

## 适用于风机动态分析的脉动风速模拟

周 睿, 周连俊, 殷明慧, 邹 云

(南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 风力发电与传统能源发电最大的区别在于风速这一源动力的随机性和不可控性, 风速状况对风电系统性能有着重要的影响, 风机动态分析依赖于脉动风速的准确模拟。该文旨在为不同风速模拟方法在风机动态分析场合的合理选用提供参考, 对常用的 Weibull 分布风速模拟、组合风速模拟、滤波法风速模拟和 ARMA 模型风速模拟四种方法进行了详细阐述和仿真, 并将模拟风速特性和自然界实际的风速特性进行了比较分析。结果表明, 使用滤波法和 ARMA 方法模拟的风速可以充分反映一定时间尺度内风速变化的统计规律和相关特性, 在风力发电系统动态仿真的场合有较好的适用性。

**关键词:** 风速模拟; 威布尔分布; 滤波; 自回归移动平均

### 0 引言

能源是经济发展的原动力, 是现代文明的物质基础。安全、可靠的能源供应和高效、清洁地利用能源是实现社会经济持续发展的重要保证。一段时期以来, 世界能源的供应主要靠化石能源, 化石能源是地球经过千万年乃至上亿年逐渐形成的, 其储量有限, 是非可再生能源。而风能是一种清洁的可再生能源, 可利用的风能在全世界范围内分布都很广泛。同时, 开发利用风力资源还具有以下几个优势<sup>[1,2]</sup>: 风能是一种清洁无污染的能源, 不存在像燃煤、燃油所造成的环境污染问题; 风电场建设周期短, 装机规模灵活; 风电场比火电场更能节约大量的淡水资源, 减少水环境污染。

随着风力发电装机容量的迅速增长, 其动态性能及对电网的影响日益成为该技术领域的一个主要课题。而风力发电机组的原动机受自然界风的驱动, 由于风速的易变性和不可控性, 风力发电机组几乎时刻遭受到较大程度的扰动, 这种扰动无论对机组本身还是对与之相连的电力系统, 都将产生一定程度的影响。因此, 建立与之相适应的风速模型, 从而能够对风速的变化进行模拟就显得尤为重要。

根据应用场合及研究时间尺度长短的不同, 可将风特性分为长期、中期和短期特性。长期风特征是指时间范围长达数十年的风况变化规律, 其用途是探索风力发电的长期可利用性。中期风特征是指时间范围在数天至数年的风速、风向分布规律, 其用途是对区域风能资源进行评估及风电场选址。短

期风特征是指时间范围在数十分钟以内的风速变化规律, 主要用于风力发电控制、风电质量评估及风轮机机械部件设计。由于风力发电机组控制主要任务是: 根据风速的实时变化, 调整风力发电机组设备, 使其对风速达到最佳响应, 确保稳定运行、最大可能地捕获风能和保证最优的功率输出。因此, 短期风速适用于风机动态分析。

风速时程样本的获取可以通过实际强风记录、风洞实验或数值模拟来得到。在没有风洞实验条件的情况下, 利用已知的风速特征信息通过计算机数值模拟重现风速时程样本是比较好的解决办法。

关于短期风速模拟的研究, 国内外的学者从不同角度进行了大量的研究。文献[3]和[4]分别使用 Weibull 分布函数方法, 对我国不同地区的风速分布特征参数估计进行研究。文献[5]将风速分解为 4 种分量, 其中基本风表示慢速变化分量, 阵风、斜坡分量和背景噪声组成了快速变化分量。文献[6]就 AR 模型对空间结构风速时程的模拟及其快速实现进行了讨论。文献[7]提出了用 Confidence interval probability 衡量 AR 模型模拟的精确性, 并给出 AR 模型的最优阶数。文献[8]将风速序列看作白噪声序列通过整形滤波器的输出, 建立了风速模型, 并给出了计算整形滤波器参数的方法。文献[9]进一步给出了两种用数字方法实现滤波器的过程。文献[10]采用自回归滑动平均(ARMA)模型方法建立了满足一定功率谱密度特性的风速模型, 为风力发电系统的全数字仿真或数字-物理混合仿真提供风速时间序

列。

本文对以上常见的四种风速模拟方法进行比较,分析各种方法在风机动态分析过程中的适用性,从而为合理选用风速模拟方法提供参考。

## 1 风速特性

风是自然界空气流动的结果,具有随机性和不可控性。虽然人们目前还无法对风进行有效的控制,但是风速的变化也是有规律可循的。

对于短期脉动风速,一般可分解为缓慢变化的分量和快速变化的分量<sup>[11,12]</sup>。在一定的时间尺度上,一般认为是 10 分钟至 1 小时,脉动风速可以看作是具有特定统计特性的平稳随机离散序列,其平均值可认为是固定不变的<sup>[10]</sup>。风速模型可以描述为:

$$v_k = \bar{v} + v_t \quad (1)$$

其中  $\bar{v}$  为平均风速,  $v_t$  为湍流分量,随时间变化。湍流风速的统计特性包括平均风速、湍流强度、湍流尺度和功率谱密度等。

### 1.1 平均风速

平均风速可以表示为:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n v_k \quad (2)$$

其中  $v_k$  瞬时风速,  $n$  为采样点数。

### 1.2 湍流强度

湍流强度描述了风速随时间和空间变化的程度,反映湍流风速的相对强度,是描述大气湍流运动特性的最重要的特征量。湍流强度  $T$  的定义如下:

$$T = \sigma_w / \bar{v} \quad (3)$$

其中  $\sigma_w$  为风速序列标准差,  $\bar{v}$  为平均风速。

### 1.3 积分尺度

大气湍流运动是由许多不同尺度的涡旋运动组合而成的,不同大气尺度的涡旋在大气运动中起着不同的作用。湍流积分尺度  $L$  是与湍流速度有关的涡旋的平均尺度,它与离地高度和地面粗糙长度有关,且随离地高度增加而变大,随地面粗糙长度增加而减小<sup>[13,14]</sup>。

### 1.4 功率谱密度

为了研究风力发电系统的动态过程,风速序列在时间轴上如何变化是极为重要的一个性质,风速的这种性质可以用功率谱密度来刻画。功率谱密度

将风速的变化看作由各种不同频率成分叠加的结果,常用的功率谱密度函数是 Von Karman 提出的一种连续谱密度函数<sup>[10,15]</sup>,即:

$$S(f) = \frac{4\sigma_w^2(L/\bar{v})}{[1 + 70.8(fL/\bar{v})^2]^{5/6}} \quad (4)$$

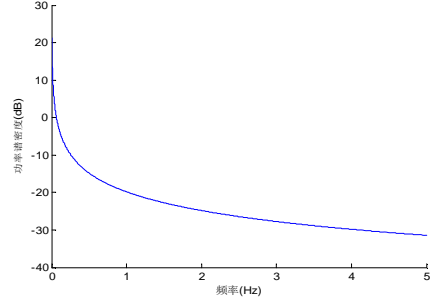


图1 标准功率谱密度

Fig.1 The standard power spectral density

其中  $f$  是频率,  $L$  是湍流积分尺度。其曲线图如图 1 所示,在本文作为标准功率谱密度曲线。

### 1.5 实际风速

根据南京江宁区 2009 年 9 月份的两组实际测量风速画出的风速折线图及其功率谱密度见图 2。

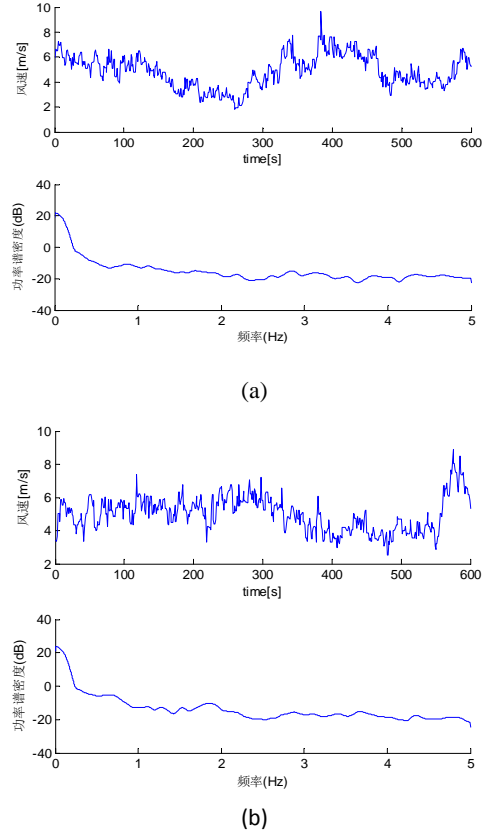


图2 实际风速及其功率谱密度

Fig.2 The real wind speed and its power spectral density

由实测风速折线图可以看出：在一段时间内，存在多个风速大幅度变动的时刻，而在两个相邻的风速大幅度变动时刻之间，表现出持续增大或减小的变化趋势。而且无论风速的上升还是下降，都是在波动中进行的。再看实测风速功率谱曲线，低频分量幅值较大，高频分量的幅值较小，且具有较明显的随频率升高而持续下降的趋势，与标准功率谱的趋势相互印证。

## 2 风速模拟方法

### 2.1 Weibull 分布模拟法<sup>[16]</sup>

常用的描述风速分布特性的函数为 Weibull 分布函数，该函数中的特征参数可以根据某地在相当长的时间段内的风速实测数据回归拟合得到。双参数威布尔分布的概率密度函数表达式为：

$$f(v) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{v}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{C}\right)^K\right] \quad (5)$$

式中： $v$  为风速，m/s； $K$  为 Weibull 分布形状参数，无量纲； $C$  为 Weibull 分布尺度参数，m/s。风速序列的频率分布如图 3 所示。

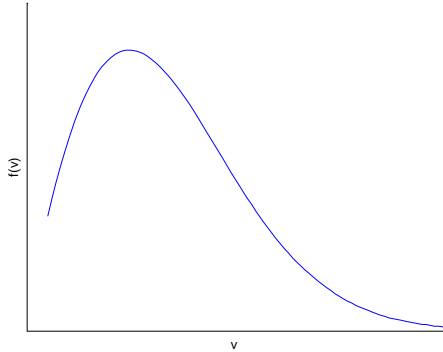


图3 风速频率分布情况

Fig.3 The distribution of wind speed frequency

相应的，只要对式(5)积分，可得出 Weibull 概率分布函数(不大于某一风速的累积概率)为：

$$F(v) = \int_0^v f(v) dv = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{C}\right)^K\right] \quad (6)$$

分布参数  $C$  和  $K$  与风速平均值和标准差的关系为：

$$\bar{v} = E(v) = \int_0^{+\infty} v f(v) dv = C \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (7)$$

$$\left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^2 = \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{K}\right) / \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{K}\right)\right] - 1 \quad (8)$$

式中： $\Gamma$  为伽马函数， $\bar{v}$  为平均风速，m/s； $\sigma$  为标准差，m/s。

利用式(7)求  $K$  值，需要求解伽马函数的反函数，比较困难，实际应用中采用以下近似公式来计算：

$$K = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (9)$$

对于 Gamma 函数  $\Gamma(a)$ ，若根据其定义  $\Gamma(a) = \int_0^{\infty} y^{a-1} e^{-y} dy$  来求，就会显得很复杂。故采用如下的经验公式来计算：

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) = \left(0.568 + \frac{0.434}{K}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (10)$$

对式(6)进行概率分布反变换即可得到计算风速公式<sup>[6]</sup>：

$$v_i = C [-\ln(u_i)]^{\frac{1}{K}} \quad (11)$$

式中  $u_i$  是符合 0-1 均匀分布的概率。

### 2.2 组合风速法

为了较精确地描述风能的随机性和间歇性的特点，风速变化的模型原则上通常用以下 4 种成分来模拟<sup>[17,18]</sup>：基本风速  $V_{wb}$ 、阵风  $V_{wb}$ 、渐变风  $V_{wr}$  和随机风  $V_{wn}$ 。

#### 2.2.1 基本风速

它在风力机正常运行过程中一直存在，基本上反映了风场平均风速的变化，可用风电场测风所得的 Weibull 分布参数近似确定，即：

$$V_{wb} = C \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (12)$$

其中  $C$ ， $K$  分别为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数。

一般认为基本风速不随时间变化，因而可以取常数。

$$V_{wb} = K_b \quad (K_b \text{ 为一常数}) \quad (13)$$

#### 2.2.2 阵风

为描述风速突然变化的特性，可用阵风来模拟，在该时间段内风速具有余弦特性，通常用它来考核在较大风速变化情况下的动态特性(电压波动特

性)。

$$V_{wg} = \begin{cases} 0 & \text{其它} \\ \frac{G_{\max}}{2} [1 - \cos 2\pi (\frac{t - T_{lg}}{T_g})], & T_{lg} < t < T_{lg} + T_g \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $G_{\max}$  为阵风峰值;  $T_g$  为阵风周期;  $T_{lg}$  为阵风开始时间;  $t$  为时间。

### 2.2.3 渐变风

对风速的渐变变化特性用渐变风来模拟。

$$V_{wr} = \begin{cases} 0, & t < T_{1r} \\ R_{\max} \frac{t - T_{1r}}{T_{2r} - T_{1r}}, & T_{1r} \leq t \leq T_{2r} \\ 0, & T_{2r} < t \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $R_{\max}$  为渐变风最大值;  $T_{1r}$  为风速渐变开始时间;  $T_{2r}$  为风速渐变结束时间。

### 2.2.4 随机风

随机风反映的是风速变化的随机性。

$V_{wn}$  的数学模型:

$$V_{wn} = V_{wn\max} \text{Rand}(-1, 1) \cos(w_v + \varphi_v) \quad (16)$$

式中:  $V_{wn\max}$  为随机风的最大值, m/s;  $\text{Rand}(-1, 1)$

为-1 和 1 之间均匀分布的随机数;  $w_v$  为风速波动的平均距离, rad/s, 一般其取值  $0.5\pi \sim 2\pi$ ;  $\varphi_v$  为  $0 \sim 2\pi$  间均匀分布的随机变量。

综合上述四种风速描述, 由式(13)、式(14)、式(15)、式(16)可建立组合风速数学模型为:

$$V_w = V_{wb} + V_{wb} + V_{wr} + V_{wn} \quad (17)$$

## 2.3 滤波法

文献[9]从风速功率谱密度的角度出发, 将风速序列看作是白噪声序列通过指定滤波器的输出, 从而建立了风速模型。其原理如图 4。将平均值为 0, 标准差  $\sigma = 1$  的白色噪声通过滤波器产生平均值为 0, 标准差 1 的有色噪声, 并使有色噪声的功率谱密度与标准功率谱密度近似。再将有色噪声乘以指定的风速标准差, 再加上平均风速, 即可得到指定平均值, 标准差以及功率谱密度与标准近似的风速。

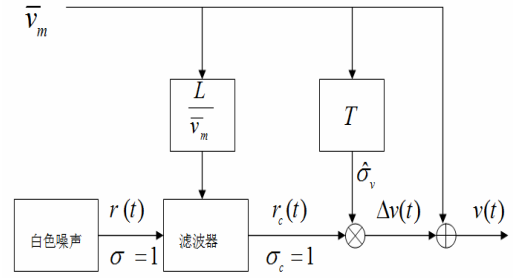


图4 滤波法原理

Fig.4 The principle of adaptive filter

### 2.3.1 滤波模拟方法

首先对于采样周期为  $T_s$ , 平均值为 0, 标准差  $\sigma=1$  的白色噪声, 其功率谱密度为定值<sup>[11]</sup>:

$$S(w) = S_0, w \in [-\frac{\pi}{T_s}, +\frac{\pi}{T_s}] \quad (18)$$

由于噪声均值为零时, 其平均功率等于噪声的方差, 所以:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |r[n]|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{T_s}}^{\frac{\pi}{T_s}} S_0 dw \quad (19)$$

又因为  $\sigma = 1$ , 所以由(18)和(19)得:

$$S_0 = T_s \quad (20)$$

根据文献[8],其使用的滤波器的表达式是:

$$H_F(jw) = \frac{K_F}{(1 + jw T_F)^{5/6}} \quad (21)$$

采用此滤波器的原因是, 通过滤波器后的功率谱密度为:

$$S_c(w) = |H_F(jw)|^2 \times S_0 = \frac{K_F^2 T}{(1 + (w T_F)^2)^{5/6}} \quad (22)$$

由此可见其形式与标准谱式(4)相同。其中:

$$T_F = \frac{L}{\bar{v}_m} \quad (23)$$

又因为滤波后的有色噪声标准差为 1, 平均值为 0, 根据噪声均值为零时, 其平均功率等于噪声的方差, 同理得:

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{T_s}}^{\frac{\pi}{T_s}} \frac{K_F^2 T}{(1 + (w T_F)^2)^{5/6}} dw = 1 \quad (24)$$

根据上式(24)可求得静态增益  $K_F$  为<sup>[12]</sup>:

$$K_F \approx \sqrt{\frac{2\pi}{B(\frac{1}{2}, \frac{1}{3})} \cdot \frac{T_F}{T_s}} \quad (25)$$

其中 B 为 beta 函数。

因为有色噪声的标准差为 1, 平均值为 0, 所以

当乘上标准差估计值  $\hat{\sigma}_v$  后, 得到的湍流部分风速  $v_i(t)$  的平均值为 0, 标准差即为标准差估计值。又因为标准估计值为一恒定数值, 所以其功率谱密度仍与标准谱近似, 其表达式如下:

$$v_i(t) = \hat{\sigma}_v r_c(t) \quad (26)$$

其中  $r_c(t)$  是有色噪声。标准差估计值  $\hat{\sigma}_v$  根据平均风速求解:

$$\hat{\sigma}_v = T \cdot \bar{v}_m \quad (27)$$

其中:  $T$  是实验决定的回归曲线的斜率即湍流强度, 回归曲线描述了  $\bar{v}_m$  和  $\hat{\sigma}_v$  的关系。

### 2.3.2 实现步骤<sup>[12]</sup>

我们认为  $L$  和  $T$  通过实验测定或者节点特性已知。风速仿真时, 平均风速  $\bar{v}_m$  为定值;  $T_s$  用于采样  $v_i(t)$ 。

为产生湍流分量  $v_i(t)$ , 下面提出以下方法:

- 1)  $\bar{v}_m$  为风速均值。
- 2) 利用式(23),(25)和(27)计算静态增益  $K_f$ :
- 3) 用参数  $T_f$  和  $K_f$  计算滤波器的离散脉冲响应:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty P(w) \cos(wt) dw \quad (28)$$

$$P(w) = \text{Re} \left[ \frac{K_f}{(1 + jwT_f)^{5/6}} \right] \quad (29)$$

- 4) 利用下式卷积产生湍流部分:

$$r_c(t) = \int_0^t h(\tau) r(t-\tau) d\tau \quad (30)$$

- 5) 计算当前风速值:

$$v(t) = \bar{v}_m + \hat{\sigma}_v \cdot r_c(t) \quad (31)$$

## 2.4 自回归滑动平均 (ARMA) 模型模拟法<sup>[6, 19-23]</sup>

自回归滑动平均 (ARMA) 模型是将线性自回归模型 (AR) 和滑动平均模型 (MA) 结合起来构成的可以描述平稳随机过程的时间序列模型。ARMA 模型是有限参数模型, 只要确定出有限个参数, 模型即完全确定。其原理是利用已知的信号序列、误差以及已知序列对信号自身的影响规律来预测未来的信号序列。ARMA 模型描述了离散随机信号中各序列之间的依存关系。

平稳随机序列的自回归滑动平均 (ARMA) 模型可以表示为:

$$x(k) = \sum_{i=1}^n a_i x(k-i) + a(k) + \sum_{j=1}^m \beta_j a(k-j) \quad (32)$$

其中,  $x(k)$  为模型输出的序列;  $a(k)$  为均值为零的白噪声, 其方差为  $\sigma_a^2$ ;  $a_i$ 、 $\beta_j$  分别为自回归系数和滑动平均系数;  $n$  称为自回归阶数;  $m$  称为滑动平均阶数。对于用于风力发电系统动态仿真的模型, 根据经验<sup>[18]</sup>, 取  $n=2, m=1$  即可以得到相当满意的结果。对式(32)进行  $z$  变换, 可得到输出序列  $x(k)$  的功率谱密度为:

$$S_x(e^{jw}) = \sigma_a^2 \left[ \left( 1 + \sum_{i=1}^n \beta_i e^{-jwi} \right) \left( 1 - \sum_{k=1}^n a_k e^{-jwk} \right) \right]^2 \quad (33)$$

式(34)是关于  $e^{jw}$  的有理分式, 即式(32)表示的 ARMA 模型的输出具有有理功率谱的形式。给出的连续功率谱密度函数可以用合适的有理谱函数进行逼近, 即这种功率谱刻画的时间序列可用 ARMA 模型来逼近。下面给出用数值方法得到 ARMA 模型参数的过程。

ARMA 模型的一个重要性质是:

$$R_x(l) - \sum_{i=1}^n a_i R_x(l-i) = 0, l \geq m+1 \quad (34)$$

式(34)称为 Yule-Walker 方程, 其中  $R_x(l)$  为序列  $x(k)$  的自相关函数, 定义为:

$$R_x(l) = E[x^*(n)x(n+l)] \quad (35)$$

式(35)中  $E$  表示数学期望; 上角标  $*$  表示复共轭。

将 Yule-Walker 方程写成展开形式为:

$$\begin{cases} R_x(m+1) = a_1 R_x(m) + a_2 R_x(m-1) + L + a_n R_x(m-n+1) \\ R_x(m+2) = a_1 R_x(m+1) + a_2 R_x(m) + L + a_n R_x(m-n+2) \\ \vdots \\ R_x(m+n) = a_1 R_x(m+n-1) + a_2 R_x(m+n-2) + L + a_n R_x(m) \end{cases} \quad (36)$$

如果式(36)中的  $R_x$  都可以得到, 那么将可以解出 ARMA 模型的  $n$  个自回归系数。由式(35)定义的序列自相关和给出的功率谱密度都表示了序列内部各采样值的相互关系, 它们之间事实上也存在着确定的关系, 是一对傅立叶变换, 即:

$$R_x(l) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/T_s}^{\pi/T_s} S_x(e^{jw}) e^{jwl} dw \quad (37)$$

式中  $T_s$  为离散序列的采样周期;  $S_x(e^{jw})$  为序

列的功率谱密度函数。由式 (36)、(37) 和 Von Karman 谱密度函数, 即可解出 ARMA 模型的  $n$  个自回归系数。

$$\text{令 } y(k) = x(k) - \sum_{i=1}^n a_i x(k-i) \quad (38)$$

则  $y(k)$  是以  $\beta_1, \beta_2, K, \beta_m$  风为参数的  $m$  阶滑动平均序列, 即有:

$$y(k) = a(k) + \sum_{j=1}^m \beta_j a(k-j) \quad (39)$$

对于序列  $y(k)$ , 其自相关函数  $R_y(l)$  可以由  $x(k)$  的自相关函数  $R_x(l)$  表示出来, 为:

$$R_y(l) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_i a_j R_x(l+j-i), l=0,1,K,m \quad (40)$$

其中  $a_0 = -1$ 。同时有:

$$R_y(l) = E[y^*(k)y(k+l)] = \sigma_a^2 \sum_{j=1}^m \beta_j \beta_{j-l}, l=0,1,K,m \quad (41)$$

其中  $\beta_0 = 1$ 。联立式(40)、(41), 可求出  $m$  个滑动平均系数  $\beta_{i,i=1,2,K,m}$  和白噪声  $a(k)$  的方差  $\sigma_a^2$ 。由此, 只要给出了某一时间段内的平均风  $\bar{v}$ , 湍流强度  $T$ , 湍流尺度  $L$  和采样时间  $T_s$ , 则利用以上过程即可求出在上述条件下风速的湍流分量为:

$$v_t(k) = v_t(kT_s) = \sum_{i=1}^n a_i v_t(k-i) + a(k) + \sum_{j=1}^m \beta_j a(k-j) \quad (42)$$

进而可利用平均风速和湍流分量的叠加得到风速序列:

$$v_w(k) = v_w(kT_s) = \bar{v} + v_t(k) \quad (43)$$

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 Weibull 分布模型风速模拟

对于平均风速  $\bar{v} = 5 \text{ m/s}$ , 风速标准差  $\sigma = 0.8 \text{ m/s}$ , 湍流强度  $T = 0.16$  的风速模型<sup>[12]</sup>, 通过式(7)、(9)计算可得到威布尔参数  $K = 7.32, C = 5.33 \text{ m/s}$ 。根据式(11)进

行风速仿真结果如图 5。

运用 Matlab 的功率谱分析工具箱, 对威布尔分布的随机风速进行功率谱密度分析, 可得如图 6 所示的威布尔分布风速模型的功率谱密度分布。

图 5 仿真得到的风速, 其平均值为  $4.99 \text{ m/s}$ , 标准差为  $0.78 \text{ m/s}$ ; 误差分别为  $0.2\%$  和  $2.5\%$ , 误差很小。但是其功率谱密度分布较为均匀, 与实际风速频率较低的成分幅值较大, 高频分量的幅值则较小的规律不符。且对比图 6 和标准功率谱密度图 1, 可以看出得到的功率谱密度与标准功率谱密度不一致。因此, 此方法的模拟效果不是很好。

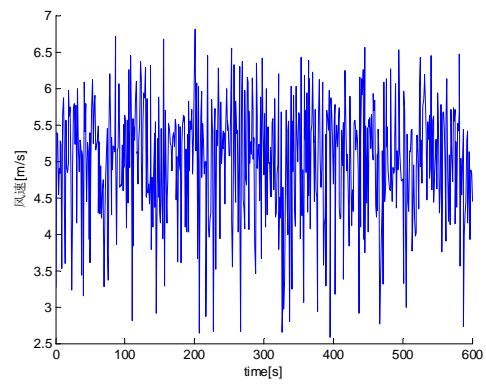


图5 Weibull 风速仿真

Fig.5 The wind speed simulation basing Weibull

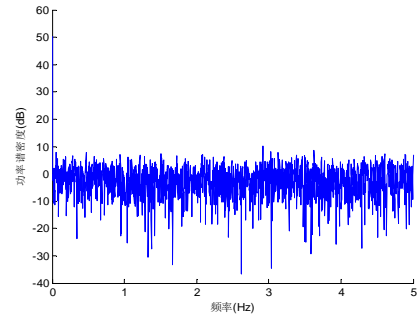


图6 Weibull 风速仿真功率谱密度

Fig.6 The power spectrum density simulation basing Weibull

#### 3.2 组合风速模拟

设置组合风速模型参数<sup>[9,18]</sup>, 如表 1。可得到阵风、渐变风、随机风仿真结果分别如图 7。再综合上述风速成份, 进行组合风速的仿真和功率谱密度分析, 如图 8 和图 9。

图 8 所示的模拟风速, 其平均值为  $5.71 \text{ m/s}$ , 误差为  $14.2\%$ , 误差较大。但是其仿真结果良好地描述了风速的规律性、随机性等特点, 表明了组合风速不仅能反映自然风速的特性, 避免了风速模型



计算的复杂性，而且还可以有针对性地考验风力发电系统在阵风、渐变风时的性能，比较适合用于风力发电机动态控制的研究。

表1 组合风速参数

Tab.1 Parameters of the combined wind speed model	
项目	参数
基本风速/(m/s)	5
阵风峰值/(m/s)	3
阵风开始时间/s	200
阵风周期/s	100
渐变风最大值/(m/s)	2
风速渐变开始时间/s	300
风速渐变结束时间/s	450
风速波动的平均距离/(rad/s)	$2\pi$

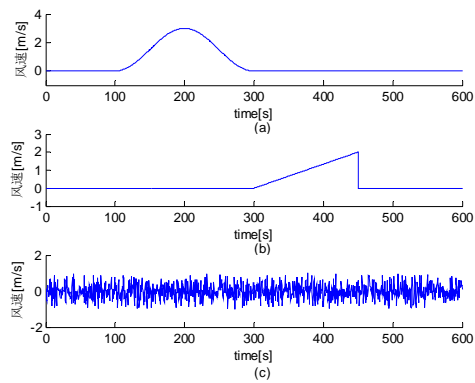


图7 (a)阵风风速仿真；(b)渐变风风速仿真；(c)随机风速仿真

Fig.7 (a) The gust velocity simulation; (b) The gradient wind speed simulation; (c) The random wind speed simulation

从图9中可以看出,风速比较明显地表现出了风速变化的高频分量与低频分量的差异，即大幅度风速波动出现的几率较小，小幅度风速波动出现的几率较大，这正是实际风速动态变化过程的特点。对比图 1，虽然两者趋势一致，但是组合风的功率谱密度比标准功率谱密度在低频分量所占比例明显要少。因此，组合风速的模拟方法稍显不足。

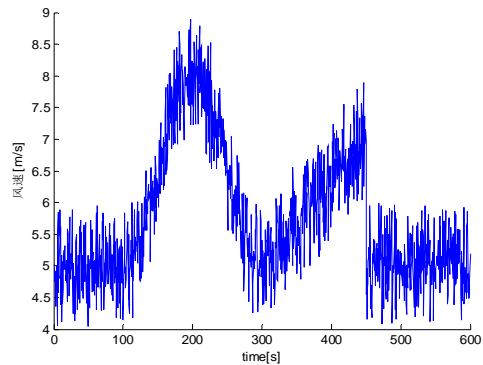


图8 组合风风速仿真

Fig.8 The combined wind speed simulation

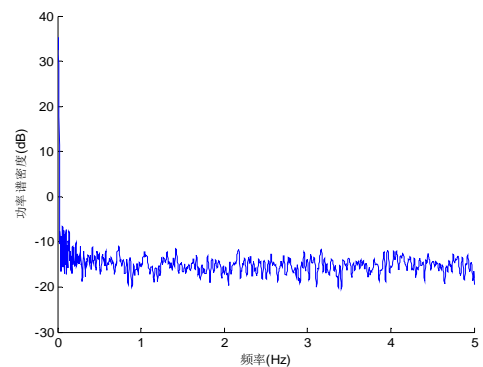


图9 组合风功率谱密度

Fig.9 The combined wind speed's power spectrum density simulation

3.3 滤波法风速模拟

在算法中所选择的参数是<sup>[9]</sup>：平均风速  $\bar{v} = 5\text{m/s}$ ， $L = 500\text{m}$ ， $T = 0.16$ ， $T_s = 0.1\text{s}$ 。仿真出的风速和功率谱密度分布分别为图 10 和图 11。

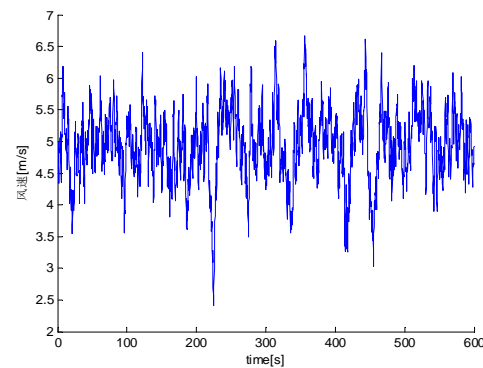


图 10 滤波法风速仿真

Fig.10 The wind speed simulation basing filtering

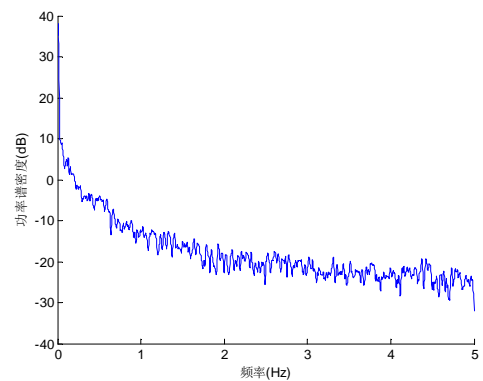


图 11 滤波法风速功率谱密度

Fig.11 The power spectrum density simulation basing filtering

图 10 仿真得到的风速，其平均值为 5.04 m/s，标准差为 0.75 m/s；误差分别为 0.8%和 6.25%，误

差较小。而作为自然界的脉动风,无论风速的上升还是下降,都是一个在波动中上升或是下降的过程,这一特点在滤波法模拟的风速中体现出来了。

从图 11 中可以看出,风速比较明显地表现出了大幅度风速波动出现的几率较小,小幅度风速波动出现几率较大的实际风速动态变化过程的特点。对比图 1 可以看出,滤波法风速功率谱密度与标准谱密度基本一致。因此,采用滤波法模拟的风速效果很好。但是在使用滤波法进行风速模拟时,计算离散脉冲响应和湍流部分的计算量较大。

### 3.4 ARMA模型风速模拟

在算法中所选择的参数是<sup>[9]</sup>: 平均风速  $\bar{v} = 5 \text{ m/s}$ ,  $L = 500 \text{ m}$ ,  $T = 0.16$ ,  $T_s = 0.1 \text{ s}$ 。仿真所得风速和功率谱密度分布分别如图 12 和图 13 所示。

图 12 对于风速的上升或是下降,都是一个在波动中上升或是下降的过程的这一特点,ARMA 模拟的风速也很好的体现出来了。

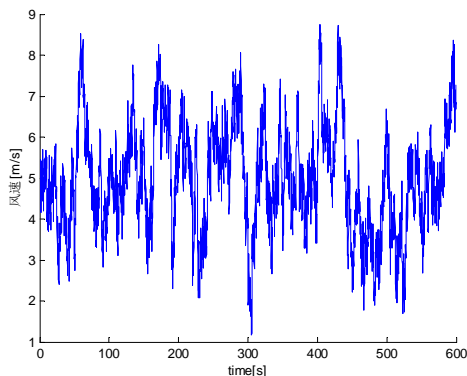


图 12 基于 ARMA 模型的风速仿真

Fig.12 The wind speed simulation basing ARMA

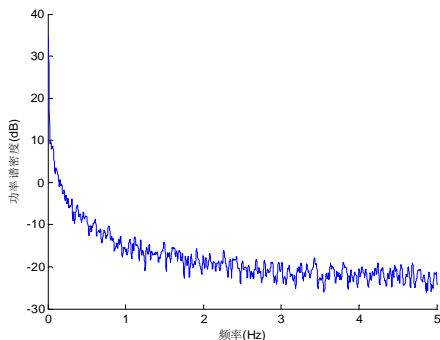


图 13 ARMA 模型风速功率谱密度

Fig.13 The power spectrum density simulation basing ARMA

从图 13 中可以看出,风速较好地表现出了风速变化的高频分量与低频分量的差异。对比图 1, ARMA 模型风速功率谱密度与标准谱密度基本一致。因此, ARMA 模型模拟风速的效果也很好。

综上所述,对比四种风速模拟方法生成的风速序列的变化趋势及其功率谱,对于风速的上升或是下降都是一个在波动中这一特点,除了基于威布尔分布假设的风速模拟外,其它三种方法都能够体现。而对于功率谱,Weibull 分布模拟风速的功率谱与标准不一致,组合风速的功率谱与标准的趋势一致,但比标准功率谱在低频分量所占比例明显要少,而滤波法和 ARMA 模拟的风速功率谱与标准谱基本一致。

## 4 结论

本文对常用的四种风速模拟方法进行了详细阐述和比较分析,结果表明,基于威布尔分布假设的风速模型与实际风速特性差距较大,无法用于风力发电系统的动态控制仿真研究,组合风速模型虽然在功率谱方面与实际有偏差,但可根据需要对不同的风速分量进行组合,因此在模拟一些特殊的工况时较为灵活,滤波法和 ARMA 模型模拟的风速能充分反映短时间尺度内风速变化的统计规律和相关特性,在风力发电系统动态仿真的场合有较好的适用性。

### 参考文献:

- [1] 姚兴佳,依雪峰.风能发电在跨世纪能源结构中的地位[J].节能,1997(7):3-6.
- [2] 赵大庆,王莹,韩玺山.风力发电场的主要环境问题[J].环境保护科学,2005,6(3):152-155.
- [3] 吴伟.基于 Weibull 风速概率分布参数的计算及应用[J].电子杂志,2008(1): 67-70.
- [4] 朱德臣,汪建文.风工况双参数威布尔分布 k 值影响研究[J].太阳能,2007(6): 34-36.
- [5] Anderson PM, Bose A. Stability simulation of wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(12): 3791-3795.
- [6] 舒新玲,周岱.风速时程 AR 模型及其快速实现[J].空结构,2003,12(9):27-32.
- [7] Drahomir Novak, Stoyan Stoyano, Hans Herda. Error assessment for wind histories generated by autoregressive



- method[J]. Structural safety, 1995, 17(2):79-90.
- [8] E. Welfonder, R. Neifer, and M. Spanner. Development and experimental identification of dynamic models for wind turbines. Contr. Eng. Practice. 1997, 5(1): 63-73.
- [9] Cristian Nichita, Dragos Luca, Brayima Dakyo, and Emil Ceanga. Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulators[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. 2002, 17(14): 523-529.
- [10] 李东东,陈陈.风力发电系统动态仿真的风速模型[J].中国电机工程学报,2005, 25(21):41-44.
- [11] Iannuzzi A, Spinelli P. Artificial wind generation and structural response[J]. Journal of structural engineering, 1987, 113(12): 2382-2398.
- [12] Calif R. PDF models and synthetic model for the wind speed fluctuations based on the resolution of Langevin equation[J]. Applied Energy, 2012, 99(C): 173-182.
- [13] Simiu E, Scanlan R H. 风对结构的作用-风工程导论[M]. 刘尚培, 项海帆, 谢黎明, 译. 第 2 版. 上海: 同济大学出版社, 1992: 33-40.
- [14] Petersen E L, Mortensen N G, Landberg L, et al. Wind power meteorology . Part I : Climate and turbulence[J]. Wind Energy, 1998, 1(Supplement 1): 25-45.
- [15] Nichita C, Luca D, Dakyo B, et al. Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(4): 523-529.
- [16] 丁明,吴伟,吴红斌等.风速概率分布参数预测及应用[J].电网技术,2008, 32(14):10-14.
- [17] 杨之俊.基于 Matlab 的组合风速建模与仿真[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2008, 13(3): 74-77.
- [18] 魏毅立,韩素贤,时盛志.风力发电系统中组合风速的建模及仿真[J]. 可再生能源, 2010, 28(12): 18-20.
- [19] 李永乐,周述华,强士中.大跨度斜拉桥三维脉动风场模拟[J]. 土木工程学报,2003.36(10):60-65.
- [20] 袁波,应惠清,徐佳炜.基于线性滤波法的脉动风速模拟及其 Matlab 程序的实现[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 55-61.
- [21] 温鹏,沈炯,李益国,潘蕾.基于自回归法的风电场脉动风速模拟[J].电网技术, 2009,33(5):75-78.
- [22] 李春祥,谈雅雅,李锦华.基于 ARMA 模型模拟高架桥的脉动风速时程[J].振动与冲击,2009, 28(6): 46-59.
- [23] 郭鹏.双自回归滑动平均模型风速预测研究[J].现代电力,2009,26(6):66-69.

## Simulation of Turbulent Wind Speed for the Wind Turbine's Dynamic Analysis

ZHOU Rui,ZHOU Lianjun,YIN Minghui, ZOU Yun

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu Province, China)

**Abstract:** The biggest difference between the wind power generation and the traditional energy generation is that wind is random and uncontrollable. Because the conditions of wind speed have an important influence on the wind power system, the accuracy of fan dynamic analysis is dependent on the fluctuating wind speed simulation. In order to offer the reference for the way of the wind speed simulation to the fan dynamic analysis, the paper takes four ways each of which is based on the Weibull distribution, the combined wind speed, filtering and the ARMA model to simulate and compare the results of the simulations with the real wind speed. It is shown that the ways based on filtering and the ARMA model is better in applying to the wind power system dynamic simulation, through which the wind speed produced can reflect the statistical laws and the properties of turbulence.

**Key words:** wind speed simulation; Weibull distribution; filtering; ARMA