

双馈异步风力发电机偏航静态误差自动修正算法

朱得利,唐中杰

(国能陕西新能源发电有限公司,陕西 西安 710075)

摘要:为了提高风力发电机的风能捕获效率,增加发电量,提出双馈异步风力发电机偏航静态误差自动化修正算法。结合经验算法对风向仪采集的实时风况数据展开分析,明确了风力发电机偏航静态误差所在区间。引入动量-叶素理论,计算出双馈异步风力发电机偏航静态误差。将偏航静态误差的校正问题转化为发电机的转速的自动控制问题,结合固定时间理论,完成滑模控制器的构建,进而实现双馈异步风力发电机偏航静态误差的自动化修正。实验结果表明,所提方法能够在持续稳定控制的前提下,有效实现偏航静态误差的校正,对于提高风力发电机的性能、稳定性和经济效益具有重要意义。

关键词:风力发电机;双馈异步发电机;偏航静态误差;动量-叶素理论;滑模控制器

中图分类号:TH-39

文章编号:1000-0682(2024)06-0088-05

文献标识码:A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.016

Automatic correction algorithm for yaw static error of doubly fed asynchronous wind turbines

ZHU Deli, TANG Zhongjie

(State Energy Shaanxi New Energy Power Generation Co., LTD., Shaanxi Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to improve the wind energy capture efficiency and increase the power generation of wind turbines, an automatic correction algorithm for the yaw static error of doubly fed asynchronous wind turbines is proposed. By combining empirical algorithms, the real-time wind condition data collected by the wind vane was analyzed, and the range of static yaw error of the wind turbine was clarified. Introduce momentum blade element theory to calculate the yaw static error of doubly fed asynchronous wind turbines. Transforming the correction problem of yaw static error into an automatic control problem of generator speed, combined with fixed time theory, the construction of a sliding mode controller is completed to achieve automatic correction of yaw static error in doubly fed asynchronous wind turbines. The experimental results show that the proposed method can effectively correct the static error of yaw under the premise of continuous stable control, which is of great significance for improving the performance, stability, and economic benefits of wind turbines.

Keywords: wind power generator; doubly-fed asynchronous generator; yaw static error; automatic correction; sliding mode controller

0 引言

双馈异步风力发电机作为风力发电领域的重要设备,其运行稳定性和发电效率直接关系到整个风

力发电系统的性能。然而,在实际运行过程中,双馈异步风力发电机常常受到风况变化、设备老化等多种因素的影响,导致偏航静态误差的产生,进而影响了发电机的运行效率和可靠性^[1]。因此,研究双馈异步风力发电机偏航静态误差的自动化修正技术,对于提高风力发电系统的整体性能具有重要意义。

Wang Y^[2]等人对大型风电机的动态特性展开

收稿日期:2024-04-25

第一作者:朱得利(1986—),男,甘肃靖远人,本科,中级工程师,研究方向为电气工程及其自动化(风电安全生产管理)。

初步分析后,建立发电机电力学模型,通过风电机运行参数的代入,推算出风速范围内,风力发电机的偏航误差区间。结合区间风速与偏航误差加减的动态变化关系,制定偏航误差校正策略。然而,仅仅通过代入运行参数来推算偏航误差区间可能无法完全反映这种动态变化关系,导致校正策略的有效性受到限制。刘颖明^[3]等人基于 Weibull 概率分布算法,对风电机组应用过程中的实时风向展开感应,并通过标签方式,对实时风况展开描述。引入 KNN 算法,对风电机组的实时偏航控制参数实施优化,进而达到风电机组的偏航控制目的。此方法实施过程中,如果标签数据存在误差或缺失,将直接影响 Weibull 概率分布模型的准确性和 KNN 算法的优化效果。谈竹奎^[4]等人考虑到双馈风力发电机的特殊结构,通过 Park 变换方法建立风力发电机数学模型,实现双馈风力发电机的解耦控制。结合电机的实时电压分析,生成电压矢量控制方法,完成电机的并网控制。Park 变换法对模型的精确性要求很高,如果模型参数不准确或受到外部干扰,可能导致控制精度下降,甚至引发系统失稳。莫岳平^[5]等人结合速度环 ADRC 控制与非线性切换方法排除风力发电系统内不确定因素的影响,结合最佳叶尖速比法,建立发电机功率跟踪模型及误差补偿器,实现偏航误差的实时计算及调整。此方法结合了多种控制策略和方法,使得整个控制算法相对复杂。这不仅增加了设计和实现的难度,还可能导致在实际应用中调试和维护的复杂性增加。

为了解决上述方法中存在的问题,提出双馈异步风力发电机偏航静态误差自动化修正算法。

1 静态误差区间辨识

双馈异步风力发电机偏航静态误差所在区间的确定,可以精确地指导静态误差的校正方向和范围。为明确双馈异步风力发电机偏航区间,将风向仪采集的风况数据划分为风速与对风偏差两个维度,在这两个维度内,对风况数据实施聚类。

设双馈异步风力发电机的输出功率为 P ,发电机作业环境内的空气密度为 ρ ,电机作业桨距角为 χ ,引入叶尖速比 μ ,对 P 展开计算,计算过程如下:

$$P = \frac{\rho C_r (\mu, \chi) S v^3 (\cos \alpha)^3}{2} \quad (1)$$

其中: C_r 表示双馈异步风力发电机作业过程中的风能利用系数; S 表示风轮旋转过程中的扫掠面积; v 表示风速; α 表示偏航误差。

以风速为主要考虑因素,利用经验算法^[6],将风况数据划分为 n 个不同区间,其中,随机 j 区间内的风况数据 Bin^j 可写成式(2)形式:

$$Bin^j = \{P^{v(j)_{\min}}, \alpha^{v(j)_{\min}} | v(j)_{\min} < v < v(j)_{\max}\} \quad (2)$$

其中: $v(j)_{\min}$ 表示 j 区间内的风速下限; $v(j)_{\max}$ 表示 j 区间内的风速上限; $P^{v(j)_{\min}}$ 、 $\alpha^{v(j)_{\min}}$ 分别表示 $v(j)_{\min}$ 前提下的双馈异步风力发电机组风能吸收量,与偏航误差。

通过以上方法,可初步完成基于风速的风况数据区间化归类。

在 Bin^j 基础上,基于偏航误差维度将 Bin^j 划分为 b 个子区间,其中第 k 个子区间 $TBin^{j,k}$ 可表示为式(3)形式:

$$TBin^{j,k} = \left\{ P^{v(j)_{\min}}, \alpha^{v(k)_{\min}} \left| \begin{array}{l} v(j)_{\min} < v < v(j)_{\max} \\ \alpha(k)_{\min} < \alpha < \alpha(k)_{\max} \end{array} \right. \right\} \quad (3)$$

其中: $\alpha(j)_{\min}$ 、 $\alpha(k)_{\max}$ 分别表示第 k 个子区间内,双馈异步风力发电机运行过程中允许的最大偏航静态误差与最小偏航静态误差。

结合式(2)与式(3)可实现风况数据的多个子区间归类划分,对单独 $TBin$ 区间内的双馈异步风力发电机发电功率均值 P_{jk} 展开计算,具体计算方法如下:

$$P_{jk} = \text{mean}(P^{v(j)_{\min}}, P^{v(j)_{\min}}) \quad (4)$$

利用式(4)对每个区间内的发电功率均值展开遍历后,对比不同区间的 P_{jk} 计算结果, P_{jk} 最大值所在区间,即为双馈异步风力发电机偏航静态误差所在区间。

2 误差自动修正

2.1 偏航静态误差计算

确定了双馈异步风力发电机偏航静态误差所在区间后,引入动量-叶素理论,风向补偿角展开计算。

在式(1)基础上引入动量-叶素理论,对双馈异步风力发电机运行过程中的风能利用微元量 eC_r 展开计算具体过程如下:

$$eC_r = eP \cdot \left[\frac{\rho v^3 S}{2} \right]^{-1} = (4-4f)f'\mu^2 \quad (5)$$

其中: f 为发电机风轮处的轴向转速诱导因子; f' 为风轮切向转速诱导因子。

设双馈异步风力发电机运行过程中,作用在风力机叶片上,使其产生沿风向的力的分量为 G ,风力

机叶片在旋转过程中,风向入射角为 β ,风力机叶片数量为 m ,叶片翼型弦长为 l ,由于风力的作用而产生的旋转力矩为 H ,结合式(5)推论,可推导出 G 、 H 的计算方法如式(6)所示:

$$\begin{cases} G = b \cdot (1 - b)^{-1} = \frac{(\delta_1 \cos \beta - \delta_2 \sin \beta)}{(\sin^2 \beta)^{-1}} \cdot \frac{ml}{8\pi r} \\ H = b' \cdot (1 + b')^{-1} = \frac{(\delta_1 \cos \beta - \delta_2 \sin \beta)}{(\sin \beta \cdot \cos \beta)^{-1}} \cdot \frac{ml}{8\pi r} \end{cases} \quad (6)$$

其中: b, b' 分别为风力发电机轴向以及切向上的速度诱导因子; δ_1, δ_2 分别为风力发电机运行过程中的升力因数与阻力因数。

在理想运行条件下,忽略双馈异步风力发电机运行过程中的叶片阻力,即令 $\delta_2 = 0$;在此前提下,令式(6)内两公式相除,可得到以下推论:

$$\tan^2 \beta = \frac{b' - bb'}{b + bb'} \quad (7)$$

已知双馈异步风力发电机运行过程中入流角 $\tan \beta = b \cdot (1 - b)^{-1} \mu$,结合式(7)得到如下推论:

$$b' - bb' \mu^2 = b + bb' \quad (8)$$

对 b 和 b' 的初始值展开设定后,设定值应用于上述公式,利用迭代算法^[7],即可得到 b 和 b' 参数的最终计算结果。

以 b, b' 矢量方向为 x 轴、 y 轴,构建二维坐标系,利用简化的静态计算分析方法,绘制双馈异步风力发电机风轮旋转过程中,偏航静态误差曲线^[8],曲线的二次方程如下:

$$\varpi' = \arctan \frac{b'}{b} \quad (9)$$

利用式(9)可得到 b 和 b' 不同迭代取值下的偏航静态误差 ϖ' 。

2.2 滑模控制器设计

在风力发电系统中,静态偏航误差是由于多种因素导致的风力发电机偏离最佳迎风位置的现象。这种误差会影响风力发电机的运行效率和能量输出。为了纠正这种误差,在控制程序中采用风向补偿角的方法来进行补偿。风向补偿角计算公式如下:

$$\varpi = \varpi' + \vartheta = k\psi \quad (10)$$

其中: ϑ 为风向角的偏航测量值^[9]; ϖ' 为不同 b 和 b' 取值下的偏航静态误差计算结果; ψ 为发电机转速; k 为风向补偿因数。

分析式(10)可发现,可通过发电机转速的控制,实现偏航静态误差的调整。

考虑到滑模控制器对系统的不确定性以及时变

性具有较强的处理能力,引入滑模控制方法^[10-11],对发电机转速展开实时调节。为缓解转速控制过程中的抖振,在传统滑模控制器中引入分数阶微积分算子,实现电机转速的感应控制。

建立双馈异步风力发电机转速控制系统的超局部模^[12]如式(11)所示:

$$z^{(w)} = \chi v + F \quad (11)$$

其中: $z^{(w)}$ 视为系统输出量的 w 阶导数; χ 为常数增益系数; F 为控制系统内的扰动合集。

设 σ' 和 σ 分别为电机实际转速与理想转速, $e = \sigma - \sigma'$ 表示电机转速的理想控制量,引入 $E^{\chi-1} \text{sig}(e)$ 分数项,以及 D_1 和 D_2 为两个常数项,构建滑模控制器的滑模面 u ,滑模面构建过程如式(12)所示:

$$u = \dot{e} + D_1 e + D_2 E^{\chi-1} \text{sig}(e) \quad (12)$$

其中: e 为电机实际转速与理想转速之间的差值; \dot{e} 为 e 的一阶导数, χ 的取值范围为 $(0, 1)$ 。

基于式(12),引入固定时间理念,构建滑模控制器趋近率如下:

$$\dot{u} = -q_1 u - q_2 \text{sig}(u)^{\iota} \quad (13)$$

其中: q_1, q_2 为两个滑模面增益项,且二者取值皆为 $(0, +\infty]$; ι 为一个取值范围为 $(0, 1)$ 区间的常数。

设 v_1 和 v_2 分别为双馈异步风力发电转速控制过程中的不匹配扰动与匹配扰动,二者计算过程如下:

$$\begin{cases} v_1 = -F_{\sigma} + \sigma' \\ v_2 = -\sigma F_{\sigma} \end{cases} \quad (14)$$

其中: F_{σ} 表示理想转速下的控制系统内的扰动合集。

此时可构建用于双馈异步风力发电机转速控制的滑模控制器如式(15)所示:

$$h = \chi^{-1} [-\dot{v}_1 - \dot{u} - v_2(1 - D_1) - D_2 E^{\chi} \text{sig}(e)] \quad (15)$$

通过滑模控制器内 q_1 和 q_2 取值的调整,可实现收敛时间的调整。

通过以上方法,可实现双馈异步风力发电机转速的实时调整,结合式(10)对风向补偿角展开进一步调整,使风向补偿角能够自动适应风向的变化,从而达到双馈异步风力发电机的偏航静态误差自动化修正目的。

3 实验与分析

为了验证所提方法对双馈异步风力发电机偏航静态误差的修正能力,在图1实验环境下实施误差

修正测试,实验具体参数设置如表1所示。



图1 实验环境

表1 实验具体参数设置

参数类别	参数名称	设定值
环境参数	风力发电机额定转速	1500 rpm
	风力发电机额定功率	2 MW
	实验风速范围	0 ~ 16 m/s
	风向变化范围	$\pm 5^\circ$
滑模控制器参数	滑模面斜率	0.5
	边界层厚度	0.02
	控制增益 λ	5

通过预设规则生成风向变化序列,并将这些风向数据输入到模拟系统中。根据实时采集的风向数据和机舱位置数据,计算当前偏航误差。根据偏航误差的大小和变化率,选择适当的偏航控制策略,并生成相应的偏航控制信号。模拟偏航电机根据控制信号调整机舱位置,完成偏航动作。在整个偏航过程中,实时更新机舱位置数据,并反馈到偏航误差计算和控制策略模拟环节。通过这种方法,可以实现双馈异步风力发电机偏航静态误差的模拟。

为了验证所提方法的实际应用效果,利用所提方法对风电机组展开偏航静态误差调整,采集不同风速区间内的风力发电数据,绘制所提方法校正作用下的功率—风速曲线,对比所提方法校正前后,风电机组功率曲线的变化情况,进而判断所提方法在实际应用过程中的效果。风电机组功率曲线如图2所示。

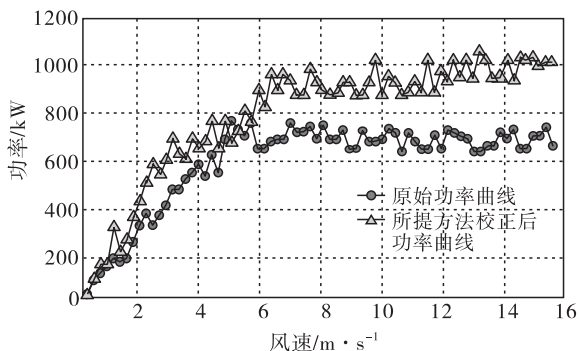


图2 风电机组功率曲线

观察图2可发现,利用所提方法对双馈异步风力发电机偏航静态误差实施校正后,不同风速下的风电机组功率曲线相较于原始曲线得到明显提升,说明风电机组的风能利用率得到显著增强,风力发电机的发电量有效增加。这是因为所提方法首先从风速与对风偏差两个维度对风向仪采集的风况数据展开分析,确定了双馈异步风力发电机偏航静态误差所在区间,有助于发电机更准确地捕捉和利用风能,从而提高风能利用率,为后续双馈异步风力发电机偏航静态误差的修正奠定基础。

为了验证所提方法的控制稳定性,分别利用所提方法、文献[4]方法以及文献[5]方法构建的控制器,对双馈异步风力发电机偏航静态误差展开调整。引入扰动抑制能力指标,对三种方法的稳定性展开评价。扰动抑制能力的计算公式如下:

$$\text{扰动抑制能力} = \left| 1 - \frac{0.5 \times \text{静态扰动峰值} - \text{系统终值}}{\text{系统终值}} \right| \times 100\% \quad (16)$$

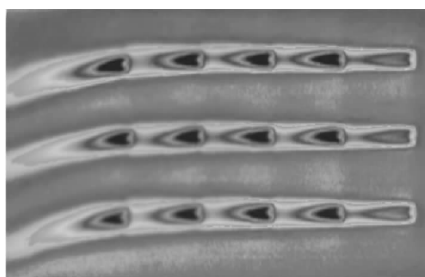
三种方法的扰动抑制能力对比如表2所示。

表2 扰动抑制能力对比

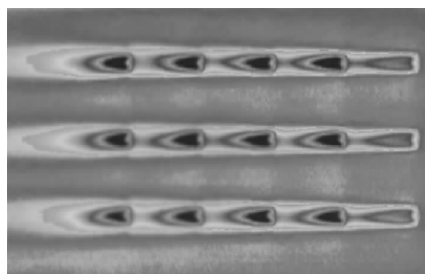
风速区间	扰动抑制能力		
	所提方法	文献[4]方法	文献[5]方法
0 m/s ~ 2 m/s	96.36	92.50	93.34
2 m/s ~ 5 m/s	97.52	91.84	91.07
5 m/s ~ 10 m/s	98.64	91.28	90.21
10 m/s ~ 16 m/s	97.21	90.14	89.66

分析表2可发现,相对于文献[4]方法与文献[5],所提方法在不同风速区间的扰动抑制能力更强,这是因为所提方法在初步得到偏航静态误差计算结果后,将偏航误差的调整问题转化为风向补偿角的控制问题,并通过滑模控制器自动调节电机转速的方式,实现风向补偿角的自动控制调整,由于控制器可以根据系统的实时状态进行动态调整,在面对外部扰动和内部参数变化时可以表现出更强的鲁棒性,因此整体扰动抑制能力较强。

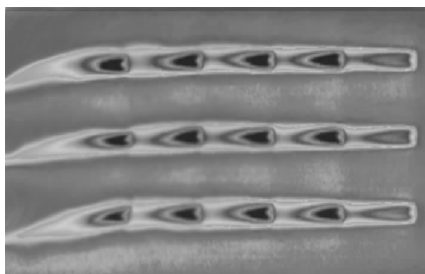
为了验证所提方法的偏航静态误差矫正效果。分别利用所提方法、文献[4]方法、文献[5]方法对双馈异步风力发电机偏航静态误差展开修正,完成修正后,绘制三种修正方法作用下的风电机组阵列尾流场示意图,通过尾流场示意图的对比,完成双馈异步风力发电机偏航静态误差校正效果对比。风电机组阵列尾流场示意图如图3所示。



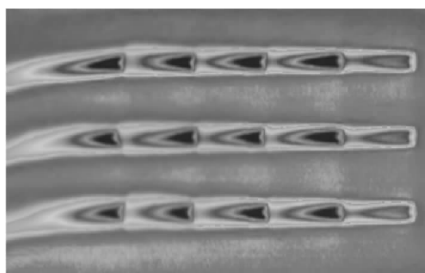
(a) 原始尾流场示意图



(b) 所提方法修正效果



(c) 文献[4]方法修正效果



(d) 文献[5]方法修正效果

图3 风电机组整列尾流场示意图

观察图3可发现,利用所提方法对双馈异步风力发电机偏航静态误差实施自适应修正后,尾流场偏转得到有效缓解,证明所提方法的修正效果较好。这是因为所提方法利用动量-叶素理论对双馈异步风力发电机运行过程中的风能利用微元量展开计算,准确地了解每个发电机叶片在不同风速和风向下的性能表现;通过迭代推导的方式,明确了偏航静态误差的大小和方向,为后续的补偿措施提供明确的指导,使滑模控制器能够更加精准地实现双馈异步风力发电机偏航静态误差补偿。

4 结束语

双馈异步风力发电机作为风力发电领域的重要

组成部分在提高能源利用效率、推动清洁能源发展方面扮演着日益重要的角色。所提方法对双馈异步风力发电机偏航静态误差的所在区间展开初步辨识后,引入动量-叶素理论计算出风向补偿角;通过滑模控制器对电机转速的自动调节,实现偏航静态误差的自动补偿。后续可通过深度学习算法的引入,对风向和风速进行精确预测,从而提前调整发电机的偏航角度,提高风力发电系统的整体性能和效率,为可再生能源的可持续发展作出更大的贡献。

参考文献:

- [1] 于波,于景龙,闻增鑫,等. 多场耦合下风电机组偏航系统疲劳载荷分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(12): 1619-1625.
- [2] WANG Y, CAI X, XU B, et al. Study on novel yaw error strategy for wind turbines based on a multi-body dynamics method[J]. Frontiers in energy research, 2021(9): 711927.
- [3] 刘颖明,陈亮,王晓东,等. 数据驱动的风电机组偏航参数适应性优化[J]. 太阳能学报, 2022, 43(08): 366-372.
- [4] 谈竹奎,文贤馗,杨涛,等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(03): 181-187.
- [5] 莫岳平,徐迪,史宏俊,等. 风力发电机最大功率模型自校正复合自抗扰控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(03): 337-343.
- [6] 何明,张斌,柳强,等. MADDPG 算法经验优先抽取机制[J]. 控制与决策, 2021, 36(01): 68-74.
- [7] 邵振国,黄耿业,张嫣,等. 固定噪声元的预测-校正型仿射潮流迭代算法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(07): 2331-2341.
- [8] 刘传亮,闫立鹏,张成义,等. 数据驱动风电机组偏航误差在线智能识别研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(04): 487-492.
- [9] 鲁胜麟,单泽彪,刘小松,等. 基于ESB波束形成的超声波传感器风速风向测量[J]. 仪表技术与传感器, 2021(10): 115-119.
- [10] 李元琪,王丁军,叶嵩,等. 基于模糊滑模控制的物料吊运定位防摆控制[J]. 计算机仿真, 2023, 40(04): 245-250.
- [11] 白天羽,赵南南,马毓敏,等. 基于灰狼算法的步进电机滑模控制系统设计[J]. 大电机技术, 2024(01): 40-47.
- [12] 吴艳娟,林峻山,王云亮. 基于超局部模型的永磁同步电机预测控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(11): 51-55.