

# 仿真技术在风力发电系统中的应用

李长青, 丁立新, 赵书强  
(华北电力大学, 河北保定, 071003)

**摘要:** 本文简单介绍了仿真技术在风力发电系统的应用情况, 重点分析了风速、风电机组以及风电场的建模方法和模型结构, 最后结合我国风电系统发展实际, 说明了应用风电场仿真机解决运行人员培训问题的重要意义。

**关键词:** 风力发电, 风电场, 仿真, 模型, 建模方法, 仿真机

## 0 引言

出于保护环境的考虑以及全球面临的能源短缺现状, 风力发电在世界范围内得到了快速发展。随着风电行业的技术进步, 风力发电成本逐步降低, 在经济性上已经能够与核能发电、水力发电展开竞争。当前, 我国面临电力短缺局面, 在煤电占主导地位的我国电力行业, 因环境承载力限制以及各种因素导致的煤炭短缺局面, 煤电发展受到制约。而我国风能资源丰富, 风能利用得到了政府的政策支持, 风力发电产业面临前所未有的发展机遇。近几年来, 我国风电产业发展势头良好, 多个大型风电场处于建设或规划阶段。

我国风电产业发展尚存在诸多制约因素。就技术层面而言, 大型风力发电设备生产技术不过关, 大多从国外采购或引进技术生产, 研发基础薄弱; 对风电机组或风电场的运行特性的研究不足, 设备运行管理水平还有待提高。将仿真技术广泛应用于风力发电设备的设计、试验测试、运行分析等各个方面, 将有助于加快我国风力发电技术的发展步伐, 是缩小与发达国家技术差距的捷径。

## 1 仿真技术在风力发电系统的应用概况

随着风力发电在世界的广泛应用, 为降低风力发电成本、提高风能利用效率, 风力发电设备单机容量越来越大, 同时为风机的设计制造、控制系统设计和运行等各个方面提出了更多的研究课题。传统的实物测试研究方法已不能满足发展需要, 仿真技术因不受气象条件的限制, 且投入低等优点, 逐渐在风力发电机组的研究和测试领域得到了越来越广泛的应用。

仿真即选取一个物理的或抽象的系统的某些行为特征, 用数学模型来表示它们的过程, 若用计算机求解数学模型, 称为计算机仿真。通俗说来, 仿真是指使用仪器设备、模型、多媒体技术, 以及利用场地、环境的布置, 模仿出真实系统的工作特性和环境, 进而用于科学研究、工业设计、预测预报或教学训练等目的的一项综合技术。仿真若仅限于设计研究目的, 则无需仿真对象系统的环境, 亦无实时仿真的必要, 借助一台主流微型计算机和商业仿真软件即可开展仿真研究工作。

1980年代初, 国外学者开始将仿真方法用于风电机组的性能研究[1], 其后, 仿真技术在风力发电系统的应用范围逐渐拓展。目前, 从风电关键设备和控制系统的设计、制造、性能测试与研究, 风电机组或风电场运行分析等各个方面均有仿真技术的应用。仿真技术的应用在很大程度上替代了传统的利用实际设备开展的设计检验等手段。主要的研究方向整理如下。

1) 风能特性仿真, 反映风能的位置分布和时间变化特性。风能特性仿真结果将用于风力发电机组或风电场的仿真分析中, 是风电仿真研究的基础。

2) 风力发电机组仿真, 仿真特定风力机组在风能变化下输出电能的变化规律, 分析其特性, 寻找设备本身存在的不足, 提供改进建议。表征电能特性的参数主要包括有功功率、无功功率、电压和频率。

3) 控制系统仿真, 建立待检验的控制系统的仿真模型和控制对象的仿真模型, 建立模型间的相互联系。改变仿真风电机组的风能参数或工作状态, 测试在各种不同运行方式下控制系统的动作特性和工作效果, 寻找控制系统设计中存在的问题, 改进设计后修正仿真模型进一步验证, 直到控制系统满足设计和运行要求。

4) 风电场仿真, 针对特定风电场的具体风能特性和实际(或规划设计)安装的风电机组情况, 建立整个风电场的仿真模型。研究风能变化、风机介入或退出系统对风电场电能特性的影响, 进而分析风电场建设的可行性, 分析风电场不同运行方式下对电力系统的影响, 或用于运行人员培训, 提高风电场运行管理水平。

国内利用仿真技术开展风电系统研究的起步较晚, 公开发表的仿真研究成果不多, 尚未形成气候。近几年情况在发生变化, 更多的研究人员已经将仿真技术引入风电系统的研究工作中, 相信近期内将会有更多的高水平仿真研究成果发表, 并能有力促进风电产业的技术进步。

## 2 风能及风电机组仿真模型

与常规发电机组(如火电、水电、核电)相比, 风力发电机组的突出特点是输入能量不受控制, 这一特点导致风力发电机组在构成上与常规发电机组有着很大的不同且呈现出多样化特点。我们知道, 常规发电机组的机械能-电能转换装置普遍采用同步发电机, 而并网型风电机组采用的发电机则形式多样, 如恒速恒频同步/异步发电机、交/直/交发电机、磁场调制发电机、交流励磁双馈发电机等。因采用的发电机类型不同, 相应的控制系统区别很大, 电能参数随风能变化的特性也有很大的不同。

仿真研究人员需要根据风力发电机组的特点开发针对性的仿真模型软件。限于篇幅, 本文主要介绍共性部分的仿真。

### 2.1 典型风力发电机组的仿真模型总体结构

在风电场中得到广泛应用的恒速风力机如图 1 所示[2], 异步发电机将风轮吸收的机械能转化成电能, 发电机转速随发电量的变化而在一定范围内变化, 因转速变化范围很小(1%左右), 通常称为恒速系统。恒速系统通常选用失速型调节方式。

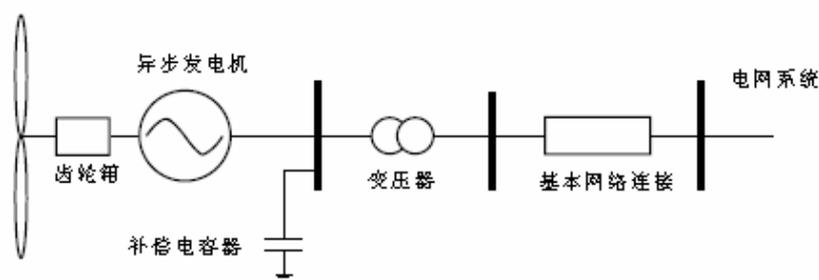


图 1 恒速风力机系统示意图

一种典型的变速风力发电机组见图 2, 它采用双馈异步发电机(DFIG)。发电机的定子线圈直接与电网相连, 转子线圈则通过滑环和电力电子逆变器与电网连接。因此, 当风速变化引起发电机转速变化时, 通过控制转子电流的频率, 可保持定子频率的恒定, 进而实现风力发电机组的变速运行。在高风速条件下, 通过调整叶片桨距限制风力机的输出功率。

上述两种风力发电机组的仿真模型的总体结构分别表示在图 3 和图 4 中[3]，变速风力机的控制系统要比恒速系统复杂得多，其仿真模型相应增加了桨距角、转速、端电压等控制器子模型和变频器的仿真模型。

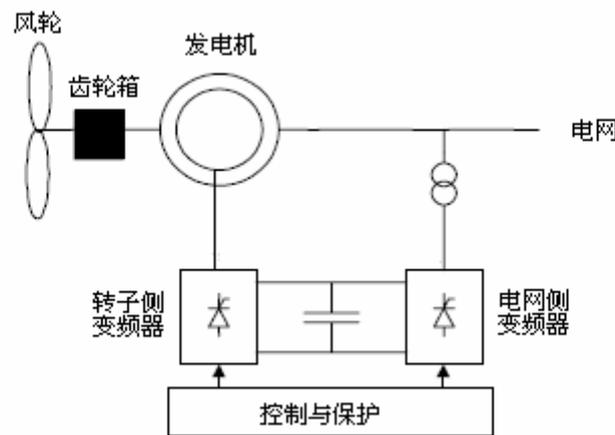


图 2 典型的双馈发电机组系统示意图



图 3 恒速风力机仿真模型的总体结构

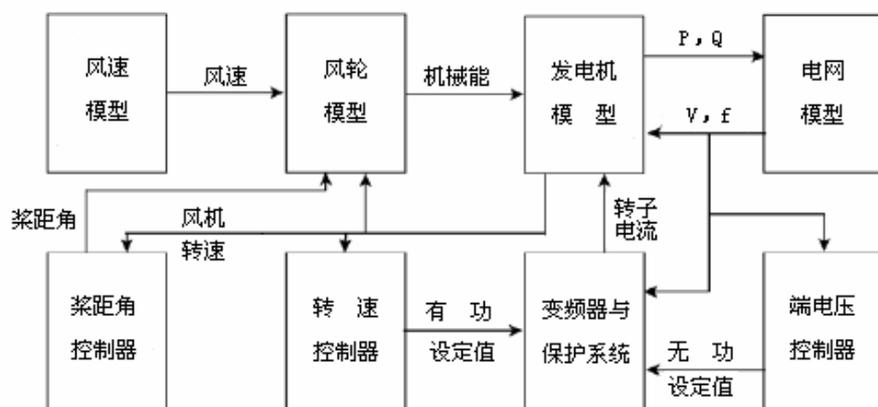


图 4 变速风力机仿真模型的总体结构

## 2.2 风能特性模型

描述风能特性的参数主要有风速、风向和风密度。风的密度主要取决于风机所处的地理位置，气候变化也会产生一定影响，对于特定风机而言，风密度可以直接取自测量数据，并可以忽略密度的变化；针对研究型的仿真应用，风向的变动可不予考虑，即假定风力机一直跟踪风向的变化。因此，我们主要关注风速的变化特性。

风因大气环流形成，风速是一个典型的随机变量。若不考虑风的方向性，风速是其空间坐标位置和时间的函数，即  $v=f(x, y, z, t)$ 。我们将描述某一区域风速的空域、时域分布变化特性的模型又称为风场模型 (Wind Field Model)。严格说来，各空间位置上的风速因

风的随机性、风场地形等因素影响而各不相同，因此，要建立一个准确的风场模型几乎是不可能的，需要进行一定的简化处理。

若风场的地形相对平坦，周边空旷，则基本可以认为在同一高度层上整个风场内各点的风速是相同的，这样可以将风场风速的三维空间模型简化为沿高度方向变化的一维模型。对于空间分布广，且地形复杂的大型风电场，可以将整个风场划分成几个区域，针对不同区域的风能特点建立简化的一维空间模型，形成分段集总式一维模型。风速空域模型转化为研究风速沿地平面高度方向的变化规律，借助空气动力学理论和风场测量数据，模型不难建立。

在时间维度上，大时期尺度（小时、天）的风速变化范围很大，且没有规律可循，只能根据风场监测记录数据拟合出风速变化模型。对于绝大多数仿真应用而言，我们不太关心大时间尺度的风速变化，而重点关注小时间尺度上的风速变化特性。在小时间尺度上观察，风速随时间的变化呈现出脉动变化的特点，即风速均值在一段时间内基本不变，风速在均值附近波动，国内外学者据此提出了各种描述风频分布的方法，如概率分布模型、瑞利分布模型、对数正态分布模型等[1]。

需要说明的是，在建立风电场内各风力发电机组的仿真模型时，需要考虑到风力机的尾流效应，即上游风力机对下游风力机流入风速的影响，影响关系和程度取决于风向、风速和风机安装位置关系，此时，风力机的输出机械能通常由尾流系数予以校正。

### 2.3 风力机模型[4]

风力机实际能够获得的机械功输出为：

$$P_f = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho v^3 C_p \quad (1)$$

式中， $R$ 、 $\rho$ 、 $v$ 和 $C_p$ 分别为风轮半径、空气密度、风速和风能利用系数。

$C_p$ 代表风力机能够从风能中提取出机械能的程度，它取决于风力机叶片的结构和运行状态，其数值由风机厂家提供。 $C_p$ 主要是叶尖速比 $\lambda$ 和桨距角 $\beta$ 的函数，即 $C_p = f(\lambda, \beta)$ ，对于投入运行的风力机，叶片的洁净程度对 $C_p$ 的影响很大，譬如叶片结冰、污物聚集等会改变叶片的气动外型，进而降低风能利用系数的数值。

叶片的叶尖圆周速度与风速的比值称为叶尖速比，即：

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2)$$

风力机的输出机械转矩由下式计算：

$$T_f = \frac{1}{2} \pi R^3 \rho v^3 C_T \quad (3)$$

式中， $C_T$ 为风机转矩系数，它是叶尖速比 $\lambda$ 的函数，与风力机结构和运行状态相关。

输出机械转矩确定后，针对不同的发电机类型，不难建立发电机电能和风力机转速仿真模型。

### 3 风电场仿真模型

#### 3.1 集总建模方法

风电场通常由几百台甚至上千台风力发电机组构成，涉及多种风力机型号和发电机类型，还需考虑各风力机间的相互影响，使得风电场仿真变得很复杂。

按正常思路，要建立风电场的仿真模型，需要针对风电场中的全部风力机，一一建立其仿真模型，并依据风电场实际结构关系与电网模型连接（多点接入），形成风电场整体仿真模型。此种详细建模方法的缺点是模型复杂，需要更多的仿真数据，运算量大，需要更长的仿真计算时间。

为解决上述问题，有人提出了风电场集总建模方法[5]。集总模型包含两层含义，一方面是由一个单一集总模型代替整个风电场模型，电能通过一个假想的公共接入点接入电网（单点接入）；另一方面，根据风电场风力机的具体构成情况，将多个风力机的机械能或电能计算合并进行。此种方法因大幅减少了网络节点数量，从而能够有效地缩减电力系统模型规模，减少模型运算时间，缺点是模型精度有所降低。

#### 3.2 集总风电场模型

对风电场仿真而言，另一项主要工作是建立风力发电机所接入的电网的仿真模型。电网模型与风电场风力机集总模型的有机结合形成风电场仿真模型，电网仿真模型的研究已相当成熟，在此不再赘述。

##### 3.2.1 恒速风力机集总模型

对于特定的恒速风力机而言，风机的机械功或发电量直接取决于作用与风机叶片上的风速，不存在能量缓冲。因此，可以将全部风力机的机械功线形迭加，由一个发电机模型替代全部的恒速发电机计算电能参数。有的研究人员则将全部风力机合并成几个更大容量的风力机对待，并相应调整发电机容量，此种处理方法实际上相当于认为多台风力机处于相同的风速下，当然会带来较大的误差。

恒速风力机集总模型结构如图 5 所示，其模型建立过程简单说明如下。

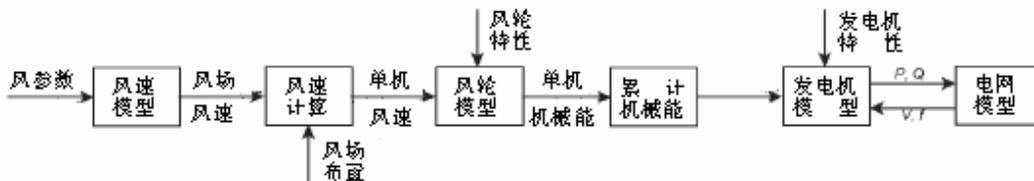


图 5 恒速风力机集总模型结构

- 1) 根据风场多年的监测记录数据建立针对性的风速模型；
- 2) 将风场布置输入风速模型，产生各风力机的风速信号；
- 3) 依据输入风速，计算每台风力机的机械功输出；
- 4) 累加各台风力机的机械功输出；
- 5) 总机械功输入到代替全部发电机的等效发电机模型中，计算电能参数。

##### 3.2.2 变速风力机集总模型

变速风力机的转子类似于能量缓冲器，风机的发电量与风速之间没有直接对应关系，前面所述的恒速风力机集总方法不能应用于变速风力机中。因此，每台风力机的转子必须单独仿真。

变速风力机集总模型的结构见图 6，其模型建立过程与变速风力机类似。

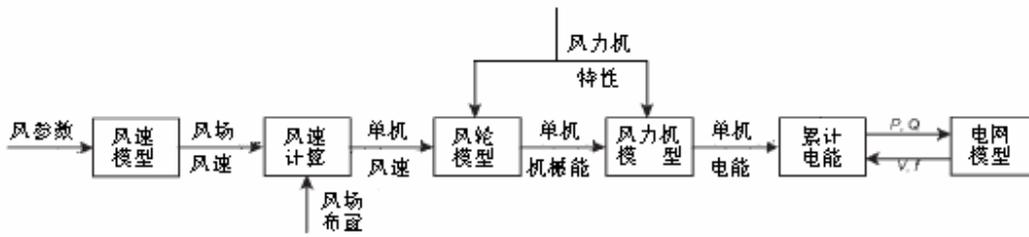


图 6 变速风力机集总模型结构

在文献[3]中，作者就两种不同的建模方法（详细建模和集总建模）所建立的风电场模型的仿真计算结果进行了对比分析，结果表明，集总风电场模型除不能客观反映出恒速风力机系统在有功/无功功率和接入点电压的脉动特性外，其仿真结果与详细仿真模型的结果间具有高度的一致性，证明集总建模方法能够满足仿真研究的需要。

## 4 风电场仿真机

仿真技术除用于系统分析研究、设计检验等目的外，还可用于人员培训目的。在电力系统，人们习惯上将用于人员培训目的的仿真系统称为仿真机。为追求更好的培训效果，要求仿真机具有很高的逼真度。仿真机逼真度主要体现在数学模型精度、人机界面逼真度和环境的相似性等几个方面。因此，仿真机软件具有不同于研究系统的特点。

### 4.1 电力系统仿真机应用现状

电力工业涉及能量转换、电力传输与调度等生产环节，产品具有不可见、不能直接存储的突出特点。发电量直接取决于不断变动的用户负荷，其生产工况处于不断变化之中，有许多重大生产事故、设备故障可能多年不遇，但一旦发生紧急情况，留给运行操作人员处理的时间非常短暂，如果不能及时正确处理，后果不堪设想；再则，为了追求能量转换与传输的高效率，电力工业装备向大容量、高参数方向发展，系统更加复杂，也更难以操作与控制。因此，对岗位操作人员的素质要求很高。但由于电力工业设备昂贵，且具有连续作业的生产特点，在生产装置上进行培训效率低、风险大，而且无法得到事故处理等方面的培训机会。因此，自九十年代起，电力培训用仿真机得到了大范围推广与应用。目前，电力系统仿真机的普及率和产业化程度居各行业之首，并代表了国内仿真行业的技术水平。

1980 年代初，国内高校最先开展了火电机组仿真机的研发工作，并于 1980 年代末期开始转入实际应用。十几年来，几家最早生产火电机组仿真机的单位引领了国内电力仿真技术的发展方向，并直接推动了电力系统仿真机的普及。1990 年代中期以后，水电机组仿真机、核电机组仿真机、变电站仿真机、地区调度以及电网仿真机陆续投入使用，培训仿真机已应用于电力生产与调度的各个环节。

据不完全统计，目前国内投入使用的各类型火电机组仿真机（含全范围仿真机和原理型仿真机）在 300 台左右；变电站仿真机超过 100 台；核电仿真机虽台数不多，但仿真机与发电机组的比例最高。绝大多数仿真机由国内企业开发生产。仿真机的使用有效解决了运行操作人员的技能训练问题，并为提升我国电力工业的安全经济运行水平发挥了很大的促进作用。

## 4.2 风电场仿真机的作用

大型风电场通常安装几十台或几百台风力发电机组，且单机容量更大，控制系统也更加复杂（变速风力发电机组在低风速下具有更高的风能转换效率，相信会得到更为广泛的应用），对风电场运行操作人员提出了更高的要求。考虑到我国风电系统的发展现状，风电场仿真机的应用将有助于消除风电发展面临的某些制约因素。

首先，可有效解决人才短缺问题。风电产业的快速发展直接带动风电技术人员需求的增长，但当前的人才供应状况不容乐观。国内高校未设立风电专业或专业方向，风电企业只能从相关专业遴选所需的技术人员。技术人员缺乏对风电场系统构成与运行知识的了解，更缺乏运行操作经验。借助仿真机，可以在较短的时间内培训出合格的运行操作人员。

其次，可有效提高运行管理水平。技术人员可以在仿真机上开展反事故演习和不同运行方式仿真实验，熟练掌握各种异常运行工况下的应对处理措施，进而提高实际风电场的运行水平，减少设备受损几率，提高风电场运行的安全性和经济性。

## 4.3 风电场仿真机模型组成特点

前面叙述的风力发电机组和风电场的仿真模型侧重于分析研究方面的应用，若用于人员培训，则需要在建模方法、模型覆盖范围等方面做出调整。主要体现在下述几个方面。

### 4.3.1 实时模型

要求模型参数的变化在时间尺度上与实际系统一致。受限于计算机的运算能力，对于运算量大的模型要进行简化处理。如电网潮流计算模型适当简化，电磁暂态过程通常不予考虑。

### 4.3.2 考虑风向和季节因素

除前面讨论的风速变化特性外，仿真机还需要考虑风向变化对风电机组和风电场运行的影响。同时，应选取几个代表性季节分别仿真其风速特性，并考虑不同季节的风密度的变化。

### 4.3.3 更详细的风力发电机组模型

前面提到的将风力机或发电机合并建模的方法不再适用，需要一一建立每一台风电机组的仿真模型。实际机组的全部系统、运行人员在控制室能够观测到的全部参数均在仿真之列，仿真范围较分析研究用模型要宽得多，除图 3、图 4 表示出的子系统外，还包括：

- 1) 包含金属温度、振动、受力变形等参数计算的设备本体模型；
- 2) 偏航控制等辅助控制系统模型；
- 3) 风力机机械能计算应考虑尾流效应；
- 4) 各种辅助系统模型，如润滑油系统、冷却系统等；
- 5) 变压器及厂用电系统模型。

### 4.3.3 完整的人机界面仿真

出于为受训学员提供一个真实的操作环境，以及操作员站使用培训两个方面的考虑，仿真机应设置多台仿真操作员站以仿真实现操作员站的全部操作监视功能。大型风电场通常分期建设，操作员站因设备供货厂家的不同而风格各异，为此，应仿真实现各种不同类型的操作员站。

## 结论与展望

在西方发达国家，仿真技术在风力发电系统中得到了越来越广泛的应用，仿真实论、方法和建模技术逐步完善，仿真技术解决了很多实际生产过程中遇到的技术问题。借鉴国外已有的研究成果，对于提高我国风电系统仿真技术的应用研究水平将大有帮助。本文提出了应用风电场仿真机开展人员培训，进而解决我国风电发展面临的人才短缺问题的建议。相信仿真技术的应用，对于提高我国风电产品的自主研发能力和风电场运行管理水平将会发挥日益重要的作用。

## 主要参考文献目录

1. 孙耀杰，康龙云等，风机模拟器研究，系统仿真学报 Vol 17, No.3, 2005
2. Jane E. McArdle, Dynamic Modelling of Wind Turbine Generators and the Impact on Small Lightly Interconnected Grids, Wind Engineering Volume 28, No. 1, 2004
3. J. G. Sloopweg and W. L. King, Modelling Wind Turbines for Power System Dynamics Simulations: an Overview, Wind Engineering Volume 28, No. 1, 2004
4. 尹炼等，风力发电，中国电力出版社，2001年
5. R. M. G. Castro, J. M. Ferreira de Jesus, An aggregated wind park model, 13<sup>th</sup> PSCC Power Systems Computation Conference Proceedings, Trondheim, Norway, v. 2, 1999

联系方式：

|        |                       |
|--------|-----------------------|
| 联系人    | 李长青                   |
| 联系电话   | 0312-5907661          |
| 传真     | 0312-5907668          |
| E-mail | cqing_li@sohu.com     |
| 通信地址   | 河北保定市青年路 206 号 93 号信箱 |
| 邮政编码   | 071003                |