DOI:10.3969/j.issn.1674 - 1951.2019.07.001

# 风电机组偏航系统静态偏差分析与研究

Analysis and research on static deviation of the yaw system of wind turbines

徐金晖<sup>1</sup>,郭鹏<sup>1</sup>,宋鹏<sup>2</sup>,柳玉<sup>2</sup> XU Jinhui<sup>1</sup>,GUO Peng<sup>1</sup>,SONG Peng<sup>2</sup>,LIU Yu<sup>2</sup>

(1.华北电力大学 控制与计算机工程学院,北京 102206;2. 华北电力科学研究院 有限责任公司,北京 100045)

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. North China Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

摘 要:静态偏差(偏航静差)普遍存在于风电机组的偏航系统控制中,造成机组发电效率降低、载荷增加。针对 目前风电场缺少激光雷达测风仪的现状,提出了基于数据预处理的改进区间化偏航静差分析和计算方法。在分 析风电机组运行特性的基础上,选取机组最大风能追踪阶段叶尖速比水平分布区间的运行数据,通过比较不同风 速和偏航误差区间的功率特性来分析计算偏航静差。以激光雷达测风仪测量的数据为基准,对该方法的有效性 进行检验,并建立偏航静差与叶轮转速的函数关系,可根据叶轮转速的变化对偏航静差作更精确的分析。风电场 实际应用表明,该方法能够有效准确地分析和计算偏航静差值。

关键词:偏航静差;风电机组;数据预处理;功率特性;叶尖速比;激光雷达测风仪

中图分类号:TM 721 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2019)07-0001-05

Abstract: Static deviation is common in yaw control system of wind turbines, resulting in reduction of power generation efficiency and increase of low load. Based on the wind turbine operating data, an improved analysis and calculation method for discretized static deviation of yaw system based on data preprocessing is proposed. By analyzing the operating characteristics of the wind turbines, the operating data in the horizontally distributed interval of tip speed ratios during maximum wind power tracking are selected. And the static deviations of the yaw system are analyzed and calculated by comparing the power characteristics with different wind speed and yaw error intervals. Baesd on data measured by laser radarsonde, the effectiveness of the method can be tested, and the relationship between the static deviation of the yaw system and the impeller speed is established. More accurate analysis on static deviation of the yaw system can be made according to impeller speed. The application results in wind farms show that the proposed method can effectively and accurately analyze and calculate the static deviation of the yaw system.

Keywords:static deviation of the yaw system; wind turbine; data preprocessing; power characteristics; tip speed ratio; laser radarsonde

### 0 引言

风力发电具有可再生及无污染的优势,过去的 几十年里在全世界范围内得到了快速发展。随着风 电机组装机容量的不断增大,对机组的控制系统与 状态监测系统提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。

偏航系统是风电机组的重要组成部分,它是使 风电机组快速高效地完成对风操作,减少风电机组 功率损失的执行机构<sup>[3]</sup>。由于风电机组运行工况复 杂,偏航系统受偏航控制策略及系统误差的影响,常 存在偏航误差,机组叶轮始终无法与来流风垂直。 这样不仅会造成风电机组风能捕获效率降低,还会 引起叶片气动弹性波动,增加机组的非对称载荷,影 响机组的使用寿命<sup>[4-7]</sup>。

偏航误差主要包括控制策略引起的偏差以及偏 航系统静态偏差。关于前者,相关学者提出了基于 风向预测、分风速段、寻优算法、偏航系数等方 法<sup>[8-12]</sup>,通过优化偏航控制策略来减小偏航误差。 关于消除偏航系统静态偏差,文献[13]提出使用机

收稿日期:2019-05-16;修回日期:2019-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51677067)

载式激光雷达测风仪对风电机组偏航系统进行纠 错,可有效减少偏航误差;文献[14]提出考虑风速 变化的分段优化方法,并使用激光雷达测风仪数据, 建立真实来流风向和机舱风向标测量风向的传递函 数来补偿偏航静差,但激光测风仪成本较高,仅少量 新型大容量风电机组有配备,上述方法并不适用于 所有风电机组。文献[15]根据动量 - 叶素理论来 计算风轮处轴向和切向速度诱导因子,并根据三角 函数关系修正因叶轮尾流导致的风向标测量误差。 文献[16]提出了一种基于功率曲线的偏航静差分 析方法,将风速及偏航误差区间化处理,通过对比每 个区间的功率特性来分析偏航静差所在区间,验证 结果表明该方法能够有效地分析偏航静差。对于不 配备激光雷达测风仪的风电机组,上述研究可有效 地提高风电机组的发电效率。

本文针对目前风电场缺少激光雷达测风仪的现 状,提出了改进区间化偏航系统静态偏差分析和计 算方法。采用叶尖速比水平分布风速段的运行数 据,减少控制因素对分析偏航静差的影响。量化分 析各偏航误差范围内的功率特性,并提出偏航静差 估计值的计算方法,以提高分析偏航静差的准确性。

#### 1 实际运行中偏航静差来源

偏航误差为真实风向与机舱轴线之间的夹角, 现场通常将风向标的零度基准与机舱轴线对准,因 此,当风向标测量精准无误时,风向标测量的物理量 就是偏航误差。由于风电机组运行环境恶劣,长期 未检定的风向标往往存在测量误差。此时风向标测 得的偏航误差与真实的偏航误差存在较大的差别, 将此测量误差定义为偏航系统静态偏差。图1为偏 航系统静态偏差示意图(图中:α为风向标测量的偏 航误差;φ 为真实的偏航误差;θ 为偏航静差)。



# 图1 偏航系统静态偏差示意

Fig. 1 Static deviation of yaw system

实际运行中,偏航静差的来源主要分为2种: (1)由于机组风向标的零度不再对准机舱轴线,导 致风向标测得的偏航误差角度偏离真实值;(2)风 电机组运行时,叶轮旋转会带动叶轮附近上下游的 空气旋转,形成叶轮尾流,导致风向标测得的偏航误 差与实际偏航误差存在一定的偏差,且这种偏差与 叶轮转速相关,叶轮转速越大偏差越大。

#### 2 偏航系统静态偏差分析方法

# 2.1 基于数据预处理的改进区间化偏航系统静态 偏差分析方法

由于成本较高,绝大多数风电机组都没有配备 激光雷达测风仪。对于这部分机组,根据运行数据 来分析机组偏航系统静态偏差是简便有效的方法。

风电机组功率的表达式为

$$P = \frac{1}{2}\rho C_{\rm p}(\lambda,\beta)Av^3(\cos\varphi)^3, \qquad (1)$$

式中:P 为风电机组的输出功率,kW; $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>; $C_p(\lambda,\beta)$  为风能利用系数; $\lambda$  为叶尖速比; $\beta$ 为桨距角;A 为风轮扫掠面积, $m^2$ ;v 为风速,m/s; $\varphi$ 为偏航误差。

由式(1)可知,风电机组的功率与偏航误差的 余弦的3次方成正比。偏航误差的绝对值越大,风 电机组的发电功率越小,功率损失越大。当偏航误 差达到10°时,功率损失为4.48%,当偏航误差达到 15°时,功率损失为9.87%。若风电机组的偏航系 统存在静态偏差,偏航系统将始终不能正确完成对 风操作。始终存在偏航误差,这就意味着风电机组 会因偏航系统静态偏差的存在而造成更多的功率损 失。当偏航误差为0°时,真实风向与机舱轴线的夹 角为0°,此时风能利用率最大,机组功率性能最优。 若偏航系统存在静态偏差,则此时风向标测得的偏 航误差角度应偏离0°。若风电机组功率性能最优 时风向标测得的角度为*x*,则角度*x*即为风电机组 偏航静差。根据上述思路,按以下步骤对偏航静差 进行分析。

2.1.1 数据预处理

选择用于分析偏航静差的变量为风向标测量的 偏航误差 α、风电机组输出功率 P、叶片桨距角 β 和 风速 v。

首先,去除功率为0的停机数据以及风电机组 工作在非正常状态下的数据。由于风电机组在额定 风速以上会进行变桨恒功率控制,因此本文仅对额 定风速以下的运行数据进行研究。当风速低于额定 风速时,叶片桨距角应处在0°位置,所以叶片桨距 角不为0°的数据也被去除。

其次,由于风电机组的功率特性不仅受偏航系 统的影响,还受控制系统的影响,所以在挑选数据时 需尽量减少控制因素对功率性能的影响。叶尖速比 λ 是机组叶片转速和风速的比值,是风电机组控制 系统的重要参数。当叶尖速比变化较大时,对风电 机组输出功率有较大影响。

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} , \qquad (2)$$

式中:R为叶轮半径;ω为叶轮转速。

图 2 为某 2 MW 风电机组叶尖速比随风速变化 的趋势图。从图 2 可以看出,当风速在 6.0~8.0 m/s 的区间时,叶尖速比呈水平分布。在该区间,风电机 组处在最大风能追踪控制模式,机组的叶尖速比变 化较小。因此,选取风电机组叶尖速比水平分布的 风速区间内的运行数据进行分析,能够较好地排除 风电机组控制系统参数波动对输出功率的影响。



图 2 叶尖速比随风速变化曲线 Fig. 2 Curve of tip speed ratio changing with wind speed

2.1.2 偏航系统静态偏差分析方法

将风向标测量的偏航误差 α 和风速 v 进行区间 化处理。将经过预处理的数据集按照风速分成 5 个 区间,每个区间的范围如式(3)所示。

 $BIN^{(i)} = \{P^{v(i)}, \alpha^{v(i)} \mid v^{(i)} < v < v^{(i+1)}\}, (3)$ 式中: $v^{(i)}$ 为第 i 个区间的风速下限; $v^{(i+1)}$ 为第 i 个 区间的风速上限;每个区间的步长为 0.4 m/s。

这样,每个区间内的数据都拥有相近的风速。 由于所选运行数据的叶尖速比处在水平分布的范围 内,在此风速范围内的每个区间,控制系统对机组功 率的影响很小,可以近似认为功率 *P* 只受偏航误差 角度 α 的影响。

为了更加精确地分析每个风速区间内功率与偏 航误差的关系,进一步将每个风速区间按照偏航误 差从 – 16° ~ 16°划分为 16 个子区间,如式(4)所示。  $SUBBIN^{(i,j)} = \left\{ (P^{e^{(i)},\alpha^{(j)}}) \middle| \begin{array}{c} v^{(i)} < v < v^{(i+1)} \\ \alpha^{(j)} < \alpha < \alpha^{(j+1)} \end{array} \right\}, \quad (4)$ 式中:  $\alpha^{(j)}$ 为第j个子区间的偏航误差下限; $\alpha^{(j+1)}$ 为 第j个子区间的偏航误差上限;每个区间的步长 为2°。

划分好区间后,计算每个偏航误差子区间内功 率的平均值,作为衡量各子区间对应的功率性能指 标。将每个风速区间内对应范围相同的偏航误差子 区间的功率性能指标求和,求得的最大指标和对应 的偏航误差子区间的范围即为偏航静差值的估计区 间,计算公式如下

$$Indicator(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} P_{ij}, \qquad (5)$$

$$P_{ij} = mean(P^{(v^{(i)}, \alpha^{(j)})})$$
, (6)

式中:n为风速区间的数量;P<sub>ij</sub>为每个偏航误差子区间内功率的平均值。

以偏航误差为横坐标,以功率为纵坐标,计算各 子区间对应的 *P*<sub>ii</sub> 并将其绘制出来,如图 3 所示。





#### Fig. 3 Curve of power changing with deviation of yaw system in different wind speed intervals

计算出最大功率指标和对应的偏航误差范围 后,选取该范围内所有数据的偏航误差的均值作为 偏航系统静态偏差的估计值 θ<sub>e</sub>,如式(7)所示。

$$\theta_{\rm e} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{ij}, \qquad (7)$$

 $\alpha_{ij} = mean(\alpha^{(v^{(i)},\alpha^{(j)})}) , \qquad (8)$ 

式中: *a*<sub>ij</sub>为每个子区间内偏航误差的平均值。 改进区间化偏航静差分析方法流程如图 4

# 2.2 基于功率曲线的偏航系统静态偏差分析方法

将文献[16]中的基于功率曲线绘制的偏航系 统静态偏差方法与本文方法进行比对分析。该方法 的步骤为:对数据按照偏航误差进行区间化处理,将 偏航误差从-15°~10°分为5个区间,每个区间步 长为5°;然后将每个偏航误差区间按风速0~13 m/s分为26个子区间,每个子区间步长为0.5m/s; 分别计算每个子区间内的平均功率。

以风速为横坐标,以功率为纵坐标,画出每个偏 航误差区间对应的功率曲线,如图5所示。

## 3 案例分析

所示。

#### 3.1 激光雷达测风仪数据分析偏航系统静态偏差

本文数据来自河北省张家口市坝上高原地区的 风电场,该风电场场地开阔平坦,海拔为1280~



1600 m。该风电机组为 2.0 MW、水平轴、变桨、变速、双馈型机组,叶轮直径为 93 m,轮毂高度为 80 m。机舱式激光雷达测风仪安装在风电机组机舱上方,利用多普勒频移原理,可测量风速、风向等多种风资源风况参数,其测量范围为 10 ~ 300 m(竖向与横向),测量精度高。以激光雷达数据分析得到的

偏航静差为基准,来验证 2.1 章节中基于数据预处 理的改进区间化偏航静差分析方法的精确性。

图 5 中位于最上方的功率曲线所对应的偏航误 差区间即为偏航静差值的估计区间,取该区间的中 位数作为偏航静差值的估计值。

本文采用的激光雷达数据为真实风向及机舱轴 线之间的夹角,即真实的偏航误差 $\varphi$ ,它与风电机组 风向标测量的偏航误差 $\alpha$ 之间的差值 $\theta$ 即为偏航系 统的静态偏差。

将静态偏差  $\theta$  按照叶轮转速分区,每个叶轮转 速区间的步长为 0.5 r/min,计算每个叶轮转速区间 内的  $\theta$  及叶轮转速  $\omega$  的平均值。以  $\theta$  的均值为纵坐 标, $\omega$  的均值为横坐标,在坐标系中画出  $\theta$  及 $\omega$  的散 点并将这些散点拟合,得到一条拟合直线 y = ax + b(y为偏航系统静态偏差;x 为风电机组叶轮转速), 如图 6 所示。通过该直线可分析风向标偏航静差的 组成:直线的斜率反映了偏航系统静态偏差随叶轮 转速的变化,而直线的截距为风电机组风向标的校 准误差。



#### 图 6 偏航系统静态偏差与叶轮转速的关系 Fig. 6 Relationship between static deviation of yaw system and impeller speed

本文采用该风电场 <sup>#</sup>12 风电机组 2015 年 10 月 19 日到 11 月 2 日的运行数据及安装在机舱上方的 激光雷达测风仪的数据对偏航系统静态偏差进行分 析。针对该试验机组激光雷达测风仪数据,分析静 态偏差与叶轮转速之间的关系,得到拟合直线的公 式为

y = -0.15x - 8.89 (9)

可以看出,该风电机组的偏航静差受叶轮转速 的影响较小。分析运行数据可发现,叶轮转速大部 分处于[9.5,14.5] r/min 的区间内,根据式(9)计 算得到偏航静差的范围为[-10.31°,-11.07°],取 该区间中点值-10.69°。

# 3.2 用运行数据分析偏航系统静态偏差

用2.1章节中基于数据预处理的改进区间化偏 航静差分析方法计算图3中不同偏航误差范围对应 的功率指标,见表1。

vaw	error	intervals	in figur	e 3

偏航误差区	功率指标/	偏航误差区	功率指标/
间/(°)	kW	间/(°)	kW
[-16,-14]	630.8	[0,2)	629.8
[-14,-12]	661.6	[2,4)	624.1
[-12,-10)	701.9	[4,6)	618.2
[-10,-8)	681.9	[6,8)	615.6
[-8, -6)	665.2	[8,10)	609.8
[-6, -4)	656.0	[10,12)	606.7
[-4, -2)	651.2	[12,14)	603.3
[-2,0)	638.9	[14,16]	598.6

表1 中最大功率指标对应的偏航误差区间为 [-12°, -10°),根据式(7)计算偏航系统静态偏差 的估计值  $\theta_{o}$  为 -10.95°。

用 2.2 章节中基于功率曲线的偏航静差分析方 法分析得到位于最上方的功率曲线对应的偏航误差 区间为[-15°,-10°),取区间中点-12.50°作为该 方法偏航静差的估计值。

将上述结果与激光雷达测风仪数据分析所得结 果进行比较,见表2。

表 2 不同方法所得结果及误差

Tab. 2 Results and errors obtained by different methods

方法	静态偏差/(°)	相对误差/%
基于数据预处理的改进区间 化偏航静差分析方法	- 10.95	2.24
基于功率曲线偏航静差分析 方法	- 12.50	16.93
激光雷达测风仪	- 10.69	基准

从表2可以看出,基于数据预处理的改进区间 化偏航静差分析方法选择了叶尖速比水平分布风速 段内的运行数据,由于减小了控制系统对功率的影 响而凸现了偏航误差对功率输出的影响,与激光雷 达测风仪测得的偏航静态误差结果更加接近。该案 例表明,本文提出的方法能够根据风电机组运行数 据准确地分析和计算偏航系统静态偏差。

采用激光雷达测风仪数据可分析得到偏航静差 随叶轮转速变化的函数关系,当风电机组拆除激光 雷达测风仪后,可根据叶轮转速的变化对偏航系统 静态偏差进行补偿,进一步提高偏航系统静态偏差 计算的准确性。

#### 4 结束语

目前,由于激光测风仪的成本较高,无法安装到 每台风电机组,而采用激光测风仪对风电机组风向 标进行定期检定时,工作量大且无法实时发现偏航 系统静态偏差的变化。本文提出了改进区间化偏航 系统静态偏差分析和计算方法,采用风电机组控制 系统参数(叶尖速比)水平分布风速段的运行数据, 以减小控制系统对输出功率的影响。采用风速分区 和偏航误差分区的方法来量化确定最大功率指标对 应的偏航误差范围,并以该范围内偏航误差的均值 作为偏航系统静态偏差的估算值。通过与基于功率 曲线的偏航系统静态偏差分析方法以及激光测风仪 数据进行比对分析,本文方法具有更高的准确性。 该方法根据风电机组运行数据即可对偏航系统静态 偏差进行准确的分析和计算,并可指导风电场运维 人员及时进行修正和处理,对提高风电场的运维水 平和经济效益具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] GIRSANG I P, DHUPIA J S. Pitch controller for wind turbine load mitigation through consideration of yaw misalignment[J]. Mechatronics, 2015, 32: 44 - 58.
- [2] SALEM A A, ABU-SIADA A, ISLAM S. Condition monitoring techniques of the wind turbines gearbox and rotor [J]. International Journal of Electrical Energy, 2014, 2(1):53-56.
- [3] BU F F, HUANG W X, HU Y W, et al. Study and implementation of a control algorithm for wind turbine yaw control system [C]//2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, 2009.
- [4] JEONG M S, KIM S W, LEE I, et al. The impact of yaw error on aeroelastic characteristics of a horizontal axis wind turbine blade[J]. Renewable Energy, 2013, 60:256 – 268.
- [5] DAI L P, ZHOU Q, ZHANG Y W, et al. Analysis of wind turbine blades aeroelastic performance under yaw conditions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 171:273 - 287.
- [6] BOWEN A J,ZAKAY N, IVES R L. The field performance of a remote 10 kW wind turbine [J]. Renewable Energy, 2003,28(1):13-33.
- [7] PEI Y, QIAN Z, JING B, et al. Data-driven method for wind turbine yaw angle sensor zero-point shifting fault detection
   [J]. Energies, 2018, 11(3):553.
- [8] OUYANG T H, KUSIAK A, HE Y S. Predictive model of yaw error in a wind turbine[J]. Energy, 2017, 123:119 – 130.
- [9] 王欣,吴根勇,潘东浩,等. 基于运行数据的风电机组偏 航优化控制方法研究[J].可再生能源,2016,34(3): 413-420.
- [10] 邹强, 刘波峰, 彭镭, 等. 爬山算法在风力发电机组偏航控制系统中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(5):72-76.
- [11] DAI J C, YANG X, HU W, et al. Effect investigation of yaw on wind turbine performance based on SCADA data[J].
   Energy, 2018, 149(4):684 - 696. (下转第9页)





#### 5.5 CH<sub>4</sub> 测量误差对结果的影响

天然气平均分子式  $C_{n1}H_{n2}O_{n3}S_{n4}N_{n5}Ar_{n6}$ 中 $n_1, n_2$ 等系数由  $CH_4$  等烷烃气体的摩尔分数或体积分数确 定。天然气主要成分为  $CH_4, CH_4$  的测量误差对平均 分子式影响最大。假定  $CH_4$  的测量误差为 1.0%, 由 图 3 可知, 排气流量和排气能量的测量误差超过 0.8%。





#### (上接第5页)

- [12]董永军,郭景富,徐明奇,等.中小型独立风电机组电传动 偏航控制与实现[J].太阳能学报,2012,33(6):1030-1036.
- [13]马东.激光雷达测风仪在风电机组偏航误差测试中的 应用研究[J].应用能源技术,2015(11):5-7.
- [14]杨伟新,宋鹏,白恺,等.基于机舱式激光雷达测风仪的 风电机组偏航控制偏差测试方法[J].华北电力技术, 2016(7):59-63.
- [15] 岳红轩,许明,卢晓光.风电机组静态偏航误差的分析

# 6 结论

(1)无论采用碳平衡法还是氧平衡法,均可较 为准确地计算出内燃机排气流量和排气能量。

(2) 排气流量和排气能量计算精度主要取决于 烟气成分、天然气流量和 CH<sub>4</sub> 含量 3 个分量。

(3)在相同的烟气成分测量误差下,采用碳平衡法估算排气流量和排气能量的误差较氧平衡法小。因此在测量过程中应严格按照网格法多点测量,并应尽可能保持内燃机负荷波动稳定,测量管路密封良好,以提高测量精度。

#### 参考文献:

- [1] Gas turbine heat recovery steam generators:Performance test code:ASME PTC4.4—2008[S].
- [2]Performance test code on gas turbines:ASME PTC22—2005
  [S].
- [3] Calculating heat value, compressibility factor, and relative density of gaseous fuels: ASTM D3588-2011[S].
- [4] 往复式内燃机 排放测量 第一部分:气体和颗粒排放物的试验台测量:GB/T 8190.1-2010[S].
- [5]赵永坚,赵杰,常经纬.燃气轮机排气流量测试方法选择
   [J]. 热力发电,2015(9):52-56.
- [6]电站锅炉性能试验规程:GB/T 10184—2015[S].
- [7] 阎维平,董静兰. 增压富氧煤燃烧烟气焓值计算方法的 研究[J]. 华北电力大学学报,2010,37(1):1-4.

(本文责编:刘芳)

#### 作者简介:

童航(1987—),男,浙江衢州人,工程师,工学硕士,从 事燃机、分布式能源性能测试评估研究(E-mail: tonghang1987@163.com)。

与研究[J]. 机械制造,2017,55(2):73 – 76.

[16]张伟, 雷阳, 张中泉. 风电机组偏航校正分析方法研究 [J]. 华电技术, 2017, 39(4): 71-73, 80.

(本文责编:刘芳)

#### 作者简介:

徐金晖(1996—),女,湖北黄冈人,在读硕士研究生,从 事风电机组偏航系统优化控制方面的研究(E-mail: 982591750@qq.com)。