

风力发电预测文档

一、风场环境建模

步骤1：风切变修正模型（Logarithmic Wind Profile）

公式：

$$v_h = v_{ref} \cdot \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)}$$

参数：

1. v_h : 表示高度为 h 处的平均风速。即特定高度 h 上的风速值。
2. v_{ref} : 是参考高度 z_{ref} 处的平均风速。它是一个已知的风速值，作为计算其他高度风速的参考依据。
3. h : 是需要计算风速的目标高度。
4. z_{ref} : 参考高度，通常是一个已经测量得到风速 v_{ref} 的特定高度，该高度的选择在实际应用中根据具体情况而定。
5. z_0 : 称为粗糙度长度，它是一个反映下垫面粗糙程度的参数。下垫面（如草地、森林、城市建筑区等）的粗糙程度不同， z_0 的值也不同。例如，海面的粗糙度长度较小，而城市中心的粗糙度长度相对较大。

作用：将气象站风速修正到风机实际高度。

AI修正：

算法：线性回归

作用：用于修正实际高度的平均风速

特征列：温度 temp

预测风速 pre_vh

大气稳定度 asl

气压 pressure

标签列：vh 实际风速

步骤2：空气密度计算（Ideal Gas Law）

公式：

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}$$

参数：

ρ ：代表气体的密度，它表示单位体积内气体的质量，单位通常为千克每立方米 (kg/m^3)。

P：是气体的压强，指的是气体作用在单位面积上的压力，单位一般为帕斯卡 (Pa)。

R：是气体常数，对于不同的气体，其值有所不同。在国际单位制中，通用气体常数 $(R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K}))$ ，在特定情况下，也会使用针对某种气体的特定气体常数。

T：为气体的热力学温度，单位是开尔文 (K)，它与摄氏温度 (t) (单位: $^\circ\text{C}$) 的关系是 $(T=t + 273.15)$ 。

作用：空气密度影响风能捕获效率。

AI 修正：

作用：更精准地计算空气密度，提高风能捕获效率计算的准确性。

算法：线性回归

特征列：

湿度 humidity

海拔 altitude

风速 v

标签列：

ρ 实际空气密度

步骤3：计算风向余弦

公式： $S_{cos}=\cos(\theta)$

$$\theta = WD - FD$$

$$\text{合并: } S_{cos} = \cos(WD - FD)$$

参数：

WD：风向角度

FD：风机朝向角度

作用：计算风机方向与风向的夹角的余弦值，用于后续计算风向衰减系数

步骤4：计算风向影响因子

公式: $I_{wind} = S_{cos} \cdot k_{yaw} \cdot k_{terrain}$

$$I_{wind} = S_{cos} \cdot k_{yaw} \cdot k_{terrain}$$

参数:

$k_{terrain}$: 地形干扰系数

k_{yaw} : 偏航响应系数

I_{wind} : 风向影响因子

作用: 计算风场地形对风向的干扰程度, 用于后续计算风向衰减系数

AI修正:

算法: 线性回归

特征列

风向角度 WD

风机朝向角度 FD

风机高度 h

风速 vh

计算风向影响因素 I_{wind}

标签列

修正风向影响因素 I_{wind}

二、风机气动模型

步骤1: 理论功率计算 (Betz Limit修正)

公式:

$$P_{theory} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\pi R^2) \cdot v_{h,final}^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot I_{wind}$$

转译为代码

代码块

```
1 import math
2
3
4 def calculate(obj):
5     rho = obj["rho"]
6     R = obj["R"]
7     v_h_final = obj["v_h_final"]
8     C_p = obj["C_p"]
```

```

9     I_wind = obj["I_wind"]
10    P_theory = 0.5 * rho * (math.pi * R ** 2) * v_h_final ** 3 * C_p * I_wind
11    return P_theory

```

参数：

Ptheory：表示风力发电机的理论功率，单位为瓦特（W），它是在理想情况下，风力发电机从风中获取的功率大小。

ρ ：是空气密度，单位是千克每立方米 (kg/m^3)。空气密度会受到温度、气压和湿度等因素的影响，在标准状况下 (0°C , 1标准大气压)，空气密度约为 $1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

A：指的是风力发电机叶片扫过的面积，单位是平方米 (m^2)，其大小与叶片的半径有关， $A = \pi R^2$ (R 为叶片半径)。

$v_{h,\text{final}}$ ：代表风速，单位是米每秒 (m/s)，即风吹过的速度，风速的大小对风力发电机的功率输出有显著影响。

$C_p(\lambda, \beta)$ ：称为功率系数，它是一个与叶尖速比入和桨距角 β 有关的函数。叶尖速比入是叶片尖端线速度与风速的比值，桨距角 β 是叶片与气流方向的夹角。功率系数反映了风力发电机将风能转化为机械能的效率，其值一般在0到0.593（贝兹极限）之间。来自步骤2修正结果后

IWind：风向影响因子

作用：基于风机设计参数计算理论发电功率。

步骤2：尾流效应模型 (Jensen模型)

公式：

$$v_{wake} = v_0 \cdot \left(1 - \frac{2a}{1 + k \cdot x/D}\right)$$

$$v_{h,\text{final}} = v_{wake} \cdot S_{\cos} \cdot I_{wind}$$

转译为代码

代码块

```

1 def calculate(obj):
2     # 从对象中获取所需参数
3     v_0 = obj["v_0"]
4     a = obj["a"]
5     k = obj["k"]
6     x = obj["x"]
7     D = obj["D"]
8     S_cos = obj["S_cos"]
9     I_wind = obj["I_wind"]

```

```

10
11     # 计算 v_wake
12     v_wake = v_0 * (1 - (2 * a) / (1 + k * x / D))
13
14     # 计算 v_h_final
15     v_h_final = v_wake * S_cos * I_wind
16
17     return v_h_final
18

```

参数：

v_{wake} : 表示尾流区域某位置处的风速。也就是在风力发电机后方尾流影响范围内特定位置的实际风速。

v : 是来流风速，即未受到风力发电机影响的上游自由气流的风速。

a : 为轴向诱导因子，它反映了风力发电机对气流的阻碍和扰动程度，与风力发电机的叶片设计、运行状态等有关。

k : 是尾流扩展系数，该系数取决于大气稳定度等环境因素，它描述了尾流在下游方向的扩散程度。

x : 是沿来流方向距离风力发电机的位置，即从风力发电机到所关心的尾流位置的距离。

D : 是风力发电机叶片的直径，它是描述风力发电机尺寸大小的一个重要参数。

$v_{h,final}$: 最终风速

- **作用：**量化上游风机对下游风速的衰减效应。

三、环境损耗修正

步骤1：结冰功率损失模型

公式：

$$P_{ice} = P_{theory} \cdot (1 - \eta_{ice} \cdot p_{ice})$$

转译为代码

代码块

```

1 def calculate(obj):
2     p_theory = obj["p_theory"]
3     eta_ice = obj["eta_ice"]
4     p_ice = obj["p_ice"]
5     return p_theory * (1 - eta_ice * p_ice)

```

参数：

Pice：表示考虑结冰情况下风力发电机的实际功率，单位为瓦特（W）。它是在风力发电机叶片等部件出现结冰现象时，发电机最终的功率输出值。

Ptheory：是风力发电机的理论功率，单位为瓦特（W）。即在理想状态下，不考虑任何损失（如结冰等因素）时，风力发电机从风中获取的功率大小。（见风机气动模型步骤1计算结果）

η_{ice} ：称为结冰功率损失系数，它是一个表示由于结冰导致功率损失程度的系数，数值在0到1之间。该系数反映了结冰对风力发电机性能的影响程度，值越大表示结冰导致的功率损失越大。

pice：代表结冰概率，即风力发电机叶片等部件出现结冰现象的可能性大小，数值在0到1之间。它与环境温度、湿度、风速等气象条件有关。

作用：修正结冰导致的叶片气动性能下降。

步骤2：高温降效模型

公式：

$$P_{temp} = \begin{cases} P_{ice} \cdot [1 - 0.005 \cdot (T - 35)], & T > 35^{\circ}C \\ P_{ice}, & T \leq 35^{\circ}C \end{cases}$$

代码

代码块

```
1 def calculate(obj):
2     T = obj["T"]
3     P_ice = obj["P_ice"]
4     if T > 35:
5         P_temp = P_ice * (1 - 0.005 * (T - 35))
6     else:
7         P_temp = P_ice
8     return P_temp
```

参数：

Ptemp：表示考虑温度影响后风力发电机的实际功率，单位为瓦特（W）。它是结合了不同温度条件下发电机的功率输出情况。

Ptheory：是风力发电机的理论功率，单位为瓦特（W），即不考虑温度等外界因素影响时，发电机从风中获取的功率。

T：代表环境温度，单位是摄氏度（ $^{\circ}C$ ）。环境温度的变化会对风力发电机的性能产生影响。

当环境温度 T 大于 35°C 时，功率会因温度升高而下降。此时实际功率 P_{temp} 由公式 $P_{\text{theory}} \cdot [1 - 0.005 \cdot (T - 35)]$ 计算得出，其中 0.005 是一个经验系数，表示温度每升高 1°C 功率的下降比例。

当环境温度 T 小于等于 35°C 时，温度对风力发电机功率没有额外的负面影响，实际功率 P_{temp} 就等于理论功率 P_{theory} 。

作用：量化高温对发电机散热效率的影响。

AI修正：

将环境温度修正成经验系数

特征列：

预测环境温度

风速

气压

湿度

降水量

标签列：

环境温度

四、机械传动模型

步骤1：齿轮箱效率模型

公式：

$$\eta_{\text{gearbox}} = \eta_{\text{nom}} - k_{\tau} \cdot (\tau - \tau_{\text{nom}})^2$$

$$P_{\text{gearbox}} = P_{\text{temp}} \cdot \eta_{\text{gearbox}}$$

代码

代码块

```
1 def calculate(obj):
2     eta_nom = obj["eta_nom"]
3     k_tau = obj["k_tau"]
4     tau = obj["tau"]
5     tau_nom = obj["tau_nom"]
6     P_temp = obj["P_temp"]
7
8     eta_gearbox = eta_nom - k_tau * ((tau - tau_nom) ** 2)
9     P_gearbox = P_temp * eta_gearbox
```

```
10     return P_gearbox
```

参数：

$\eta_{gearbox}$ ：表示齿轮箱的实际效率。它是一个无量纲的数值，反映了齿轮箱在运行过程中将输入功率转化为输出功率的能力，数值一般在0到1之间。

η_{nom} ：是齿轮箱的额定效率。即在正常的额定工况下，齿轮箱的效率值，同样是一个无量纲的数值。

k_T ：称为扭矩影响系数，它是一个与齿轮箱的设计、制造材料等因素有关的常数，用于衡量扭矩变化对齿轮箱效率的影响程度，单位取决于 τ 的单位。

τ ：代表齿轮箱所承受的实际扭矩，单位通常为牛顿·米（N·m），其大小会随着风力发电机的运行工况而变化。

τ_{nom} ：是齿轮箱的额定扭矩，单位也是牛顿·米（N·m），表示齿轮箱在设计时所规定的正常工作扭矩值。

作用：量化传动系统机械损耗。

步骤2：发电机效率模型

公式：

$$\eta_{gen} = \eta_{max} - c_T \cdot (T_{winding} - T_{opt})^2$$

$$P_{gen} = P_{gearbox} \cdot \eta_{gen}$$

代码

代码块

```
1 def calculate(obj):
2     # 从对象中获取所需参数
3     eta_max = obj["eta_max"]
4     c_T = obj["c_T"]
5     T_winding = obj["T_winding"]
6     T_opt = obj["T_opt"]
7     P_gearbox = obj["P_gearbox"]
8
9     # 计算 eta_gen
10    eta_gen = eta_max - c_T * ((T_winding - T_opt) ** 2)
11
12    # 计算 P_gen
13    P_gen = P_gearbox * eta_gen
14
15    return P_gen
```

参数：

- η_{gen} : 发电机效率，是一个无量纲的数值，反映了发电机将机械能转化为电能的效率，其值一般在 0 到 1 之间，数值越大表示发电机将机械能转化为电能的能力越强。
- η_{max} : **发电机最大效率**，通常在 95% - 97% 之间，是发电机在理想条件下能够达到的最高效率值，由发电机的设计和制造工艺决定。
- cT : **温度影响系数**，单位为 $1/\circ C$ ，约为 $0.02/\circ C$ 。该系数衡量了绕组温度变化对发电机效率的影响程度，其值越大，说明绕组温度变化对发电机效率的影响越显著。
- $T_{winding}$: **绕组温度**，单位是摄氏度 ($\circ C$)，指发电机绕组工作时的温度。绕组温度会随着发电机负载和环境温度的变化而变化，过高或过低的绕组温度都会影响发电机的效率。
- T_{opt} : **最佳运行温度**，通常为 $80\circ C$ ，是发电机运行时能达到最高效率的绕组温度值。当绕组温度偏离最佳运行温度时，发电机效率会下降，该公式通过 $(T_{winding} - T_{opt})^2$ 这一项来体现这种效率下降的程度。
- **作用：**量化温度对电磁转换效率的影响。

五、控制约束模型

步骤1：功率爬坡率限制

公式：

$$P_{grid}(t) = \begin{cases} P_{grid}(t-1) + \Delta P_{max}, & P_{gen} - P_{grid}(t-1) > \Delta P_{max} \\ P_{gen}, & otherwise \end{cases}$$

代码

代码块

```
1 def calculate(obj):  
2     P_gen = obj["P_gen"]  
3     P_grid_prev = obj["P_grid_prev"]  
4     delta_P_max = obj["delta_P_max"]  
5  
6     if P_gen - P_grid_prev > delta_P_max:  
7         return P_grid_prev + delta_P_max  
8     else:  
9         return P_gen
```

$P_{grid}(t)$: 表示在时刻 t 接入电网的功率，单位通常为瓦特 (W) 或千瓦 (kW) 等功率单位，它是根据当前时刻的其他条件计算得出的接入电网的实际功率值。

$P_{grid}(t - 1)$: 是上一时刻 $t - 1$ 接入电网的功率，同样单位为瓦特 (W) 或千瓦 (kW) 等，用于与当前时刻的其他参数进行比较和计算。

ΔP_{max} : 称为最大功率变化量，它表示在相邻两个时刻之间，接入电网的功率允许的最大变化幅度，单位与功率单位相同。这个值由电网的稳定性要求、设备的性能等因素决定。

P_{gen} : 代表发电机在时刻 t 产生的电功率，单位也是瓦特 (W) 或千瓦 (kW) 等。它是发电机实际发出的功率，需要根据具体的发电设备和运行工况来确定。（见机械传动模型步骤2结果）

参数：

- ΔP_{max} : 最大允许爬坡率 (如5 MW/min)

作用：确保电网稳定性，避免功率突变。

说明：

这个公式是一个分段函数形式。当发电机产生的电功率 P_{elec} 与上一时刻接入电网的功率 $P_{grid}(t - 1)$ 的差值大于最大功率变化量 ΔP_{max} 时，为了保证电网的稳定和设备的安全，接入电网的功率 $P_{grid}(t)$ 是在上一时刻功率的基础上加上最大功率变化量 ΔP_{max} ；否则，接入电网的功率 $P_{grid}(t)$ 就直接等于发电机产生的电功率 P_{elec} 。通过这个公式，可以合理地控制和调节接入电网的功率，确保电网的稳定运行。

参数获取途径

参数类型	典型数据来源
风机设计参数	厂家技术手册 (叶片半径、额定功率、功率曲线)
气象数据	数值天气预报 (NWP) 或现场测风塔
地表粗糙度 $z_{0.20}$	卫星遥感或地表覆盖分类数据库
尾流衰减系数 k_k	风电场历史数据校准
机械损耗系数	SCADA系统记录的齿轮箱/发电机运行数据

完整模型链公式串联系例

1. 输入气象数据

风速 $(v_{10}=8\text{ m/s})$, 温度 $(T = 15^\circ\text{C})$, 气压 $(P = 1013\text{ hPa})$

2. 风切变修正

使用对数风廓线公式 $(v_h=v_{ref}\cdot\ln(h/z_0)/\ln(z_{ref}/z_0))$, 这里 $(v_{ref}=v_{10}=8\text{ m/s})$, $(z_{ref}=10\text{ m})$, $(h=120\text{ m})$, $(z_0=0.1\text{ m})$

$$[v_{120m}=8\times\frac{\ln(120/0.1)}{\ln(10/0.1)}\approx9.2\text{ m/s}]$$

3. 空气密度计算

根据理想气体状态方程变形公式 $(\rho=\frac{P}{R\cdot T})$, 其中 $(P = 1013\text{ hPa}=101300\text{ Pa})$, $(R = 287\text{ J/(kg\cdot K)})$, $(T=(15 + 273.15)\text{ K}=288.15\text{ K})$

$$[\rho=\frac{101300}{287\times288.15}\approx1.225\text{ kg/m}^3]$$

4. 理论功率计算

使用公式 $(P_{theory}=\frac{1}{2}\rho A v^3 C_p)$, 其中 $(A=\pi R^2)$, $(\rho = 1.225\text{ kg/m}^3)$, $(R = 65\text{ m})$, $(v = v_{120m}=9.2\text{ m/s})$, $(C_p=0.45)$

$$[P_{theory}=0.5\times1.225\times\pi\times65^2\times9.2^3\times0.45\approx2.98\text{ MW}]$$

5. 结冰修正

使用公式 $(P_{ice}=P_{theory}(1 - \eta_{ice} p_{ice}))$, 其中 $(P_{theory}=2.98\text{ MW})$, $(\eta_{ice}=0.2)$, $(p_{ice}=0.3)$

$$[P_{ice}=2.98\times(1 - 0.2\times0.3)=2.82\text{ MW}]$$

6. 并网功率输出

考虑爬坡率限制, 公式为 $(P_{grid}=\min(2.82, P_{prev}+2))$

完整模型链

风速修正计算

- 风切变修正风速: $v_h = v_{ref} \cdot \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)}$

- 结合风向余弦和风向影响因子的风速综合修正: $v_{h,final} = v_h \cdot \cos S_{cos} \cdot \cos I_{wind}$, 其中 $S_{cos} = \cos(WD - FD)$, $I_{wind} = S_{cos} \cdot k_{yaw} \cdot k_{terrain}$

$$1. \text{ 空气密度计算: } \rho = \frac{P}{R \cdot T}$$

$$2. \text{ 理论功率计算: } P_{theory} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\pi R^2) \cdot v_{h,final}^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot I_{wind}$$

3. 环境损耗修正功率计算

- 结冰修正功率: $P_{ice} = P_{theory} \cdot (1 - \eta_{ice} \cdot p_{ice})$

$$\text{高温修正功率: } P_{temp} = \begin{cases} P_{ice} \cdot [1 - 0.005 \cdot (T - 35)], & T > 35^\circ C \\ P_{ice}, & T \leq 35^\circ C \end{cases}$$

4. 机械传动损耗后功率计算

- 齿轮箱损耗后功率: $P_{gearbox} = P_{temp} \cdot \eta_{gearbox}$, 其中 $\eta_{gearbox} = \eta_{nom} - k_\tau \cdot (\tau - \tau_{nom})^2$
- 发电机损耗后功率: $P_{gen} = P_{gearbox} \cdot \eta_{gen}$, 其中 $\eta_{gen} = \eta_{max} - c_T \cdot (T_{winding} - T_{opt})^2$

5. 并网功率计算

- 考虑功率爬坡率限制的并网功率:

$$P_{grid}(t) = \begin{cases} P_{grid}(t-1) + \Delta P_{max}, & P_{gen} - P_{grid}(t-1) > \Delta P_{max} \\ P_{gen}, & otherwise \end{cases}$$

将上述公式逐步代入简化, 可得汇总公式 (从气象数据和风机基础参数到并网功率) :

$$P_{grid}(t) = \begin{cases} P_{grid}(t-1) + \Delta P_{max}, & \\ P_{gen} - P_{grid}(t-1) > \Delta P_{max}, & \\ \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{R} \cdot (\pi R^2) \cdot \left(\eta_{ice} \cdot \frac{\sin(WD)}{\sin(FD)} \cdot \cos(WD - FD) \cdot \cos(WD - FD) \cdot k_{yaw} \cdot k_{terrain} \right)^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \cos(WD - FD) \cdot k_{yaw} \cdot k_{terrain} \cdot (1 - \eta_{ice} \cdot p_{ice}) \right) \cdot \begin{cases} 1 - 0.005 \cdot (T - 35), & T > 35^\circ C \\ 1, & T \leq 35^\circ C \end{cases} \cdot (\eta_{nom} - k_\tau \cdot (\tau - \tau_{nom})^2) \cdot (\eta_{max} - c_T \cdot (T_{winding} - T_{opt})^2) - P_{grid}(t-1) + \Delta P_{max}, & \end{cases}$$

关键物理参数表

符号	物理意义	单位	典型值范围
z_0	地表粗糙度长度	m	0.01 (水面) ~1.0 (城市)
C_p	功率系数	无因次	0.35~0.48
k_k	尾流衰减系数	无因次	0.04~0.08
$\lambda\lambda$	叶尖速比	无因次	6~8 (最优区间)
$\eta_{gearbox}$	齿轮箱效率	%	97%~98%