1205-06

0 引言

风电机组是风能发电的核心设备,其运行效率和可靠性对整个能源系统有着重要影响。在风能发电过程中,风向的变化会导致风电机组的风轮产生偏航效应,从而对风能利用率和发电效率产生不利影响^[1]。如何通过控制风轮偏航来提高风能利用率和发电效率是风能发电领域亟待解决的问题,研究一种能够自适应、快速响应、精准控制的智能偏航控制方法,对于提高风电机组的运行效率和可靠性具有重要意义。

为了增强风电机组运行的可靠性和稳定性,相关人员致力于研究出有效的控制方法。张志龙^[2]利用坎贝尔图获取共振区间,在最优转矩控制的基础上加入转速控制,最终实现穿越控制。王文亮^[3]分析了不同参数对推力系数产生的影响,通过分析结果给出对应的控制策略。颜湘武^[4]在故障穿越以及频率调节原理的基础上,提出了风储能联合控制策略。上述方法均没有考虑风向的不稳定性,导致对风电机组的偏航控制效果不佳。

在已有研究方法的基础上,本文提出了一种基于贝叶斯推理的风电机组风轮偏航协同智能控制方法。首先,使用贝叶斯分类器对风向样本进行分类,并将风向数据建模为正态分布。通过结合贝

叶斯分类器和正态分布模型,能够更好地分析和预测风向变化趋势,并根据分布计算后验概率;然后,根据不同的风速随机性和风场状况,动态地调整警戒值,以适应风电机组风轮偏航控制的需求;最后,利用爬山算法对警戒值进行优化调节,以实现风电机组风轮偏航的协同智能控制。实验结果表明,所提方法具有良好的风电机组风轮偏航协同智能控制性能。

1 风电机组风轮偏航协同智能控制方法

1.1 考虑风速随机性的风向信号分析

风向信号是风电机组偏航控制的重要依据。精准分析风向情况可以帮助提高发电效率。然而,由于风速的随机性,风向也相应地变化,因此准确地捕捉和预测风向信号对于偏航控制是至关重要的。

为了进行精准的风向信号分析,通常使用风玫瑰图来表示不同方位的风向情况。

对于风向的测量,常用的方法是旋转式风速估计,其中,使用最广泛的设备是风杯。杯形风速计的转速与风速之间有一定的关系,通过这种关系可以计算出风速 v 。

$$\begin{cases} v=a+bN+cN \\ b=2\pi SK \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2023-10-30。

基金项目: 国家电投总部科技项目(KYTC2021SD14)。

作者简介: 邬伟骏(1991-),男,工程师,主要从事电气工程相关工作。E-mail:le_lc223@163.com

式中: a 为由阻力矩所决定的常数; b 为风速表系数; c 为风速和风杯两者之间的关系; N 为单位时间范围内风杯的转数; S 为可加热式风速; K 为风速表功率系数。

考虑风速的随机性, 风速记录仪可以利用光电式完成风速数据记录和转换操作。如果任意地区的风速近似服从双参数分布, 利用得到的风速 v , 即可获取概率分布密度函数 $e(v)$ 。

$$e(v) = (ac)(v/c)^{a-1} \exp[-(v/c)^a] \quad (2)$$

通过对各个站点的统计数据进行分析, 研究区域内 24 h 的风速变化情况, 统计各个研究区域内的风能和持续总时长。同时, 根据记录的平均风速数据和最大风速数据展开风速威布尔分布参数估计。在固定时间范围内设定最大风速为 V_{\max} , 利用概率分布密度函数, 计算最大风速值出现概率 $Z(V)$ 。

$$Z(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_{\max}}{c_e \cdot e(v)}\right)^2\right] \geq V_{\max} \quad (3)$$

式中: c_e 为概率分布参数。

风速的变化对风电机组的运行状态和发电效率具有重要影响。通过了解风速的概率分布, 可以针对不同的风速情况, 制定相应的风电机组控制策略, 从而提高发电效率和稳定性。风速的概率分布 V_{ar} 为

$$V_{ar} = c_d \left[\beta \left(\frac{Z(V)}{c_p} \right) \right] - \left[\beta \left(\frac{Z(V)}{c_p} \right) \right]^3 \quad (4)$$

式中: c_d, c_p 分别为概率分布的尺度和形状参数; β 为伽马函数。

当机组接入风力发电系统后, 风的随机性会导致风电机组的风轮转速也实时发生变化。如果当前风速处于额定风速和停机风速之间, 在控制变桨距的过程中还须要调节风电场偏离最大位置的风速以及风向, 避免风电机组的机舱和风向是正对的, 降低强风对风电机组产生的伤害。考虑到风速的随机性和间接性, 本文提出了基本风、阵风、渐变风和随机噪音风 4 种风速成分模拟。通过综合这些成分模拟, 可以更好地模拟真实的风速情况, 并为风电机组的风轮偏航控制提供更为准确的输入信号。

①基本风: 通过风电场测风获取的 Weibull 分布近似表示为

$$\bar{V} = c_d \cdot \beta \left(\frac{V_{ar}}{c_p} \right) \quad (5)$$

式中: \bar{V} 为基本风速。

②阵风: 描述风速突变时的特征, 获取的阵风风速 V_{wg} 为

$$V_{wg} = \begin{cases} 0, & t < T_{lp} \\ V_s, & T_{lp} \leq t < T_{lp} + T_p \\ 0, & t \geq T_{lp} + T_p \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_p 为阵风持续总时长; T_{lp} 为阵风开始时刻; t 为时间。

③渐变风: 通过渐变风成分描述渐变风的特性, 渐变风风速 V_{wr} 为

$$V_{wr} = \begin{cases} 0, & t < T_{1s} \\ \bar{V}_r, & T_{1s} \leq t < T_{2s} \\ \max V_{wr}, & T_{2s} \leq t < T_{2s} + T_s \\ 0, & t \geq T_{2s} + T_s \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_{1s}, T_{2s} 分别为渐变风的起始和结束时刻; T_s 为渐变风持续总时长。

④随机噪音风: 风速随机性可以借助随机风速模拟, 随机噪音风风速 V_{wn} 为

$$V_{wn} = [(u_v(\alpha_i) \Delta \alpha)]^n \cdot \alpha_i \quad (8)$$

式中: α_i 为均匀分配在 $[0, 2\pi]$ 内的随机变量; $\Delta \alpha$ 为随机变量均值; u_v 为风速输出模式。

综合上述 4 种风速成分, 获取风向样本数据 V_{qo} 。

$$V_{qo} = \bar{V} + V_{wg} + V_{wr} + V_{wn} \quad (9)$$

1.2 风电机组风轮偏航协同智能控制

通过对风向样本数据的深入分析, 可以获得风向的变化模式和趋势, 并利用这些信息来获取风电机组的偏航控制策略, 以提高风能的利用率和发电效率。为了实现这一目标, 引入贝叶斯分类器帮助获取新的风向样本服从上一批样本分布的后验概率^[5,6]。使用贝叶斯分类器获取风向样本后验概率的详细操作步骤如下。

①收集并准备风向样本数据

收集一批风向样本数据, 并进行整理和准备, 以确保数据的质量和准确性。

②设定实验参数和先验函数

根据所收集到的风速 v , 计算不同风速事件的出现次数。先验函数 $g(q)$ 为

$$g(q) = \frac{\varphi + \delta}{\varphi \cdot \delta} p(1-p)^{\delta-1/v} \quad (10)$$

式中: φ, δ 均为不同事件出现的次数; p 为实验参数。

③估计风向样本的概率分布

利用收集到的风向样本数据, 通过分析和计算, 估计风向样本的概率分布。

④计算似然函数

通过贝叶斯分类器获取似然函数 $Z(\theta|p)$ ^[7,8]。

$$Z(\theta|p) = Z(\theta) \cdot Z(p) / g(q) \quad (11)$$

式中: $Z(\theta), Z(p)$ 分别为风向样本 θ 和风向样本 p 的估计量。

⑤加入归一化系数

为了计算后验概率, 在似然函数中加入归一化系数即可获取新的风向样本服从上一批样本分布的后验概率 \hat{Z} 。

$$\hat{Z} = [Z(\theta) \cdot Z(p)] \cdot p(1-p)^{\delta-1} \cdot Z(\theta|p) \quad (12)$$

自适应谐振理论 2 加权网络结构 (ART2wNF) 如图 1 所示。

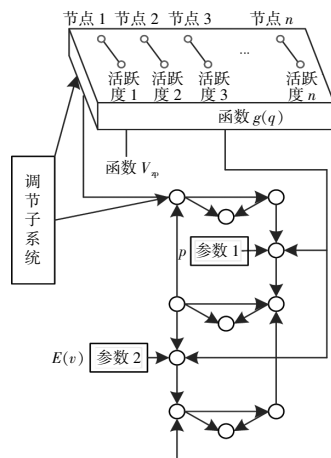


图 1 ART2wNF 网络结构

Fig.1 ART2wNF network structure

将 ART2wNF 网络和后验概率有效结合, 建立基于贝叶斯推理的 ART2wNF 网络警戒值调节机制^[9,10]。利用爬山算法展开警戒值调节, 最终实现风电机组风轮偏航协同智能控制。

①对风向信号进行周期采样处理

考虑风速的随机性, 对风向信号展开周期采样处理, 获取风向样本数据 V_{sp} 。

②计算风向分布函数

根据风向样本数据, 建立风向分布模型, 并计算风向分布密度的获取概率分布函数 $E(v)$ 。 $E(v)$

描述了不同风向区间的可能性。

③利用贝叶斯模型获取后验概率

使用贝叶斯模型获取新样本数据服从上一批样本数据后验概率^[11,12], 将得到的后验概率设定为警戒值调节基准, 结合 ART2wNF 网络, 建立基于贝叶斯推理的 ART2wNF 网络警戒值调节机制。

④引入爬山算法计算功率的偏差值

爬山算法是一种利用控制变量不断搜索函数最大值的局部择优方法^[13,14], 应用到风电机组风轮偏航协同智能控制中就是不断寻求风电机组输出功率的最大值点, 以便控制偏航电机的启停以及转向。风电机组的输出功率 f_p 为

$$f_p = p\pi v H_s(\tau, \sigma) / \hat{Z} \quad (13)$$

式中: H_s 为风能利用系数; τ 为叶尖速比; σ 为叶片桨距角。

当功率偏差值大于风电机组风轮偏航起始功率时, 展开偏航。在风向不变、风速变化时, 利用功率偏差值 ψ 实现风电机组风轮偏航协同智能控制。

$$\psi = (S_{\text{max}1} - S_{\text{max}2}) \cdot f_p / \frac{\varphi + \delta}{\varphi \cdot \delta} \quad (14)$$

式中: $S_{\text{max}1}, S_{\text{max}2}$ 分别为风曲线 1 和 2 的最大功率值。

在风电机组风轮偏航协同智能控制中, 提高偏航准确度是至关重要的。为了实现这一目标, 采取以下措施。

①精细化风向划分

通过对风向区间进行更细致地划分, 更准确地判断风向变化, 从而确保偏航方向的准确性。

②优化偏航范围

根据实际的风向变化和风电机组的特性, 设定更加精确的偏航范围。当风向发生变化时, 风电机组可以及时、准确地调整偏航角度, 从而提高偏航准确度。

③协同控制策略

在多台风电机组运行的环境下, 通过协同控制策略, 可以实现多台机组之间的协同偏航。当一台机组因风向变化而偏航时, 其他机组可以相应地调整自身的偏航角度, 确保整体的风能利用率和发电效率最大化。

④反馈调整机制

建立偏航控制的反馈调整机制, 根据实际运

行效果不断地调整和优化偏航控制策略,及时发现并纠正偏航误差,提高偏航准确度。

通过将 ART2wNF 网络警戒值调节机制与爬山算法相结合,可以优化风电机组的偏航控制策略,实现协同智能控制,最大化风能利用率和发电效率。这种协同控制方法还可以进一步提高风轮偏航的准确度。通过对不同风向区间进行细致的划分,以及对风电机组的偏航范围进行更加精确的设定,提高了偏航的准确度。

2 实验分析

选取某城市某风电场的监测数据验证所提基于贝叶斯推理的风电机组风轮偏航协同智能控制方法的有效性,不考虑齿轮箱在设备使用过程中产生的能量消耗。实验参数见表 1。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

参数	数值
风电机组额定功率/kW	3 000
切入、切出风速/m·s ⁻¹	5,25
风电机组额定风速/m·s ⁻¹	10
偏航速度/(°)·s ⁻¹	0.5
功率因数	-1.00~1.00

为了体现所提控制方法的优越性,选取了文献[3]的双风轮风电机组的主动共振穿越控制研究方法,与本文方法进行对比。采用不同方法展开的风电机组风轮偏航协同智能控制前后偏航时间变化情况见表 2。

表 2 不同方法控制前后的偏航时间对比结果

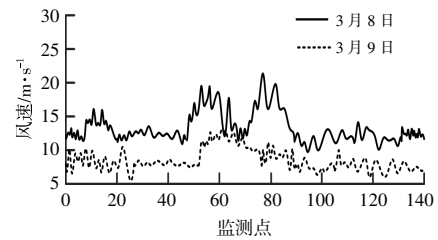
Table 2 Comparison results of yaw time before different control methods

监测点 编号	控制前偏航 时间/ms	控制后偏航时间/ms		
		本文方法	文献[3]方法	文献[4]方法
01	152	64	128	116
02	114	23	77	92
03	160	66	135	147
04	87	12	64	73
05	52	7	29	35
06	10	0	6	9
07	21	3	10	14
08	49	4	15	19
09	56	5	47	51
10	73	11	58	62

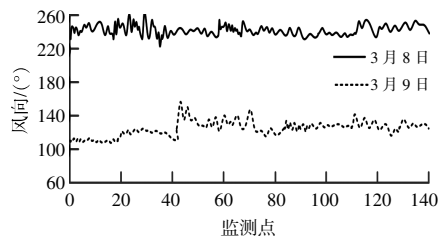
由表 2 可知:采用不同方法展开风电机组风轮偏航协同智能控制后,偏航时间得到明显降低;

与本文方法相比,其他两种方法的偏航时间明显更高一些。本文方法可以有效减少偏航时间,获取更加满意的风电机组风轮偏航协同智能控制结果。

为了确保对比实验的可靠性,对实验工况进行了如下设定,选取 2022 年 3 月 8 日和 9 日的风速和风向数据作为实验数据(图 2),在已知风速和风向数据的情况下,分别采用不同方法展开风电机组风轮偏航协同智能控制,实验结果如图 3 所示。



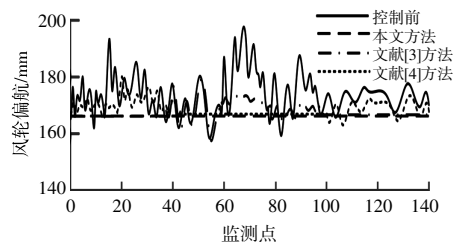
(a) 风速



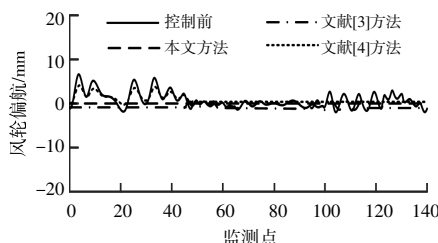
(b) 风向

图 2 8 日和 9 日的风速和风向

Fig.2 Wind speed and direction on the 8th and 9th



(a) 8 日控制前后风轮偏航对比结果



(b) 9 日控制前后风轮偏航对比结果

图 3 风电机组风轮偏航协同智能控制前后结果对比

Fig.3 Comparison of results before and after collaborative intelligent control of wind turbine wheel yaw

由图 3 可知,采用本文方法对风电机组风轮

偏航展开协同智能控制后,机舱位置出现偏航的次数为0,而采用另外两种控制方法后仍然出现大量偏航的情况。由此可见,本文方法具有良好的风电机组风轮偏航协同智能控制性能。这是因为本文方法通过利用贝叶斯推理和爬山算法等优化算法,实现了更加精准的风向跟踪和偏航控制,能够根据实时的风向数据和机组运行状态,快速调整偏航角度,使风电机组始终保持最佳的运行状态。

为了进一步验证本文方法的优越性,分析采用不同控制方法后的风能利用系数的变化情况(图4)。

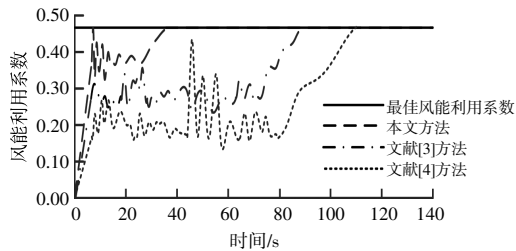


图4 不同方法的风能利用系数实验结果

Fig.4 Comparison of experimental results on wind energy utilization coefficients using different methods

由图4可知:本文方法的风能利用系数在40s左右达到最佳状态,并且整体没有出现较大的波动,说明采用本文方法展开风电机组风轮偏航协同智能控制后,风电机组始终保持在最优工作效率,可以更好地控制风电机组运行,充分验证了本文方法的优越性;文献[3]和文献[4]方法在控制效果上存在一定的不足,无法有效地减少偏航时间,导致了较多的偏航情况发生。

3 结论

为了确保风电机组的稳定运行,本文提出了一种基于贝叶斯推理的风电机组风轮偏航协同智能控制方法。该方法考虑了风速随机性,并结合贝叶斯推理和网络警戒值调节机制进行风向控制优化。通过使用贝叶斯分类器和风向正态分析模型,能够准确计算出风向样本后验概率,从而动态调整警戒值并提高控制准确性。同时,引入爬山算法对警戒值进行调节,进一步优化偏航控制效果。通过实验分析表明,本文方法可以有效降低偏航次

数以及偏航时间,提升风能利用系数,适用于解决风电机组风轮偏航问题。

参考文献:

- [1] 石忠佼,朱化杰,赵良玉,等.考虑舵机动力学的旋转弹自适应解耦控制[J].航空学报,2022,43(3):341-351.
- [2] 张志龙,方钊,刘亚娟,等.双风轮风电机组的主动共振穿越控制研究[J].热力发电,2023,52(3):130-135.
- [3] 王文亮,张国强,李璇焯.风电机组叶尖净空分析与控制[J].水力发电,2022,48(4):94-98.
- [4] 颜湘武,王德胜,隗小雪,等.风电机组故障穿越与频率调节风储联合控制策略研究[J].中国电机工程学报,2021,41(17):5911-5923.
- [5] 张春英,冯晓泽,刘洋,等.一种新的三支扩展TAN贝叶斯分类器[J].小型微型计算机系统,2021,42(3):485-490.
- [6] 张梦蝶,覃华,苏一丹.进化贝叶斯优化的核极限学习机分类器[J].计算机工程与设计,2022,43(2):399-405.
- [7] 崔西宁,孙红雨,李克龙.基于贝叶斯算法的弱监督细粒度图像分类方法[J].计算机仿真,2022,39(9):467-470,512.
- [8] 马文,陈庚,李昕洁,等.基于朴素贝叶斯算法的中文评论分类[J].计算机应用,2021,41(S2):31-35.
- [9] 王慧婷,陈燕俐,彭春春.一种基于本地化差分隐私保护的高效朴素贝叶斯分类方案[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2022,42(3):100-112.
- [10] 樊顺星,李楚进,沈澳.不平衡数据分类的类依赖属性加权朴素贝叶斯算法改进[J].应用数学,2022,35(2):463-468.
- [11] 吴香华,周洁琴,解康,等.基于改进的贝叶斯模型平均的方法和应用研究[J].数学的实践与认识,2022,52(10):240-249.
- [12] 张文钧,蒋良孝,张欢,等.一种双层贝叶斯模型:随机森林朴素贝叶斯[J].计算机研究与发展,2021,58(9):2040-2051.
- [13] 刘敬一,彭举,唐建波,等.融合多特征的轨迹数据自适应聚类方法[J].地球信息科学学报,2023,25(7):1363-1377.
- [14] 袁欣,俞卫琴,王国强.基于希尔伯特相似度的高维面板数据聚类方法及应用[J].统计与决策,2022,38(17):52-54.

Collaborative intelligent control method for wind turbine rotor yaw based on Bayesian inference

Wu Weijun, Wu Jiangbo, Zhou Qiang, Jiang Wenbing

(State Power Investment Group Jiangxi Ganzhou New Energy Co.,Ltd., Ganzhou 330000, China)

Abstract: The change in wind direction poses a challenge to the yaw control of wind turbines. Due to frequent changes in wind direction, the response speed of wind turbines is too slow, making it difficult to adjust the yaw angle in a timely manner, thereby affecting power generation efficiency. In order to accurately control the problem of wind turbine wheel yaw, a collaborative intelligent control method for wind turbine wheel yaw considering the randomness of wind speed is proposed. Considering the randomness of wind speed, analyze the wind direction signal and obtain wind direction sample data. Introduce a Bayesian classifier and combine it with a wind direction normal analysis model to calculate the posterior probability of wind direction samples that follow the distribution of the previous batch of samples. Use it as the benchmark for adjusting the warning value, establish a network warning value adjustment mechanism based on Bayesian inference, and adjust the warning value through a mountain climbing algorithm to achieve collaborative intelligent control of wind turbine rotor yaw. The experimental results show that the proposed method achieves collaborative intelligent control of wind turbine rotor yaw, with zero occurrence of yaw in the cabin position and a short yaw control time. This indicates that the method can achieve collaborative intelligent control of wind turbine rotor yaw.

Keywords: consider the randomness of wind speed; wind turbines; wind wheel yaw; collaborative intelligent control