

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 5 月 22 日 (22.05.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/097944 A1

- (51) 国际专利分类号:
F03D 17/00 (2016.01) **F03D 7/04** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2018/116072
- (22) 国际申请日: 2018 年 11 月 18 日 (18.11.2018)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。
- (72) 发明人: 杨秦敏(YANG, Qinmin); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 鲍雨浓(BAO, Yunong); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 陈积明(CHEN, Jiming); 中国浙江省杭州市西湖

区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 孙优贤(SUN, Youxian); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限有限公司(HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO.,LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区玉古路 147 号黄鸿年科技综合大楼 215 室/刘静, Zhejiang 310013 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,

(54) Title: REAL POWER CURVE-BASED METHOD FOR DISCRIMINATING AND COMPENSATING YAW ERROR INHERENT DEVIATION OF WIND TURBINE GENERATOR SET

(54) 发明名称: 一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法

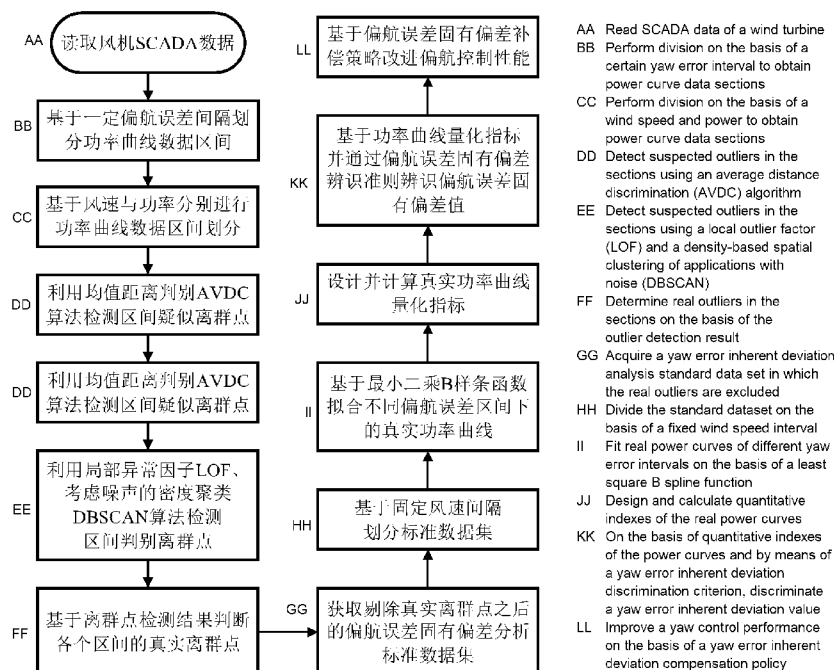


图 1

(57) Abstract: A real power curve-based method for discriminating and compensating a yaw error inherent deviation of a wind turbine generator set. Said method comprises: on the basis of real-time operation data, including wind speed, active power, yaw error, etc., of a supervisory control and data acquisition (SCADA) system of a wind turbine generator set, first performing a certain degree of preprocessing on the data and then dividing power curve data according to a certain yaw error interval; in combination with an outlier

MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

discrimination method, fitting power curves of different yaw error intervals by means of a real power curve fitting process; further performing a quantitative analysis on different power curves and determining, on the basis of a section determination criterion, the section range of an yaw error inherent deviation value; and finally, compensating the discriminated inherent deviation value to a yaw error measurement value. Said method is based on data driving, and has no special requirements on the operation data of the wind turbine generator set, having strong universality and having a strong application value for improving the performance of the wind turbine generator set.

(57) 摘要: 一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法。该方法基于包括风速、有功功率以及偏航误差等在内的风电机组数据采集与监视控制(SCADA)系统实时运行数据, 首先对数据进行一定程度的预处理之后依据一定偏航误差间隔划分功率曲线数据, 并结合离群点判别方法通过真实功率曲线拟合流程分别对不同偏航误差间隔下的功率曲线进行拟合, 进一步将不同功率曲线进行量化分析并基于区间判断准则确定偏航误差固有偏差值的区间范围, 最终将辨识得到的固有偏差值补偿至偏航误差测量值上。该方法基于数据驱动, 对风电机组运行数据无特殊要求, 具有较强的普适性, 对风电机组的性能提升有着很强的应用价值。

一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法

技术领域

本发明涉及一种风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法，特别涉及一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法。

背景技术

在传统化石能源资源匮乏和污染严重的现代社会，风能作为一种无污染、可再生的新能源而广泛为大众所青睐，风电产业也由此成为国内外大力发展的新型可再生能源产业之一。在我国，近十年来有关风电场的建设与相关研究工作无论是从数量上还是质量上来说都有着显著的提升，但在大力发展风力发电行业的同时，也伴随着风电机组自身的不断退化所导致的一系列负面因素。现今风电机组在使用的过程中，由于风速具有间歇性与高度不确定性的特点，对风电机组本身的性能评估造成了较大的影响，而准确对风电机组的性能状况进行评估并积极探究风电机组的性能提升有效手段则是提高风电在新能源发电中竞争力的重中之重。

目前，风力发电系统在应对风向变化时，通过偏航系统进行调整的方式来获得最大的风能捕获效率。如图2所示为风电机组偏航控制策略示意图，其中偏航系统及执行器的具体控制策略是希望保证偏航误差的值尽可能的小，体现到实际中的物理意义即为尽可能控制风电机组的叶片扫掠面正对来流风向，即控制偏航误差 θ 的角度尽可能的接近 0° 。在当今风电行业的相关应用中，风电机组对于偏航误差角度的确定采用直接测量的方式：即在机舱后方安装风向仪并将风向仪零刻线的位置校准至与机舱方向平行；在风电机组的正常运行状况下，传感器将测量得到的风向值反馈给偏航系统，偏航系统基于自身的偏航控制策略，控制机舱向正对来流风方向调整。但风向仪在实际安装与运行维护时主要存在着以下两大问题：

(1) 装机工人往往不会借助测量设备，而是仅凭经验或目测的方式进行风向仪零刻线位置的校准；

(2) 风向仪在实际运行下的反复转动过程中同样可能由于机械原因出现回程误差。这两方面的逐渐积累往往会给偏航误差角度的测量带来较大的误差，从而影响偏航系统的性能。

因此，在基于数据分析的智能辨识与补偿技术在风电机组的性能提升领域的相关研究仍然处于技术空白的背景下，基于控制器改进的研究思路，需要针对风电机组机舱风向仪零位误差的确定这一问题，将偏航误差固有偏差值进行辨识并反馈补偿至偏航系统中，从而达到提升风力发电系统出力性能的目的是十分有意义的。

发明内容

本发明目的在于填补基于数据分析的智能辨识与补偿技术在风电机组的性能提升领域的技术空白，提出一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法。该方法基于数据分析，在考虑功率曲线离群点检测的前提下对风电机组在不同偏航误差区间下的真实功率曲线进行拟合并设计相应的指标进行性能量化，最终结合简单有效的偏航误差固有偏差辨识准则及偏航误差固有偏差补偿策略实现对偏航误差固有偏差的辨识与补偿，对风电机组的发电出力性能提升具有很高的实际应用价值。

本发明的目的通过以下的技术方案实现：一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法，包括以下步骤：

1) 根据待分析风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿需求，读取相应需求周期内总计 N 条待分析风电机组的 SCADA 系统中测量得到的风电机组运行数据信息，该信息包含风速 $\{v_i\}$ 、有功功率 $\{P_i\}$ 以及偏航误差 $\{\theta_i\}$ ，将信息数据集记为风电机组偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ ，其中 $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ；

2) 将步骤 1)中的风电机组偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 以一定的偏航误差间隔划分为 M 个区间，记第 k 个偏航误差划分区间中的数据个数为 N_k 、偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\epsilon_l^k\} = \{(v_l, P_l)\}$ ，其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$ ， $l = 1, 2, 3, \dots, N_k$ ；

3) 基于步骤 2)中 M 个区间的偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_l^k\}$ 分别拟合出 M 条真实功率曲线，记第 k 个偏航误差区间下的真实功率曲线为 $\{PC_k\}$ ，其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$ ；

4) 分别计算步骤 3)中 M 个偏航误差区间下的真实功率曲线 $\{PC_k\}$ 各自的量化性能指标 PI_k ，其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$ ；

5) 通过偏航误差固有偏差辨识准则确定该风电机组的偏航误差固有偏差值 θ_{im} 的辨识结果，并将该偏差值 θ_{im} 直接以增量形式补偿到偏航误差实际测量值 θ 上，得到最终补偿后的偏航误差真实值 θ' ，即 $\theta' = \theta + \theta_{im}$ ；

所述偏航误差固有偏差辨识准则定义如下：将步骤 4)中所有 M 个偏航误差区间下真实功率曲线 $\{PC_k\}$ 的量化性能指标 PI_k 由大到小进行排列，并确定最大量化性能指标 PI_{max} 对应的区间下标 k' ，则偏航误差固有偏差值 θ_{im} 的辨识结果计算公式如下

$$\theta_{im} = \theta_{lb} + \frac{2k' - 1}{2M} (\theta_{ub} - \theta_{lb})$$

其中 θ_{lb} 和 θ_{ub} 分别为待分析偏航误差范围的下界和上界。

作为更进一步描述，所述方法步骤 2)中，偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 区间划分方法步骤如下：

2-a) 绘制偏航误差 $\{\theta_i\}$ 的频率分布直方图, 并基于频率分布直方图的分布情况设定待分析偏航误差范围的下界 θ_{lb} 和上界 θ_{ub} ;

2-b) 设定偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 的区间划分个数 M ;

2-c) 以 $\frac{1}{M}(\theta_{ub} - \theta_{lb})$ 为偏航误差区间划分间隔, 对偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 进行划分, 并仅保留风速和功率信息作为偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_i^k\}$ 。

作为更进一步描述, 所述方法步骤 3) 中, M 个偏航误差区间下风电机组真实功率曲线获取流程如下:

3-a) 设定真实功率曲线获取初始区间 $k = 1$;

3-b) 将第 k 个偏航误差区间下偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_i^k\}$ 中的风速信息和功率信息分别进行最大值-最小值归一化处理, 记归一化偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\mathcal{E}_{norm,l}^k\}$, 其中 $l = 1, 2, 3, \dots, N_k$;

3-c) 分别按照一定的风速间隔(ws)和功率间隔(ap)将步骤 3-b) 中的归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,l}^k\}$ 划分为 M' 个区间, 并分别记第 j 个区间中的数据个数为 $M'_{k,seg,j}$ 、归一化偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$, 其中 $seg = \{ws, ap\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, M'$, $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$;

3-d) 利用均值距离判别(AVDC)离群点检测算法分别对步骤 3-c) 中的 $2M'$ 个区间 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 进行疑似离群点检测, 并分别记第 j 个区间的疑似离群点个数为 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 、归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集为 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$, 其中 $seg = \{ws, ap\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, M'$, $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$;

所述均值距离判别(AVDC)离群点检测算法具体为: 对于数据个数 $M'_{k,seg,j}$ 小于给定最小阈值 $\delta_{M'}$ 的区间, 认为该区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ 为 $\emptyset$; 否则对于第 j 个风速区间或第 j 个功率区间, 首先计算区间内归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中各风速-功率数据点 $(v_{norm,n}^{k,seg,j}, p_{norm,n}^{k,seg,j})$ 的判别距离 $dist_{norm,n}^{k,seg,j}$, 进一步设定疑似离群点的占比 $\eta_{k,seg,j}^{AVDC}$ 并确定第 j 个区间中疑似离群点个数 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$, 通过由大到小对判别距离 $dist_{norm,n}^{k,seg,j}$ 进行排序的方式确定前 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 个数据构成第 j 个区间的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$;

所述判别距离 $dist_{norm,n}^{k,seg,j}$ 的计算方式具体如下:

$$dist_{norm,n}^{k,seg,j} = \begin{cases} |p_{norm,n}^{k,seg,j} - \overline{p_{norm,n}^{k,seg,j}}|, & seg = ws \\ |v_{norm,n}^{k,seg,j} - \overline{v_{norm,n}^{k,seg,j}}|, & seg = ap \end{cases}$$

其中 $\overline{P_{norm}^{k,seg,j}}$, $\overline{v_{norm}^{k,seg,j}}$ 分别为归一化偏航误差固有偏差分析数据集第 j 个风速区间内的功率平均值和第 j 个功率区间内的风速平均值, 其中 $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$;

3-e) 分别利用局部异常因子(LOF)以及考虑噪声的基于密度的聚类(DBSCAN)这两种离群点检测算法对步骤 3-c)中的 $2M'$ 个区间 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 进行判别离群点检测, 并分别记第 j 个区间的判别离群点个数为 $m_{method}^{k,seg,j}$ 、归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的判别离群点集为 $\{Outlier_{jud,method}^{k,seg,j}\}$, 其中 $seg = \{ws, ap\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, M'$, $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$, $method = \{LOF, DBSCAN\}$;

3-f) 基于真实离群点判别准则, 从步骤 3-d)的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ 和步骤 3-e)的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的判别离群点集 $\{Outlier_{jud,method}^{k,seg,j}\}$ 中获取真实离群点集 $\{Outlier_{true}^{k,seg,j}\}$, 其中 $seg = \{ws, ap\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, M'$, $method = \{LOF, DBSCAN\}$;

所述真实离群点判别准则定义为: 对于第 j 个区间的偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中的任一数据点 Q , 若其属于疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$, 并且属于 LOF 判别离群点集 $\{Outlier_{jud,LOF}^{k,seg,j}\}$ 或 DBSCAN 判别离群点集 $\{Outlier_{jud,DBSCAN}^{k,seg,j}\}$ 之一, 则点 Q 为第 j 个区间的真实离群点;

3-g) 基于步骤 3-f)中得到的各风速区间真实离群点集 $\{Outlier_{true}^{k,ws,j}\}$ 以及各功率区间真实离群点集 $\{Outlier_{true}^{k,ap,j}\}$, 利用最终离群点判断准则获得偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 的最终离群点判别结果集 $\{Outlier_k\}$ 并加以剔除, 记剔除离群点后的偏航误差固有偏差分析标准数据集为 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$;

所述最终离群点判断准则定义为: 对于偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 中的任一数据点 Q' , 若其在归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中对应的数据点 Q 是某风速区间或某功率区间的真实离群点, 则点 Q' 为偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 的最终离群点。

3-h) 确定步骤 3-g)中获取到的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$ 中的风速对应的最大值 v_{max} , 并以固定风速间隔 Δv 为风速区间划分间隔, 将第 k 个偏航误差区间下偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$ 进一步基于风速信息进行划分, 则第 q 个风速区间下的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{w\mathcal{S}_{q,m}^k\}$ 定义为

$$\{w\mathcal{S}_{q,m}^k\} = \{(v_m, P_m) \in \{y\mathcal{E}_{std,l}^k\} | (q-1)\Delta v \leq v_m < q\Delta v\}$$

$$q = 1, 2, 3, \dots, M_k \quad m = 1, 2, 3, \dots, M_{k,q}$$

其中 $M_{k,q}$ 为第 q 个风速区间下的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{w\mathcal{S}_{q,m}^k\}$ 中的数据个数; M_k

为第 k 个偏航误差区间下偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{y_{std,l}^k\}$ 的风速区间划分个数, 计算公式如下

$$M_k = \begin{cases} \left\lceil \frac{v_{max}}{\Delta v} \right\rceil, & \frac{v_{max}}{\Delta v} \notin \mathbb{Z} \\ \frac{v_{max}}{\Delta v}, & \frac{v_{max}}{\Delta v} \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 函数为向上取整函数;

3-i) 计算每个风速区间下的偏航误差固有偏差分析数据集 $\{ws_{q,m}^k\}$ 中的平均风速 $\overline{v_q^k}$ 以及平均功率 $\overline{P_q^k}$, 并将所有平均风速和平均功率分别进行最大值-最小值归一化处理, 得到归一化后的平均风速 $v_{norm}^{k,q}$ 和平均功率 $P_{norm}^{k,q}$;

3-j) 基于平均风速 $\overline{v_q^k}$ 以及平均功率 $\overline{P_q^k}$ 确定每个风速区间下的功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^q$, 方式如下: 若第 j 个风速区间下的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{ws_{q,m}^k\}$ 中的数据个数 $M_{k,q} = 0$, 则认为无功率曲线拟合中心点; 反之则认为功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^q = (\overline{v_q^k}, \overline{P_q^k})$;

3-k) 补充定义中心点 $\mathbf{C}_k^0 = (0,0)$, 并记第 k 个偏航误差区间下的功率曲线拟合中心点个数 M'_k , 计算每个功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^r$ 对应的参数值 $\bar{t}_k^r$, 公式为

$$\bar{t}_k^r = \begin{cases} 0, & r = 0 \\ \bar{t}_k^{r-1} + \frac{d_k^r}{d_k}, & r = 1, 2, \dots, M'_k \end{cases}$$

其中 d_k^r 为两个相邻的功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^r$ 与 $\mathbf{C}_k^{r-1}$ 对应坐标归一化后的弦长, 即

$$d_k^r = \sqrt{(v_{norm}^{k,r} - v_{norm}^{k,r-1})^2 + (P_{norm}^{k,r} - P_{norm}^{k,r-1})^2}$$

d_k 为所有功率曲线拟合中心点对应坐标归一化后的总弦长, 即 $d_k = \sum_{r=1}^{M'_k} d_k^r$;

3-l) 采用最小二乘 B 样条拟合算法对第 k 个偏航误差区间下的功率曲线进行拟合, 其拟合函数 $\mathbf{B}_k(t)$ 定义如下:

$$\mathbf{B}_k(t) = \sum_{r=0}^{M'_k} N_{r,p}(t) \mathbf{b}_k^r \quad (t_k^{p-1} \leq t \leq t_k^{M'_k+1})$$

其中 $N_{r,p}(t)$ 为阶数为 p 的第 r 段 B 样条拟合函数的标准函数, t 为最小二乘 B 样条拟合函数的自变量, $\mathbf{b}_k^r$ 为该最小二乘 B 样条拟合函数的第 r 个控制点; t_k^s 为分段节点, $s = 0, 1, 2, \dots, p-1, p, p+1, \dots, M'_k-1, M'_k, M'_k+1, \dots, M'_k+p$, 其计算公式如下:

$$t_k^s = \begin{cases} 0 & s = 0, 1, 2, \dots, p-1 \\ \frac{1}{p-1} \sum_{r=i-p+1}^{i-1} \bar{t}_k^r & s = p, p+1, \dots, M'_k-1, M'_k \\ 1 & s = M'_k+1, \dots, M'_k+p \end{cases}$$

3-m) 基于如下最小二乘优化函数确定 B 样条拟合函数 $\mathbf{B}_k(t)$ 中的所有控制点 $\{\mathbf{b}_k^r\}$:

$$\min_{b_k^0, b_k^1, b_k^2, \dots, b_k^{M'_k}} \sum_{r=0}^{M'_k} |B_k(\bar{t}_k^r) - C_k^r|$$

3-n) 将求解得到的最小二乘 B 样条拟合函数 $B_k(t)$ 转换为自变量为风速 v 的多项式形式, 作为第 k 个偏航误差区间下的真实功率曲线结果 $\{PC_k\}$;

3-o) 设置待分析区间 $k = k + 1$, 并重复进行步骤 3-b) 至步骤 4-n), 直到 $j > M$ 为止。

作为更进一步描述, 所述方法步骤 3-c) 中, 归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,l}^k\}$ 的划分方法具体如下:

3-c-a) 确定归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,l}^k\}$ 的区间划分个数 M' ;

3-c-b) 以 $\frac{1}{M'}$ 为划分间隔, 将数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,l}^k\}$ 分别按照风速和功率进行均匀划分, 得到各风速区间和各功率区间下的归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,ws,j}\}$ 和 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,ap,j}\}$ 。

作为更进一步描述, 所述方法步骤 3-d) 中, 利用均值距离判别(AVDC)离群点检测算法进行 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中各区间内疑似离群点检测, 算法详细流程如下:

3-d-a) 设定初始离群点检测区间 $j = 1$;

3-d-b) 若第 j 个区间对应归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中的数据个数 $M'_{k,seg,j}$ 小于给定最小阈值 $\delta_{M'}$, 则认为第 j 个区间的疑似离群点个数 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 为 0、归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ 为 $\emptyset$, 并跳至步骤 3-d-g) 继续执行; 反之则继续执行步骤 3-d-c);

3-d-c) 设定疑似离群点在第 j 个区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中的占比 $\eta_{k,seg,j}^{AVDC}$, 并计算第 j 个区间中疑似离群点个数 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$, 计算公式定义为

$$m_{AVDC}^{k,seg,j} = \lceil M'_{k,seg,j} \times \eta_{k,seg,j}^{AVDC} \rceil$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 函数为向上取整函数;

3-d-d) 计算第 j 个风速区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,ws,j}\}$ 中各数据点 $(v_{norm,n}^{k,ws,j}, P_{norm,n}^{k,ws,j})$ 的风速判别距离 $dist_{norm,n}^{k,ws,j}$, 计算公式如下

$$dist_{norm,n}^{k,ws,j} = \left| P_{norm,n}^{k,ws,j} - \overline{P_{norm,n}^{k,ws,j}} \right| \quad n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,ws,j}$$

其中 $\overline{P_{norm,n}^{k,ws,j}}$ 为第 j 个风速区间内归一化偏航误差固有偏差分析数据集的功率平均值;

3-d-e) 计算第 j 个功率区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,ap,j}\}$ 中各数据点 $(v_{norm,n}^{k,ap,j}, P_{norm,n}^{k,ap,j})$ 的风速判别距离 $dist_{norm,n}^{k,ap,j}$, 计算公式如下

$$dist_{norm,n}^{k,ap,j} = \left| v_{norm,n}^{k,ap,j} - \overline{v_{norm,n}^{k,ap,j}} \right| \quad n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,ap,j}$$

其中 $\overline{v_{norm,n}^{k,ap,j}}$ 为第 j 个功率区间内归一化偏航误差固有偏差分析数据集的风速平均值;

3-d-f) 将第 j 个区间的判别距离数据集 $\{dist_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 分别由大到小进行排序,并分别选取排序后的判别距离数据集中的前 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 个数据,构成第 j 个区间的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$,其中 $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,ap,j}$;

3-d-g) 设置检测区间 $j = j + 1$,并重复进行步骤 3-d-b)至步骤 3-d-f),直到 $j > M'$ 为止。

作为更进一步描述,所述方法步骤 4)中,量化性能指标 PI_k 的定义如下:

$$PI_k = \frac{0.5N_h(P_j^{k,mid} + P_{j-1}^{k,mid}) \sum_{j=1}^{M_k} [F(v_{j,cor}^{k,mid}) - F(v_{j-1,cor}^{k,mid})]}{CAP}$$

其中 N_h 为 1 年时间转化为小时的数值; CAP 为待分析风电机组的额定功率; $v_{j,cor}^{k,mid}$ 为第 k 个偏航误差区间下、第 j 个风速区间中的风速中值,即 $v_{j,cor}^{k,mid} = 0.5(2j - 1)\Delta v$,且 $v_{0,cor}^{k,mid} = 0$; $P_j^{k,mid}$ 为第 k 个偏航误差区间的真实功率曲线 $\{PC_k\}$ 上 $v_{j,cor}^{k,mid}$ 对应的功率值,且 $P_0^{k,mid} = 0$; $F(\cdot)$ 函数为 Rayleigh 分布的累计概率分布函数,具体公式如下

$$F(v) = 1 - e^{-(\pi v^2)/(4v_{ave}^2)}$$

其中 v_{ave} 为待分析风电机组的年平均风速。

与现有技术相比,本发明具有以下创新优势及显著效果:

1) 针对现有风电机组功率曲线离群点检测及判别算法中未考虑不同工况给判别流程带来的影响这一问题,通过风速及功率区间划分的方式来约束运行工况的方式来进行分段研究,保证功率曲线数据在风电机组运行工况方面一定程度的统一;同时结合多种离群点检测算法的优势,突破单一离群点检测算法的应用限制,使风电机组功率曲线拟合结果更真实、准确;

2) 创新性地提出一种基于功率曲线分析的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法,填补基于数据分析的智能辨识与补偿技术在风电机组的性能提升领域的技术空白。

3) 设计了包括风电机组真实功率曲线拟合、功率曲线性能量化指标构建、偏航误差固有偏差辨识以及偏航误差固有偏差补偿策略制定等步骤在内的风电机组性能提升流程,具有较强的实用性、可靠性与扩展性。

附图说明

图1是本发明基于功率曲线分析的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法流程图;

图2是本发明应用领域内风电机组偏航误差固有偏差等角度相关关系示意图;

图3是本发明实施例中步骤1)中风电机组功率曲线原始数据散点图;

图4是本发明实施例中步骤2-a)中补偿前的偏航误差频率分布直方图;

图5是本发明实施例中步骤2-c)至步骤3-c)中偏航误差区间为 $[-1^\circ, 0^\circ]$ 的归一化功率曲线原始散点以及风速&功率划分相关结果图;

图6是实施例中偏航误差区间为 $[-1^\circ, 0^\circ]$ 、风速划分数据下的AVDC疑似离群点检测结果图;

图7是实施例中偏航误差区间为 $[-1^{\circ}, 0^{\circ}]$ 、功率划分数据下的AVDC疑似离群点检测结果图；

图8、图9分别是实施例中偏航误差区间为 $[-1^{\circ}, 0^{\circ}]$ 、风速划分数据下的LOF判别离群点检测结果图和DBSCAN判别离群点检测结果图；

图10、图11分别是实施例中偏航误差区间为 $[-1^{\circ}, 0^{\circ}]$ 、功率划分数据下的LOF判别离群点检测结果图和DBSCAN判别离群点检测结果图；

图12是实施例中偏航误差区间为 $[-1^{\circ}, 0^{\circ}]$ 、风速划分数据下的真实离群点检测结果图；

图13是实施例中偏航误差区间为 $[-1^{\circ}, 0^{\circ}]$ 、功率划分数据下的真实离群点检测结果图；

图14是实施例中偏航误差区间为 $[-1^{\circ}, 0^{\circ}]$ 下偏航误差固有偏差分析数据集的最终离群点检测结果图；

图15是实施例中偏航误差区间为 $[-1^{\circ}, 0^{\circ}]$ 下偏航误差固有偏差分析标准数据集的真实功率曲线相关结果图；

图16、图17分别是实施例中偏航误差固有偏差补偿前、后各偏航误差区间下功率曲线量化性能指标结果图。

具体实施方式

以下结合附图对本发明的具体实施方法与工作原理作如下详述：

实施例

由于风电场中的风电机组在不同时段内运行时的风况很难完全一致，出于对本发明专利方法有效性的验证，本实施例中采用的数据为GH Bladed 3.82在同一型号风电机组、同一风文件下的仿真数据来对风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法进行分析研究。数据采样间隔为10min，数据信息为期5年，总计284405条。数据集包括的相关信息如表1、表2所示：

表1 GH Bladed 3.82下对某型号风电机组在某风文件下的部分仿真数据

数据序号	风速	有功功率	环境温度	环境气压	偏航误差
...	...	...	...	...	...
105679	4.2992	81.0290	25.0000	100463.2887	5.7852
105680	4.5417	81.8810	25.0000	100463.2887	15.2980
105681	4.9667	82.8700	25.0000	100463.2887	1.6641
...	...	...	...	...	...
235640	11.6990	1504.7000	25.0000	100463.2887	6.0619
235641	11.5200	1549.5000	25.0000	100463.2887	9.1317
235642	11.1470	1550.0000	25.0000	100463.2887	-0.0520
...	...	...	...	...	...

表2 GH Bladed 3.82下对某型号风电机组的仿真数据集变量信息

变量名称	变量含义	变量单位
风速 v	当前风电机组机舱风速	m/s
有功功率 P	当前风电机组有功功率	kW
环境温度 T	风电机组运行环境温度	$^{\circ}C$
环境气压 B	风电机组运行环境气压	Pa
偏航误差 θ	当前风电机组偏航误差	$^{\circ}$

值得一提的是, GH Bladed中测量得到的偏航误差并没有实际应用过程中风向仪在测量过程中测量过程中存在的偏航误差固有偏差, 因此在仿真过程中采用将测量值人为 $+5^{\circ}$ 的方式来模拟实际过程中存在 -5° 偏航误差固有偏差的现象。本实施例中默认利用上述全部仿真数据来进行偏航误差固有偏差辨识与补偿方法的实施, 方法结果为得到的风电机组片偏航误差固有偏差的辨识结果并通过补偿手段进行方法有效性的验证, 其详细实施步骤具体如下:

1) 根据待分析风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿需求, 读取相应需求周期内总计 N 条待分析风电机组的 SCADA 系统中测量得到的风电机组运行数据信息, 该信息包含风速 $\{v_i\}$ 、有功功率 $\{P_i\}$ 以及偏航误差 $\{\theta_i\}$, 将信息数据集记为风电机组偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, N$; 根据表 1 以及表 2 所列出的数据集变量信息描述, 本实施例中的数据集包括了本步骤中的所有必要信息, 图 3 所示的结果为本步骤中风电机组功率曲线原始数据散点图;

2) 将步骤 1)中的风电机组偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 以一定的偏航误差间隔划分为 M 个区间, 记第 k 个偏航误差划分区间中的数据个数为 N_k 、偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\mathcal{E}_l^k\} = \{(v_l, P_l)\}$, 其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$, $l = 1, 2, 3, \dots, N_k$; 偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 区间划分的一种优选方法步骤如下, 但不限于此:

2-a) 绘制偏航误差 $\{\theta_i\}$ 的频率分布直方图, 并基于频率分布直方图的分布情况设定待分析偏航误差范围的下界 θ_{lb} 和上界 θ_{ub} ; 本实施例中的偏航误差频率分布直方图如图 4 所示, 从图中选取 10%分位数与 90%分位数就近取整值作为待分析偏航误差的下界 θ_{lb} 和上界 θ_{ub} , 10%和 90%分位数值为 -13.984° 和 5.273° , 进一步通过就近取整方式后确定 θ_{lb} 为 -14° , θ_{ub} 为 5° ;

2-b) 设定偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 的区间划分个数 M ; 在本实施例中, M 取 20;

2-c) 以 $\frac{1}{M}(\theta_{ub} - \theta_{lb})$ 为偏航误差区间划分间隔, 对偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 进行划分, 并仅保留风速和功率信息作为偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 。在本实施例中, 由

于篇幅限制原因, 仅给出对应偏航误差区间为 $[-1^\circ, 0^\circ]$ 的功率曲线散点数据图, 如图 5 所示。

3) 基于步骤 2) 中 M 个区间的偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_l^k\}$ 分别拟合出 M 条真实功率曲线, 记第 k 个偏航误差区间下的真实功率曲线为 $\{PC_k\}$, 其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$; 风电机组真实功率曲线获取的一种优选算法流程如下:

3-a) 设定真实功率曲线获取初始区间 $k = 1$;

3-b) 将第 k 个偏航误差区间下偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_l^k\}$ 中的风速信息和功率信息分别进行最大值-最小值归一化处理, 记归一化偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\epsilon_{norm,l}^k\}$, 其中 $l = 1, 2, 3, \dots, N_k$; 在本实施例中, 归一化后的偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\epsilon_{norm,l}^k\}$ 散点图如图 5 中黑色数据点所示;

3-c) 分别按照一定的风速间隔(ws)和功率间隔(ap)将步骤 3-b) 中的归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_{norm,l}^k\}$ 划分为 M' 个区间, 并分别记第 j 个区间中的数据个数为 $M'_{k,seg,j}$ 、归一化偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,seg,j}\}$, 其中 $seg = \{ws, ap\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, M'$, $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$; 归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_{norm,l}^k\}$ 的一种优选划分方法具体如下, 但不限于此:

3-c-a) 确定归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_{norm,l}^k\}$ 的区间划分个数 M' ; 在本实施例中, M' 取 20;

3-c-b) 以 $\frac{1}{M'}$ 为划分间隔, 将数据集 $\{y\epsilon_{norm,l}^k\}$ 分别按照风速和功率进行均匀划分, 得到各风速区间和各功率区间下的归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,ws,j}\}$ 和 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,ap,j}\}$ 。在本实施例中, 风速&功率划分相关结果如图 5 中虚线及点虚线所示。

3-d) 利用均值距离判别(AVDC)离群点检测算法分别对步骤 3-c) 中的 $2M'$ 个区间 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 进行疑似离群点检测, 并分别记第 j 个区间的疑似离群点个数为 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 、归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集为 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$, 其中 $seg = \{ws, ap\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, M'$, $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$; 利用均值距离判别(AVDC)离群点检测算法进行 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中各区间内疑似离群点检测, 算法详细流程如下:

3-d-a) 设定初始离群点检测区间 $j = 1$;

3-d-b) 若第 j 个区间对应归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中的数据个数 $M'_{k,seg,j}$ 小于给定最小阈值 $\delta_{M'}$, 则认为第 j 个区间的疑似离群点个数 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 为 0、归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ 为 $\emptyset$, 并跳至步骤 3-d-g) 继续执行; 反之则继续执行步骤 3-d-c);

3-d-c) 设定疑似离群点在第 j 个区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中的

占比 $\eta_{k,seg,j}^{AVDC}$ ，并计算第 j 个区间中疑似离群点个数 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ ，计算公式定义为

$$m_{AVDC}^{k,seg,j} = \lceil M'_{k,seg,j} \times \eta_{k,seg,j}^{AVDC} \rceil$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 函数为向上取整函数；

3-d-d) 计算第 j 个风速区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,ws,j}\}$ 中各数据点 $(v_{norm,n}^{k,ws,j}, p_{norm,n}^{k,ws,j})$ 的风速判别距离 $dist_{norm,n}^{k,ws,j}$ ，计算公式如下

$$dist_{norm,n}^{k,ws,j} = \left| p_{norm,n}^{k,ws,j} - \overline{p_{norm}^{k,ws,j}} \right| \quad n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,ws,j}$$

其中 $\overline{p_{norm}^{k,ws,j}}$ 为第 j 个风速区间内归一化偏航误差固有偏差分析数据集的功率平均值；

3-d-e) 计算第 j 个功率区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,ap,j}\}$ 中各数据点 $(v_{norm,n}^{k,ap,j}, p_{norm,n}^{k,ap,j})$ 的风速判别距离 $dist_{norm,n}^{k,ap,j}$ ，计算公式如下

$$dist_{norm,n}^{k,ap,j} = \left| v_{norm,n}^{k,ap,j} - \overline{v_{norm}^{k,ap,j}} \right| \quad n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,ap,j}$$

其中 $\overline{v_{norm}^{k,ap,j}}$ 为第 j 个功率区间内归一化偏航误差固有偏差分析数据集的风速平均值；

3-d-f) 将第 j 个区间的判别距离数据集 $\{dist_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 分别由大到小进行排序，并分别选取排序后的判别距离数据集中的前 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 个数据，构成第 j 个区间的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ ，其中 $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,ap,j}$ ；

3-d-g) 设置检测区间 $j = j + 1$ ，并重复进行步骤 3-d-b)至步骤 3-d-f)，直到 $j > M'$ 为止。由于篇幅限制，本实施例中有离群点的相关分析均略去各过程参数的计算过程及结果，相关重要参数取值如下：给定最小阈值 δ_M ，取 10，疑似离群点占比 $\eta_{k,seg,j}^{AVDC}$ 均取 0.02。最终基于风速间隔(ws)和功率间隔(ap)的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点检测结果分别如图 6、图 7 中的“×”符号所示，其余正常数据点以“•”符号表示。

3-e) 分别利用局部异常因子(LOF)以及考虑噪声的基于密度的聚类(DBSCAN)这两种离群点检测算法对步骤 3-c)中的 $2M'$ 个区间 $\{y\epsilon_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 进行判别离群点检测，并分别记第 j 个区间的判别离群点个数为 $m_{method}^{k,seg,j}$ 、归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的判别离群点集为 $\{Outlier_{jud,method}^{k,seg,j}\}$ ，其中 $seg = \{ws, ap\}$ ， $j = 1, 2, 3, \dots, M'$ ， $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$ ， $method = \{LOF, DBSCAN\}$ ；本实施例中，有关 LOF 判别离群点检测的相关重要参数取值如下：给定最小阈值 δ_M ，取 10，LOF 判别离群点占比 $\eta_{k,seg,j}^{LOF}$ 均取 0.02， k 距离计算中的邻域参数 k 取 10；有关 DBSCAN 判别离群点检测的相关重要参数取值如下：给定最小阈值 δ_M ，取 10， ϵ 邻域判别半径 eps 取 0.02，核心点判别参数 $MinPts$ 取 10。最终基于风速间隔(ws)和功率间隔(ap)的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的 LOF 及 DBSCAN 判别离群点检测结果分别如图 8、图 9、图 10 和图 11 中的“×”符号所示，其余正常数据点均以“•”符号表示。

3-f) 基于真实离群点判别准则, 从步骤 3-d)的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ 和步骤 3-e)的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的判别离群点集 $\{Outlier_{jud,method}^{k,seg,j}\}$ 中获取真实离群点集 $\{Outlier_{true}^{k,seg,j}\}$, 其中 $seg = \{ws, ap\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, M'$, $method = \{LOF, DBSCAN\}$;

所述真实离群点判别准则定义为: 对于第 j 个区间的偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中的任一数据点 Q , 若其属于疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$, 并且属于 LOF 判别离群点集 $\{Outlier_{jud,LOF}^{k,seg,j}\}$ 或 DBSCAN 判别离群点集 $\{Outlier_{jud,DBSCAN}^{k,seg,j}\}$ 之一, 则点 Q 为第 j 个区间的真实离群点; 针对本实施例, 基于真实离群点判断准则判断出的风速间隔(ws)和功率间隔(ap)下归一化偏航误差固有偏差分析数据集真实离群点检测结果分别如图 12 和图 13 中的“×”符号所示, 其余正常数据点均以“·”符号表示。

3-g) 基于步骤 3-f)中得到的各风速区间真实离群点集 $\{Outlier_{true}^{k,ws,j}\}$ 以及各功率区间真实离群点集 $\{Outlier_{true}^{k,ap,j}\}$, 利用最终离群点判断准则获得偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 的最终离群点判别结果集 $\{Outlier_k\}$ 并加以剔除, 记剔除离群点后的偏航误差固有偏差分析标准数据集为 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$;

所述最终离群点判断准则定义为: 对于偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 中的任一数据点 Q' , 若其在归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中对应的数据点 Q 是某风速区间的真实离群点或某功率区间的真实离群点, 则点 Q' 为偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 的最终离群点。针对本实施例, 基于最终离群点判断准则判断出归一化偏航误差固有偏差分析数据集真实离群点检测结果, 即 $\{Outlier_k\}$ 数据集结果如图 14 中的“×”符号所示, 最终的正常数据点均以“·”符号表示。

3-h) 确定步骤 3-g)中获取到的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$ 中的风速对应的最大值 v_{max} , 并以固定风速间隔 Δv 为风速区间划分间隔, 将第 k 个偏航误差区间下偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$ 进一步基于风速信息进行划分, 则第 q 个风速区间下的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{ws_{q,m}^k\}$ 定义为

$$\{ws_{q,m}^k\} = \{(v_m, P_m) \in \{y\mathcal{E}_{std,l}^k\} | (q-1)\Delta v \leq v_m < q\Delta v\}$$

$$q = 1, 2, 3, \dots, M_k \quad m = 1, 2, 3, \dots, M_{k,q}$$

其中 $M_{k,q}$ 为第 q 个风速区间下的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{ws_{q,m}^k\}$ 中的数据个数; M_k 为第 k 个偏航误差区间下偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$ 的风速区间划分个数, 计算公式如下

$$M_k = \begin{cases} \left\lceil \frac{v_{max}}{\Delta v} \right\rceil, & \frac{v_{max}}{\Delta v} \notin \mathbb{Z} \\ \frac{v_{max}}{\Delta v}, & \frac{v_{max}}{\Delta v} \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 函数为向上取整函数;

3-i) 计算每个风速区间下的偏航误差固有偏差分析数据集 $\{\mathcal{WS}_{q,m}^k\}$ 中的平均风速 $\overline{v}_q^k$ 以及平均功率 $\overline{P}_q^k$, 并将所有平均风速和平均功率分别进行最大值-最小值归一化处理, 得到归一化后的平均风速 $v_{norm}^{k,q}$ 和平均功率 $P_{norm}^{k,q}$;

3-j) 基于平均风速 $\overline{v}_q^k$ 以及平均功率 $\overline{P}_q^k$ 确定每个风速区间下的功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^q$, 确定方式如下: 若第 j 个风速区间下的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{\mathcal{WS}_{q,m}^k\}$ 中的数据个数 $M_{k,q} = 0$, 则认为该区间内无功率曲线拟合中心点; 反之则认为该区间内的功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^q = (\overline{v}_q^k, \overline{P}_q^k)$;

3-k) 补充定义中心点 $\mathbf{C}_k^0 = (0,0)$, 并记第 k 个偏航误差区间下的功率曲线拟合中心点个数 M'_k , 计算每个功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^r$ 对应的参数值 $\bar{t}_k^r$, 公式为

$$\bar{t}_k^r = \begin{cases} 0, & r = 0 \\ \bar{t}_k^{r-1} + \frac{d_k^r}{d_k}, & r = 1, 2, \dots, M'_k \end{cases}$$

其中 d_k^r 为两个相邻的功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^r$ 与 $\mathbf{C}_k^{r-1}$ 对应坐标归一化后的弦长, 即

$$d_k^r = \sqrt{(v_{norm}^{k,r} - v_{norm}^{k,r-1})^2 + (P_{norm}^{k,r} - P_{norm}^{k,r-1})^2}$$

d_k 为所有功率曲线拟合中心点对应坐标归一化后的总弦长, 即 $d_k = \sum_{r=1}^{M'_k} d_k^r$;

3-l) 采用最小二乘 B 样条拟合算法对第 k 个偏航误差区间下的功率曲线进行拟合, 其拟合函数 $\mathbf{B}_k(t)$ 定义如下:

$$\mathbf{B}_k(t) = \sum_{r=0}^{M'_k} N_{r,p}(t) \mathbf{b}_k^r \quad (t_k^{p-1} \leq t \leq t_k^{M'_k+1})$$

其中 $N_{r,p}(t)$ 为阶数为 p 的第 r 段 B 样条拟合函数的标准函数, t 为最小二乘 B 样条拟合函数的自变量, $\mathbf{b}_k^r$ 为该最小二乘 B 样条拟合函数的第 r 个控制点; t_k^s 为分段节点, $s = 0, 1, 2, \dots, p-1, p, p+1, \dots, M'_k-1, M'_k, M'_k+1, \dots, M'_k+p$, 其计算公式如下:

$$t_k^s = \begin{cases} 0 & s = 0, 1, 2, \dots, p-1 \\ \frac{1}{p-1} \sum_{r=i-p+1}^{i-1} \bar{t}_k^r & s = p, p+1, \dots, M'_k-1, M'_k \\ 1 & s = M'_k+1, \dots, M'_k+p \end{cases}$$

3-m) 基于如下最小二乘优化函数确定 B 样条拟合函数 $\mathbf{B}_k(t)$ 中的所有控制点 $\{\mathbf{b}_k^r\}$:

$$\min_{b_k^0, b_k^1, b_k^2, \dots, b_k^{M'_k}} \sum_{r=0}^{M'_k} |B_k(\bar{t}_k^r) - C_k^r|$$

3-n) 将求解得到的最小二乘 B 样条拟合函数 $B_k(t)$ 转换为自变量为风速 v 的多项式形式, 作为第 k 个偏航误差区间下的真实功率曲线结果 $\{PC_k\}$;

3-o) 设置待分析区间 $k = k + 1$, 并重复进行步骤 3-b) 至步骤 4-n), 直到 $j > M$ 为止。由于篇幅限制, 本实施例中有功率曲线的拟合均略去各过程参数的计算过程及次要结果, 相关重要参数取值如下: 风速对应最大值为 $v_{max} = 28.9760 \text{ m/s}$, 固定风速间隔 $\Delta v = 2 \text{ m/s}$, 第 14 个偏航误差区间为 $[-1^\circ, 0^\circ]$ 的功率曲线相关数据中风速区间划分个数为 15, 对应真实功率曲线拟合中心点及拟合结果如图 15 中 “■” 符号及曲线所示。

4) 分别计算步骤 3) 中 M 个偏航误差区间下的真实功率曲线 $\{PC_k\}$ 各自的量化性能指标 PI_k , 其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$; 量化性能指标 PI_k 的一种优选定义如下, 但不限于此:

$$PI_k = \frac{0.5N_h(P_j^{k,mid} + P_{j-1}^{k,mid}) \sum_{j=1}^{M_k} [F(v_{j,cor}^{k,mid}) - F(v_{j-1,cor}^{k,mid})]}{CAP}$$

其中 N_h 为 1 年时间转化为小时的数值; CAP 为待分析风电机组的额定功率; $v_{j,cor}^{k,mid}$ 为第 k 个偏航误差区间下、第 j 个风速区间中的风速中值, 即 $v_{j,cor}^{k,mid} = 0.5(2j - 1)\Delta v$, 且 $v_{0,cor}^{k,mid} = 0$; $P_j^{k,mid}$ 为第 k 个偏航误差区间的真实功率曲线 $\{PC_k\}$ 上 $v_{j,cor}^{k,mid}$ 对应的功率值, 且 $P_0^{k,mid} = 0$; $F(\cdot)$ 函数为 Rayleigh 分布的累计概率分布函数, 具体公式如下

$$F(v) = 1 - e^{-(\pi v^2)/(4v_{ave}^2)}$$

其中 v_{ave} 为待分析风电机组的年平均风速。在本实施例中, 相关重要参数取值如下: N_h 按照 1 年 365 天计算取 8760; CAP 为该型号风电机组的额定功率值, 取 1550kW; v_{ave} 取仿真风文件的平均风速 7 m/s , 对应 20 个偏航误差区间下的真实功率曲线各自量化性能指标 PI_k 计算结果如图 16 所示。

5) 通过偏航误差固有偏差辨识准则确定该风电机组的偏航误差固有偏差值 θ_{im} 的辨识结果, 并将该偏差值 θ_{im} 直接以增量形式补偿到偏航误差实际测量值 θ 上, 得到最终补偿后的偏航误差真实值 θ' , 即 $\theta' = \theta + \theta_{im}$;

所述偏航误差固有偏差辨识准则定义如下: 将步骤 4) 中所有 M 个偏航误差区间下真实功率曲线 $\{PC_k\}$ 的量化性能指标 PI_k 由大到小进行排列, 并确定最大量化性能指标 PI_{max} 对应的区间下标 k' , 则偏航误差固有偏差值 θ_{im} 的辨识结果计算公式如下

$$\theta_{im} = \theta_{lb} + \frac{2k' - 1}{2M} (\theta_{ub} - \theta_{lb})$$

其中 θ_{lb} 和 θ_{ub} 分别为待分析偏航误差范围的下界和上界。在本实施例中, 图 16 中真实功率曲线的量化性能指标 PI_k 的最大值 PI_{max} 使用 “★” 符号标注出, 可以看出最大值对应的区间序

号为 9 号, 即偏航误差区间为 $[-6^{\circ}, -5^{\circ}]$, 则可以根据偏航误差固有偏差值 θ_{im} 的辨识结果计算公式计算出偏航误差固有偏差值的辨识结果为 -5.5° ; 进一步基于偏航误差固有偏差补偿策略, 通过将偏航误差测量值 θ 人为加 5.5° 变为修正后的 θ' , 即 $\theta' = \theta + 5.5^{\circ}$; 将修正后的结果作为偏航控制输入重新对该风电机组在同一风文件下进行补偿后的数据仿真, 经过同样的分析流程可以得到如图 17 所示的真实功率曲线各自量化性能指标 PI_k 计算结果, 相关重要参数如下: 偏航误差的频率分布直方图的 10%和 90%分位数分别为 -9.681° 和 10.498° , 即偏航误差下界 θ_{lb} 和上界 θ_{ub} 分别为 -10° 和 10° ; 区间划分个数 M 取 20; 风速对应最大值为 $v_{max} = 28.9760\text{m/s}$, 固定风速间隔 $\Delta v = 2\text{m/s}$, 其他关键参数与补偿前的参数相同。从图 17 中可以看出, 经过偏航误差固有偏差的辨识及补偿之后, 最大值对应的区间序号为 10 号, 即补偿后偏航误差固有偏差的辨识区间为 $[0^{\circ}, 1^{\circ}]$, 由此可见固有偏差的补偿提升了在固有偏差存在下的偏航控制的效果, 从功率曲线量化指标结果值上同样也可以看出, 相同偏航位置下的功率曲线量化指标结果也有 20~30h 不等的显著提升, 相比与辨识补偿前的性能提升约 0.8%~1.2%。

至此, 基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法的有效性与实用性在 GH Bladed 3.82 仿真软件的仿真数据集上成功验证。

本发明基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法, 主要包括基于偏航误差区间划分、风电机组功率曲线数据离群点检测、风电机组真实功率曲线拟合、功率曲线量化指标计算以及偏航误差固有偏差的辨识与补偿等环节组成。图1为基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法实时与应用的具体流程。整个实施例按照图 1 中所示的流程, 基于风电机组 SCADA 数据进行分析, 通过对不同偏航误差区间下风电机组的真实功率曲线进行拟合并最终基于偏航误差固有偏差的辨识准则与补偿策略来实现风电机组的性能提升需求。图2-图17为使用本发明基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法进行风电机组偏航误差固有偏差的辨识与补偿流程中各个环节的结果, 对具有风电机组的性能提升需求的企业有着很强的应用价值及意义。

权利要求书

1、一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法，其特征在于，包括以下步骤：

1) 根据待分析风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿需求，读取相应需求周期内总计 N 条待分析风电机组的 SCADA 系统中测量得到的风电机组运行数据信息，该信息包含风速 $\{v_i\}$ 、有功功率 $\{P_i\}$ 以及偏航误差 $\{\theta_i\}$ ，将信息数据集记为风电机组偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ ，其中 $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ；

2) 将步骤 1)中的风电机组偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 以一定的偏航误差间隔划分为 M 个区间，记第 k 个偏航误差划分区间中的数据个数为 N_k 、偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\mathcal{E}_l^k\} = \{(v_l, P_l)\}$ ，其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$ ， $l = 1, 2, 3, \dots, N_k$ ；

3) 基于步骤 2)中 M 个区间的偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 分别拟合出 M 条真实功率曲线，记第 k 个偏航误差区间下的真实功率曲线为 $\{PC_k\}$ ，其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$ ；

4) 分别计算步骤 3)中 M 个偏航误差区间下的真实功率曲线 $\{PC_k\}$ 各自的量化性能指标 PI_k ，其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$ ；

5) 通过偏航误差固有偏差辨识准则确定该风电机组的偏航误差固有偏差值 θ_{im} 的辨识结果，并将该偏差值 θ_{im} 直接以增量形式补偿到偏航误差实际测量值 θ 上，得到最终补偿后的偏航误差真实值 θ' ，即 $\theta' = \theta + \theta_{im}$ ；

所述偏航误差固有偏差辨识准则定义如下：将步骤 4)中所有 M 个偏航误差区间下真实功率曲线 $\{PC_k\}$ 的量化性能指标 PI_k 由大到小进行排列，并确定最大量化性能指标 PI_{max} 对应的区间下标 k' ，则偏航误差固有偏差值 θ_{im} 的辨识结果计算公式如下

$$\theta_{im} = \theta_{lb} + \frac{2k' - 1}{2M}(\theta_{ub} - \theta_{lb})$$

其中 θ_{lb} 和 θ_{ub} 分别为待分析偏航误差范围的下界和上界。

2、根据权利要求 1 所述的一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法，其特征在于，所述步骤 2)中，偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 区间划分方法步骤如下：

2-a) 绘制偏航误差 $\{\theta_i\}$ 的频率分布直方图，并基于频率分布直方图的分布情况设定待分析偏航误差范围的下界 θ_{lb} 和上界 θ_{ub} ；

2-b) 设定偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 的区间划分个数 M ；

2-c) 以 $\frac{1}{M}(\theta_{ub} - \theta_{lb})$ 为偏航误差区间划分间隔，对偏航误差固有偏差分析数据集 $\{X_i\}$ 进行划分，并仅保留风速和功率信息作为偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 。

3、根据权利要求1所述的一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法，其特征在于，所述步骤3)中， M 个偏航误差区间下风电机组真实功率曲线获取流程如下：

3-a) 设定真实功率曲线获取初始区间 $k = 1$ ；

3-b) 将第 k 个偏航误差区间下偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_t^k\}$ 中的风速信息和功率信息分别进行最大值-最小值归一化处理，记归一化偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\mathcal{E}_{norm,l}^k\}$ ，其中 $l = 1, 2, 3, \dots, N_k$ ；

3-c) 分别按照一定的风速间隔(ws)和功率间隔(ap)将步骤3-b)中的归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,l}^k\}$ 划分为 M' 个区间，并分别记第 j 个区间中的数据个数为 $M'_{k,seg,j}$ 、归一化偏航误差固有偏差分析数据集为 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ ，其中 $seg = \{ws, ap\}$ ， $j = 1, 2, 3, \dots, M'$ ， $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$ ；

3-d) 利用均值距离判别(AVDC)离群点检测算法分别对步骤3-c)中的 $2M'$ 个区间 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 进行疑似离群点检测，并分别记第 j 个区间的疑似离群点个数为 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 、归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集为 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ ，其中 $seg = \{ws, ap\}$ ， $j = 1, 2, 3, \dots, M'$ ， $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$ ；

所述均值距离判别(AVDC)离群点检测算法具体为：对于数据个数 $M'_{k,seg,j}$ 小于给定最小阈值 $\delta_{M'}$ 的区间，认为该区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ 为 $\emptyset$ ；否则对于第 j 个风速区间或第 j 个功率区间，首先计算区间内归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中各风速-功率数据点 $(v_{norm,n}^{k,seg,j}, p_{norm,n}^{k,seg,j})$ 的判别距离 $dist_{norm,n}^{k,seg,j}$ ，进一步设定疑似离群点的占比 $\eta_{k,seg,j}^{AVDC}$ 并确定第 j 个区间中疑似离群点个数 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ ，通过由大到小对判别距离 $dist_{norm,n}^{k,seg,j}$ 进行排序的方式确定前 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 个数据构成第 j 个区间的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ ；

所述判别距离 $dist_{norm,n}^{k,seg,j}$ 的计算方式具体如下：

$$dist_{norm,n}^{k,seg,j} = \begin{cases} \left| p_{norm,n}^{k,seg,j} - \overline{p_{norm,n}^{k,seg,j}} \right|, & seg = ws \\ \left| v_{norm,n}^{k,seg,j} - \overline{v_{norm,n}^{k,seg,j}} \right|, & seg = ap \end{cases}$$

其中 $\overline{p_{norm,n}^{k,seg,j}}$ ， $\overline{v_{norm,n}^{k,seg,j}}$ 分别为归一化偏航误差固有偏差分析数据集第 j 个风速区间内的功率平均值和第 j 个功率区间内的风速平均值，其中 $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$ ；

3-e) 分别利用局部异常因子(LOF)以及考虑噪声的基于密度的聚类(DBSCAN)这两种离群点检测算法对步骤3-c)中的 $2M'$ 个区间 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 进行判别离群点检测，并分别记第 j 个区间的判别离群点个数为 $m_{method}^{k,seg,j}$ 、归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的判别离群点集为

$\{Outlier_{jud,method}^{k,seg,j}\}$, 其中 $seg = \{ws, ap\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, M'$, $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,seg,j}$, $method = \{LOF, DBSCAN\}$;

3-f) 基于真实离群点判别准则, 从步骤 3-d)的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ 和步骤 3-e)的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的判别离群点集 $\{Outlier_{jud,method}^{k,seg,j}\}$ 中获取真实离群点集 $\{Outlier_{true}^{k,seg,j}\}$, 其中 $seg = \{ws, ap\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, M'$, $method = \{LOF, DBSCAN\}$;

所述真实离群点判别准则定义为: 对偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中的任一数据点 $\mathbf{Q}$, 若其属于疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$, 且属于 LOF 判别离群点集 $\{Outlier_{jud,LOF}^{k,seg,j}\}$ 或 DBSCAN 判别离群点集 $\{Outlier_{jud,DBSCAN}^{k,seg,j}\}$ 之一, 则点 $\mathbf{Q}$ 为第 j 个区间的真实离群点;

3-g) 基于步骤 3-f)中得到的各风速区间真实离群点集 $\{Outlier_{true}^{k,ws,j}\}$ 以及各功率区间真实离群点集 $\{Outlier_{true}^{k,ap,j}\}$, 利用最终离群点判断准则获得偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 的最终离群点判别结果集 $\{Outlier_k\}$ 并加以剔除, 记剔除离群点后的偏航误差固有偏差分析标准数据集为 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$;

所述最终离群点判断准则定义为: 对于偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 中的任一数据点 $\mathbf{Q}'$, 若其在归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中对应的数据点 $\mathbf{Q}$ 是某风速区间或某功率区间的真实离群点, 则点 $\mathbf{Q}'$ 为偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_l^k\}$ 的最终离群点。

3-h) 确定步骤 3-g)中获取到的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$ 中的风速对应的最大值 v_{max} , 并以固定风速间隔 Δv 为风速区间划分间隔, 将第 k 个偏航误差区间下偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$ 进一步基于风速信息进行划分, 则第 q 个风速区间下的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{w\mathcal{S}_{q,m}^k\}$ 定义为

$$\{w\mathcal{S}_{q,m}^k\} = \{(v_m, P_m) \in \{y\mathcal{E}_{std,l}^k\} | (q-1)\Delta v \leq v_m < q\Delta v\}$$

$$q = 1, 2, 3, \dots, M_k \quad m = 1, 2, 3, \dots, M_{k,q}$$

其中 $M_{k,q}$ 为第 q 个风速区间下的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{w\mathcal{S}_{q,m}^k\}$ 中的数据个数; M_k 为第 k 个偏航误差区间下偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{y\mathcal{E}_{std,l}^k\}$ 的风速区间划分个数, 计算公式如下

$$M_k = \begin{cases} \lceil \frac{v_{max}}{\Delta v} \rceil, & \frac{v_{max}}{\Delta v} \notin \mathbb{Z} \\ \frac{v_{max}}{\Delta v}, & \frac{v_{max}}{\Delta v} \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 函数为向上取整函数;

3-i) 计算每个风速区间下的偏航误差固有偏差分析数据集 $\{w\mathcal{S}_{q,m}^k\}$ 中的平均风速 $\overline{v_q^k}$ 以及

平均功率 $\overline{P_q^k}$ ，并将所有平均风速和平均功率分别进行最大值-最小值归一化处理，得到归一化后的平均风速 $v_{norm}^{k,q}$ 和平均功率 $P_{norm}^{k,q}$ ；

3-j) 基于平均风速 $\overline{v_q^k}$ 以及平均功率 $\overline{P_q^k}$ 确定每个风速区间下的功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^q$ ，方式如下：若第 j 个风速区间下的偏航误差固有偏差分析标准数据集 $\{\mathcal{WS}_{q,m}^k\}$ 中的数据个数 $M_{k,q} = 0$ ，则认为无功率曲线拟合中心点；反之则认为功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^q = (\overline{v_q^k}, \overline{P_q^k})$ ；

3-k) 补充定义中心点 $\mathbf{C}_k^0 = (0,0)$ ，并记第 k 个偏航误差区间下的功率曲线拟合中心点个数为 M'_k ，计算每个功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^r$ 对应的参数值 $\bar{t}_k^r$ ，公式为

$$\bar{t}_k^r = \begin{cases} 0, & r = 0 \\ \bar{t}_k^{r-1} + \frac{d_k^r}{d_k}, & r = 1, 2, \dots, M'_k \end{cases}$$

其中 d_k^r 为两个相邻的功率曲线拟合中心点 $\mathbf{C}_k^r$ 与 $\mathbf{C}_k^{r-1}$ 对应坐标归一化后的弦长，即

$$d_k^r = \sqrt{(v_{norm}^{k,r} - v_{norm}^{k,r-1})^2 + (P_{norm}^{k,r} - P_{norm}^{k,r-1})^2}$$

d_k 为所有功率曲线拟合中心点对应坐标归一化后的总弦长，即 $d_k = \sum_{r=1}^{M'_k} d_k^r$ ；

3-l) 采用最小二乘 B 样条拟合算法对第 k 个偏航误差区间下的功率曲线进行拟合，其拟合函数 $\mathbf{B}_k(t)$ 定义如下：

$$\mathbf{B}_k(t) = \sum_{r=0}^{M'_k} N_{r,p}(t) \mathbf{b}_k^r \quad (t_k^{p-1} \leq t \leq t_k^{M'_k+1})$$

其中 $N_{r,p}(t)$ 为阶数为 p 的第 r 段 B 样条拟合函数的标准函数， t 为最小二乘 B 样条拟合函数的自变量， $\mathbf{b}_k^r$ 为该最小二乘 B 样条拟合函数的第 r 个控制点； t_k^s 为分段节点， $s = 0, 1, 2, \dots, p-1, p, p+1, \dots, M'_k-1, M'_k, M'_k+1, \dots, M'_k+p$ ，其计算公式如下：

$$t_k^s = \begin{cases} 0 & s = 0, 1, 2, \dots, p-1 \\ \frac{1}{p-1} \sum_{r=i-p+1}^{i-1} \bar{t}_k^r & s = p, p+1, \dots, M'_k-1, M'_k \\ 1 & s = M'_k+1, \dots, M'_k+p \end{cases}$$

3-m) 基于如下最小二乘优化函数确定 B 样条拟合函数 $\mathbf{B}_k(t)$ 中的所有控制点 $\{\mathbf{b}_k^r\}$ ：

$$\min_{\mathbf{b}_k^0, \mathbf{b}_k^1, \mathbf{b}_k^2, \dots, \mathbf{b}_k^{M'_k}} \sum_{r=0}^{M'_k} |\mathbf{B}_k(\bar{t}_k^r) - \mathbf{C}_k^r|$$

3-n) 将求解得到的最小二乘 B 样条拟合函数 $\mathbf{B}_k(t)$ 转换为自变量为风速 v 的多项式形式，作为第 k 个偏航误差区间下的真实功率曲线结果 $\{PC_k\}$ ；

3-o) 设置待分析区间 $k = k + 1$ ，并重复进行步骤 3-b)至步骤 3-n)，直到 $j > M$ 为止。

4、根据权利要求 3 所述的一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法，其特征在于，所述步骤 3-c)中，归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{\mathcal{Y}_{norm,l}^k\}$ 的划分方

法具体如下:

3-c-a) 确定归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,l}^k\}$ 的区间划分个数 M' ;

3-c-b) 以 $\frac{1}{M'}$ 为划分间隔, 将数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,l}^k\}$ 分别按照风速和功率进行均匀划分, 得到各风速区间和各功率区间下的归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,ws,j}\}$ 和 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,ap,j}\}$ 。

5、根据权利要求 3 所述的一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方法, 其特征在于, 所述步骤 3-d) 中, 利用均值距离判别(AVDC)离群点检测算法进行 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中各区间内疑似离群点检测, 算法详细流程如下:

3-d-a) 设定初始离群点检测区间 $j = 1$;

3-d-b) 若第 j 个区间对应归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中的数据个数 $M'_{k,seg,j}$ 小于给定最小阈值 $\delta_{M'}$, 则认为第 j 个区间的疑似离群点个数 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 为 0、归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$ 为 $\emptyset$, 并跳至步骤 3-d-g) 继续执行; 反之则继续执行步骤 3-d-c);

3-d-c) 设定疑似离群点在第 j 个区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 中的占比 $\eta_{k,seg,j}^{AVDC}$, 并计算第 j 个区间中疑似离群点个数 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$, 计算公式定义为

$$m_{AVDC}^{k,seg,j} = [M'_{k,seg,j} \times \eta_{k,seg,j}^{AVDC}]$$

其中 $[\cdot]$ 函数为向上取整函数;

3-d-d) 计算第 j 个风速区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,ws,j}\}$ 中各数据点 $(v_{norm,n}^{k,ws,j}, p_{norm,n}^{k,ws,j})$ 的风速判别距离 $dist_{norm,n}^{k,ws,j}$, 计算公式如下

$$dist_{norm,n}^{k,ws,j} = |p_{norm,n}^{k,ws,j} - \overline{p_{norm}^{k,ws,j}}| \quad n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,ws,j}$$

其中 $\overline{p_{norm}^{k,ws,j}}$ 为第 j 个风速区间内归一化偏航误差固有偏差分析数据集的功率平均值;

3-d-e) 计算第 j 个功率区间归一化偏航误差固有偏差分析数据集 $\{y\mathcal{E}_{norm,n}^{k,ap,j}\}$ 中各数据点 $(v_{norm,n}^{k,ap,j}, p_{norm,n}^{k,ap,j})$ 的风速判别距离 $dist_{norm,n}^{k,ap,j}$, 计算公式如下

$$dist_{norm,n}^{k,ap,j} = |v_{norm,n}^{k,ap,j} - \overline{v_{norm}^{k,ap,j}}| \quad n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,ap,j}$$

其中 $\overline{v_{norm}^{k,ap,j}}$ 为第 j 个功率区间内归一化偏航误差固有偏差分析数据集的风速平均值;

3-d-f) 将第 j 个区间的判别距离数据集 $\{dist_{norm,n}^{k,seg,j}\}$ 分别由大到小进行排序, 并分别选取排序后的判别距离数据集中的前 $m_{AVDC}^{k,seg,j}$ 个数据, 构成第 j 个区间的归一化偏航误差固有偏差分析数据集中的疑似离群点集 $\{Outlier_{sus,AVDC}^{k,seg,j}\}$, 其中 $n = 1, 2, 3, \dots, M'_{k,ap,j}$;

3-d-g) 设置检测区间 $j = j + 1$, 并重复进行步骤 3-d-b) 至步骤 3-d-f), 直到 $j > M'$ 为止。

6、根据权利要求 1 所述的一种基于真实功率曲线的风电机组偏航误差固有偏差辨识及补偿方

法，其特征在于，所述步骤 4)中，量化性能指标 PI_k 的定义如下：

$$PI_k = \frac{0.5N_h(P_j^{k,mid} + P_{j-1}^{k,mid}) \sum_{j=1}^{M_k} [F(v_{j,cor}^{k,mid}) - F(v_{j-1,cor}^{k,mid})]}{CAP}$$

其中 N_h 为 1 年时间转化为小时的数值； CAP 为待分析风电机组的额定功率； $v_{j,cor}^{k,mid}$ 为第 k 个偏航误差区间下、第 j 个风速区间中的风速中值，即 $v_{j,cor}^{k,mid} = 0.5(2j - 1)\Delta v$ ，且 $v_{0,cor}^{k,mid} = 0$ ； $P_j^{k,mid}$ 为第 k 个偏航误差区间的真实功率曲线 $\{PC_k\}$ 上 $v_{j,cor}^{k,mid}$ 对应的功率值，且 $P_0^{k,mid} = 0$ ； $F(\cdot)$ 函数为 Rayleigh 分布的累计概率分布函数，具体公式如下

$$F(v) = 1 - e^{-(\pi v^2)/(4v_{ave}^2)}$$

其中 v_{ave} 为待分析风电机组的年平均风速。

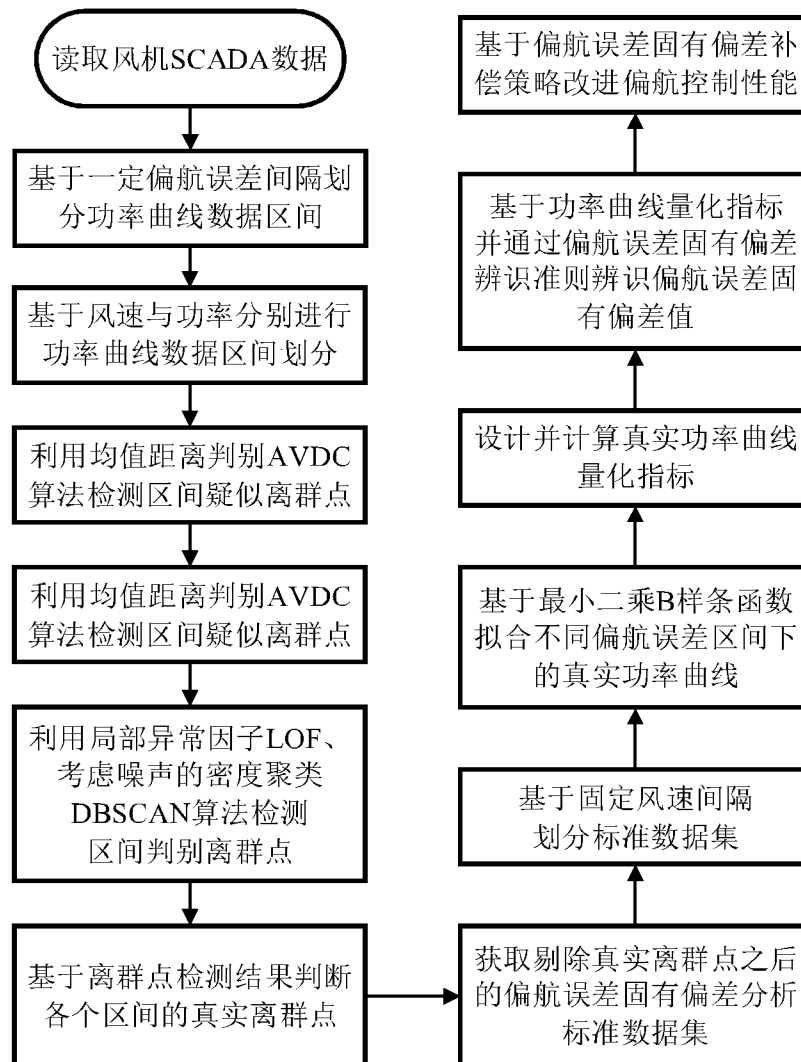


图 1

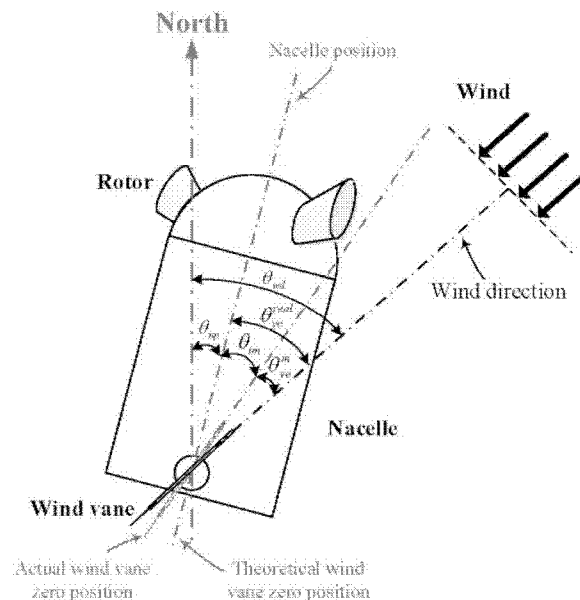


图 2

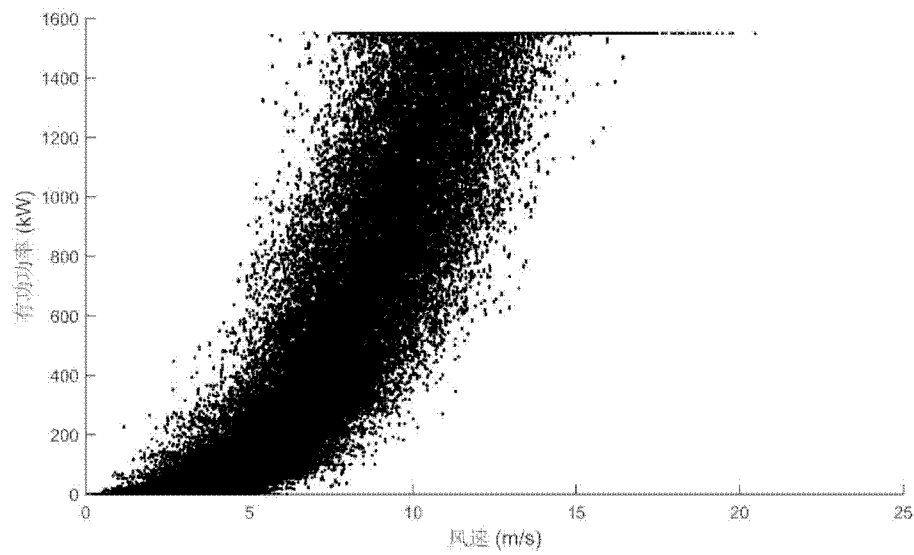


图 3

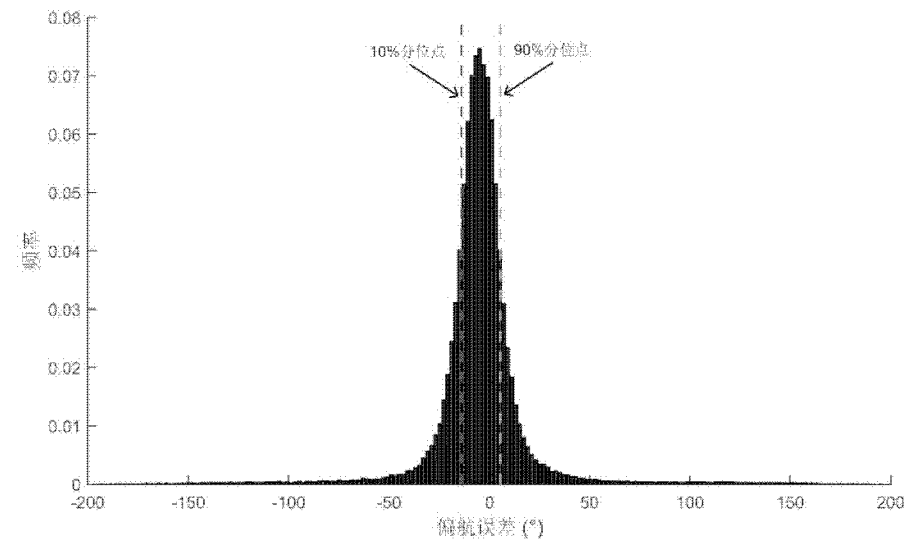


图 4

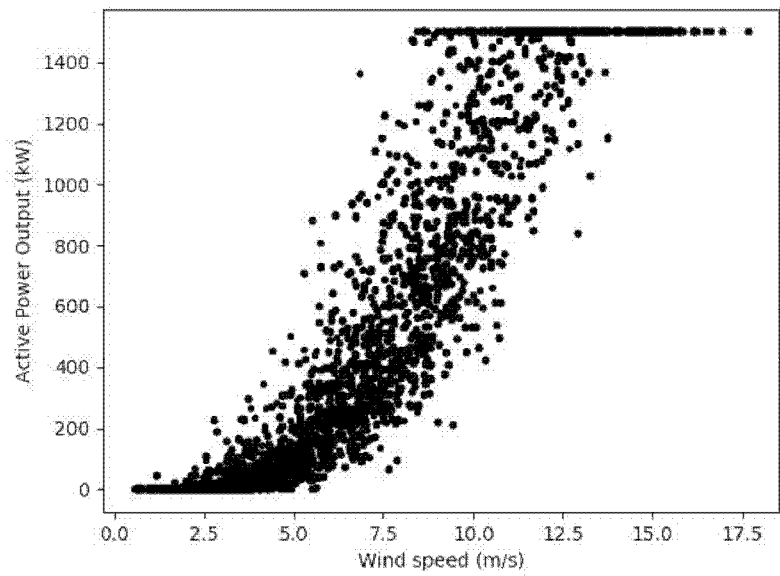


图 5

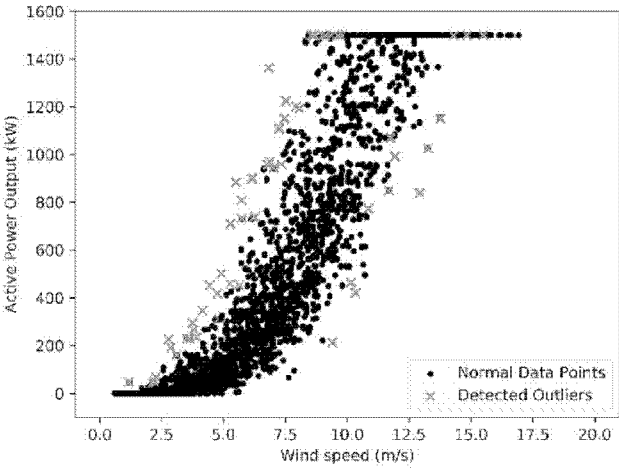


图 6

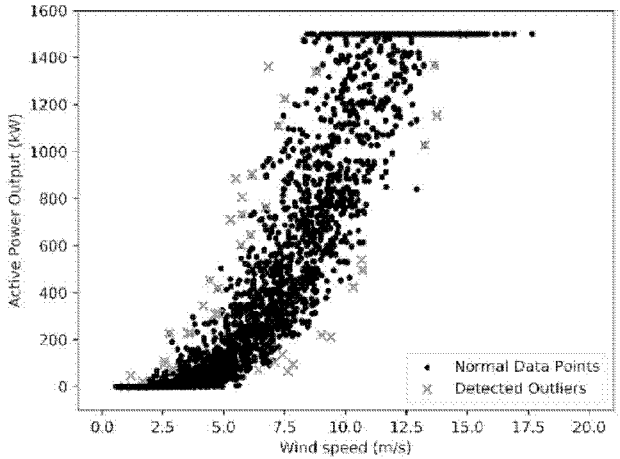


图 7

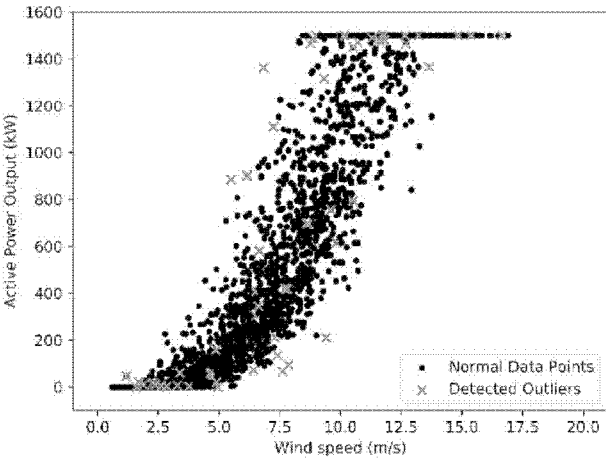


图 8

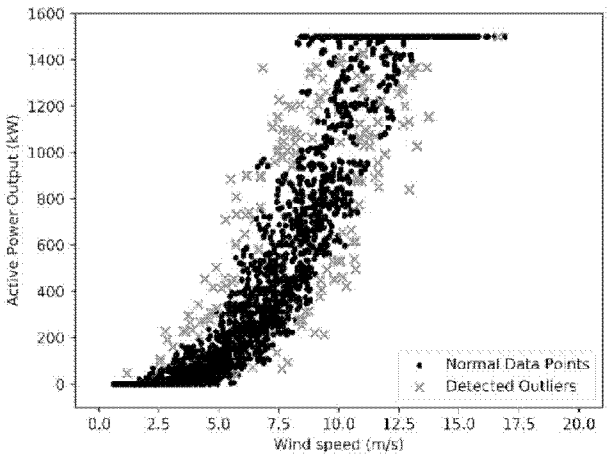


图 9

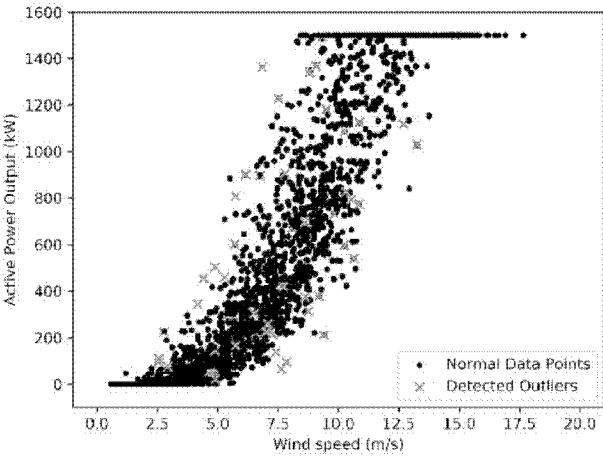


图 10

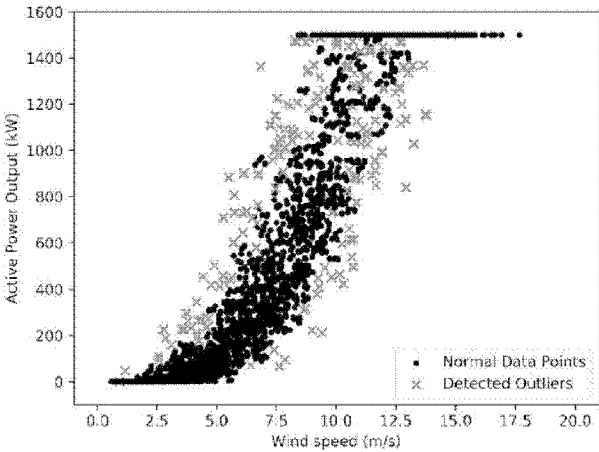


图 11

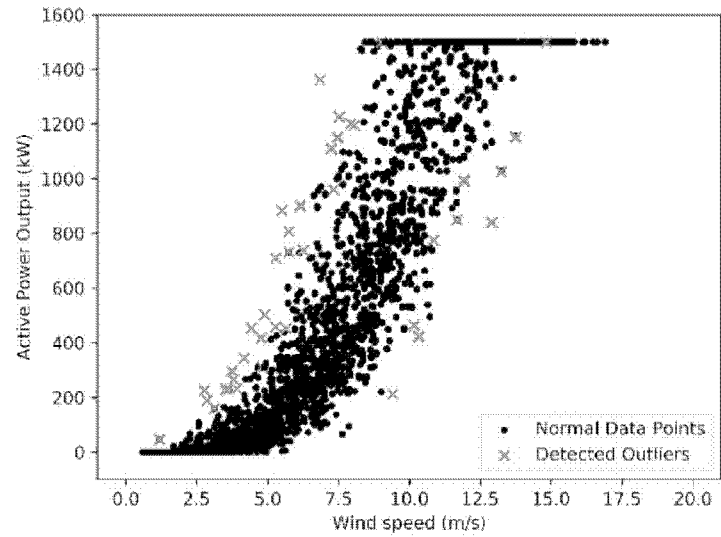


图 12

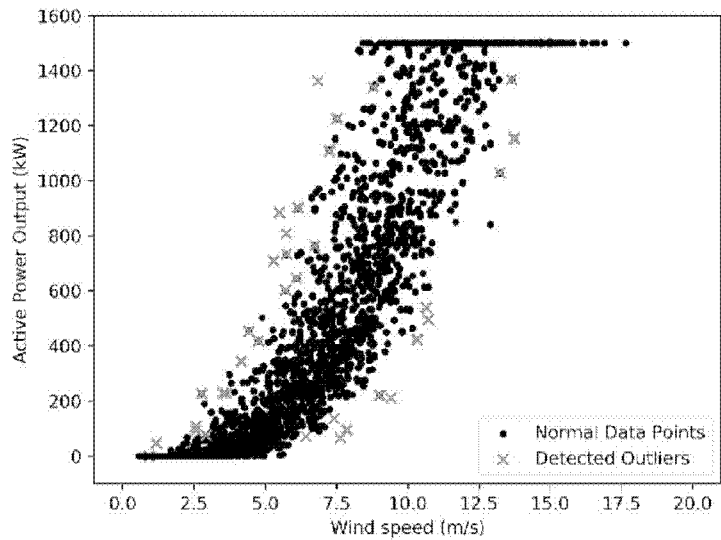


图 13

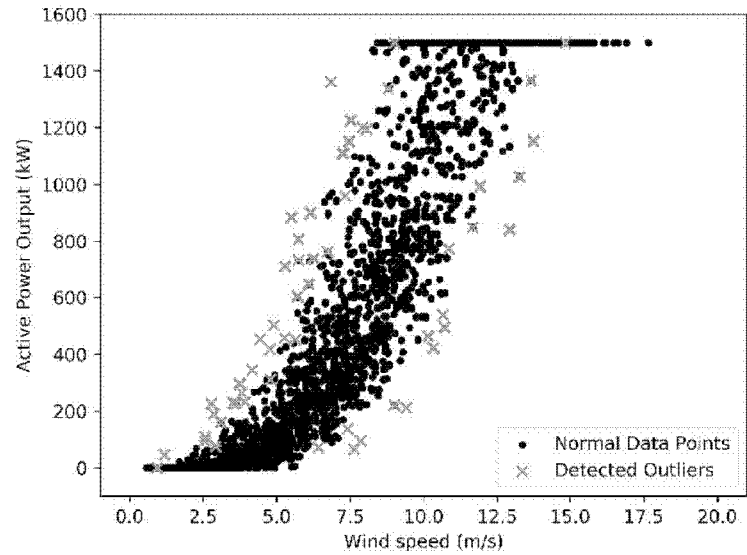


图 14

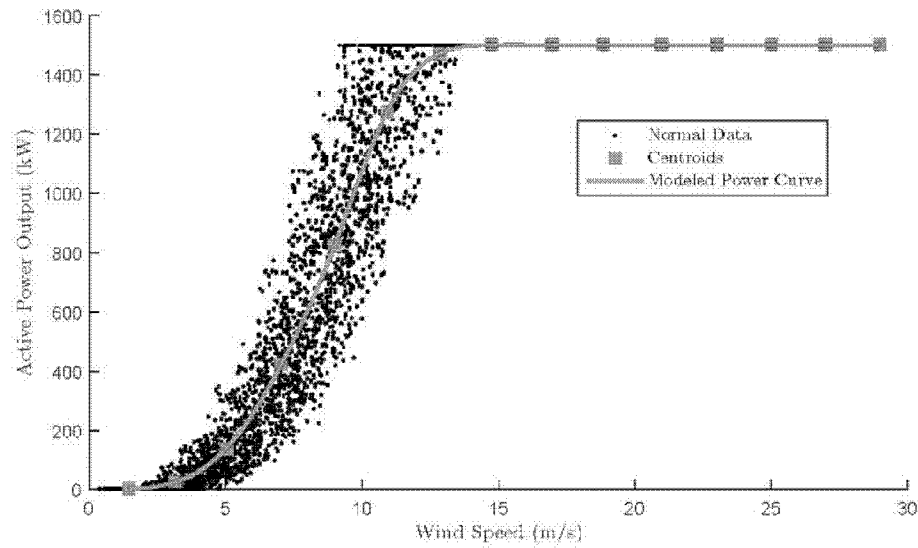


图 15

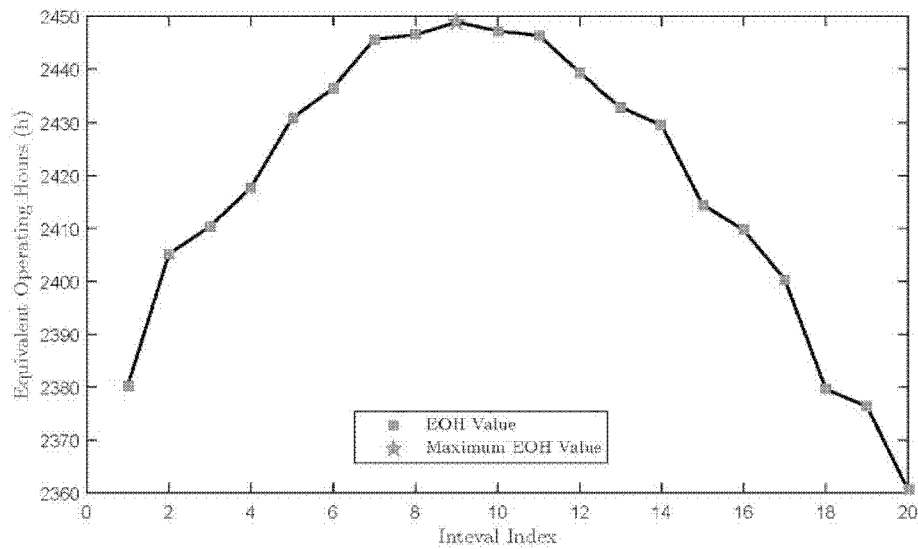


图 16

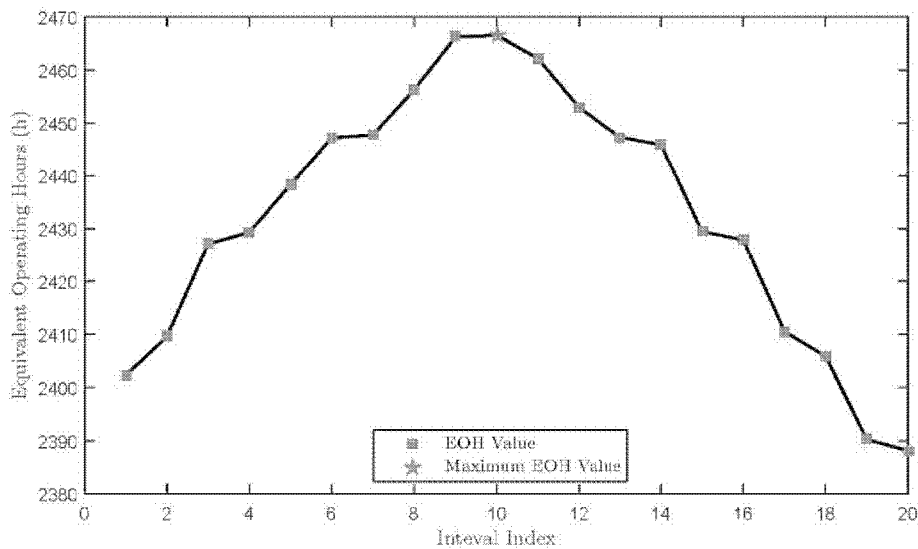


图 17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/116072

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

F03D 17/00(2016.01)i; F03D 7/04(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F03D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, CNPAT, WPI, EPODOC: 风电, 风机, 固有, 偏航, 误差, 偏差, 补偿, 功率, 风速, 归一化, wind power, inherent, yaw, error, compensat+, power, wind speed, normaliz+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102213182 A (BEIJING GOLDWIND SCIENCE & CREATION WINDPOWER EQUIPMENT CO., LTD.) 12 October 2011 (2011-10-12) description, paragraphs [0041]-[0044]	1-6
A	CN 106014878 A (NORTH CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD. et al.) 12 October 2016 (2016-10-12) entire document	1-6
A	CN 107944175 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 20 April 2018 (2018-04-20) entire document	1-6
A	CN 106150904 A (NORTH CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD. et al.) 23 November 2016 (2016-11-23) entire document	1-6
A	CN 105909466 A (HUADIAN ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) 31 August 2016 (2016-08-31) entire document	1-6
A	US 8890349 B1 (NORTHERN POWER SYSTEMS, INC.) 18 November 2014 (2014-11-18) entire document	1-6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“D” document cited by the applicant in the international application

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

05 June 2019

Date of mailing of the international search report

04 July 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

National Intellectual Property Administration, PRC (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/116072

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	张伟 等, (ZAHNG, Wei et al.,). "风电机组偏航校正分析方法研究, (Non-official translation: Research on Yaw Correction Analysis Method for Wind Turbine)" 华电技术, (HUADAIN TECHNOLOGY,), Vol. 39, No. 4, 30 April 2017 (2017-04-30), ISSN: 1674-1951, pages 71-73	1-6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/116072

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	102213182	A	12 October 2011	CN	102213182	B	04 September 2013
CN	106014878	A	12 October 2016	CN	106014878	B	20 November 2018
CN	107944175	A	20 April 2018	None			
CN	106150904	A	23 November 2016	CN	106150904	B	30 October 2018
CN	105909466	A	31 August 2016	CN	105909466	B	16 November 2018
US	8890349	B1	18 November 2014	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/116072

A. 主题的分类 F03D 17/00(2016.01)i; F03D 7/04(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																							
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) F03D 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNKI, CNPAT, WPI, EP0D0C: 风电, 风机, 固有, 偏航, 误差, 偏差, 补偿, 功率, 风速, 归一化, wind power, inherent, yaw, error, compensat+, power, wind speed, normaliz+																							
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 102213182 A (北京金风科创风电设备有限公司) 2011年 10月 12日 (2011 - 10 - 12) 说明书第[0041]-[0044]段</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106014878 A (华北电力科学研究院有限责任公司 等) 2016年 10月 12日 (2016 - 10 - 12) 全文</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107944175 A (浙江大学) 2018年 4月 20日 (2018 - 04 - 20) 全文</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106150904 A (华北电力科学研究院有限责任公司 等) 2016年 11月 23日 (2016 - 11 - 23) 全文</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105909466 A (华电电力科学研究院) 2016年 8月 31日 (2016 - 08 - 31) 全文</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 8890349 B1 (NORTHERN POWER SYSTEMS, INC.) 2014年 11月 18日 (2014 - 11 - 18) 全文</td> <td>1-6</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 102213182 A (北京金风科创风电设备有限公司) 2011年 10月 12日 (2011 - 10 - 12) 说明书第[0041]-[0044]段	1-6	A	CN 106014878 A (华北电力科学研究院有限责任公司 等) 2016年 10月 12日 (2016 - 10 - 12) 全文	1-6	A	CN 107944175 A (浙江大学) 2018年 4月 20日 (2018 - 04 - 20) 全文	1-6	A	CN 106150904 A (华北电力科学研究院有限责任公司 等) 2016年 11月 23日 (2016 - 11 - 23) 全文	1-6	A	CN 105909466 A (华电电力科学研究院) 2016年 8月 31日 (2016 - 08 - 31) 全文	1-6	A	US 8890349 B1 (NORTHERN POWER SYSTEMS, INC.) 2014年 11月 18日 (2014 - 11 - 18) 全文	1-6
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
A	CN 102213182 A (北京金风科创风电设备有限公司) 2011年 10月 12日 (2011 - 10 - 12) 说明书第[0041]-[0044]段	1-6																					
A	CN 106014878 A (华北电力科学研究院有限责任公司 等) 2016年 10月 12日 (2016 - 10 - 12) 全文	1-6																					
A	CN 107944175 A (浙江大学) 2018年 4月 20日 (2018 - 04 - 20) 全文	1-6																					
A	CN 106150904 A (华北电力科学研究院有限责任公司 等) 2016年 11月 23日 (2016 - 11 - 23) 全文	1-6																					
A	CN 105909466 A (华电电力科学研究院) 2016年 8月 31日 (2016 - 08 - 31) 全文	1-6																					
A	US 8890349 B1 (NORTHERN POWER SYSTEMS, INC.) 2014年 11月 18日 (2014 - 11 - 18) 全文	1-6																					
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																							
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																							
国际检索实际完成的日期 2019年 6月 5日		国际检索报告邮寄日期 2019年 7月 4日																					
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 王笑寒 电话号码 86-(10)-53961495																					

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	张伟 等, . “风电机组偏航校正分析方法研究,” 华电技术, 第39卷, 第4期, 2017年 4月 30日 (2017 - 04 - 30), ISSN: 1674-1951, 第71页-第73页	1-6

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/116072

检索报告引用的专利文件				公布日 (年/月/日)		同族专利		公布日 (年/月/日)	
CN	102213182	A	2011年 10月 12日	CN	102213182	B		2013年 9月 4日	
CN	106014878	A	2016年 10月 12日	CN	106014878	B		2018年 11月 20日	
CN	107944175	A	2018年 4月 20日		无				
CN	106150904	A	2016年 11月 23日	CN	106150904	B		2018年 10月 30日	
CN	105909466	A	2016年 8月 31日	CN	105909466	B		2018年 11月 16日	
US	8890349	B1	2014年 11月 18日		无				