



电力行业团体标准

ICS: 27.180

T/CEEMA 002—2020

风力发电机组功率曲线验证技术规范

Technical Specification for Verification of Power Curve of Wind Turbin

2020-06-24 发布

2020-06-24 实施

中国电力设备管理协会

全国团体标准信息平台

目 次

1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.4 保证功率曲线	2
4 功率曲线验证前期准备	4
4.1 空气密度与风速频率	4
4.2 机组功率曲线确认	5
4.3 功率曲线验证数据来源	5
4.4 风电机组状态	5
4.5 风力发电机组运行要求	5
4.6 样板机选择和确认	6
5 功率曲线验证程序	6
5.1 数据采集	6
5.2 数据同步	7
5.3 数据剔除	7
5.4 使用孪生保证功率曲线反推真实风速	7
5.5 实际功率曲线	8
5.6 年发电量	9
5.7 功率曲线验证保证值计算	10
5.8 全场机组性能评价	10

前言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国中国电力设备管理协会风电专业委员会提出。

本标准由中国中国电力设备管理协会归口。

本标准主要起草单位：中国电力设备管理协会、中国质量认证中心、北京计鹏信息咨询有限公司、北京拾易技术有限公司、华能山东新能源公司、华电电力科学研究院、金风科技股份有限公司、中国华电科工集团有限公司、大有硕能实业有限公司、明阳智慧能源集团股份有限公司

本标准主要起草人：吴耿松 辛克峰 李国庆 王钊 孙荣富 周斌 杜文珍 巩家豪 邢合萍 高赞 安沙 冯雅皓 胡晓春 康巍 王英博 张瑞君 杨军 韩利坤 王瑜 丁然 刘鹏程 杨亮 许伟伟 刘庆超 魏超 王照阳 薛浩宁 高鹏

风力发电机组功率曲线验证技术规范

1 范围

本标准规定了风力发电机组（以下简称风电机组）及全场风力发电机组功率曲线验证方法。

本标准适用于并网型风力发电场。

2 规范性引用文件

下面的文件全部或部分被引用，凡是注明引用的文件，以引用的版本为准。对于没有引用日期的文件，以最新版本为准。

GBT18451.2-2012 风力发电机组功率特性测试

IEC 61400-12-1: 2005 风电机组 第 12-1 部分：风力发电机组功率特性测试

GBT/18710.2-2002 风电场风能资源评估方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本规范。

3.1 风车库

由中国电力设备管理协会发起的《风电机组功率曲线全生命周期闭环管理和数据开发》项目的简称，是一个面向全球开发的数据库。该数据库积累了风电机组型式认证、风电场设计、风电机组选型、风电场投产后功率曲线验证、风电场出质保前功率曲线验证、风电场运维治理等与风电机组功率曲线全生命周期管理相关的主要参数和指标。

3.2 认证功率曲线

在标准空气密度（ $\rho=1.225\text{kg/m}^3$ ）的条件下，风电机组的输出功率与风速的关系曲线称为该风电机组的认证功率曲线。认证功率曲线需要经过认证机构在机组型式认证过程中确认。

3.3 孪生功率曲线

《中国风电场设备管理对标评价平台》利用人工智能算法，计算得到的一条与认证功率曲线高度拟合的风速和功率之间函数关系的曲线，要求使用两条曲线计算的发电量偏差不大于 1%。

孪生功率曲线的应用将机组理论功率的计算从差值法提升到了函数法，使用函数法将大大提高机组功率计算的科学性、稳定性、易编程性，将引领风电行业进入风电机组理论功率计算效率更高的函数新时代。

3.4 保证功率曲线

在现场空气密度的条件下,风电机组的输出功率与风速的关系曲线称为该风电机组的保证功率曲线。要求使用认证功率曲线和现场空气密度推导得出。

3.5 孪生保证功率曲线

在现场空气密度的条件下的孪生功率曲线。要求使用孪生功率曲线和现场空气密度推导得出。本规范使用孪生保证功率曲线计算理论发电量,用于功率曲线验证。

3.6 SCADA 功率曲线

根据 SCADA 系统采集的风速和功率数据绘制的功率曲线。SCADA 功率曲线有时与实际功率曲线存在偏差,不适合用于功率曲线验证。

3.7 实际功率曲线

利用 SCADA 风速校正后(使用风速校正函数)实际风速,绘制风电机组功率与实际风速的关系曲线,用图形和表格表示。实际功率曲线反映了机组的真实性能,是功率曲线验证的重要依据。

3.8 功率曲线保证值

采用风频法计算发电量,使用实际功率曲线计算的发电量与使用孪生保证功率曲线计算的发电量的比值。

3.9 SCADA 风速

是指由风电场 SCADA 系统采集的风速

3.10 实际风速

是指由 SCADA 系统采集风速仪数据的还原值(此数据要还原到轮毂前真实风速数据,不采用风机制造商修正后的 SCADA 数据)。方法是在风电场中寻找一台表现最好或较好的机组作为样板机组,该机组被风电场业主和制造商共同认可为满足保证功率曲线要求的机组,在此基础上,使用样板机组 SCADA 功率曲线和孪生保证功率曲线拟合,计算出真实风速与 SCADA 风速之间的函数关系,将此函数成为为风速校正函数。并将风速校正函数用于全场机组的功率曲线验证。

3.11 风速校正函数

实际风速与 SCADA 风速之间的函数关系。

3.12 风电机组利用小时数

等效满负荷发电小时数,是指统计周期内风电机组发电量折算到其满负荷运行条件下的发电小时数。

3.13 风电场利用小时数

是指统计周期内风电场发电量折算到风电场总装机容量满负荷运行条件下的发电小时数。

3.14 风电机组能量可用率

是指统计周期内，风电机组实际发电量占理论发电量的比率。

3.15 风电场能量可用率

是指统计周期内，风电场实际发电量占理论发电量的比率。

3.16 风电机组数据可用率

是指统计周期内，风电机组可用数据（风速、功率）数量占应该采集数据总量的比率。

3.17 风电场数据可用率

为场内单机数据可用率的平均值

3.18 孪生额定风速

风电机组孪生功率曲线对应的额定风速。

3.19 外推功率曲线

用估计方法对测量功率曲线从测量的最大风速到切出风速的延伸。

3.20 湍流强度

风速标准偏差与平均风速的比值，在特定时间内，由相同数据组中的测量水平风速样本决定。

3.21 区间法

将测试数据按照参数间隔分组的数据处理方法。通常用于风速区间，但也可用于其它参数。

注 1：在每一个区间内，记录数据集或采样的数目和总和，计算每一个区间内的平均值。

3.22 机舱风速（风速仪测量风速）

在风电机组机舱顶或风电机组前方测量的水平风速。

3.23 孪生功率

利用孪生功率曲线计算的机组功率。

3.24 标准空气密度

指海平面空气密度，数值为 $1.225\text{kg}/\text{m}^3$ 。

3.25 现场空气密度

指风电项目现场的空气密度。

3.26 空气密度系数

现场空气密度/标准空气密度。

3.27 中国风电场设备管理对标平台

是中国电力设备管理协会风电专业委员会组织开展的风电场设备管理对标评价活动的大数据平台，平台采用大数据和人工智能技术，利用风电场上传的实时数据，计算出风电场相关设备管理指标，并实现风电场对标的目的。对标评价指标采用单机法计算，风电场指标为风电场内所有单机指标的平均值。单机指标计算依据风电机组的风速和有功功率两个数据，将风机划分为数据中断、正常运行、限负荷运行、停机、待机 5 个状态；统计每个状态的持续时间、理论发电量、实际发电量；计算出平均风速、数据可用率、利用小时、机组可用率、标准能量可用率、限负荷损失率、停机损失率等共 7 项基本统计指标，供风电场设备管理对标评价使用。

4 功率曲线验证前期准备

4.1 空气密度与风速频率

一般建议使用《项目可研报告》中的现场空气密度和风速频率作为功率曲线验证的计算依据。也可使用现场测量数据计算空气密度，方法如下：

采集数据标准化到标准空气密度（海平面空气密度 1.225kg/m^3 ）条件或任意现场空气密度下时使用式（1）和式（2），当实际空气密度在 $1.225\text{kg/m}^3 \pm 0.05\text{kg/m}^3$ 范围内时，无需把空气密度标准化为实际平均空气密度。

$$\rho_{10\min} = \frac{1}{T_{10\min}} \left[\frac{B_{10\min}}{R_0} - \phi P_w \left[\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right] \right] \quad (1)$$

式中：

$\rho_{10\min}$ ——推导出的 10min 内平均空气密度；

$T_{10\min}$ ——实测 10min 得到的平均绝对气温；

$B_{10\min}$ ——实测 10min 得到的平均气压；

R_0 ——干燥空气的气体常数 $287.05\text{J}/(\text{kgK})$ ；

ϕ ——相对湿度(范围从 $0 \sim 1$)；

R_w ——水蒸汽的气体常数 $[461.5\text{J}/\text{kg K}]$ ；

P_w ——水蒸汽压力 $[\text{Pa}]$ ；

$P_w = 0.0000205e^{0.0631846T}$ ，其中，蒸汽压力 P_w 取决于平均气温 T $[\text{K}]$ 。

温度、气压、和湿度测量应该在环境温度（即非机舱内部条件）下进行。如果气压传感器装在

风力发电机组上，它应安装于不受叶片或其它设备如通风系统等影响的位置。

温度传感器（和湿度传感器）应该装在轮毂高度 10m 范围内，安装位置或在风力发电机组上或在 4 倍风轮直径以内的测风塔上。温度传感器应测量外部环境温度，而不受风力发电机组设备如通风系统或加热系统的影响。如果不测湿度，高温时需要对湿度进行修正，公式 2 中取 $\phi=0.5$ 。

气压计应该装在风力发电机组 5 km 范围内，且与机舱功率曲线测量系统在 10 min 内同步。如果气压计没有安装在相对海平面的风轮中心位置高度，需要根据 ISO 2533 修正到风轮中心高度。温度信号的合成不确定度应该小于 3 °C，气压的合成不确定度应小于 10 hPa。

4.2 机组功率曲线确认

4.2.1 认证功率曲线确认

通过《风车库》查询机组型式认证报告及相关信息，得到认证功率曲线数据，并与制造商确认。

4.2.2 保证功率曲线确认

按照现场空气密度计算保证功率曲线，与风电场提供的保证功率曲线对比，确认保证功率曲线的准确性。如有差异，需项目业主和制造商进一步确认。

4.2.3 孪生功率曲线确认

通过《风车库》查询机组孪生额定风速，计算孪生功率曲线，确认使用孪生功率曲线和使用认证功率曲线计算的发电量偏差小于 1%。

4.2.4 孪生保证功率曲线确认

按照现场空气密度计算孪生保证功率曲线，确认孪生保证功率曲线与确认的保证功率曲线计算的发电量偏差小于 1%后。使用孪生保证功率曲线进行功率曲线验证。

4.3 功率曲线验证数据来源

将风电场 10 分钟风速和功率数据接入《中国风电场设备管理对标评价平台》，并保证数据传输的可靠性。

4.4 风电机组状态

《中国风电场设备管理对标评价平台》将风电机组运行状态划分为数据中断、停机、待机、限负荷运行和正常运行 5 个状态。

4.5 风力发电机组运行要求

在功率曲线验证期间，风电机组应按照其运行手册中的规定正常运行，保证机舱风速仪在检验合格期之内，同时风电机组的配置不能改变。验证期间，可对风电机组进行正常维护，但应在测试

日志中记录。任何特殊维护操作，如为了保证良好的功率特性所进行的经常性叶片清洗都应特别注明。默认情况是不进行此类特殊维护，除非测试开始前签约双方有约定。

4.6 样板机选择和确认

使用《中国风电场设备管理对标评价平台》中的人工智能算法寻找功率曲线满足投标要求的机组，结合风电场风机布置图，以及现场实地踏勘情况，确定样板机。

样板风机（以下简称风机）的选取还应考虑如下几点：

- a) 风机尽量位于风电场边缘位于主风向上风向位置；
- b) 风机在测试期间故障率较少，标准能量可用率高；
- c) 风机叶片不应有影响功率曲线的缺陷；
- d) 风机其他部件完好，运行稳定可靠；
- e) 风机主风向上风向无明显障碍物；
- f) 认证功率曲线满足投标要求；
- g) 风资源良好，湍流强度等满足要求；
- h) 风机无因自身原因限负荷情况，或应将此情况剔除；
- i) 样板机的选择要经项目业主和机组制造商共同确认。并出具确认函。

5 功率曲线验证程序

5.1 数据采集

利用《中国风电场设备管理对标评价平台》采集全场风力发电机组控制系统（即，SCADA 系统）风速、功率 10 分钟平均值。

与现场空气密度相关的大气压力、环境温度、相对湿度等数据（可引用风电场的前期可行性研究报告中的数据或现场实际测量）。

风力发电机组控制系统（即，SCADA 系统）可以用来采集数据，只要它符合要求并能够对信号进行溯源及处理。

数据采集到的任何影响或运行特性都应被记录。如下事项需要核查：

- a) 数据采集系统对数据进行的任何平均或滤波应被详细记录，用以评估它对数据质量和数据不确定度的影响；
- b) 应详细记录任何数据的内部校准、应用偏移或修正，从而无需在数据处理过程中再次重复。

5.2 数据同步

数据接入《中国风电场设备管理对标平台》的目的就是保证数据同步。如果数据来自多个数据采集系统，所有系统在整个验证期间应保持同步。风速和功率两个数据采集同步的最大时间差应小于平均时间的 1%。任何违反同步要求的事件应记录在案。

5.3 数据剔除

一些数据组应予以剔除以保证：分析和结果与风电机组的正常运行条件相吻合；风电机组被破坏的或不精确的数据予以剔除。

下面情况下的数据组应从数据库中剔除：

- a) 风速以外的其他外部条件超出风电机组的运行范围；
- b) 风电机组不在线（数据中断状态）；
- c) 由于外部因素如电网引起风电机组限功率，这些在现场文件中应当记录，例如日志或风电机组状态信号；
- d) 叶片结冰或机舱覆雪；
- e) 风速超过切出风速；
- f) 风电机组故障引起机组停机；
- g) 风电机组手动停机或测试或维护模式运行；
- h) 风速波动异常数据

其它任何筛选标准都应在报告中明确说明。所有由于这些标准剔除的数据应记录在案。

测量期间特殊运行条件（例如由灰尘，盐，昆虫和结冰引起的叶片高粗糙度）或大气条件（如降雨，湍流强度，风剪切）下所收集的子数据库可以被选定为特殊数据库。如果电网频率在 600s 平均时间内变化超过 1%，则应当测量电网频率。电网频率变化超过正常电网频率 1%时的数据应该分开分级或被忽略。

5.4 使用孪生保证功率曲线反推真实风速

如果对精度要求较高，推荐使用专业机构提供的孪生功率曲线。

公式如下：

$$P=aV^2+bV+c$$

式中：

P：孪生功率曲线功率（理论功率）

V：孪生功率曲线风速（真实风速）

- a: 二次项系数。
- b: 一次项系数。
- c: 常数项。

也可以通过《风车库》查询被测机型的孪生额定风速 v_a ，并计算孪生功率曲线。

公式如下：

$$10 \cdot P / P_r = 0.17(10 \cdot V / v_a)^2 (10 \cdot V / v_a - 0.79(10 \cdot V / v_a) + 0.9)$$

式中：

v_a : 孪生额定风速

P: 孪生功率曲线功率（理论功率）

$10 \cdot V / v_a$: 风速系数

V: 孪生功率曲线风速（真实风速）

P_r : 额定功率

计算得到孪生功率曲线 $P=f(V)$

再按照现场空气密度计算孪生保证功率曲线，并与现场空气密度下的保证功率曲线比较。

孪生保证功率曲线是使用孪生功率曲线和现场空气密度计算孪生保证功率曲线。

通过样板机组 SCADA 功率曲线与孪生保证功率曲线拟合，建立实际风速与 SCADA 风速的相关关系，寻找 SCADA 风速的校正函数，公式如下：

$$V = a \cdot v + b$$

式中：

V: 真实风速

v: 采集的 SCADA 风速

a: 线性函数的斜率

b: 线性函数的截距

5.5 实际功率曲线

实际功率曲线是利用机组实际风速和功率的数据组用“区间法”确定的，即用 1.0m/s（或 0.5m/s）的区间，依据公式（6）（7）对每一风速区间计算规格化后的平均风速和规格化后的输

出功率平均值得到：

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j}$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j}$$

式中：

V_i : 第 i 个区间规格化平均风速；

$V_{n, i, j}$: 第 i 个区间数组 j 规格化风速；

P_i : 第 i 个区间规格化平均输出功率；

$P_{n, i, j}$: 第 i 个区间数组规格化输出功率；

N_i : 第 i 个区间内 10min 数组的个数。

5.6 年发电量

年发电量是通过采用实际功率曲线对风速频率分布（数据来源于《项目可研报告》）进行估计得到的。参考风速频率分布应采用与形状因数为 2 的韦伯尔分布完全相同的瑞利分布。当轮毂高度年平均风速分别为 4、5、6、7、8、9、10 和 11 m/s 时，可根据下式估算年发电量为：

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right)$$

式中：

AEP : 年发电量；

N_h : 一年中的小时数，约为 8760 小时；

N : 区间的个数；

V_i : 第 i 个区间规格化平均风速；

P_i : 第 i 个区间规格化平均输出功率。

$$F(V) = 1 - \exp \left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}} \right)^2 \right)$$

式中：

$F(V)$: 风速的瑞利累积概率分布函数；

V_{ave} : 轮毂高度的年平均风速；

V: 实际风速。

求和初始化: 设置 V_{i-1} 等于 $V_{i-0.5}$ m/s, P_{i-1} 等于 0.0kW。

5.7 功率曲线验证保证值计算

风电机组功率曲线保证值计算方法:

$$\text{保证值 (\%)} = (\text{实测年发电量} / \text{孪生保证年发电量}) \times 100\%$$

$$\text{实测年发电量} = \text{风频分布值} \times 8760 \times \text{实际功率曲线值}$$

$$\text{保证年发电量} = \text{风频分布值} \times 8760 \times \text{孪生保证功率曲线值}$$

5.8 全场机组性能评价

按照测试机组的计算方法计算各机组相关指标如下表:

表 1 机组性能评价表

机组/指标	1#	2#	3#	4#	5#	6#
排名							
孪生保证功率曲线保证值 (%)							
制造商保证功率曲线保证值 (%)							
数据可用率							
机组可用率 (%)							
能量可用率 (%)							