

# 风力发电系统的建模和仿真

谭 昕, 田继明

(江汉大学 机电与建筑工程学院, 湖北 武汉 430056)

**摘 要:** 概述了风力发电系统的建模和仿真方法, 分析比较了它们的优缺点; 介绍了多领域统一建模新方法, 此方法为风电系统的性能仿真提供了有效工具, 基于 Modelica 的工具软件, 可以为风电系统的性能仿真提供统一的工具, 让不同领域的仿真分析基于统一的模型, 实现不同领域模型的无缝集成。

**关键词:** 风力发电系统; 仿真; 多领域; Modelica 软件

**中图分类号:** TM315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0143(2013)06-0049-07

## 0 引言

风力发电能缓解日益严峻的能源问题和污染问题, 成为很多国家的能源发展方向。但风力发电系统故障率一直居高不下<sup>[1]</sup>, 究其原因是风力发电技术是涉及机械传动、空气动力学、自动控制、力学等多学科的系统工程, 有较强的综合性, 这给风电系统的性能仿真分析带来了很大困难。如风能的特性分析, 通过各种风况计算平均风速, 然后进行模拟、分析, 虽然这些模拟能较好了解风载, 但其中涉及到气流与桨叶之间的流固耦合, 其仿真分析相当复杂。又如风力发电齿轮箱的动力特性分析, 分析的方法是计算扭转振动的动力学微分方程, 但在实际工况中有横向振动、纵向振动及它们的耦合振动, 还有时变啮合刚度、齿面间隙、齿面摩擦等因素的影响, 其仿真分析计算也非常复杂, 风电系统仿真分析的复杂性和不准确性, 导致风电系统达不到正常寿命, 故障率很高。风电系统的这些性能仿真分析不仅要考虑自身因素, 还要考虑与其他领域之间的相互作用, 可以看出多领域问题在风电系统性能仿真中表现得很明显。

近些年, 国际上风电系统正朝着大型化、变速恒频和变桨距的方向不断发展<sup>[2-3]</sup>。风力发电设备单机容量越来越大, 这对控制系统提出了更高的要求, 因为控制策略决定着风力发电的效益, 包括经济效益和社会效益, 控制系统的仿真

首先要建立待检验系统的模型和控制对象的模型, 这涉及到风轮空气动力学、发电机模型、增速齿轮箱模型和结构动力学, 其中非线性的传动链也需要研究(如图1所示), 考虑风电系统内部各部件的耦合作用是建立模型的前提, 因此风力发电控制系统的仿真也是多领域的问题。可以看出, 风电产品在研发过程中进行设计和性能仿真时多领域耦合问题是不可避免的。

## 1 风电系统建模和仿真

为了让风电系统的故障率降低, 提高可靠性, 国内外研究者提出了很多方法来解决风电系统中的多领域问题, 这些方法在建模仿真、优化过程中起到了很大的作用, 能解决一些问题, 但有一定局限性。

### 1.1 建模方法

风力发电系统的建模一直是研究的难点, 因为它是一个复杂系统, 要考虑的因素很多, 动态模型的精确性很难保证。对于风力发电机组的建模, 早期采用的方法有机制分析法和测试法。机制分析方法<sup>[4]</sup>是通过分析研究系统的内部原因和机制, 找出其发展变化规律的方法, 此方法建立的模型能准确地模拟系统的特性, 反映系统的动态物理本质, 由于风电系统建模过程中, 涉及的内在和外因因素较多, 运用机制分析法建模时要以力矩平衡关系作为计算时主要考虑的条件, 通过建立的模型可以深入理解研究的对象, 但风电

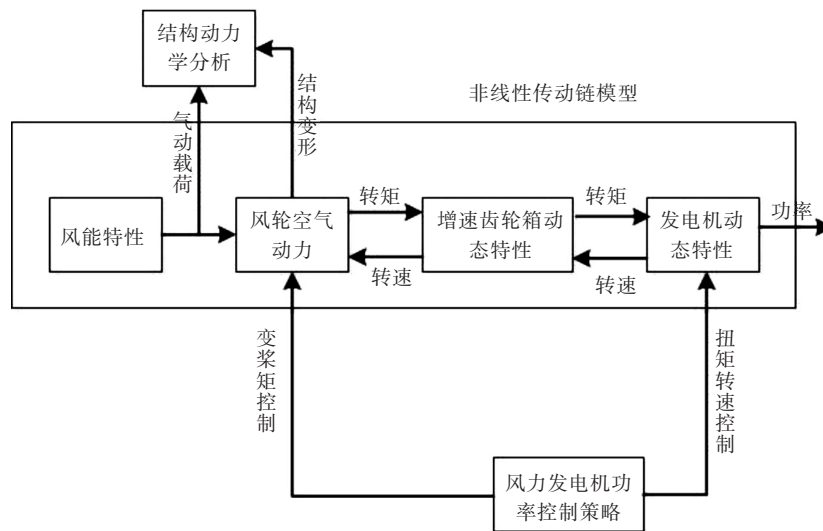


图 1 风电系统的模型结构

系统不是单一的机制，而是多个学科的综合机制，建模非常困难，得到的机制模型有很大的误差。测试法<sup>[5]</sup>是分析系统的外在功能，不考虑系统内部结构和内部特性，通过功能模型来反映系统的动态特性，这种方法让风电系统的建模变得简单，只需用数学公式来描述，但是这种建模方法不能反映系统的物理本质，而且参数的物理意义很模糊。由于机制分析法和测试法存在着不足，随着系统辨识理论快速发展，产生了将机制分析法和测试法有机结合进行建模的新方法，这种结合的建模方法已经被证明很有效<sup>[6]</sup>。包能胜等<sup>[7]</sup>使辨识得到的模型参数具有明确的物理意义，他们结合机制模型结构，得到具有机制模型结构的辨识参数模型。Jiang<sup>[8]</sup>和 Baars<sup>[9]</sup>对 UNI-WEX 型风力机采用预报误差法进行了混合建模。

近些年，常见的建模方法有键合图方法、系统图方法、混合 Petri 网方法等。键合图建模方法<sup>[10]</sup>是最常用的建模工具之一，键合图建模的主要对象是系统的能量流，包含有能量的源头和流向关系，所以它是一种包含系统因果关系的建模。键合图方法已在化学、流体、生物学、电子、机械、热力学等工程技术领域的动态分析与控制研究中得到了广泛应用，具有一套严密的描述变换规则，同各类典型物理特性及定律之间具有高度的协调一致性，对系统动态模型的准确定义很有效。系统图的基础是线性图理论，它是一种表示系统能量流的线性图，在系统建模中主要体现系统的拓扑关系，能直观、清晰地得到系统的拓扑结构<sup>[11]</sup>。混合 Petri 网<sup>[12]</sup>是描述具有不同时间

和信号概念的整个系统，主要用于对位置的建模和仿真，适合以离散特征为主的系统(连续变量少且耦合少)。虽然建模的方法不断涌现，但模型的准确性不能得到完全保证，尤其对一些复杂的系统来说，就更不准确，比如风电系统受内外因素的影响，还有不同领域的耦合和交互，建模的方法还有待进一步发展。

## 1.2 仿真分析

风力发电设备的设计、运行分析、试验测试、优化等各个方面都有仿真技术的应用，对于风电系统这样涉及多学科耦合和交互的问题，要想进行整个风电系统的性能分析，并保证其准确性，使用单领域建模与仿真分析工具是不可能完成的。对于这样的应用需要，各个领域仿真软件的合作(协同仿真)得到广泛运用。不同领域的仿真软件都是各自领域的独立描述，通过提供对口的专门接口程序以实现联合仿真，这样的方法可以集成仿真工具，单领域间仿真工具集成逐渐发展成为单领域工具向多领域延拓，这样可以使数据传递间的误差减少并提高传递效率<sup>[13]</sup>。例如机械多体动力学仿真软件 ADAMS，提供与控制系统仿真软件 MATLAB\_Simulink、MATRIXx 的接口，通过该接口可以实现机械多体动力学与控制系统的协同建模，同时利用它们提供的协同仿真功能，可以实现机械多体动力学和控制系统的协同仿真；又如 ADAMS 中，集成了 ADAMS/Hydraulics 液压模块，它可以在同一界面下建立机械系统与液压回路之间相互作用的模型并计算特性<sup>[14]</sup>；再如 MATLAB\_Simulink 中，集成其他领域的模块，可以实现机械、电子、控制 3 个领域耦合

的仿真研究<sup>[15]</sup>。目前针对风力发电机的仿真软件主要有 HAWC(Horizontal Axis Wind turbine Code)和 MATLAB-Simulink。HAWC是丹麦 RIS 的国家实验室开发的空气动力仿真工具,主要计算叶片结构的空气动力,可以模拟在各种工况(启动、超速及停机)时的动态特性。MATLAB-Simulink 可以用来对风力发电机组进行建模和仿真,已开发了相应的 MATLAB 模块库,而且 Simulink 库也有很多模块库可以用来建模,如 SImpower 库<sup>[16]</sup>,用模块库建模和仿真效率非常高。

虽然风力发电系统的建模和仿真方法有很多,但都有其局限性,不能解决风力发电系统的不同领域交互和耦合的问题,需要实现不同领域不同学科在一个集成环境下建模和仿真的新方法,提高建模和仿真的精度,保证风电系统的稳定性,延长其使用寿命。

## 2 风电系统建模的新方法

随着面向对象建模技术的快速发展,多领域统一建模和仿真的方法出现了,这种方法可以解决现代复杂产品设计中多领域、多学科耦合的问题,它将不同领域的简单模型组装成复杂模型,实现了不同领域的耦合,这种建模方法从系统的本构关系进行分析,可以揭示多领域问题的实质<sup>[15]</sup>。

该方法可以让不同领域对象(如机械、气动、电控、电子等)在一个统一的图形描述框架下进行建模,其模型的表达变成陈述式,不再是数学上的加法器、积分器等,而是质量、电容、电感、

弹簧阻尼器、电阻等物理元器件,这些元器件通过相关的物理定理来联系,根据相关参数进行建模,通过这些方程可以替代因果赋值等形式,这样不仅大大缩短了建模的时间,而且建立的模型非常准确<sup>[17]</sup>;另外不同领域形成不同的模块库,这样很容易开发自己的模型或采用已有的模型,可将定制模型加入库中心备用。

1996年9月,欧洲仿真界的专家学者们开始研究多领域统一建模语言,为了防止物理建模和仿真软件之间不兼容<sup>[18]</sup>,提出要统一分散的建模语言,因此 Modelica<sup>[19]</sup>语言成为统一的标准。基于 Modelica 语言的建模方法特别适合复杂的、多领域的系统,具有与领域无关的通用描述能力,由于 Modelica 语言可以描述各种方程(常微分方程、微分代数方程等),所以它很方便建立各领域的分析模型。Modelica 模型实质上是一种陈述式的数学描述,动态属性由方程表示,这些模型能表达系统的运动机制(物理规律和现象),通过求解微分方程系统实现仿真运行<sup>[20]</sup>。Modelica 协会每年召开国际学术大会,交流最新进展,就应用 Modelica 时出现的问题进行讨论,并提出解决方案,分享 Modelica 应用的成果和相关软件的开发,这样使得基于 Modelica 语言的多领域统一建模方法应用得越来越广泛<sup>[21]</sup>。

各个国家都在多领域统一建模语言的基础上开展研究,基于 Modelica 语言的仿真工具也相继出现,其中较为成熟的商用建模仿真工具有 5 个<sup>[22]</sup>,如表 1 所示。

表 1 基于 Modelica 语言的多领域物理系统建模与仿真系统

序号	软件	公司或研究所	国家	类型	状态
1	Dymola	Dynasim	瑞典	环境	完整
2	SimulationX	ITI	德国	环境	完整
3	MathModelica	MathCore	瑞典	环境	开发中
4	OpenModelica	PELAB	瑞典	环境	开发中
5	MWorks	华中科技大学 CAD 中心	中国	环境	试用

Dymola<sup>[23]</sup>是第一个支持 Modelica 语言的建模仿真工具,适用于模拟不同类型的物理对象,提供图形化建模环境、支持基于图标的拖放式图形建模,Dymola 具有强大的功能(符号处理和数值求解),它可以处理大型、复杂的多领域系统。SimulationX<sup>[24]</sup>全面兼容基于 Modelica 语言的多领域系统模型,具有车辆工程所涉及的各个学科领域的基础模型库,使得 SimulationX 成为国际上新车开发时建模和仿真的标准平台。MathModelica<sup>[25]</sup>

是通过集成其他仿真软件的功能而开发的,具有很强的建模功能,但 MathModelica 的建模过程很复杂,因为它的各模块来自不同的软件,具有独立性,没有集成在同一个界面。MWorks 是华中科技大学打造的多领域系统建模与仿真平台,支持连续-离散混合建模、陈述式非因果建模、面向对象建模,它有大量的领域库,可以用于机械、气压、电子、控制、能源、车辆、航空等领域的产品分析与知识积累需求<sup>[26-27]</sup>。

多领域统一建模与仿真已经成为仿真领域的导向。基于 Modelica 的多领域物理系统建模与仿真在系统层面上实现复杂系统的集成建模与分析, 特别适合产品概念设计或初步设计阶段, 从而为产品的创新设计提供强有力的支持。特别是风力发电系统这种多领域交互和耦合的系统, 在设计阶段就能很好把握风电系统的稳定性和可靠性, 大幅降低风电系统的故障率。

### 3 多领域统一建模在风电系统中的应用

风力发电技术是涉及电机学、机械传动、空气动力学、自动控制、力学等多学科的综合性和高技术系统工程。目前各国都在大力发展风电产

业, 但是风电系统的高故障率直接影响了风电产业的快速发展, 故障多的原因是风电系统在进行建模和性能仿真时使用的方法不能涵盖所有领域的问题和因素, 多领域统一建模正好可以解决这样的问题, 完整的建模和仿真, 可以降低设备的故障率, 提高其寿命和稳定性。

瑞典兰德大学运用多领域统一建模方法研制垂直轴风力发电系统的测试台架, 运用此方法, 使得测试系统校准能力很强, 他们用 Dymola 对垂直轴风力发电系统进行建模, 如图 2 所示, 在不同工况下进行仿真, 对模型的主要数据采集合成, 优化测试系统<sup>[28]</sup>。

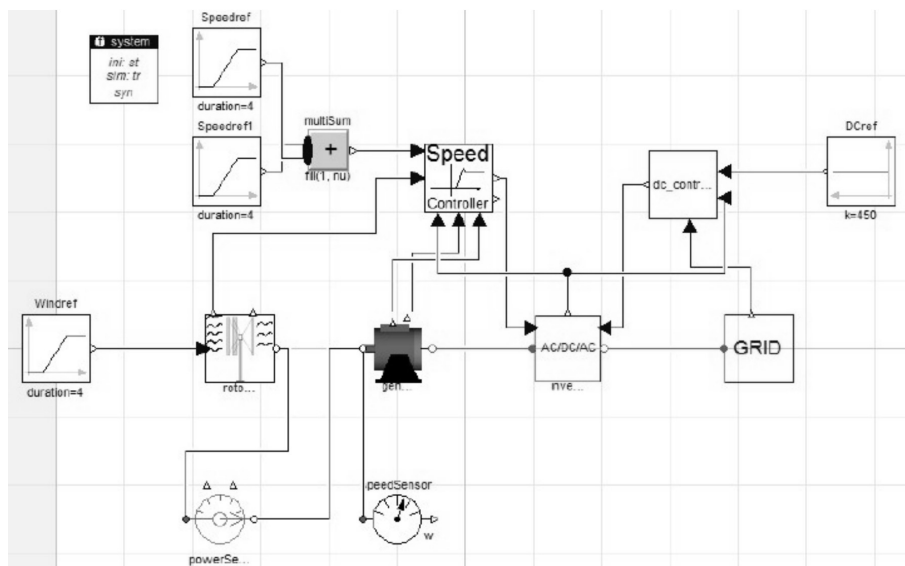


图 2 垂直轴风力发电系统的简单模型

为了能全面了解风电产业, Chris Gloss<sup>[29]</sup>用多领域统一建模的方法建立 APE(年发电量)模型和成本模型, APE 模型通过功率传感器接收输出发电机的平均功率, 然后把时间倍增到年, 就可以模拟年发电量, 模型如图 3。而系统成本模型的建立相当复杂, 需要为材料、组件、年度操作、维护、运输、基础设施、工程许可证、土地租赁等建立相应的成本程序, 模型如图 4, 成本模型能分析出每千瓦时的成本。APE 模型和成本模型的接口都是在发电机、传动链模型上, 建立的整体模型如图 5, 通过整体模型的仿真, 就能得到相应的 APE 和成本数据。

垂直轴风力发电机模型、成本模型和 APE 模型的建立充分展现了多领域统一建模方法的适用性和高效性, 上述模型中各个领域模型之间的连

接是物理连接, 符合实际情况, 能描述系统各领域之间的动态耦合特性。目前, 风电系统的控制系统和电网系统是影响风电产业高速发展的障碍, 需要开发相应的模型库。

虽然基于 Modelica 的多领域统一建模在风电系统应用不多, 开发的相应模型库也不多, 但可以预见这种方法将会在风电系统中得到大量运用。风电产业作为绿色能源将会快速发展, 而风电系统的性能将直接制约发展的速度, 对于风电系统这种复杂的多领域系统, 多领域统一建模能完成准确的建模、仿真和优化。

### 4 结语

1) 风力发电系统是多领域交互和耦合问题, 现有的方法不能准确地进行性能仿真分析, 导致

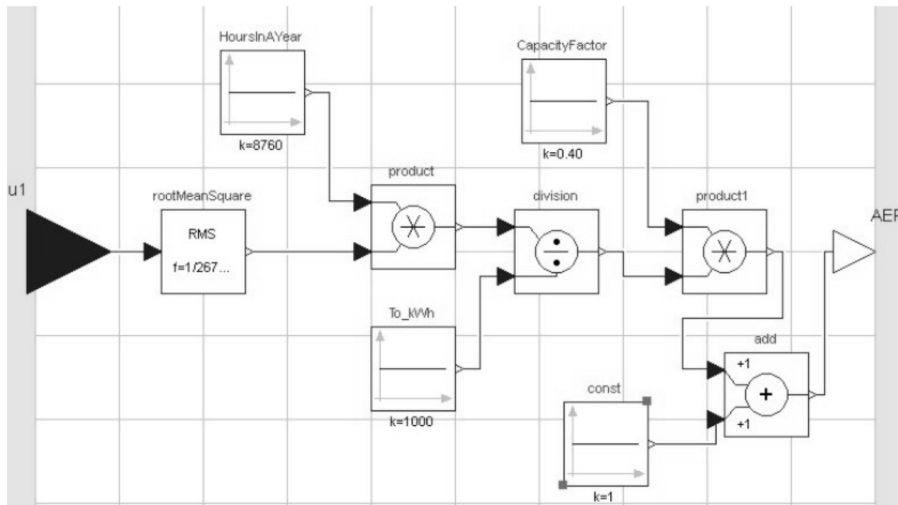


图3 APE(年发电量)模型

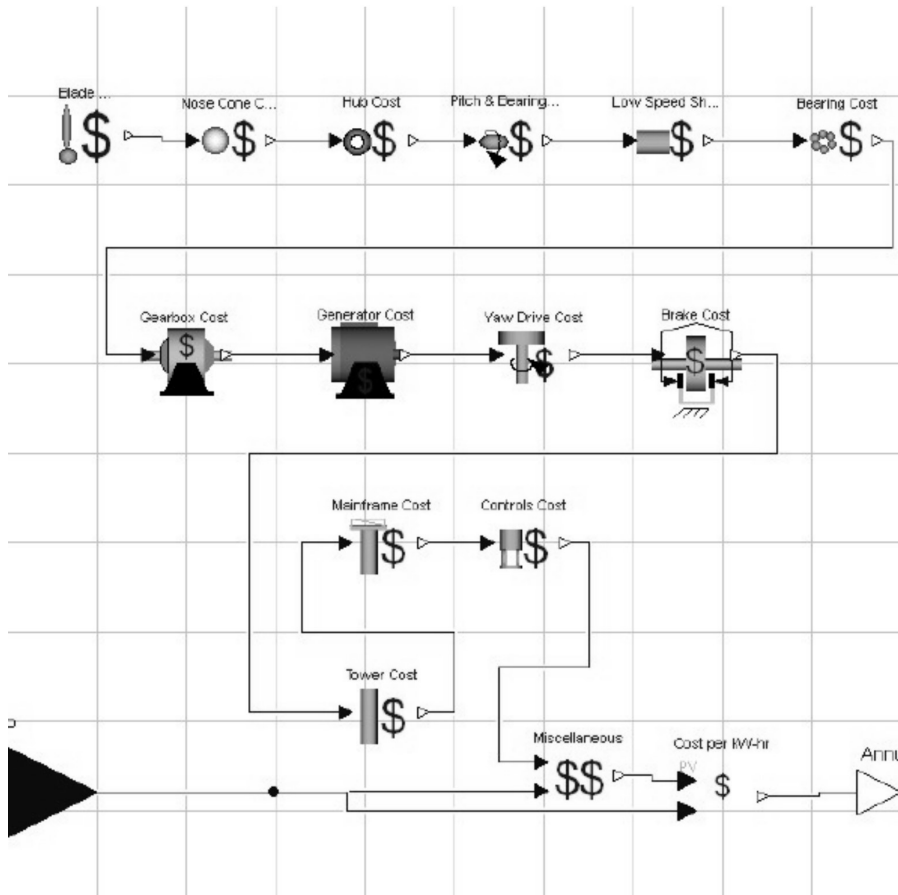


图4 成本模型

风电系统的故障率居高不下,需要新的仿真工具,可以从领域耦合的角度来满足风电系统统一建模的需求,解决各领域间的单向作用和双向动态作用。

2) 基于Modelica的多领域统一建模的新方法,在系统层面上实现复杂系统的集成建模与分析,能准确地得到性能仿真结果,为复杂系统提

供了统一建模的工具。

3) 多领域统一建模方法将在风力发电系统仿真分析中得到大量应用,基于Modelica的多领域统一建模的方法能解决风力发电系统领域耦合和交互问题,能提高风力发电系统整体工作性能和寿命,满足不断增加的风机容量。应将多领域统一建模方法应用到风力发电系统中,开发相应

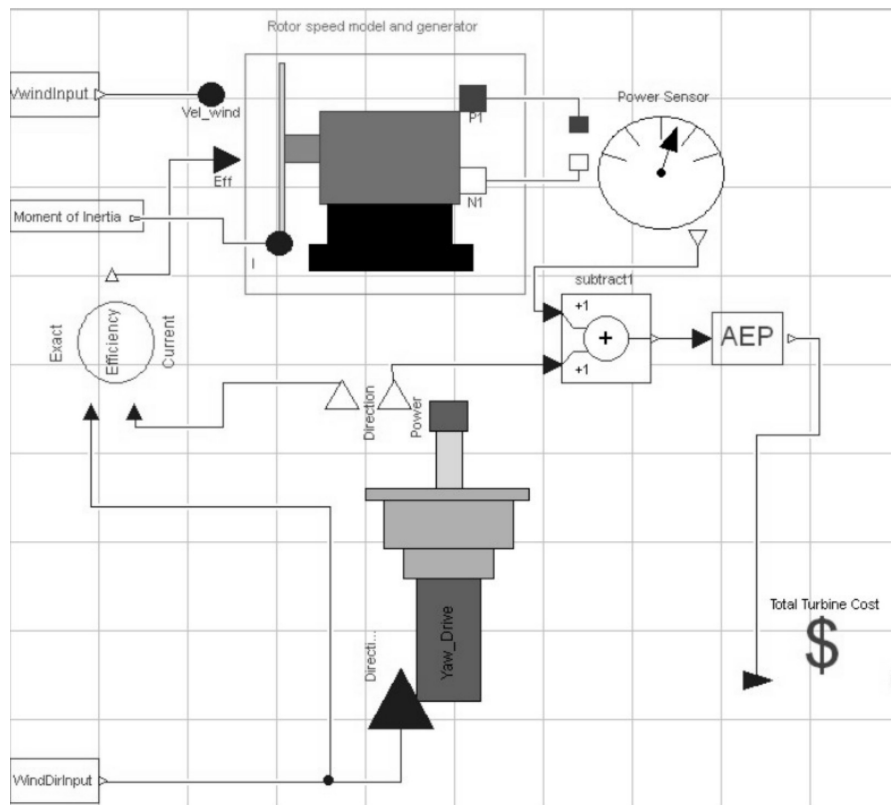


图5 风力发电系统模型

模型库,将风电产品设计朝着建模、仿真、分析、优化以及后处理的一体化方向发展。

#### 参考文献:

- [1] 徐展. 基于振动法的风电机组传动链状态监测与故障诊断研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [2] 宁玉泉. 新型风电机组发展趋势[J]. 电气技术,2009(8):22-27.
- [3] 徐建军,王惠斌,闫丽梅. 变桨距风力发电机组控制策略的研究[J]. 电力学报,2009,20(3):174-177.
- [4] 董萍,吴捷,杨金明,等. 风力发电机组建模研究现状[J]. 太阳能学报,2004,25(5):612-619.
- [5] 王聪,刘永前. 风力发电系统的建模与仿真研究[J]. 中国电力教育,2006(S1):125-128.
- [6] 王聪. 面向物理对象建模方法在风电机组建模中的应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
- [7] Bao N S, Chen Q X, Jiang T. Modeling and identification of a wind turbine system[J]. Wind Engineering, 1996,20(4):203-218.
- [8] Jiang T, Bao N S, Chen Q X. Modeling and identification of wind energy conversion system[C]//Electric Machines and Drives Conference. Milwaukee: IEEE International Record, 1997:TC3/9.1-TC3/9.3.
- [9] Van Baars G E, Bongers P M M. Wind turbine control design and implementation based on experimental models[C]//Proceedings of the 31st IEEE Conference. Arizona: Decision and Control, 1992: 2454-2459.
- [10] 仇勇. 基于键合图的复杂机电系统模块化[D]. 长沙:中南大学,2003.
- [11] 刘敏. 基于Modelica的多领域物理系统建模平台的研究与开发[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
- [12] 李惠峰,周锐,陈宗基. 混合Petri网及其可达性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(2):149-152.
- [13] 陈立平,杨勇,宋健. 电动汽车性能仿真中的多领域统一建模方法[C]//节能环保和谐发展—2007中国科协年会论文集(一). 武汉:中国科技协会,2007:225-228.
- [14] 孙成通,韩虎,曾庆良. ADAMS\_Hydraulics模块的研究与应用[J]. 机床与液压,2008,36(1):138-140.
- [15] 任卫群,宋健. 多领域统一建模方法在汽车性能仿真中的应用[J]. 计算机仿真,2008,25(11):274-277.
- [16] 薛娟妮. 直驱风电系统最大功率捕获技术的仿真研究[D]. 南宁:广西大学,2008.
- [17] Fritzon P, Engelson V. Modelica—a unified object-oriented language for system modeling and simulation[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Object-Oriented Programming. Brussels: Springer-Verlag, 1998: 67-90.
- [18] 张和华. 多体动力学模型到多领域模型的转换研究[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
- [19] Modelica Association. Modelica and the Modelica asso-

- ciation [EB/OL]. [2013-05-15]. <http://www.modelica.org>.
- [20] Elmqvist H, Mattsson S E, Otter M. Object-oriented and hybrid modeling in Modelica [J]. *The Journal of European System Automatics*, 2001, 35(1): 1-10.
- [21] 张昌杰. 基于多领域模型分析的参数优化设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [22] 陈小国. 混合动力车辆多领域统一建模与仿真 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [23] Brück D, Elmqvist H, Mattsson S E, et al. Dymola for multi-engineering modeling and simulation [C]//The 2nd international Modelica conference. Oberpfaffenhofen: Proceedings of Modelica, 2002: 551-558.
- [24] 刘宝生. SimulationX 多学科建模和仿真工具 [J]. *CAD/CAM 与制造业信息化*, 2009(9): 34-36.
- [25] Jirstrand M. MathModelica—a full system simulation tool [C]//Proceedings of Modelica Workshop 2000. Lund: Global Product Development, 2000: 23-24.
- [26] 苏州同元软控有限公司. 多领域物理系统建模与仿真平台 MWorks [EB/OL]. [2012-05-20]. <http://www.modelica-china.com/index.asp>.
- [27] 王岳. 多领域建模仿真平台 MWorks 的外接工具集成研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [28] Petersson J, Isaksson P, Tummeseit H, et al. Modeling and simulation of a vertical wind power plant in dymola/modelica [D]. Sweden: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, 2011.
- [29] Gloss C, Lincoln A, Mustard M, et al. HW2: Planning the simulation-based design study modeling a wind turbine [EB/OL]. [2012-05-23]. <http://www.srl.gatech.edu/education/ME6105/Projects/Fa11/Wind%20Turbine>.

## Modeling and Simulation of Wind Power Generation System

TAN Xin, TIAN Ji-ming

(School of Electromechanical and Architectural Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, Hubei, China)

**Abstract:** With single capacity increasing, wind power generation system has increasingly become a complex multi-domain system, which contains mechanical, electric, wind power and control systems and their coupling, requirements are higher for modeling and simulation. The method of modeling and simulation of the wind power system are presented, the advantages and disadvantages of the applications are analysed. Multi-domain unified modeling are introduced, it can provide effective tools for performance simulation of wind power generation system. The software based on Modelica can provide an unified tool for performance simulation of wind power generation system, simulations in different domains can be based on an unified model, it can realize seamless integration of different domain models.

**Key words:** wind power generation system; simulation; multi-domain; Modelica software

(责任编辑: 陈 旷)