

8-13-2020

Nacelle Wind Speed Correction of Wind Turbine Generation Units Based on Wind Speed Measured by Anemometer Tower

Gao Feng

1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;;

Xiyun Yang

1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;;

Wang Wei

1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;;

Zhang Lei

2. Datang Corporation (Chifeng) Renewable Limited Co., Chifeng 024400, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Nacelle Wind Speed Correction of Wind Turbine Generation Units Based on Wind Speed Measured by Anemometer Tower

Abstract

Abstract: In consideration that there are great calculation errors in theoretical correction of nacelle wind speed, the entire range of wind speed was divided according to changes of control strategies for wind turbine generation unit. *The nacelle transfer function (NTF) was defined by higher-order polynomial fitting to identify a method for correcting nacelle wind speed based on wind measurements of the anemometer tower.* It doesn't only overcome problems like poor practicability of IEC standards NTF, but also has higher fitting precision than simple linear fitting without intervals. *By introducing intermediate intervals, the problem about discontinuous NTF in different sections has been improved.* The calculation example suggest that the above method is high advantageous in correcting nacelle wind speed.

Keywords

wind turbine, nacelle wind speed, wind speed correction, nacelle transfer function

Recommended Citation

Gao Feng, Yang Xiyun, Wang Wei, Zhang Lei. Nacelle Wind Speed Correction of Wind Turbine Generation Units Based on Wind Speed Measured by Anemometer Tower[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(11): 2790-2797.

基于测风塔测风数据的风电机组机舱风速修正

高峰¹, 杨锡运¹, 王伟¹, 张磊²

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 大唐(赤峰)新能源有限公司, 赤峰 024400)

摘要: 针对机舱风速理论修正方法计算偏差较大的问题, 根据风力发电机组控制策略对整个风速范围进行分区, 通过高阶多项式拟合来确定机舱风速传递函数, 建立一种基于测风塔测风数据的机舱风速修正方法。采用该方法进行风速修正不仅能够克服 IEC 机舱传递函数实用性较差的问题, 而且较不分区的简单线性拟合又具有较高的拟合精度, 通过引入过渡区间改进了分段机舱传递函数所存在的不连续问题。算例结果与数据分析表明了该机舱风速修正方法的优越性。

关键词: 风力机; 机舱风速; 风速修正; 机舱传递函数

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 11-2790-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201611021

Nacelle Wind Speed Correction of Wind Turbine Generation Units Based on Wind Speed Measured by Anemometer Tower

Gao Feng¹, Yang Xiyun¹, Wang Wei¹, Zhang Lei²

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Datang Corporation (Chifeng) Renewable Limited Co., Chifeng 024400, China)

Abstract: In consideration that there are great calculation errors in theoretical correction of nacelle wind speed, the entire range of wind speed was divided according to changes of control strategies for wind turbine generation unit. The nacelle transfer function (NTF) was defined by higher-order polynomial fitting to identify a method for correcting nacelle wind speed based on wind measurements of the anemometer tower. It doesn't only overcome problems like poor practicability of IEC standards NTF, but also has higher fitting precision than simple linear fitting without intervals. By introducing intermediate intervals, the problem about discontinuous NTF in different sections has been improved. The calculation example suggest that the above method is high advantageous in correcting nacelle wind speed.

Keywords: wind turbine; nacelle wind speed; wind speed correction; nacelle transfer function

引言

分析机组实际功率曲线并与理论曲线相比较是一种对风力发电机组进行性能评估与优化的重要工具和手段; 利用机组实际功率曲线与风场风频分布, 还可以估算机组的年发电量和风场短期发电

量, 发电量的预测准确与否, 对电网调度将产生很大的影响。但目前绘制机组功率曲线所采用风速是由装在机舱顶部或前部的风速计测量, 称为“机舱风速”, 这个位置与风力发电机组风轮中心相对较近, 所以周围地形和障碍物对风在理想测量位置 and 实际测量位置之间的畸变影响较小。然而, 风轮和机舱使风严重畸变, 因此机舱风速并不能准确反应轮毂处的来流风速, 即自由流风速。因此采用机舱风速绘制的功率曲线评估机组性能和进行发电量预测并不客观与准确。

为获得叶轮扫风面前方的自由流风速, 需要对



收稿日期: 2015-03-16 修回日期: 2015-09-16;
基金项目: 中央高校基本科研业务费(2015MS24);
作者简介: 高峰(1976-), 男, 山东滨州, 博士, 讲师, 研究方向为风力发电机组建模与性能评估; 杨锡运(1973-), 女, 内蒙, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 2790 •

机舱风速进行修正。修正方法主要分为两种: 一种是理论计算修正法^[1-8], 此方法基于空气动力学理论, 利用机组某些性能参数和运行数据通过理论计算来修正机舱风速, 但在实际应用中往往存在计算偏差较大, 不易应用等问题; 另一种方法是函数拟合法^[9-11], 直接拟合测风塔风速与机舱风速之间的函数关系, 即机舱传递函数(Nacelle Transfer Function, NTF), IEC 标准(61400-12-2: 2013)中还给出了确定 NTF 的具体方法与要求, 利用该函数关系可实现对机舱风速的修正。由于后一种方法简单易用, 又有相关国际标准, 得到了更多的实际应用。

笔者根据 IEC 标准中 NTF 确定方法, 建立一种基于测风塔测风数据的机舱风速修正方法, 用以绘制更加客观反映机组发电能力及准确进行发电量预测的功率曲线。该方法不仅可以克服理论修正方法计算偏差大的问题, 而且在保证获得较高准确度的前提下解决了 IEC 标准方法中由于风速分区太多导致计算相对繁杂、实用性较差的问题。

1 理论修正方法介绍与误差分析

1.1 几种主要理论修正方法介绍

基于风轮动量理论的单元流管模型^[1-2], 可将风轮后的机舱风速修正成风轮前的自由流风速。如图 1 所示, 设通过风轮的气流其上游截面积为 A_1 , 下游截面积为 A_2 , 风轮截面积为 A , V_1 、 V_2 、 V 分别为上述 3 个位置对应的风速, 因风轮吸收的能量等于风轮前后气流动能之差:

$$P / (\eta_1 \cdot \eta_2) = \rho \pi R^2 V (V_1^2 / 2 - V_2^2 / 2) \quad (1)$$

式中: P 为机组发电功率; ρ 为空气密度; R 为风轮半径; η_1 为机组传动链效率; η_2 为发电机效率。根据风轮动量理论, 风速 V 为风轮前后风速 V_1 、 V_2 的算术平均值, 即:

$$V = (V_1 + V_2) / 2 \quad (2)$$

假设机舱风速接近于 V_2 , 自由流风速接近于 V_1 , 将(1)、(2)联立即可得到 V_1 和 V_2 的关系:

$$P = \frac{\pi}{4} \rho R^2 \eta_1 \eta_2 (V_1 + V_2)^2 (V_1 - V_2) \quad (3)$$

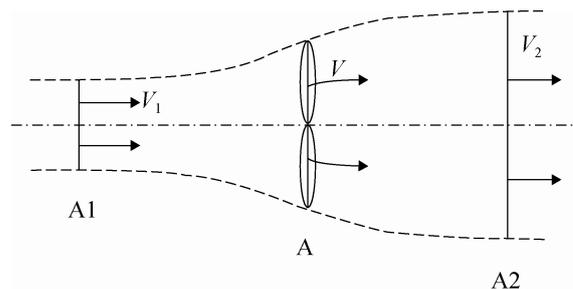


图 1 风轮流管模型

利用该关系式与迭代算法不难求得 V_1 在 $[V, V_{out}]$ 范围内的实数解, 其中 V_{out} 为切出风速。

文献[3]在流管模型的基础上根据能量守恒原则提出一种利用风能利用系数和机组某些运行参数求取轮毂处风速 V 的方法, 其中叶尖速比和风能利用系数的关系为:

$$\begin{cases} V = \frac{\omega R}{\lambda} \\ 2P\lambda^3 = \pi R^5 \rho \eta_1 \eta_2 \omega^3 C_p(\lambda, \beta) \\ C_p(\lambda, \beta) = -0.00184(\lambda - 3)\beta + \\ (0.44 - 0.167\beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: λ 为叶尖速比; C_p 为风能利用系数; ω 为风轮转速; β 为桨距角。将式(4)求出的 V 与 V_2 带入式(2)即可求得 V_1 。该方法没有考虑不同机组风能利用系数的差异, 文献[4]则利用厂商提供的风能利用系数设计数据对该方法进行了改进。在设计数据中风能利用系数是关于叶尖速比和桨距角的二维数据表格, 在桨距角已知的情况下, 对该表中的数据进行多项式逼近, 得到风能利用系数与叶尖速比的关系表达式:

$$C_p(\lambda) = c_0 + c_1 \lambda + \dots + c_n \lambda^n \quad (5)$$

然后再将式(5)与式(4)联立求解。

文献[5-8]以风电场为研究对象, 研究各机组对风速的相互干扰, 建立风电场的等效风速模型, 主要用于风电场集群控制、风电场功率预测、风电场运行特性分析等。如文献[5]通过测风塔风速和风向数据计算风电场各机组的动态空间位置, 在风电机组尾流效应和时滞效应数学模型的基础上, 综合风电场空间和风速时间关系建立了风速在各台风

机上的分布模型；文献[6]分析了风力机背面风速的计算方法，根据上游风力机对下游风力机的遮挡及遮挡面积的不同，建立了考虑尾流效应的风电场风速模型；文献[7]基于 Mosaic 模型建立了风电场动态尾流模型，并将该模型用于风场集群控制器的设计；文献[8]结合制动盘理论与 CFD 方法，采用 FLUENT 软件实现了对风电场和风力机流场的建模与仿真。这些文献中所建模型针对风电场内风电机组的位置排列和地形因素，研究各机组对风速的相互干扰与风速风向的动态变化关系，其中文献[5]还分别结合尾流效应和时滞效应模型计算风速衰减及延迟，从而提高了模型的准确性。如果已知风电场各台风机的特征参数、地理坐标等模型固有参数，并以测风塔风速、风向数据与风电机组的运行数据作为模型的动态输入，可实时计算各机组位置处的自由流风速，从而实现对各台机组机舱风速的修正。

1.2 理论修正误差原因分析

以上几种主要理论修正方法在实际应用中往往计算偏差较大，图 2 为流管模型修正结果对比图，其主要原因总结如下：

1) 第 1 类修正方法中需要采用机舱风速作为计算变量，这使得风速计的测量精度对计算影响较大，如果风速计测量误差较大则修正风速必然存在偏差；

2) 在许多基于流管模型的计算方法中，将机舱风速等同于 V_2 ，由于机舱风速计距离风轮较近，受节流效应的影响，气流的经过风轮的能量损失还未完全体现出来，其值并不等于 V_2 ，甚至可能大于 V_2 ；

3) 第 2 类修正方法计算中不需要风速 V_2 ，规避了风速计测量误差的问题，但 C_p 的计算往往采用一些经验公式或机组厂家提供的 C_p 数据表，前者由于机组不同不具一般性，而后者是机组设计值或理论值，由此推算出来的风速无法评估机组实际发电性能和真实的预测机组功率；

4) 第 3 类方法虽然也不使用风速 V_2 ，但需要

各机组和测风塔所处的详细地理条件，而且所建计算模型所需参数较多，例如计算风轮背面风速的机组效率、尾流影响所需的形状系数、Mosaic 模型中的推力系数、尾流因子和衰减系数等等，由于机组机型的差别和风电场的地理环境的复杂性，这些参数不易确定和获得，模型参数的不准确势必会带来较大计算误差；

5) 机舱风速计处于风轮后的扰流区，受风轮尾流旋转和机舱类型等因素的影响严重，该区域的平面内风速情况较为复杂，机舱风速测量的是点风速而不是理论修正计算所需的平面平均风速或等效风速。

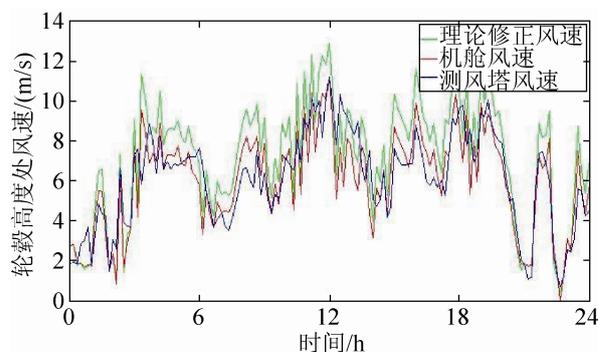


图 2 理论修正风速与测风塔风速对比图

2 基于 IEC 标准的机舱风速传递函数拟合

《基于机舱风速计的风力发电机组功率特性测试》(IEC61400-12-2: 2013)中指出^[9]：“该方法通过机舱传递函数(NTF)描述了风速畸变，NTF 由该文件附录 D 所述的试验方法确定。一旦获得传递函数，用机舱风速计建立机舱功率曲线的方法与《风力发电机组功率特性测试》(IEC61400-12-1: 2005)的方法相同。”基于 IEC 标准的修正方法可概括为利用测风塔测风数据与机舱风速的相关性进行传递函数拟合，通过传递函数进行风速修正。修正时不需复杂的理想化数学模型及机组性能参数，同时规避了机舱风速测量精度等实际测量因素的影响，具有简单易用，准确性较高的优点。国家能源局已发布《风电功率预测系统功能规范》，这便

于获取拟合时所需测风塔数据, 非常适合该方法的大量应用。

由于测风塔和机组运行数据一般不在同一个系统内采集, 因此需要对数据进行时间同步, 并按照时间戳对齐二者数据。测风塔一般用不同通道分别记录不同高度处的风速及风向, 如 50 m 高度、80 m 高度等, 因此需要通过风剪切计算测风塔轮毂高度处风速数据, 计算公式如下:

$$V_H = V_z \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中: V_H 为轮毂高度 H 处的平均风速; V_z 为高度 z 处的平均风速; α 为风剪切系数, 如该系数未知可由下式计算得出:

$$a = \frac{\lg(V_{80} / V_{50})}{\lg(80 / 50)} \quad (7)$$

式中: V_{80} 为高度测风塔 80 m 通道风速; V_{50} 为 50 米通道风速。将对齐时间戳和高度校正后测风塔风速数据和机舱风速数据按 IEC61400-12-2: 2013 的要求进行数据筛选, 剔除无效数据后, 再按 IEC 61400-12-1: 2005 所述方法进行分区处理, 即风速范围划分为以 0.5 m/s 整数倍的风速为中心, 左右各 0.25 m/s 的连续区间^[10]。应用 IEC61400-12-2: 2013 所述方法可得到如图 3 所示机舱传递函数, 计算公式如下:

$$V_{\text{free}} = \frac{V_{\text{free},i+1} - V_{\text{free},i}}{V_{\text{nacelle},i+1} - V_{\text{nacelle},i}} \times (V_{\text{nacelle}} - V_{\text{nacelle},i}) + V_{\text{free},i} \quad (8)$$

式中: $V_{\text{nacelle},i}$ 和 $V_{\text{nacelle},i+1}$ 为区间 i 和区间 $i+1$ 中机舱风速平均值; $V_{\text{free},i}$ 和 $V_{\text{free},i+1}$ 为区间 i 和区间 $i+1$ 中测风塔风速平均值; V_{nacelle} 为机舱风速的实测值, 用于估算自由流风速; V_{free} 为采用实测机舱风速和测风塔风速修正后的自由流风速。

可见此 NTF 曲线有多段折线构成, 每段直线为每两个风速区间的线性差值, 为了使 NTF 与实测数据间总体误差较小, 风速区间划分间隔较小, 因此总区间数较多。在实际应用该传递函数进行修正时, 需要对数据进行分区间处理和计算, 由于分

区太多, 数学模型形式复杂而导致计算繁琐, 不利于该 NTF 的广泛应用。因此, 目前一种简化的线性拟合方法被广为采用, 即将整个工作风速范围作为一个区间进行线性拟合^[11-12], 从而得到整个风速区间形式统一的 NTF 来进行风速修正。此简化方法计算过程简单, 容易实现, 可以应用在一些对风速修正精确度要求不高的场合。但由于采用一阶线性拟合又没有分区, 难免带来一定的拟合误差, 这对于绘制精确度要求较高或要进行机组性能评价和优化功率曲线而言, 该方法则无优越性。

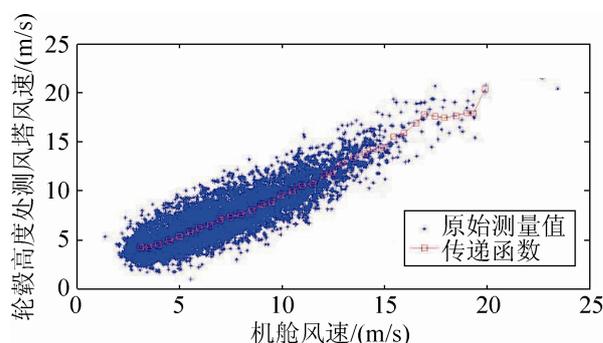


图 3 IEC 标准机舱传递函数

3 机舱传递函数的高次多项式分区拟合

目前大型风力发电机组普遍采用了变速变桨距控制技术, 一般根据风速的高低采用不同控制策略: 低于额定风速时进行转矩控制, 通过调节风机转速实现最大风能捕获, 此时桨距角不变; 而高于额定风速时电机转矩基本不变, 通过变桨距来控制转速不变从而保证功率的恒定。因为机组在不同风速时控制策略的改变会造成 NTF 的变化, 而采用简化方法的拟合结果难以同时兼顾额定风速上下的两个区间数据分布, 特别是某些风资源不佳的风场, 大量有效数据处于额定风速以下, 导致在高于额定风速时的线性拟合效果严重偏离原始数据分布。本文基于 IEC 标准, 同样利用测风塔数据和目标机组机舱风速数据获取 NTF, 但将整个风速区间依据机组控制策略的不同分为两个区间分别进行拟合, 即低于额定风速区间和高于额定风速区

间；同时为了提高拟合精度，在每个区间内采用高阶多项式进行逼近以减小分区较少所带来的拟合误差，NTF 的高阶多项式采用如下形式：

$$y = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0 \quad (n \geq 1) \quad (9)$$

式中： x 为机舱风速； y 为测风塔风速； $a_0 \sim a_n$ 为多项式的系数，可由最小二乘法计算得到； n 为多项式阶数，由于采取分区拟合，所以阶次 n 一般不高，可依次计算各阶 NTF 的拟合优度 R^2_n ，通过与 IEC 标准 NTF 的拟合优度 R^2 进行对比来确定 n 值，即在满足拟合精度的前提下 n 值应尽量小，这样得到的 NTF 修正公式形式简单且计算误差较小：

$$Y = \begin{cases} a_{dn} X^j + \dots + a_{d1} X + a_{d0}, X \in [v_{in}, v_e] \\ a_{un} X^k + \dots + a_{u1} X + a_{u0}, X \in [v_e, v_{out}] \end{cases} \quad (10)$$

式中： X 为机舱风速； Y 为修正风速； j 、 k 为两个风速区间拟合函数阶数； V_{in} 为切入风速； V_{out} 为切出风速； V_e 为切入风速。对于该高次多项式分区拟合方法的具体实施步骤和相关问题，本文将结合下面的算例进行分析和讨论。

4 算例分析

为验证本文建立机舱风速修正方法的优越性，选择内蒙古赤峰地区某风电场 1.5 MW 机组作为目标实验机组进行算例分析，该风电场地势简单地形开阔，略有起伏，平均海拔在 420 m 左右，实验机组与风电场主要参数：额定功率：1.5 MW；叶片数量：3；扫风面积：5 820 m²；旋转方向(从上风向看)：顺时针；风轮倾角：5°；风轮转速：9.7~19.5Rpm；风轮额定转速：17.4 Rpm；发电机额定转速：1 750 Rpm；发电机额定频率：50 Hz；功率因数：-0.95~0.95(可调节)；额定风速：10 m/s；切入风速：4 m/s；切出风速：25 m/s；轮毂高度：65 m；风轮半径：43 m；齿轮箱传动比：100；齿轮箱效率：0.96；发电机效率：0.96；最大风能利用系数：0.46；最佳叶尖速比：8.5；平均空气密度：1.16 kg/m³；风剪切系数：0.134；风场平均海拔：420 m。

4.1 实验机组的选择与数据采集

首先根据机组位置图或地理坐标计算测风塔与周围机组的距离与方位角，然后根据 IEC 标准(61400-12-2:2013)中对实验机组和测风塔地理条件的要求，选择风电场测风塔附近的某一台机组作为目标实验机组，选择原则为：

- 1) 目标实验机组应为该风场距离测风塔最近机组之一，且与测风塔之间的距离 L 应为 $2D \sim 4D$ ，其中 D 为风轮直径；
- 2) 目标实验机组应处于测风塔下风向，且在风场主风向上；
- 3) 目标实验机组与测风塔间无障碍物，且地形较平坦，满足 IEC 标准(IEC-61400-12-1:2005)要求。

确定目标机组后分别考取测风塔不同高度所记录风速与风向数据，同时考取目标机组 SCADA 系统中相同时间段的运行数据。数据时间跨度和间隔应满足 IEC 标准(61400-12-2:2013)要求，为了与 IEC61400-12-1:2005 保持一致性，本算例使用 10 min 平均数据，选择 10 min 数据考虑了风速从测风塔流到风力发电机组的时间，从而保证风速和功率合理相关，同时减小了风速的湍流效应。但也允许以更短的平均值时间进行分析及报告。当使用更短平均周期的数据时，需要根据 IEC61400-12-2:2013 要求核查所应用的 NTF 的有效性。

该风场测风塔周围机组分布情况为：测风塔位于 16#机组东南侧 132.45°，距离为 726.48 m；位于 17#机组东南侧 101.12°，距离为 491.94 m；位于 18#机组东北侧 45.59°，距离为 594.8 m；具体分布位置如图 4。因 17#机组为该风场距离测风塔最近机组且处于测风塔下风向，并且也处在风场主风向上且二者海拔基本相同，因此选择该机组作为目标机组完全满足 IEC 标准。

4.2 数据同步与测风塔风速高度校正

从 17#机组 SCADA 获取某年 10 min 平均运行数据，包括风速、有功功率、发电机转速等；从测

风塔记录数据库同样提取相同时间段记录数据, 包括 50 m 风速、风向和 80 m 风速、风向; 将两部分数据通过对齐时间戳合并。由于目标机组轮毂高度为 65 m, 而测风塔风速数据只有 50 m、80 m 通道, 需要通过高度校正计算测风塔 65 m 高度风速。

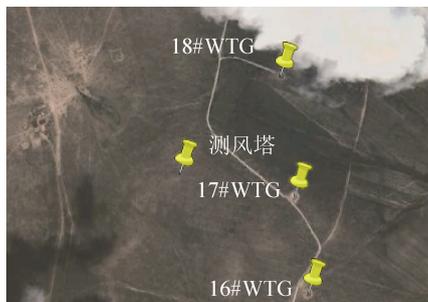


图 4 测风塔附近机组相对位置

4.3 数据筛选与初步拟合

将高度校正后测风塔风速数据和机舱风速数据按 IEC61400-12-2:2013 的要求进行数据筛选:

- 1) 剔除无效扇区数据: 基于测风塔 80 m 风向数据剔除机组与测风塔共同无效扇区 (22.9°, 153.1°) 的数据;
- 2) 剔除停机数据: 筛选 17#机组发电机并网转速(975Rpm)以上数据;
- 3) 剔除限功率数据: 根据机组运行记录剔除 17#机组限功率数据;

剔除无效数据后, 首先应用 IEC 标准方法计算 NTF, 图 3 即为目标实验机组 NTF 结果图, 图 5 为使用不分区的线性拟合方法对目标机组的处理结果, 其 NTF 数学模型表达式为:

$$Y = 0.865 X + 0.986 2 \quad (11)$$

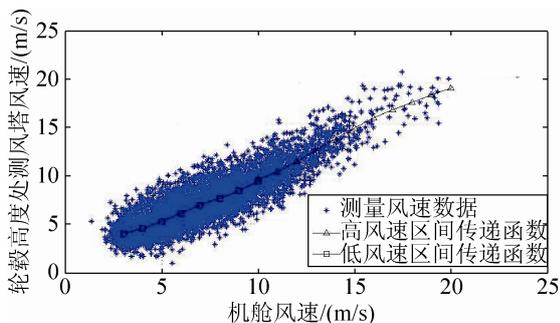


图 5 线性拟合机舱传递函数

一般认为风机运行状态下机舱风速应小于自由流风速, 即在本算例中的机舱风速应小于测风塔风速。然而, 实测数据经常出现机舱风速不降反升的现象^[10,13], 从图 5 可看出本算例中大量数据也属于这种情况。其中原因之一可能与机舱风速计与测风塔风速计未统一标定有关, 另一原因可能是机舱风速计的安装位置处在机舱周边的“增速区”^[14-15], 增速区形成是由于气流遇到边界时会发生急速变化, 部分区域的风速就会增加, 称为“壁面效应”。因而机舱风速可能高于自由流风速, 也可能低于自由流风速, 与风速水平、机舱形状、测点位置等因素有关^[11]。

4.4 分区拟合与确定机舱传递函数

将筛选后数据以额定风速为界分为高速区和低速区, 分别进行拟合计算, 目标机组分区机舱传递函数 NTF 为:

$$Y = \begin{cases} 0.005 0X^4 - 0.132 7X^3 + 1.283 3X^2 - 4.504 5X + 9.1901 & X \in [3,10] \\ 0.001 1X^4 - 0.070 8X^3 + 1.686 8X^2 - 16.162 4X + 62.671 3 & X \in [10,25] \end{cases} \quad (12)$$

图 6 为目标实验机组数据的处理结果图。分区拟合方法得到的 NTF 与线性 NTF、IEC 标准 NTF 各项统计指标比较如表 1。

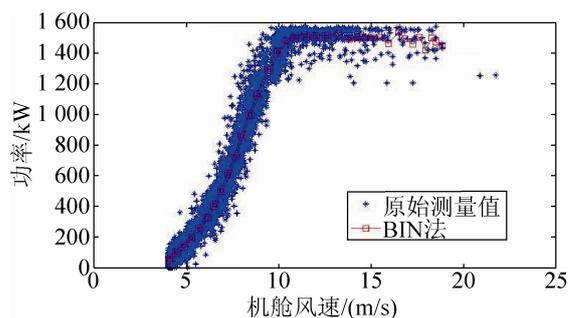


图 6 分区拟合机舱传递函数

表 1 拟合统计指标对比表

拟合方法	回归平方和 算术平方根	残差平方和 算术平方根	相关 系数	拟合 优度
IEC 拟合	102.99	201.19	0.890 2	0.792 4
线性拟合	104.89	200.20	0.885 8	0.784 6
分区拟合	102.71	201.32	0.890 8	0.793 5

由表 1 可见分区拟合法在拟合优度和相关性上都接近 IEC 标准方法, 并优于未分区间的线性拟合方法; 且其回归平方和(ESS, Explained Sum of Squares)的算术平方根也明显小于线性拟合方法。

图 7 为应用该 NTF 对机舱风速进行修正前后的功率曲线, 修正后的功率曲线散点图出现了分段的情况, 这是由于机舱传递函数由两段函数组成, 传递函数不连续所造成的。解决该问题的关键是使两段传递函数在整个风速区间连续。

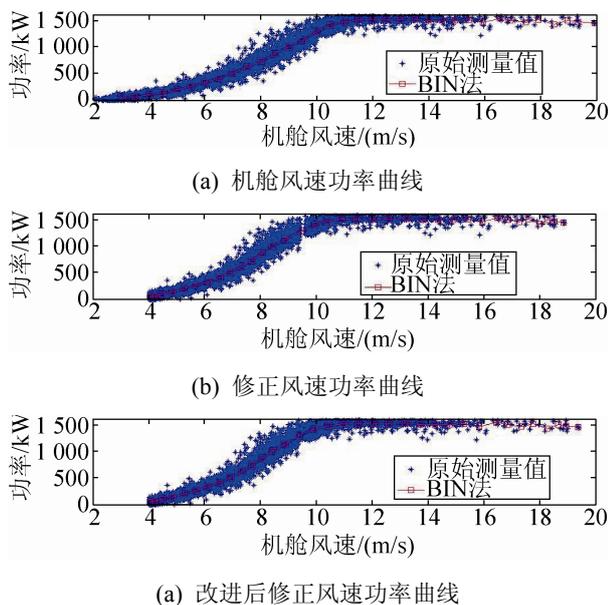


图 7 功率曲线对比图

为了克服切换扰动, 平滑功率输出, 目前已有大型风力发电机组采取在额定风速附近进行高、低风速区过渡的控制策略, 因此对分区拟合方法进行如下改进来确定最终 NTF:

- 1) 将整个风速区间先分为 3 个区间: 低风速区间、高风速区间和过渡风速区间;
- 2) 将低风速区间与过渡风速区间的风速数据合并组成低风速区数据, 而将高风速区间与过渡风速区间的风速数据合并组成高风速区数据;
- 3) 分区拟合后求取两段传递函数的交点, 然后以交点为分界点得到最终 NTF, 式(13)为对式(12)进行改进后的 NTF。

$$Y = \begin{cases} 0.0042X^4 - 0.1137X^3 + 1.1216X^2 \\ -3.9302X + 8.4761 & X \in [3, 10.15] \\ -0.0033X^3 + 0.1317X^2 - 0.6539X \\ + 6.0764 & X \in [10.15, 25] \end{cases} \quad (13)$$

图 7(c)为应用该传递函数对机舱风速进行修正后的功率曲线, 通过改进解决了传递函数不连续的问题, 与原功率曲线对比可以看出功率曲线拐点风速更接近机组额定风速, 实际切入风速也更接近机组设计值。需要说明的是:

- 1) 该修正 NTF 仅适用于该实验风场相同机型的其它机组, 其它风场相同机型机组或该风场其它机型机组需要单独确定;
- 2) 对于无过渡区控制的机组, 过渡区间范围可根据功率曲线的拐点处的散点分布情况划分;
- 3) 两段传递函数的交点还可能出现在过渡区间内或出现两个交点的情况, 对于前者可通过提高传递函数阶次或适当增大过渡区范围来调整; 后者则选取距离额定风速更近的交点作为最终 NTF 分界点。

5 结论

1) 针对风力发电机组机舱风速不能准确反映风轮前自由流风速的问题, 建立了一种基于测风塔测风数据的机舱风速修正方法, 用以绘制更加客观反映机组发电能力的功率曲线, 可为机组性能评估和优化提供指导, 也可为风电场功率预测提供依据;

2) 根据 IEC 相关标准, 利用测风塔测风数据拟合机舱传递函数进行风速修正, 可以克服理论修正方法所具有的计算偏差大、不易应用的问题, 而且在保证获得较高准确度的前提下解决了 IEC 标准方法中由于风速分区太多导致计算相对繁杂、实用性差的问题。

3) 通过采用对风速分区的高次多项式拟合算法, 能够兼顾风力发电机组两种运行方式下 NTF 的变化, 拟合优度明显优于在整个风速范围进行简单线性拟合, 同时通过引入过渡区间改进了分段 NTF 所存在的不连续问题。

由于本文从工程实际应用的角度出发, 拟合方

法采取了易于实现且已在工程实际中被广泛应用的最小二乘高阶多项式拟合, 在拟合方法上做进一步的理论创新研究和采取更加优化的数据处理方法成为下一步需要研究的重要问题。

参考文献:

- [1] 刘昊. 大型风电机组综合性能评估方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009. (Liu Hao. The study of comprehensive performance evaluation methods for large-scale wind turbine [D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2009.)
- [2] 刘永前, 高小力, 韩爽, 等. 基于修正风速的风电场等效功率特性模型研究 [J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(3): 49-54. (Liu Yongqian, Gao Xiaoli, Han Shuang, et al. Study on equivalent power characteristic model of a wind farm based on corrected wind speed [J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(3): 49-54.)
- [3] 李倩倩. 风力发电机组的功率特性测试与研究 [D]. 内蒙古: 内蒙古大学, 2011. (Li Qianqian. Wind turbine power performance test and study [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University, 2011.)
- [4] 张学智. 风力发电系统风速测算方法研究 [D]. 内蒙古: 内蒙古大学, 2014. (Zhang Xuezhong. Research of equivalent wind speed measurement for wind power system [D]. Inner Mongolia, China: Inner Mongolia University, 2014.)
- [5] 余慎思, 李征, 蔡旭. 基于风电场动态时空关系的风速分布模型研究 [J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1432-1438. (She Shensi, Li Zheng, Cai Xu, et al. Research on wind speed distribution model of wind farm based on its dynamic space-time relation [J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1432-1438.)
- [6] 曹娜, 赵海翔, 任普春, 等. 风电场动态分析中风速模型的建立及应用 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 68-72. (Cao Na, Zhao Haixiang, Ren Puchun, et al. Establish and application of wind speed model in wind farm dynamic analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 68-72.)
- [7] 舒进, 郝治国, 张保会, 等. 风电场的集群功率优化控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 10-19. (Shu Jin, Hao Zhiguo, Zhang Baohui, et al. Wind farm coordinated control for power optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 10-19.)
- [8] 田琳琳, 赵宁, 钟伟. 风力机尾流相互干扰的数值模拟 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(8): 1315-1320. (Tian Linlin, Zhao Ning, Zhong Wei, et al. Numerical simulation of wake interactions of wind turbines [J]. Acta Energetica Sinica, 2012, 33(8): 1315-1320.)
- [9] IEC 61400-12-2, Wind Turbines Part 12-2: Power Performance of Electricity Producing Wind Turbines Based on Nacelle Anemometry [S].
- [10] IEC 61400-12-1, Wind Turbines Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines [S].
- [11] 姜文玲, 冯双磊, 孙勇, 等. 基于机舱风速数据的风电场弃风电量计算方法研究 [J]. 电网技术, 2014, 38(3): 647-652. (Jiang Wenling, Feng Shuanglei, Sun Yong, et al. Study on energy loss calculation during wind power curtailment based on wind speed measured by turbine nacelle anemometers [J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 647-652.)
- [12] 杨天时. 大型风电机组综合性能评估系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011. (Yang Tianshi. Research on comprehensive performance evaluation system for large wind turbine [D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2011.)
- [13] Smith B, Link H, Randall G, et al. Applicability of Nacelle Anemometer Measurements for Use in Turbine Power Performance Tests [C]// American Wind Energy Association (AWEA) WINDPOWER 2002 Conference, Oregon, USA. USA: IEEE, 2002.
- [14] Smaili A, Masson C. On the Rotor Effects upon Nacelle Anemometry for Wind Turbines [J]. Wind Engineering (S0309-524X), 2004, 28(6): 695-714.
- [15] Ameer K, Masson C, Eecen P J. 2D and 3D Numerical Simulation of the Wind-Rotor Nacelle Interaction in an Atmospheric Boundary Layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (S0167-6105), 2011, 99(8): 833-844.