

# 基于温度归一化的风电机组发电量模型研究

刘金曼<sup>1</sup>, 王海云<sup>1</sup>, 叶 峰<sup>2</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆风能研究所, 乌鲁木齐 830047)

**摘 要:** 针对环境温度影响风电机组的输出功率及发电量计算的问题,通过分析风速的分布建立威布尔分布模型;分析温度对风电机组输出功率的影响,推导出温度归一化的功率折算公式,将功率折算到统一基准温度下,提出基于温度归一化的风电机组发电量计算模型。以新疆某风电场为算例,分别计算出4台风电机组的发电量,将温度归一化模型和传统算法计算的发电量与实测 SCADA 数据进行对比,验证温度归一化模型计算发电量的精确性。

**关键词:** 发电量; 威布尔分布; 温度归一化; 功率折算

**中图分类号:** TK81

**文献标识码:** A

## 0 引 言

由于环境污染、能源短缺,风能等清洁能源的开发已成为世界各国的战略<sup>[1]</sup>。近年来风电发展迅猛,风电机组的装机容量逐年增加<sup>[2,3]</sup>,风电机组的发电量对风电场的运行效益、风电机组的性能评估有着重要意义,同时是风电场选址的重要依据<sup>[4,5]</sup>。因此,风电机组发电量的精确计算十分重要。

目前,国内外鲜有涉及到温度影响下风电机组的发电量模型的研究。文献[6,7]提出多种计算发电量的软件,如法国美迪公司的 Meteodyn WT,英国的 WindFarmer 以及丹麦的 WindPRO。文献[8]提出对于风频分布不均匀不能满足威布尔分布的风电场,采用单机容量修正法计算发电量。文献[9]采用大气模式结合 CFD 降尺度技术,分析了极端气温下对发电量的折减。文献[10]分析环境温度对内燃机发电量的影响,计算得出环境温度对发电量具有负效应。文献[11,12]提出在风电机组的功率曲线受环境温度以及大气压强的影响,但未涉及温度对发电量计算的深入分析。

综合上述文献,在分析温度对风电机组功率影响的基础上,本文提出基于温度归一化的风电机组发电量模型。以新疆某风电场的实测数据为基础,

使用该模型计算理论发电量,将计算结果和传统算法计算结果与风电场 SCADA 数据进行对比,验证该发电量模型的准确性。

## 1 风电机组发电量计算模型

对于发电量的计算,常用 1 a 的风资源数据进行分析,建立风速频率分布的数学模型拟合实际的风频分布,然后与风电机组的实际输出功率函数积分,以此求解风电机组的理论发电量  $W$ 。如式(1)所示。

$$W = t \int_{v_i}^{v_o} f(v) P(v) dv \quad (1)$$

式中,  $t$  ——发电时间, s;  $v_i$ 、 $v_o$  ——切入、切出风速, m/s;  $v$  ——风速, m/s;  $f(v)$  ——风速概率分布密度函数;  $P(v)$  ——风电机组的功率曲线函数。

本文使用美国 Origin Lab 公司推出的一款数据分析和绘图软件 Origin,画出风速与功率的变化散点图,对功率的散点图进行曲线拟合并求拟合功率函数的多项式,可以根据需要拟合高阶的功率多项式。

$$P_v = A_0 + A_1 v + A_2 v^2 + A_3 v^3 + \cdots + A_n v^n \quad (2)$$

式中,  $P_v$  ——拟合的功率函数, kW;  $A_i (i=0, 1, \cdots, n)$  ——风速参数。

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点实验室项目(2016D03021); 国家自然科学基金(51667020); 新疆维吾尔自治区科研机构创新项目(2015009); 新疆维吾尔自治区重点研发任务(2016B02019)

通信作者: 王海云(1973—), 女, 硕士、教授, 主要从事可再生能源发电与并网技术方面的研究。327028229@qq.com

## 2 基于威布尔分布的风速概率密度模型

目前,拟合风速频率的概率分布模型中最为常用的模型有皮尔逊分布模型、瑞利分布模型及威布尔分布模型等<sup>[13]</sup>。本文拟合风速概率分布采用威布尔分布模型。其风速概率分布密度函数为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

式中,  $k$  ——威布尔形状参数;  $c$  ——威布尔尺度参数。

应用威布尔分布模型分析风速分布情况,必须确定威布尔分布的双参数  $k$  和  $c$ 。2 个参数的计算方法有最小二乘法、距法和极大似然法等。本文使用软件 WindPRO 来计算威布尔分布参数。该软件是由丹麦的 EMD 公司开发的软件,主要用于风电场的风资源评估,并且能准确的计算出威布尔双参数。其过程:首先在风资源地图模块 ATALS 中计算地形特点,其次将测风塔的测风统计数据经过处理分析后以符合 WindPRO 的格式导入,最后软件将会计算出各个风向扇区的威布尔形状参数  $k$  和尺度参数  $c$ 。

## 3 考虑温度归一化的风电机组功率模型

风电机组发电是将风能转换为电能的过程,风电机组的风轮转动从空气中吸收风能,将风能转化成风电机组的功率。风电机组的功率为:

$$P = \frac{1}{2} C_p A \rho v^3 \quad (4)$$

式中,  $P$  ——风轮输出的功率, W;  $C_p$  ——风轮的功率系数;  $A$  ——风轮的扫掠面积,  $\text{m}^2$ ;  $\rho$  ——空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

风电机组的生产厂商提供的标准功率曲线与实际风电场中运行的功率曲线存在很大的差异。厂商所提供的环境条件:温度为  $15^\circ\text{C}$ , 标准大气压是  $1013.3 \text{ hPa}$ , 空气密度为  $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。风电场的运行环境条件变化莫测,尤其是北方海波较高、气候干燥的地区,环境温度对风电机组输出功率的影响不可避免也不能忽略。对于干燥地区可忽略湿度的影响,主要考虑温度因素。干空气密度为:

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{T} \times \frac{p}{0.1013} \quad (5)$$

式中,  $\rho_0$  ——压力为  $0.1013 \text{ MPa}$  状态下干空气的密度,  $\rho_0 = 1.293 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $p$  ——绝对压力,  $\text{MPa}$ ;  $T$  ——温度,  $\text{K}$ 。

对所有气体系统,有克拉珀龙方程:

$$pV = \nu RT \quad (6)$$

式中,  $V_1$  ——空气体积,  $\text{m}^3$ ;  $R$  ——气体常数,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $\nu$  ——物质的量。

空中气体是受力平衡的,受到向上的压力与向下的重力平衡相等,可得:

$$-dp \times s = dm \times g = dz \times S \times \rho \times g = dz \times s \times \frac{p\mu}{RT} \times g \quad (7)$$

消去式(7)左右无量纲并对公式变形可得:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\mu g \times dz}{RT} \quad (8)$$

对式(8)两边积分,可得:

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = \int_0^z -\frac{\mu g \times dz}{RT} \quad (9)$$

式中,  $p_0 = 0.1013 \text{ MPa}$ ;  $\mu$  ——空气的摩尔质量,约为  $0.029 \text{ kg}/\text{mol}$ ;  $z$  ——测温高度,  $\text{m}$ 。

由式(9)得出大气压强公式:

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu g z}{RT}} = 0.1013 \times e^{-\frac{0.029 \times 9.8 \times z}{8.314 \times T}} = 0.1013 \times e^{-0.034 \times \frac{z}{T}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(5),得出空气密度与环境温度的关系式为:

$$\rho = (353.05/T) e^{-0.034(z/T)} \quad (11)$$

可看出空气密度与温度成反比,即温度越高,空气密度越低,功率越低。考虑温度对功率的影响,本文提出将功率折算到某一基准温度下。由密度与功率的正比关系推导出式(12)。

$$P_0 = P \frac{(353.05/T_0) e^{-0.034(z/T_0)}}{(353.05/T) e^{-0.034(z/T)}} \quad (12)$$

采用 SCADA 系统分析了新疆某风电场风电机组 G71 的一年数据下的功率曲线,且该风电机组的额定功率为  $1.5 \text{ MW}$ 。以每 10 分钟为间隔记取数据,将一年的实测数据提取出来,画出功率、风速及温度变化关系的散点图,如图 1 所示。

从图 1 可看出功率曲线受风速和温度的影响,当风速相同时,温度不同功率也会不同。由式(4)和式(11)分析得知:环境温度影响空气密度,空气

密度影响风电机组输出功率。环境温度越低,空气密度会越大,风电机组的功率会越大。而通过的温度归一化将功率折算在统一基准温度下,也就是将三维立体图投影到功率风速的二维平面上,这样可以减少温度的影响,方便拟合功率风速的关系函数,使功率和风速的变化曲线更加标准化。

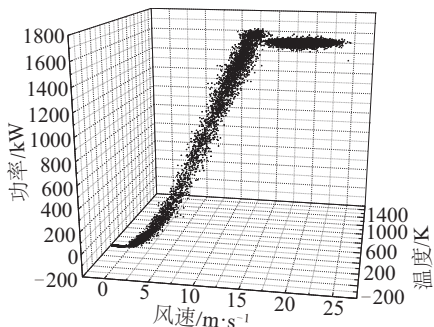


图1 风电机组的功率曲线散点图

Fig. 1 The chart of scatter plot of the wind turbines power curve

## 4 算例分析

### 4.1 威布尔分布参数

本文采集新疆某风电场 2015 年的 SCADA 数据以及测风塔的测风数据。经过数据的分析与处理,删除错误数据保留有效数据。将数据导入到 WindPRO 软件中对威布尔分布参数进行求解,求得威布尔参数  $k$  和  $c$  分别为 1.3986 和 8.504,将参数代入式(3)可得到风速分布的概率密度函数:

$$f(v) = \frac{1.3986}{8.504} \left( \frac{v}{8.504} \right)^{0.3986} e^{-\left( \frac{v}{8.504} \right)^{1.3986}} \quad (13)$$

### 4.2 温度归一化

以新疆某风电场风电机组 G71 一年的 SCADA 数据为例,根据测风塔的温度数据,计算出该风电场的年平均温度为 7.8 °C,测风塔的测温高度  $z$  取 50 m。从 SCADA 数据中抽出几组数据,将  $T = 7.8$  °C,  $z = 50$  m 代入到功率折算公式(12)中,计算不同温度下的功率折算。折算结果如表 1 所示。从表 1 可看出同一风速,不同温度时,功率不同;并且当风速一定时,温度越高,功率越低。当实际温度高于 7.8 °C 时,折算后的功率大于实际功率;当温度低于 7.8 °C 时,折算后的功率小于实际功率。

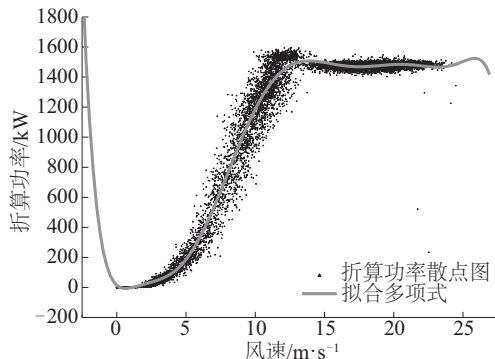
表1 功率的折算

Table 1 Power conversion

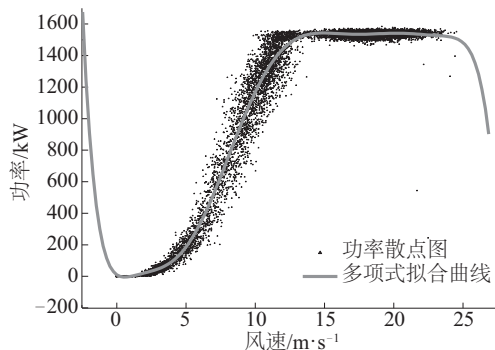
风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	功率/ $\text{kW}$	折算后功率/ $\text{kW}$
7.83	15.1	688.05	705.83
7.83	13.8	1035.42	1057.41
10.41	16.0	1098.21	1130.08
10.41	12.0	1334.92	1354.76
10.41	10.0	1493.86	1505.49
17.60	-2.9	1563.93	1504.69
17.60	-1.3	1551.11	1501.15
17.60	5.8	1510.09	1499.39
7.81	16.6	661.56	682.17
7.92	16.8	560.72	578.56

### 4.3 虑及温度归一化的风电机组发电量模型分析

通过式(12)将 SCADA 系统监测的功率折算到年平均温度下,使用软件 Origin 分别画出考虑温度归一化和未考虑温度归一化的功率变化散点图,然后对图形进行功率曲线的拟合以及多项式拟合,如图 2 所示。



a. 考虑温度归一化



b. 不考虑温度归一化

图2 考虑和不考虑温度归一化的功率曲线

Fig. 2 The power curve based on the with and without considering temperature normalization

从图 2 可看出,温度归一化的功率曲线点更为集中,拟合的曲线更加平坦。从图 2b 可看出,切入风速在 2.5 m/s,风电机组的功率为 14.3 kW;而图 2a 切入风速等于 2.0 m/s 时,风电机组功率等于 15 kW;图 2b 的额定风速等于 14.0 m/s,风电机组功率等于 1500 kW,切出风速等于 26.0 m/s;而图 2a 的额定风速等于 13.3 m/s 时,对应额定功率 1500 kW,切出风速约为 26.0 m/s。风电机组的切入风速是系统开始发电的最小风速;从最小风速到额定风速之间,风电机组产生的功率随着风速的增加而增大;当风速达到额定风速以后,风速再增加,风电机组始终保持以额定功率饱和发电;当风速继续增大至高出切出风速时,风电机组将停机以保护风电机组叶轮和传动系统免遭损坏。

使用软件 Origin 分别对图 2 做风电机组的功率高阶多项式拟合,拟合结果为:

$$P_{(v)} = 10.87064 - 63.43908v + 88.81065v^2 - 38.4576v^3 + 9.37254v^4 - 1.16288v^5 + 0.07957v^6 - 0.00307v^7 + 0.0000628v^8 - 0.000000532v^9 \quad (14)$$

$$P_{T_{(v)}} = 13.87558 - 80.43713v + 99.90548v^2 - 46.00619v^3 + 10.94394v^4 - 1.33962v^5 + 0.09073v^6 - 0.00346v^7 + 0.00007v^8 - 0.000000584v^9 \quad (15)$$

将式(13)、式(14)代入式(1)可得到未考虑温度的发电量计算公式:

$$W = t \int_{2.5}^{26} \frac{1.3986}{8.504} \left(\frac{v}{8.504}\right)^{0.3986} e^{-\left(\frac{v}{8.504}\right)^{1.3986}} P(v) dv \quad (16)$$

将式(13)和式(15)代入式(1)得到风电机组温度归一化后的发电量的计算公式:

$$W = t \int_{2.5}^{26} \frac{1.3986}{8.504} \left(\frac{v}{8.504}\right)^{0.3986} e^{-\left(\frac{v}{8.504}\right)^{1.3986}} P_{T_{(v)}}(v) dv \quad (17)$$

分别计算虑及温度归一化和未考虑温度情况的年发电量,计算的理论发电量肯定比实际监测发电量大,是由于多种确定因素和不确定因素的影响,对实际发电量有一定的折减。在风电场实际运行中风电机组的可利用率以及叶片污染或结冰,运行中控制的滞后,功率曲线的拟合误差以及威布尔参数的误差以及其他特殊区域气候存在不确定因素都对发电量有很大损耗<sup>[14]</sup>。综合损耗会高达 80%。本文分别对 4 台风电机组 G69、G70、G71、G72 的理论年发电量进行计算,并进一步计算环境温度对发电量计算的影响系数,计算结果如表 2 所示。

从表 2 可看出,虑及温度的归一化所计算的理论年发电量小于未考虑温度所计算的理论年发电量,虑及温度归一化的风电机组发电量模型所计算的年发电量与风电场 SCADA 系统监控的年发电量更为接近;进一步,计算出环境温度对发电量计算的影响系数约等于 0.95,更能说明温度对风电机组的发电量影响很大。因此本文提出的虑及温度归一化的风电机组发电量模型可以更好地计算风电机组的发电量。

表 2 发电量和温度影响系数

Table 2 Power generation and temperature influences coefficient

机型	SCADA 监测的 发电时间/s	SCADA 监测的 发电量/MW	温度归一化后的 发电量/MW	不考虑温度的 发电量/MW	环境温度 影响系数
G71	6733.6	5060.440	6196.18	6512.02	0.951
G72	7607.7	5473.878	6887.37	7254.32	0.949
G69	7391.7	5039.262	6789.74	7123.41	0.953
G70	7437.9	5233.911	6803.24	7198.97	0.945

## 5 结 论

本文在分析温度对功率影响的基础上,建立基于温度归一化的风电机组的发电量模型,并以新疆某风电场为算例,分别计算 4 台风电机组的年发电量,将该模型计算的年发电量和传统算法计算的年

发电量与风电场 SCADA 系统监测的年发电量进行对比。结果表明本文提出的基于温度归一化的风电机组发电量模型所计算的发电量小于传统算法计算的结果,该模型计算的年发电量更接近风电场 SCADA 系统实测的年发电量,验证了温度对年发电量计算的影响,证明该模型可降低温度对理论年发



电量计算的误差,能较精确地计算风电机组的年发电量。

### [参考文献]

- [1] 潘 媛,李 鹏. 国务院参事室可再生能源产业发展调研会纪实(2)——风能篇[J]. 太阳能, 2007, (3): 2—6.
- [1] Pan Yuan, Li Peng. Documentary of the Counselors' Office of the State Council meeting about researching on the development of renewable energy industry [J]. Solar Energy, 2007, (3): 2—6.
- [2] 蒋 程,刘文霞,张建华,等. 含电池储能风电场的发电系统风险评估[J]. 太阳能学报, 2014, 35(2): 207—213.
- [2] Jiang Cheng, Liu Wenxia, Zhang Jianhua, et al. Risk assessment of generation systems of wind farm with battery energy storage [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2014, 35(2): 207—213.
- [3] 黄 杨,陈红坤,回俊龙,等. 考虑风电接纳能力约束的风机装机容量优化[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2015, 48(6): 842—847.
- [3] Huang Yang, Chen Hongkun, Hui Junlong, et al. Wind power capacity optimization is accommodation of wind power constraints [J]. Engineering Journal of Wuhan University: Engineering Science Edition, 2015, 48(6): 842—847.
- [4] Wilkinson M R, Spinato F, Tavner P J. Condition monitoring of generators & other subassemblies in wind turbine drive trains [A]. IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives [C], Cracow, Poland, 2007, 388—392.
- [5] Costa A, Crespo A, Navarro J, et al. A review on the young history of the wind power short-term prediction [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(6): 1725—1744.
- [6] 杨迎超,刘宏昭,原大宁,等. 测风数据处理与风资源评估[J]. 太阳能学报, 2012, 33(10): 1661—1666.
- [6] Yang Yingchao, Liu Hongzhao, Yuan Daning, et al. Data processing in anemometry and wind resource assessment [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2012, 33(10): 1661—1666.
- [7] 李 雪,李桂敏,李伟宏,等. WEPAS和WAsP在复杂地形条件下的适应性[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(10): 87—92.
- [7] Li Xue, Li Guimin, Li Weihong, et al. Adaptability of WEPAS and WAsP software in complicated terrain conditions [J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(10): 87—92.
- [8] 王 丹,孙昶辉. 风电场发电量计算的物理模型[J]. 中国电力, 2011, 44(1): 94—97.
- [8] Wang Dan, Sun Xuhui. Annual energy production calculation in wind farm based on physical model [J]. Electric Power, 2011, 44(1): 94—97.
- [9] 马文通,朱 蓉,李 凯,等. 哈密东南部风电项目极端气温导致的发电量折减与不确定性分析[J]. 风能, 2014, (2): 84—88.
- [9] Ma Wentong, Zhu Rong, Li Kai, et al. Analysis of production loss and uncertainty due to extreme temperature in Southeastern Hami area wind power project [J]. Wind Energy, 2014, (2): 84—88.
- [10] 刘景龙,袁本雄,齐 伟. 环境温度对燃气发电能力的影响分析[J]. 山东化工, 2015, 44(14): 117—119.
- [10] Liu Jinglong, Yuan Benxiong, Qi Wei. The influence of ambient temperature on electric power of gas turbine [J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(14): 117—119.
- [11] 韩建辉. 研究影响风电机组实际运行功率曲线的相关因素分析[J]. 科技创新导报, 2015, (29): 88—90.
- [11] Han Jianhui. Analysis of the related factors affecting the actual operating power curve of wind turbine [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, (29): 88—90.
- [12] 杨 刚,陈 鸣. 一种有效计算风机发电量的新方法[J]. 华东电力, 2008, 36(7): 12—15.
- [12] Yang Gang, Chen Ming. An effective method for calculating power generation quantity for wind turbines [J]. East China Electric Power, 2008, 36(7): 12—15.
- [13] 姚国平,余岳峰,王志征. 如东沿海地区风速数据分析及风力发电量计算[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 12—14.
- [13] Yao Guoping, Yu Yuefeng, Wang Zhizheng. Wind data analysis and wind power generation calculation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4): 12—14.
- [14] 李 丽,李玉坤,刘 玮. 国外风电场不同发电量计算方法探讨[J]. 西北水电, 2015, (2): 87—90.
- [14] Li Li, Li Yukun, Liu Wei. Different foreign wind farm capacity calculation method [J]. Journal of Northwest Hydroelectric Power, 2015, (2): 87—90.

## MODEL RESEARCH OF POWER GENERATION QUANTITY OF WIND TURBINE BASED ON TEMPERATURE NORMALIZATION

Liu Jinman<sup>1</sup>, Wang Haiyun<sup>1</sup>, Ye Feng<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Xinjiang Wind Energy Research Institute, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** Aiming at the effect of ambient temperature on output power and calculation of power generation quantity of wind turbine, the Weibull distribution model was set up through analysis of wind speed distribution. The effect of temperature on output power of wind turbine was analyzed, the power conversion formula with temperature normalized was derived, in which the power was calculated in a uniform reference temperature, the calculation model of power generation quantity of wind turbine was proposed based on temperature normalization. Taking a certain wind farm in Xinjiang as an example, the power generation quantity of four wind turbine were respectively calculated, the calculated power generation quantity based on temperature normalization model and traditional algorithm were compared with the measured SCADA data, verified the accuracy of power generation quantity calculated by temperature normalization model.

**Keywords:** power generation quantity; Weibull distribution; temperature normalization; power conversion