

基于 IEC 61400-12-1: 2017 的风轮等效风速研究

徐秉俊¹, 何中一², 袁野³

(1. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063;

2. 上海中认尚科新能源技术有限公司, 上海 201206;

3. 中国质量认证中心 上海分中心, 上海 200063)

摘要: 2017 版风电机组功率特性测试标准与 2005 版功率测试标准的一大改变在于风速的定义, 前者规定应基于风轮等效风速评估风机的功率特性。分析了新版标准中的风轮等效风速的定义, 提出了计算叶尖低处区域面积和叶尖高处区域面积的简化算法, 验证了两种风轮等效风速计算方法的有效性和可行性。

关键词: 风力发电机组; 功率特性测试; 风速测量

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)08-0112-03

Research on the rotor equivalent wind speed based on IEC 61400-12-1: 2017

XU Bingjun¹, HE Zhongyi², YUAN Ye³

(1. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China;

2.

3. Shanghai Branch Center, China Quality Certification Center, Shanghai 200063, China)

Abstract: A major change between the wind turbine power performance testing standards of version 2017 and version 2005 was the definition of the wind speed. In version 2017, the wind speed used for power performance evaluation was the rotor equivalent wind speed (REWS). The definition of REWS was studied, and a simplified algorithm of calculating the blade lower-tip section area and the blade upper-tip section area was proposed. The validity and feasibility of two REWS calculations were provided via examples.

Key words: wind turbine generation system; power performance testing; wind speed measurement

0 引言

国内风电行业目前依据的风电机组功率特性测试标准分别为 IEC 61400-12-1:2005^[1] 和与之等价的 GB/T 18451.2—2012^[2], 这两份标准采用安装在测风塔上近风机轮毂高度($\pm 2.5\%$)的风速计测量的风速, 评估被测风电机组的功率特性。2017 年 3 月最新发布的 IEC 61400-12-1:2017^[3], 与 2005 版相比, 主要内容发生了很大的变化, 篇幅从 90 页扩充至 261 页。最大的变化在于, 2017 版标准引入了风轮等效风速的概念, 通过测量风机风轮扫掠面高度范围内的多个高度的风速大

小, 按照加权平均的算法, 得到更精确地反映风轮扫掠面运动能通量的风轮等效风速, 据此评估被测风电机组的功率特性。

考虑到 2017 版功率特性测试标准刚刚发布, 与这一版本对应的国标的出台尚需时日, 为了便于广大风电同行更好地理解并运用最新版的功率特性测试标准, 本文致力于依据新版标准的对应章节, 详细解读风轮等效风速的定义及计算方法, 给出图示说明, 并提供了 2 个计算实例。

1 风速测量

2005 版 IEC 功率测量标准中规定风速必须

作者简介: 徐秉俊(1984—), 男, 工程师, 研究方向为电机及风力发电机组产品。

何中一(1979—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为风力发电机组及变流器产品。

袁野(1976—), 男, 工程师, 研究方向为通讯工程类产品。

使用风杯式风速计测量,风速计安装在测风塔上,风速计风杯中心离地高度应在被测风机轮毂高度的 $\pm 2.5\%$ 范围内。测风塔和被测风机的距离需在被测风机风轮直径的2~4倍的区域内。主风速计和其他气象传感器在测风塔上的安装要求也有相应的规定。

2017版IEC功率测量标准中规定风速可以使用安装在测风塔上的风速计测量,也可以使用测风塔与遥测装置(RSD)如激光雷达共同测量。允许使用的风速计除了风杯式风速计外,还可以使用超声波风速计。应根据被测风机所在的测试场地的地形是否复杂,选取合适的风速测量方式。2017版标准允许的风速测量配置方式如表1所示。

2017版IEC功率测量标准中,测风塔和被测风机的距离需在被测风机风轮直径的2~4倍的区域内,这与2005版标准中的要求一致;测风塔上气象传感器的安装要求与2005版标准有所不同,限于篇幅,这里不作深入介绍。

表1 风速测量配置

风速测量	轮毂高度 度风速	轮毂高度 度风速	风轮等 效风速	风轮等 效风速
地形类别	非复杂	复杂	非复杂	复杂
轮毂高度 测风塔	允许	允许	/	/
轮毂高度 测风塔+RSD	允许	允许	允许	/
RSD+非轮毂 高度测风塔	允许	/	允许	/
远高于轮毂高 度的测风塔	允许	允许	允许	允许

2 仅计及垂直风速梯度时的风轮等效风速

风轮等效风速是在考虑垂直风速梯度时与风轮扫掠面运动能通量对应的风速。风轮等效风速的计算需要至少测量3个高度的风速,定义如式(1)所示。

$$v_{eq} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{n_h} v_i^3 \frac{A_i}{A}} \quad (1)$$

其中: $A = \pi \times R^2$

式中: n_h ——风速测量高度的数目, $n_h \geq 3$;

v_i ——第 i 个高度测得的风速大小;

A ——风轮扫掠面积;

R ——风轮半径;

A_i ——风轮扫掠面积的第 i 个区域的面积,

A_i 与 v_i 对应。

风速测量高度的编号可以设成从低处到高处逐渐增大,也可以设成从高处到低处逐渐增大。本文中采取前一种编号方式。相应地,区域面积 A_i 的编号也从低到高逐渐增大。

记风机轮毂高度为 H , 风轮直径为 D , 半径为 $R = D/2$, n_h 个风速测量高度分别为 $h_1, h_2, \dots, h_{n_h}$, 第 i 个区域的下边界高度 z_i 和上边界高度 z_{i+1} 分别为

$$z_1 = H - R \quad (2)$$

$$z_i = \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \quad i = 2, 3, \dots, n_h \quad (3)$$

$$z_{n_h+1} = H + R \quad (4)$$

区域面积 A_i 的计算应根据 i 的大小区别对待, 当 $i = 2, 3, \dots, n_h - 1$ 时, 采用定积分方法计算, 积分函数 $c(z)$ 为高度 z 处的风轮扫掠面宽度, 即

$$c(z) = 2\sqrt{R^2 - (z - H)^2} \quad (5)$$

记 $c(z)$ 的原函数为 $g(z)$, 则有

$$g(z) = (z - H) \times \sqrt{R^2 - (z - H)^2} + R^2 \times \arctan \left[\frac{z - H}{\sqrt{R^2 - (z - H)^2}} \right] \quad (6)$$

区域面积 $A_i (i = 2, 3, \dots, n_h - 1)$ 按式(7)计算:

$$A_i = \int_{z_i}^{z_{i+1}} c(z) dz = g(z_{i+1}) - g(z_i) \quad (7)$$

区域面积 A_1 和 A_{n_h} 的计算可通过扇形面积减去等腰三角形面积, 如式(8)和式(9)所示。

$$A_1 = R^2 \times \arcsin \frac{\sqrt{R^2 - (z_2 - H)^2}}{R} - |z_2 - H| \times \sqrt{R^2 - (z_2 - H)^2} \quad (8)$$

$$A_{n_h} = R^2 \times \arcsin \frac{\sqrt{R^2 - (z_{n_h} - H)^2}}{R} - |z_{n_h} - H| \times \sqrt{R^2 - (z_{n_h} - H)^2} \quad (9)$$

当轮毂高度风速计的安装高度恰好在 H 时, 可以使用如下简单的办法计算 A_1 和 A_{n_h} 。计轮毂

高度风速计的安装高度为 $h_k = H$, 则

$$A_1 = \frac{\pi R^2}{2} - \sum_{j=2}^{k-1} A_j - \frac{A_k}{2} \tag{10}$$

$$A_{n_h} = \frac{\pi R^2}{2} - \sum_{j=k+1}^{n_h-1} A_j - \frac{A_k}{2} \tag{11}$$

根据上述算得的 A_i 以及测量得到的 v_i , 由式 (1) 即可算出仅考虑垂直风速梯度、不考虑垂直风向梯度时的风轮等效风速。

3 同时考虑垂直风速梯度和垂直风向梯度的风轮等效风速测量

当考虑垂直风速梯度和垂直风向梯度时, 与风轮扫掠面运动能通量对应的风速即为风轮等效风速。计算风轮等效风速需至少测量 3 个高度的风速和风向, 其定义如式 (12) 所示。

$$v_{eq} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{n_h} [v_i \times \cos(\varphi_i)]^3 \times \frac{A_i}{A}} \tag{12}$$

式中: φ_i ——第 i 个高度测得的风向与轮毂高度测得的风向的角度差异。

式 (12) 与式 (1) 的差别在于, 式 (12) 中引入了不同测量高度的风向与轮毂高度的风向的角度差的余弦, 相当于把不同测量高度的风速矢量的水平分量投影到与轮毂高度风速矢量的水平分量相一致的方向。与式 (1) 给出的风轮等效风速相比, 按式 (12) 计算的风轮等效风速更精确地反映了风轮扫掠面的运动能通量。2017 版功率测试标准 9.1.4 节^[3] 推荐采用式 (12) 计算风轮等效风速。

4 计算实例

给出了 2017 版功率测试标准 9.1.3.2 节^[3] 中风轮等效风速的计算实例。与标准中的描述相比, 增加了配图说明及中间计算结果。在此基础上, 给出了一组假设的不同测量高度的风向数值, 并由此按式 (12) 计算风轮等效风速。

被测风机轮毂高度 80 m, 风轮直径 100 m, 使用测风塔上 5 个不同高度的风速计和风向标测量风速和风向, 同一测量高度上的风速计和风向标的安装高度相同, 如图 1 所示。

表 2 给出了按式 (1) 计算的风轮等效风速的相关过程量, 其中 v_i 和 h_i 为测量结果, 其他均为计算结果。需要指出的是, v_i 为各个高度的 10 分

钟平均风速, v_{eq} 为与这个 10 分钟数据组对应的 10 分钟加权平均值。

假设除轮毂高度风向标之外, 其余 4 个高度的风向标测量结果与轮毂高度风向标测量结果的角度差异的余弦值分别如表 2 中 $\cos(\varphi_i)$ 栏所示。表 3 中的 5 个安装高度与表 2 中的对应相同, 表 3 中的 5 个安装高度的风速大小与表 2 中的对应相同。根据式 (12) 的计算方法, 得到的 v_{eq} (10 分钟加权平均值) 为 9.16 m/s。

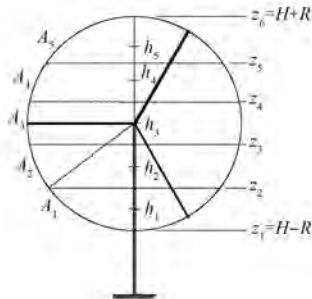


图 1 风速风向测量高度示意图

表 2 风轮等效风速计算示例 1

$v_i /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$h_i /$ m	$z_i /$ m	$z_{i+1} /$ m	$g(z_i) /$ m^2	$g(z_{i+1}) /$ m^2	$A_i /$ m^2	$A_i /$ $A / \%$
6.05	40	30	50	/	-2 808.75	1 118.24	14.24
7.81	60	50	70	-2 808.75	-993.29	1 815.46	23.12
9.24	80	70	90	-993.29	993.29	1 986.59	25.29
10.43	100	90	108	993.29	2 645.85	1 652.56	21.04
11.46	116	108	130	2 645.85	/	1 281.14	16.31
$v_{eq} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	9.38						

表 3 风轮等效风速计算示例 2

$v_i /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$h_i /$ m	$\cos$ (φ_i)	$z_i /$ m	$z_{i+1} /$ m	$A_i /$ m^2	$A_i /$ $A / \%$	$v_i \times \cos(\varphi_i) /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
6.05	40	0.95	30	50	1 118.24	14.24	5.75
7.81	60	0.97	50	70	1 815.46	23.12	7.58
9.24	80	1.00	70	90	1 986.59	25.29	9.24
10.43	100	0.98	90	108	1 652.56	21.04	10.22
11.46	116	0.96	108	130	1 281.14	16.31	11.00
$v_{eq} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	9.16						

(下转第 119 页)

度均匀性较差,拉伸后漆包线中间部位的导体直径、漆膜厚度均略小于样品端部的导体直径和漆膜厚度。

(2) 拉伸后漆包线的击穿电压小于未拉伸漆包线的击穿电压,拉伸率为 10%、15% 的漆包线的击穿电压保留率均高于 85%,而且拉伸后漆包线击穿电压的保留率高于拉伸后漆包线漆膜厚度保留率。

(3) 拉伸后漆包线的耐电晕寿命与未拉伸试样相比明显降低,拉伸率为 10% 的漆包线的耐电晕寿命保留率不足 20%,拉伸率 15% 的漆包线的耐电晕寿命与拉伸率为 10% 的漆包线相比也有一定程度的降低,但劣化率较小。

【参考文献】

- [1] 徐洪英,赵莉华,黄聃喆,等.重复方波上升时间对变频电机耐电晕寿命影响研究[J].绝缘材料,2016(4): 40-44.
- [2] 卜忠波.变频电机绝缘损坏机理及对策[J].黑龙江

科学,2014(8): 276.

- [3] 田国群.脉冲电压对变频防爆电机绝缘寿命的影响[J].电气防爆,2013(4): 17-19,22.
- [4] 变频调速专用三相异步电动机绝缘规范: GB/T 21707—2008[S].
- [5] 陈洁.变频电机绝缘早期损坏的探讨[J].电机与控制应用,2010,37(7): 64-66.
- [6] 张燕.低压大功率变频三相异步电动机绝缘结构研究[J].电机与控制应用,2014,41(11): 37-40.
- [7] 唐文进,王文进,李鸿岩,等.耐电晕涂层厚度对漆包线耐电晕性能的影响[J].绝缘材料,2010,43(4): 45-47.
- [8] 诸冉冉,张大义.漆包线耐电晕试验参数对测试结果的影响[J].电线电缆,2016(1): 32-35,40.
- [9] 徐桂城.变频漆包线耐电晕测试系统的研究与实现[D].西安: 西安电子科技大学,2013.
- [10] 林志雅,丛培海,王慧峰,等.具有高绕线性能的耐电晕漆包线的开发[J].技术与应用,2010(1): 73-75.

收稿日期: 2016-10-24

(上接第 114 页)

5 结 论

2017 版功率特性测试标准规定应基于风轮等效风速评估风机的功率特性,风轮等效风速通过在风轮扫掠面高度范围内测量多个高度的风速和风向、并且根据风轮扫掠面的运动能通量进行加权平均求得。当考虑垂直风向梯度时,计算得到的风轮等效风速更接近被测风机所在风电场的实际运行状况。结合实例,验证了两种风轮等效风速的计算方法。

【参考文献】

- [1] Wind turbines-Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, Edition 1.0: IEC 61400-12-1-2005[S].
- [2] 风力发电机组功率特性测试 GB/T 18451.2-2012[S].
- [3] Wind energy generation systems-Part 12-1: power performance measurements of electricity producing wind turbines, Edition 2.0: IEC 61400-12-1-2017[S].

收稿日期: 2017-07-20

《电机与控制应用》征稿启事

《电机与控制应用》期刊内容涉及板块:(1)电机设计与制造:电机制造新工艺、新材料、高效电机及再制造、智能制造等技术;(2)电机测试与检测:电机及系统运行的状态检测、快速信号处理、电机运行故障诊断、智能在线检测等技术;(3)电机调速与保护:变频调速、高性能调速、电机启动及运行保护、智能调速等技术;(4)并网与电驱动:风电并网控制、电动汽车驱动等技术;(5)系统节能运行:电机应用系统节能相关技术。为及时、全面刊载上述技术领域的最新技术动态,推广研发成果、工程经验及

新产品应用方案,推动研究与应用的紧密结合,欢迎广大科研技术人员及团队向本刊投稿!

列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

本刊只接受官网在线投稿系统(www.motor-abc.cn)的投稿。一经投稿,不可一稿多投,稿件确定不录用后方可另投他刊,敬请注意!