

DOI: 10.7667/PSPC170021

# 弱一致性风速分布山区风电场机电暂态建模及适用性研究

韩松, 王兴龙

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 为提升高海拔山区风电场接入系统动态特性分析的有效性和准确性, 有必要开展考虑高海拔山区弱一致性风速分布的风电场机电暂态建模及适用性研究。首先回顾了高海拔山区风电场风速特点; 其次讨论了常用的风电场简化模型建模方法; 然后提出了一种基于 PSS/E 自定义风速时空分布模型的风电场详细建模方法。案例分析在贵州某高海拔山区风电场展开, 通过风速分布变化、低风速风机切入、低风速风机切出等场景下详细模型和简化模型比较, 分析了它们的适用性。

**关键词:** 风速空间分布; 弱一致性; 自定义风速模型; 山区风电场; 适用性分析

## Modeling of DFIG based wind farm considering temporal and spatial non-uniformity of wind speed in mountainous region and its applicability analysis

HAN Song, WANG Xinglong

(Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to improve the validity and accuracy of wind farm integrated power system dynamic analysis in high-altitude mountainous region, it is necessary to study on modeling of double-fed induction generator (DFIG) based wind farm considering non-uniformity of wind speed in mountainous region and its applicability analysis. Firstly, the wind speed characteristics of wind farm in high-altitude mountain can be reviewed. Secondly, the simplified modeling method for wind farm could be discussed briefly. Thirdly, a detailed modeling method for wind farm based on a user-defined model with temporal and spatial distribution of wind speed using PSS/E is proposed. A case study is carried on a high-altitude mountainous wind farm in Guizhou which may analyze the applicability of detailed model and simplified model by the comparisons in three scenarios involving the variation of wind speed distribution, cut-in wind speed, and cut-out wind speed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51567006) and Training Program for Outstanding Young Scientists and Educators of Guizhou (No. 2012151).

**Key words:** temporal and spatial distribution of wind speed; non-uniformity; user-defined model for wind speed; mountainous wind farm; applicability analysis

## 0 引言

风力发电已经成为我国新能源发电的主要形式, 但风电出力具有随机性和间歇性以及反调峰特性, 给电力系统安全稳定运行带来了新的挑战<sup>[1]</sup>。因此, 开展高海拔山区风电场数学模型及其适应性研究, 更好地掌握风电场接入系统动态特性, 对于电网规划建设和运行调度具有重要意义。

传统上, 风电场建模主要考虑风力发电机机电暂态模型的内在联系, 其中一些早期文献未考虑升压站内常用的静止型无功补偿装置(Static Var Compensator, SVC)<sup>[2-5]</sup>。但是风电场并网时, 发出或吸收无功能力有限, 不能承担电网电压调整<sup>[6-9]</sup>。尤其高海拔山区风电场的风功率特性更易造成并网点(Point of Common Coupling, PCC)电压、频率波动。在风电场接入地区电网的机电暂态分析中, 应考虑 SVC 模型的接入。此外, 文献[10-13]在风速模拟上采用平均风速, 而受到山区地貌、加速效应及时延效应等影响, 风电场内风速变化差异较大。因此,

**基金项目:** 国家自然科学基金(51567006); 贵州省科教青年人才培养工程项目(2012151)

这种简化方法并不能体现高海拔山区风力时空分布弱一致性的特点。文献[14-16]关注风电场等值建模,开展了考虑风速、集电线路等因素的建模分析与研究。但对于弱一致性风速分布的高海拔山区风电场建模适用性的研究相对鲜见。

为提升高海拔山区风电场接入系统动态特性分析的有效性和准确性,带着简化模型和详细模型适用性的思考,提出了一种基于 PSS/E 自定义风速时空分布模型的风电场详细建模方法,开展了考虑高海拔山区弱一致性风速分布的风电场机电暂态建模及适用性研究。

## 1 山区风电场风速的弱一致性

山区风电场中,某高度平均风速比平地相应高度平均风速有所增加,即加速效应<sup>[10]</sup>。通常用加速比来定量描述。

$$\Delta S = \frac{V(z) - V_0(z)}{V_0(z)} \quad (1)$$

式中:  $V(z)$  表示山区地面以上  $z$  高度处的风速;  $V_0(z)$  表示平地地面以上  $z$  高度处的风速。

两山体之间,单个山体风速的加速比受到山体坡度、高度、地貌的影响<sup>[17]</sup>。被挡山体加速比还受两山体距离、遮挡山体坡度的影响,计算式为<sup>[18]</sup>

$$\Delta S_{AD} = \eta_{dl} \eta_{dh} \Delta S \quad (2)$$

式中,  $\eta_{dl}$ 、 $\eta_{dh}$  分别为两山体距离系数和遮挡山体坡度系数。

复杂山地具有与两山体完全不同的风场特性,不同的山体间隔距离、遮挡山体坡度和高度致使各山体风速加速比不同。此外,山区风电场机位点分布较分散,时延效应更为明显<sup>[19]</sup>。可见,山区风电场内风速时空分布差异较大,具有弱一致性的特点。

## 2 风电场简化建模

### 2.1 风力发电机简化模型

设风电场由  $N$  台型号相同的双馈发电机 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) 组成,分为  $m$  组,每组  $n$  台风机,如图 1 所示。每组机群等效为一台发电机组,风电场简化模型如图 2 所示。

简化模型中,风电机群相关参数计算<sup>[13]</sup>如下所述。其中,带有下标“eq”的变量表示简化模型中相应的变量。

#### 1) 功率参数

$$P_{eq,m} = \sum_{i=1}^n P_{m,i}, \quad Q_{eq,m} = \sum_{i=1}^n Q_{m,i} \quad (3)$$

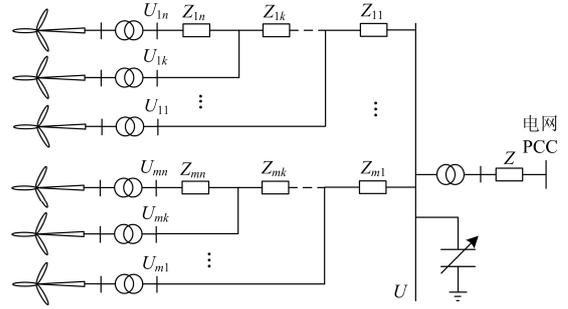


图 1 风电场详细模型

Fig. 1 A detailed model for wind farm

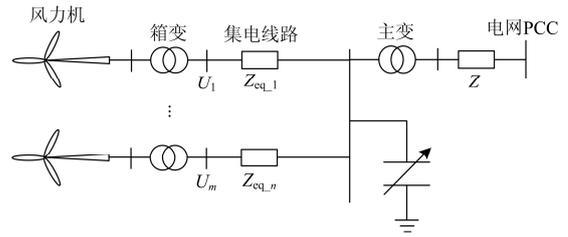


图 2 风电场简化模型

Fig. 2 A simplified model for wind farm

#### 2) 发电机参数

$$\begin{cases} x_{s,eq} = \frac{x_s}{m}, x_{r,eq} = \frac{x_r}{m}, x_{m,eq} = \frac{x_m}{m} \\ r_{s,eq} = \frac{r_s}{m}, r_{r,eq} = \frac{r_r}{m} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x_s$  和  $x_r$  分别为发电机定子电抗和转子电抗;  $x_m$  为发电机励磁电抗;  $r_s$  和  $r_r$  分别为发电机定子电阻和转子电阻。

#### 3) 轴系参数

$$\begin{cases} T_{g,eq} = mT_g, T_{l,eq} = mT_l \\ K_{s,eq} = mK_s, D_{s,eq} = mD_s \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $T_g$  和  $T_l$  分别为发电机和风力机的转子惯性时间常数;  $K_s$  为轴系刚度系数;  $D_s$  为阻尼系数。

集电线路简化计算如下所述。

#### 1) 变压器参数

$$\begin{cases} S_{T,eq} = mS_T \\ x_{T,eq} = \frac{x_T}{m} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $S_T$  为变压器容量;  $x_T$  为变压器电抗。

#### 2) 电缆参数

风电场风机之间通过 0.6 km 左右的电力电缆并入集电网络,距离较短,其阻抗可以忽略。每组

集电网络的阻抗可用平均值简化, 即

$$Z_{eq,m} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_{mi}}{n} \quad (7)$$

### 2.2 风电场风速简化模型

简化风电机组的风速可用同群风电机组风速的平均值来表示, 即

$$V_{w,eq} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{w,i}}{n} \quad (8)$$

式中:  $V_{w,eq}$  为简化机组的风速;  $V_{w,i}$  为同群机组编号为  $i$  处的风速。

## 3 基于 PSS/E 的风电场详细建模

风电场详细模型包括空气动力模型、双馈发电机、箱式变压器、集电线路、升压变压器、无功补偿装置等。

### 3.1 DFIG 模型

DFIG 动态模型由发电/变流器、电气控制、机械转动、桨距角控制等模型组成, PSS/E 软件中双馈风机模型如图 3 所示。

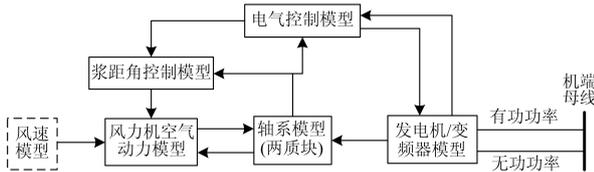


图 3 PSS/E 中双馈风机模型框图

Fig. 3 Model of DFIG in PSS/E

### 3.2 空气动力模型

PSS/E 给出了一类空气动力的线性模型, 适用于发生扰动后风速保持 5~30 s 不变的情况<sup>[3]</sup>。标准空气动力模型如式(9)所示。

$$P_{mech} = 0.5\rho AC_p V_w^3 \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为实际风电场空气密度( $g/m^3$ );  $A$  为风叶扫风面积( $m^2$ );  $C_p$  为风能利用系数, 其理论最大值为 0.593, 其实际值通常在 0.47 左右;  $V_w$  为风速( $m/s$ )。

### 3.3 风速模型

根据风速的变化特性, 风电场的风速一般分为 4 种基本模型: 基本风、斜坡风、阵风和随机风, 其中, 基本风主要反映风电场中平均风速变化, 决定风力发电机的输出功率。

PSS/E 软件中, 由稳态潮流计算结果得到基本风的初始风速  $V_0$ , 可供动态仿真时调用。考虑山区地形因素、加速效应和时延效应等对风速的影响, 为了分析风速变化下, 风电系统的动态稳定性, 自定义了式(9)的空气动力模型和式(10)中的风速模

型。可改变式(10)中相应参数模拟不同机位点平均风速的变化。相关自定义方法及步骤参见文献[20]。

$$V_w = \begin{cases} V_0 & t < t_0 \\ V_0 + \frac{V_1 - V_0}{t_1 - t_0} \times (t - t_0) & t_0 < t < t_1 \\ V_1 + \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \times (t - t_1) & t_1 < t < t_2 \\ V_2 & t_2 < t < t_3 \\ V_2 + \frac{V_3 - V_2}{t_4 - t_3} \times (t - t_3) & t_3 < t < t_4 \\ V_3 + \frac{V_4 - V_3}{t_5 - t_4} \times (t - t_4) & t_4 < t < t_5 \\ V_4 + \frac{V_5 - V_4}{t_6 - t_5} \times (t - t_5) & t_5 < t < t_6 \\ V_5 & t > t_6 \end{cases} \quad (10)$$

### 3.4 SVC 模型

PSS/E 软件一般常采用其 CSVGN5 模型来模拟 SVC 装置, 如图 4 所示。

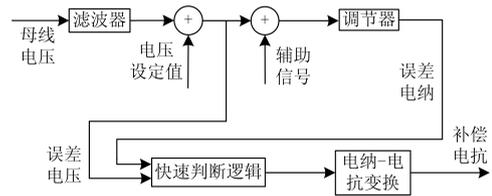


图 4 PSS/E 中 CSVGN5 模型框图

Fig. 4 CSVGN5 model for SVC in PSS/E

## 4 案例分析

贵州某山区风电场地理分布如图 5 所示, 包含区域地形、风资源、风力发电机、集电线路分布等信息。该风电场共有 50 台风机, 每台风机额定有功容量 2 MW, 单台风机机端电压为 0.69 kV。50 台风机分为 6 组, 通过箱式变压器升压至 35 kV 后, 利用电力电缆输送到 110 kV 升压变 35 kV 侧。



图 5 风电场地理分布示意图

Fig. 5 Geographic diagram of a wind farm

风电场风机详细连接图参见附录图 A 所示。依据风速分布的风电场分群情况如表 1 所示。

表 1 依据风速分布的风电场分群

组数	机组序号
1组	43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50
2组	36, 37, 38, 39, 40, 41, 42
3组	19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
4组	27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35
5组	8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18
6组	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13

由表1可见，每组机群风机数不同，且风机并不是严格按照编号来分组。第6组机群位置较分散。

#### 4.1 风速分布变化场景

该山区属于低风速范畴，风速易受地形的影响，不同位置的风速差异较大。风速主要分布在 2~10 m/s 风速段。风电场机群切入风速：3 m/s，平均风速：6.5 m/s，额定风速：9.5 m/s，切出风速：20 m/s。

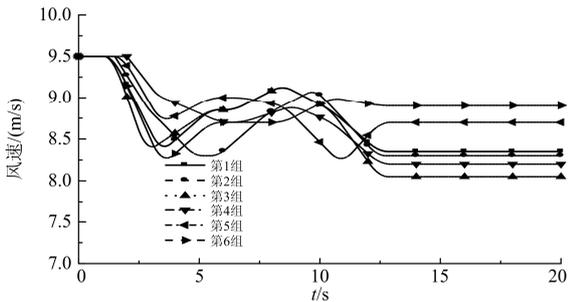


图 6 每组机群拟合风速曲线

Fig. 6 Fitting curves of wind speed for each group

为凸显不同机位点处风速变化，在额定风速附近，利用 PSS/E 软件自定义功能，根据式(10)对风速的定义，建立 50 组风机处的不同风速平均值，见附录图 B。根据式(8)，简化模型中等值机组的风速根据详细模型中每组机群风速拟合求取，如图 6 所示。详细模型和简化模型有关变量如图 7 所示。

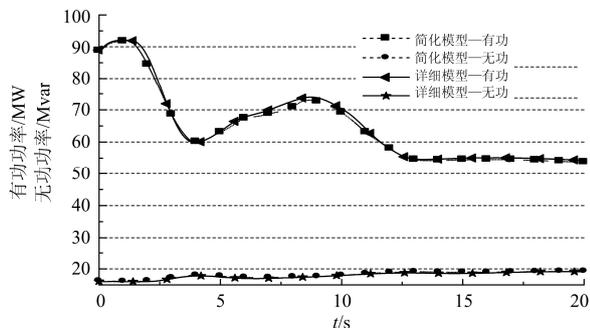


图 7 考虑自定义风速分布的详细模型与简化模型的对比  
Fig. 7 Comparisons between the simplified and detailed models by an user-defined model of wind speed

由图 7 可见，简化模型瞬时有功最大偏差为 2.1 MW，瞬时无功最大偏差为 1.9 Mvar。

为说明简化模型的合理性，定义有功功率平均偏差 $E_P$ 和无功功率平均偏差 $E_Q$ 作为评价指标<sup>[10]</sup>，计算式为

$$E_P = \frac{\sum_{n=1}^N |P_{in} - P_n|}{\sum_{n=1}^N |P_n|}; E_Q = \frac{\sum_{n=1}^N |Q_{in} - Q_n|}{\sum_{n=1}^N |Q_n|} \quad (11)$$

式中： $P_{in}$ 和 $Q_{in}$ 分别代表简化风电场PCC处有功功率和无功功率； $P_n$ 和 $Q_n$ 分别代表详细风电场PCC处有功功率和无功功率； $n$ 表示对每一步仿真步长进行积分计算的序列号。

不同场景下，简化模型的相对偏差如表2所示。其中，故障扰动为PCC母线与电网侧母线之间连接线路三相短路，扰动时间设为0.25 s。

表 2 简化和详细模型之间的偏差

相对偏差	$E_P/\%$	$E_Q/\%$
(相同风速)稳态	2.93	19.46
(相同风速)故障	3.12	12.63
(不同风速)稳态	5.84	9.89
(不同风速)故障	5.80	9.94

由表 2 可见，当风速相同时，风电场输出有功功率偏差较小，而无功功率偏差较大；风速分布变化时，输出有功功率偏差增至 5.8%、无功功率偏差减少至 9.9%。由此可见，风速在额定值附近变动下，该简化模型能较准确地反映风电场的功率输出特性<sup>[16]</sup>。

#### 4.2 低风速风机切入场景

假设风速从 0.5 m/s 逐渐增加至 7 m/s。风速增至切入风速时，风机投入运行。风电场 PCC 母线注入功率如图 8 所示。

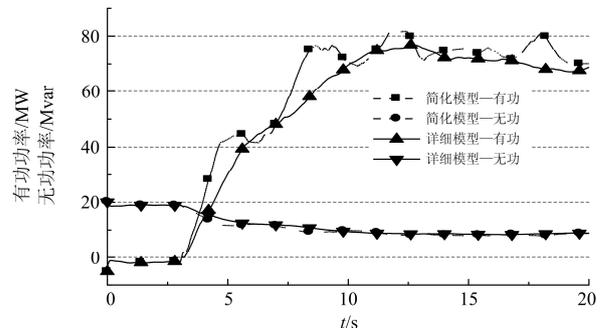


图 8 切入风速情形下详细模型与简化模型的对比  
Fig. 8 Comparisons between the simplified and detailed models in the case of cut-in wind speed

由图 8 可见, 简化模型瞬时有功功率输出最大偏差为 20 MW, 瞬时无功功率输出最大偏差为 5.75 Mvar, 且简化模型中, PCC 母线处注入有功功率波动较大。该场景表明, 风速从 0.5 m/s 逐渐增加的过程中, 用简化模型开展风电系统动态仿真, 会产生较大偏差。

### 4.3 低风速风机停运场景

该风电场第 6 组机群位置较分散。故假设第 6 组机群中, #1~#7 风机风速从额定风速逐渐降低到 3 m/s 附近, 而#12、#13 风机风速处于额定风速附近。此时, 第 6 组机群输出功率如图 9 所示。

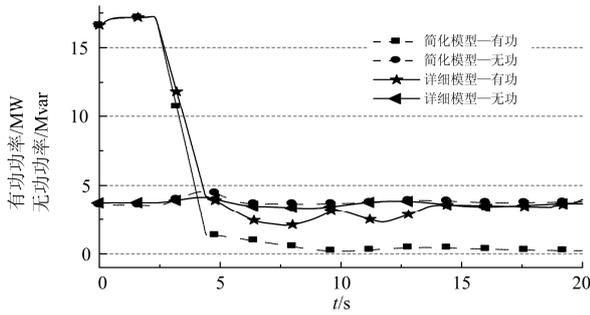


图 9 低风速下详细模型与简化模型中第 6 组机群的对比  
Fig. 9 Comparisons of group 6 generators between the simplified and detailed models in the case of low wind speed

由图 9 可见, 当风电场风速逐渐降低时, 简化模型瞬时有功功率输出误差较大。在 Intel I5 CPU 4 GB RAM 硬件环境及 PSS/E V33.04 软件环境下, 对两模型进行动态仿真耗时比较。该风电场详细模型仿真耗时为 0.5735 s, 简化模型仿真耗时为 0.2060 s。由仿真耗时比较可见, 虽然简化模型仿真耗时较短, 但其有功功率输出偏差较大, 不能满足风电场动态仿真需求, 故应采用详细模型分析风电系统动态特性。

由以上分析可见, 当风速在额定值附近变动时, 简化模型相对偏差在合理范围内, 可用于风电接入区域性系统的动态特性分析。当风电场内风速较小或部分机组处于低风速运行状态时, 虽然简化模型仿真耗时较详细模型的短, 但会产生较大偏差, 并不能代替详细模型分析风电场接入系统的动态响应。此外, 简化模型不能反映风电场内风机停运的情况。

## 5 结论

借助 PSS/E 软件, 结合贵州某山区风电场实例, 开展了考虑高山区弱一致性风速分布的风电场机电暂态建模及适用性研究, 得到如下结论:

1) 山区风电场风速处于风机额定风速附近时, 简化模型相对偏差在合理范围内, 可用于风电接入区域性电网的动态特性分析。

2) 在风速弱一致性或时空非一致性的风电场中, 利用传统等值方法而得到的简化模型中, 并网注入功率相对偏差较大, 甚至不可接受。因而该情景下, 可采用文中的详细模型分析风电接入区域性电网的动态特性。

3) 详细模型能体现山区风电场的弱一致性风速分布特征, 适用于山区风电场内低风速变化场景分析、内部故障扰动分析以及高密度风电接入局部电网的动态特性分析。

## 附录

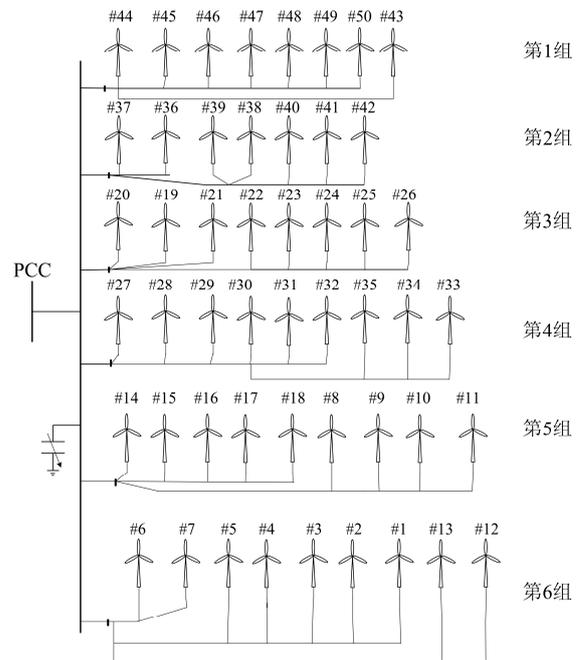
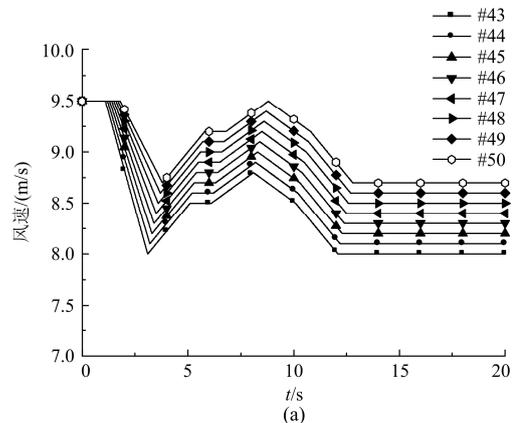


图 A 贵州某风电场风机详细连接图  
Fig. A Electrical diagram of a wind farm in Guizhou



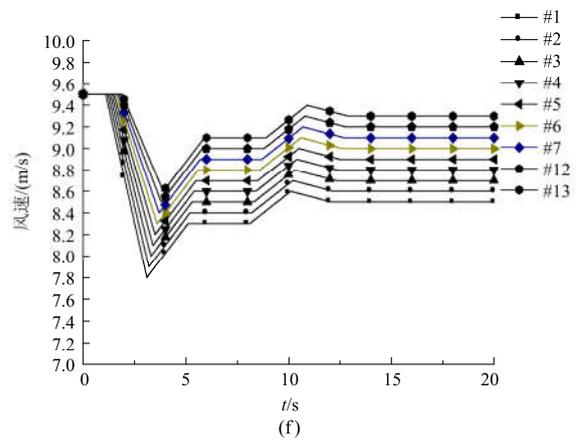
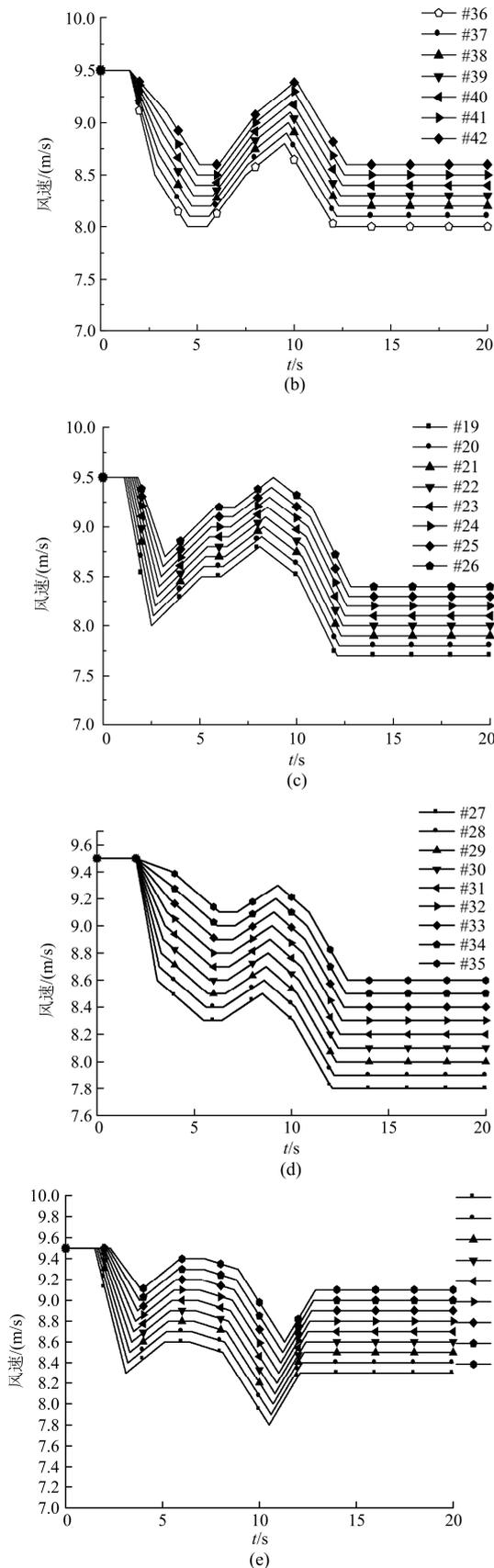


图 B 风电场详细模型中每组机组风速取值

Fig. B Wind speed for each group of unit in the detailed model of wind farm

参考文献

[1] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp. DOI 10.1186/s41601-016-0016-y

[2] 刘涛, 戴汉扬, 宋新立, 等. 适用于电力系统全过程动态仿真的风电机组典型模型[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 609-614.

LIU Tao, DAI Hanyang, SONG Xinli, et al. A typical wind power generation set model of suitable for full dynamic simulation of power grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 609-614.

[3] 马宁宁, 王德林. 风电系统的空气动力 PSS/E 自定义模型[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 80-83.

MA Ningning, WANG Delin. Aerodynamic models of wind power systems by using the PSS/E user-defined function[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(5): 80-83.

[4] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.

ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.

[5] 徐琼璟, 徐政. PSS/E 中的风电机组通用模型概述[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 176-182.

XU Qiongjing, XU Zheng. A survey on general models of wind turbine generators in PSS/E[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 176-182.

[6] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.

LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch

- wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.
- [7] LO K L, EDRAH M, ANAYA-LARA O. Reactive power control of DFIG wind turbines for power oscillation damping under a wide range of operating conditions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(15): 3777-3785.
- [8] 边晓燕, 王本利, 陈建平, 等. 改进的 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制改善风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 9-16.  
BIAN Xiaoyan, WANG Benli, CHEN Jianping, et al. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using coordinated control of the improved DFIG and VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 9-16.
- [9] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 112-119.  
XU Hailiang, ZHANG Wei, CHEN Jiansheng, et al. A high-voltage ride-through control strategy for DFIG based wind turbines considering dynamic reactive power support[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 112-119.
- [10] 李正良, 孙毅, 魏奇科. 山区平均风加速效应数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 32-37.  
LI Zhengliang, SUN Yi, WEI Qike. Numerical simulation of mean velocity speed-up effect in hilly terrain[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 32-37.
- [11] 洪翠, 林维明, 温步瀛. 风电场风速及风电功率预测方法研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(1): 60-66.  
HONG Cui, LIN Weiming, WEN Buying. Overview on prediction methods of wind speed and wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(1): 60-66.
- [12] 曹娜, 赵海翔, 任普春, 等. 风电场动态分析中风速模型的建立及应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 68-72.  
CAO Na, ZHAO Haixiang, REN Puchun, et al. Establish and application of wind speed model in wind farm dynamic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 68-72.
- [13] 文贤馥, 肖永, 林呈辉, 等. 贵州高原山区空气密度对风电功率影响研究[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 101-103.  
WEN Xiankui, XIAO Yong, LIN Chenghui, et al. Research on the impact of the air density on the wind power in Guizhou plateau mountainous region[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 101-103.
- [14] 徐玉琴, 张林浩, 王娜, 等. 计及尾流效应的双馈机组风电场等值建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 70-76.  
XU Yuqin, ZHANG Linhao, WANG Na, et al. Study on equivalent model of wind farms with DIFG considering wake effects[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 70-76.
- [15] 严干贵, 李鸿博, 穆钢, 等. 基于等效风速的风电场等值建模[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(3): 13-19.  
YAN Gangui, LI Hongbo, MU Gang, et al. Equivalent model of wind farm by using the equivalent wind speed[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2011, 31(3): 13-19.
- [16] 米增强, 苏勋文, 余洋, 等. 双馈机组风电场动态等效模型研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 72-77.  
MI Zengqiang, SU Xunwen, YU Yang, et al. Study on dynamic equivalence model of wind farms with wind turbine driven doubly fed induction generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 72-77.
- [17] 孙毅, 李正良, 黄汉杰, 等. 山地风场平均及脉动风速特性试验研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5): 593-599.  
SUN Yi, LI Zhengliang, HUANG Hanjie, et al. Experimental research on mean and fluctuating wind velocity in hilly terrain wind field[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(5): 593-599.
- [18] 李正良, 魏奇科, 孙毅. 复杂山地风场幅值特性试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 184-191, 198.  
LI Zhengliang, WEI Qike, SUN Yi. Experimental research on amplitude characteristics of complex hilly terrain wind field[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 184-191, 198.
- [19] 孙辉, 徐箭, 孙元章, 等. 考虑风速时空分布及风机运行状态的风电场功率计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 30-38.  
SUN Hui, XU Jian, SUN Yuanzhan, et al. A method for wind power calculation considering wind speed spatial and temporal distribution status[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 30-38.
- [20] 张东辉, 金小明, 周保荣, 等. PSS/E 的自定义建模及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 82-87.  
ZHANG Donghui, JIN Xiaoming, ZHOU Baorong, et al. User-defined modeling in PSS/E and its applicability in simulations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 82-87.

收稿日期: 2017-01-04; 修回日期: 2017-03-10

作者简介:

韩松(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为交直流电力系统动态分析, 新型电力电子装备以及配电网规划与运行; E-mail: shan@gzu.edu.cn

王兴龙(1989—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定。E-mail: 1019721557@qq.com

(编辑 姜新丽)