



“十二五”国家重点图书出版规划项目
智能电网研究与应用丛书

风电机组与风电场的 动态建模

Dynamic Modeling of
Wind Turbines and Wind Farms

蔡旭 李征 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
智能电网研究与应用丛书

风电机组与风电场的动态建模

**Dynamic Modeling of Wind Turbines
and Wind Farms**

蔡 旭 李 征 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书讲述风电机组、风电场的动态建模方法,用于电网分析、风电并网仿真以及风电机组控制与保护的研究工作。建立采用当前主流风电机组参数的机组详细模型,包括各种控制策略、保护及其整定值。在系统地分析风电机组多时间尺度模型的基础上,给出可用于电力系统电磁暂态、机电暂态仿真的机理性降阶模型和暂态稳定分析模型;面向风电机组的整机控制和设计问题,给出包含气-弹-机-电耦合的风电机组精细化模型。对比分析所建模型在不同控制策略下的响应特性;论述风电场动态聚合模型的建模方法和分群原则,给出典型风电场的动态聚合模型、中长期模型,并对模型进行验证;论述基于 RT-LAB 和 RTDS 实时仿真器的风电机组与风电场全工况动态模型,以及控制器硬件在环实时仿真方法,结合多种实际案例,展现这些模型在大规模风电工程中的应用。

本书可供从事电力系统及新能源发电分析、设计和研究的工程技术人员以及高等学校电气工程领域相关的学者、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

风电机组与风电场的动态建模 = Dynamic Modeling of Wind Turbines and Wind Farms / 蔡旭,李征著. —北京:科学出版社,2016.7

(智能电网研究与应用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-049126-8

I. ①风… II. ①蔡…②李… III. ①风力发电机-发电机组-系统建模
②风力发电-发电厂-系统建模 IV. ①TM315②TU271.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143582 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 王 苏 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年7月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年7月第一次印刷 印张:22

字数:422 000

定价:138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《智能电网研究与应用丛书》编委会

主编:周孝信

编委:(按姓氏汉语拼音排序)

白晓民(中国电力科学研究院)

蔡旭(上海交通大学)

曹一家(湖南大学)

陈希(中国电力科学研究院)

程浩忠(上海交通大学)

程时杰(华中科技大学)

丁立健(国家自然科学基金委员会)

董新洲(清华大学)

董旭柱(南方电网科学研究院有
限责任公司)

段献忠(华中科技大学)

郭剑波(中国电力科学研究院)

韩英铎(清华大学)

何湘宁(浙江大学)

胡学浩(中国电力科学研究院)

鞠平(河海大学)

李立涅(华南理工大学)

廖瑞金(重庆大学)

刘建明(国家电网公司)

卢强(清华大学)

梅生伟(清华大学)

穆钢(东北电力大学)

饶宏(南方电网科学研究院有限
责任公司)

荣命哲(西安交通大学)

宋永华(浙江大学)

孙元章(武汉大学)

王成山(天津大学)

王锡凡(西安交通大学)

王益民(国家电网公司)

肖立业(中国科学院电工研究所)

薛禹胜(国家电网公司)

杨奇逊(华北电力大学)

杨勇平(华北电力大学)

余贻鑫(天津大学)

张保会(西安交通大学)

张伯明(清华大学)

赵争鸣(清华大学)



《智能电网研究与应用丛书》序

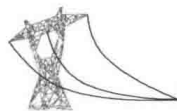
迄今为止,世界电网经历了“三代”的演变。第一代电网是第二次世界大战前以小机组、低电压、孤立电网为特征的电网兴起阶段;第二代电网是第二次世界大战后以大机组、超高压、互联大电网为特征的电网规模化阶段;第三代电网是第一、二代电网在新能源革命下的传承和发展,支持大规模新能源电力,大幅度降低互联大电网的安全风险,并广泛融合信息通信技术,是未来可持续发展的能源体系的重要组成部分,是电网发展的可持续化、智能化阶段。

同时,在新能源革命的条件下,电网的重要性日益突出,电网将成为全社会重要的能源配备和输送网络。与传统电网相比,未来电网应具备如下四个明显特征:一是具有接纳大规模可再生能源电力的能力;二是实现电力需求侧响应、分布式电源、储能与电网的有机融合,大幅度提高终端能源利用的效率;三是具有极高的供电可靠性,基本排除大面积停电的风险,包括自然灾害的冲击;四是与通信信息系统广泛结合,实现覆盖城乡的能源、电力、信息综合服务体系。

发展智能电网是国家能源发展战略的重要组成部分。目前,国内已有不少科研单位和相关企业做了大量的研究工作,并且取得了非常显著的研究成果。在智能电网研究与应用的一些方面,我国已经走在了世界的前列。为促进智能电网研究和应用的健康持续发展,宣传智能电网领域的政策和规范,推广智能电网相关具体领域的优秀科研成果与技术,在科学出版社“中国科技文库”重大图书出版工程中隆重推出《智能电网研究与应用丛书》这一大型图书项目,本丛书同时入选“十二五”国家重点出版规划项目。

《智能电网研究与应用丛书》将围绕智能电网的相关科学问题与关键技术,以国家重大科研成就为基础,以奋斗在科研一线的专家、学者为依托,以科学出版社“三高三严”的优质出版为媒介,全面、深入地反映我国智能电网领域最新的研究和应用成果,突出国内科研的自主创新性,扩大我国电力科学的国内外影响力,并为智能电网的相关学科发展和人才培养提供必要的资源支撑。

我们相信,有广大智能电网领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编



风电机组与风电场的动态建模

委的共同努力,本丛书将为发展智能电网、推广相关技术、增强我国科研创新能力做出应有的贡献。

最后,我们衷心地感谢所有关心丛书并为丛书出版尽力的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和赞助,感谢广大读者对丛书的厚爱;希望通过大家的共同努力,早日建成我国第三代电网,尽早让我国的电网更清洁、更高效、更安全、更智能!

周孝信



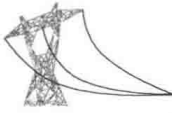
前 言

风电作为可再生能源开发利用的一种主要形式,近年来得到了快速发展。8个千万千瓦级的风电基地正在建设中,我国装机容量已居世界首位。今后还将建设大规模海上风电场。随着电网中风电比例的不断增加,风电固有的随机波动性、间歇性将对电力系统的安全稳定运行、电能质量、电压和频率控制等带来更大的冲击,因而,随之产生的电力系统分析和控制问题成为国内外研究的热点,电网友好的风电机组和风电场的研究也被提到议事日程。

风电机组由塔架、风轮、传动链、发电机、变流器、主控制器及变桨控制和安全保护系统组成。从动力学的角度来看,风轮叶片和传动轴将风能的动态扰动作用耦合到发电机侧,体现为转速、扭矩角的振荡,最后表现在输出功率中。而电网中的故障扰动通过发电机的电磁耦合,作用于机组传动轴,引发轴系振荡。为理解和分析这些问题,指导风机设计,建立详细的数学模型显得十分重要。可以通过解析方法和计算机仿真获得响应的物理本质。

对风电机组的研究可以基于不同的视角,面向机组设计和控制的研究,着重于最大风能俘获、柔化风机载荷、平稳输出功率等;面向风电并网的研究,着重于评估风电场接入后对电网运行的影响,需要深入了解风电机组的动态特性及其与电网间的相互作用。以永磁直驱机组为代表的全功率变换风电机组的电力全部经电力电子功率变换后接入电网,以双馈风电机组为代表的部分功率变换机组的电力经电力电子功率变换控制后接入电网,其共同特点是对电网呈现出小惯性、对过电流和过电压敏感的特点,它们的大量接入给电力系统的稳定性分析和运行控制方法等带来诸多挑战。传统电力系统中功角稳定的概念不再完全适用于含风电系统的分析;风电机组引入的强非线性、不同惯量时间常数元件间的相互作用带来不同仿真计算步长联合仿真的挑战,同时,由数百台风电机组构成的风电场也带来了海量计算的问题,使原有的电力系统仿真计算工具不再适应。需要寻找可以模拟风电系统的简化计算模型。

风电机组机电暂态时间常数远小于常规同步发电机组,其本身又是由不同时间常数的子系统组合而成的,各子系统的控制策略对机组的动态性能会产生较大影响。因而在面向电力系统特定问题的分析研究中会遇到一系列的问题,例如,



如何简化才能既满足分析计算能力的限制又可以保持特定的动态性能,正确反映与电力系统之间的相互作用;风电场的等值模型是否能正确模拟由机组的风速分布特性引发的机组运行工作点不同对动态特性的影响;模型如何体现风电机组控制的快速作用和风速扰动对电力系统长时间动态过程产生的影响;风电机组作为电力系统的一个元件,应该具有怎样的模型精度;在研究电力系统动态问题时,应该选择怎样的实用模型等。风电机组、风电场的建模是研究风电场与电网交互影响的基础,模型精度及适用性直接影响到分析结果的准确性和可信度。近几年在风电机组建模和控制方面的研究进展较快,取得了一些研究成果,这些成果在机组并网控制仿真中表现出模型的有效性,但面向实际电力系统分析计算需求的建模尚没有给出清晰的界定。国内外针对风电机组的建模还没有形成统一的标准,风机制造商通常采用自己的模型进行开发和评估,商业软件的风机模型也存在较大差异。例如,PSCAD 中的发电机采用较为详细的电磁暂态模型,DIgSILENT 包含了机电暂态和电磁暂态模型,PSS 则采用较为简化的机电暂态模型。不同软件平台上的电磁暂态模型、机电暂态模型的精度也存在较大差异,这将导致分析结果不具有 consistency,影响更深层次的研究展开。本书的初衷即试图回答上述问题。

本书综合了作者近年来在风电机组建模方面的研究成果,论述了建立反映风电机组非线性特性的、基于机组物理特征的详细动态模型的理论方法、用于分析电力系统不同时间尺度问题的模型简化方法,以及满足电力系统安全稳定分析和风电控制的计算精度和速度需要的风电场动态聚合建模方法。写作中融入丰富的仿真结果,增强读者对问题的理解,同时体现仿真模型的实用性。针对目前主流风电机组及参数,给出了机组的动态模型、常规标准形式风电场的聚合模型和不同时间尺度模型应用的仿真案例。立足于解决电力系统动态分析计算中的问题,努力保持原系统的连续非线性特性和切换特性。根据应用需求,论述了全工况动态仿真模型的建立,通过在虚拟仿真平台上长时间的连续仿真,验证控制策略的作用。力图为风电相关的理论研究和工程应用提供有价值的参考。

本书的撰写要感谢饶芳权院士多年来给予的鼓励与支持。感谢上海交通大学风力发电研究中心的博士、硕士研究生,研究成果的取得与他们的辛勤付出分不开。全书共 9 章,张琛博士参与了第 1、3、5、6、8 章的整理、绘图、校对工作,贾锋博士参与了第 2、4、6、9 章的整理、绘图、校对工作,蔡游明博士参与了第 7、9 章的整理、绘图、校对工作,陈根博士参与了第 2 章的整理、绘图和全书的排版校对工作。吕敬、王晗、夏玥、韩刚、余慎思博士,董建政硕士也分别对第 7、9 章的整理做出了贡献。感谢张建文博士在研究中给予的建议。研究的开展基于国内外同行的研究成果,引用之处在书中进行了标注,在此一并表示感谢。



本书的出版得到了国家 863 计划项目(编号: 2011AA05A104)和上海市自然科学基金(编号: 14ZR1400700)的资助,研究工作及风电场数据资料获取得到了甘肃省电力公司风电技术中心的大力帮助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,有些问题的探讨还不够深入,书中难免存在疏漏之处,欢迎广大读者批评指正。

蔡 旭 李 征

2015 年 6 月

于上海

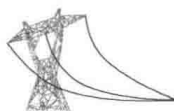


目 录

《智能电网研究与应用丛书》序

前言

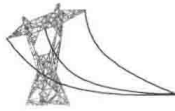
第 1 章 概述	1
1.1 风力发电系统建模的意义	1
1.2 风电动态模型及分类	2
1.3 动态建模的基本方法	2
1.3.1 机理建模	3
1.3.2 辨识建模	3
1.4 风电动态建模研究现状	4
1.4.1 机组级建模	4
1.4.2 风场级建模	6
1.5 常用的建模仿真工具	7
参考文献	9
第 2 章 风力发电系统及其控制与保护	12
2.1 典型风力发电系统的结构	12
2.1.1 定速风电机组	13
2.1.2 双馈风电机组	14
2.1.3 感应电机全功率变换风电机组	15
2.1.4 同步电机直驱风电机组	17
2.2 机械动力系统	18
2.2.1 风力机	18
2.2.2 传动系统	21
2.2.3 塔架	21
2.2.4 偏航系统	22
2.2.5 变桨系统	22
2.3 电气系统	23
2.3.1 发电机	23
2.3.2 风电变流器	31



2.3.3	变流器保护电路	48
2.3.4	升压变压器	51
2.4	风电机组的运行、控制与保护	52
2.4.1	风电机组的控制系统	52
2.4.2	风电机组的偏航控制	53
2.4.3	风电机组的变桨控制	54
2.4.4	风电机组的启动	56
2.4.5	风电机组的发电运行	57
2.4.6	风电机组的保护	64
2.5	本章小结	66
	参考文献	67
第3章	动力学系统的时间尺度与模型	69
3.1	系统动态时间尺度与模型的关系	69
3.2	风电时间尺度与模型	72
3.2.1	风速时间常数	73
3.2.2	气动时间常数	74
3.2.3	变桨系统时间常数	75
3.2.4	传动系时间常数	76
3.2.5	发电机时间常数	77
3.2.6	变流器及电气控制时间常数	79
3.2.7	风电系统时间尺度划分	82
3.3	风电电力系统时间尺度	83
3.4	本章小结	84
	参考文献	84
第4章	风力机及风的动态建模	86
4.1	风电机组模型的划分及其关联	86
4.2	风速的建模	88
4.2.1	风速模型的分类及特点	88
4.2.2	风速的一般模型	89
4.2.3	风速的空间分布	90
4.2.4	用于动态仿真的多时间尺度风速建模方法	92
4.3	风力机的数学模型	102
4.3.1	风轮的空气动力学模型	102
4.3.2	偏航系统模型	107
4.3.3	变桨系统模型	108



4.3.4 机械部分模型	110
4.4 风力机特定动态及耦合问题的模拟	119
4.4.1 风力机的动态入流现象及模拟	120
4.4.2 桨叶面内模态与塔架左右模态的影响与模拟	122
4.4.3 桨叶面外模态与塔架前后模态的影响与模拟	123
4.4.4 风速空间分布不均匀的影响及模拟	124
4.5 本章小结	127
参考文献	128
第5章 风力发电系统电气部分的建模	130
5.1 电磁暂态模型	130
5.1.1 发电机模型	130
5.1.2 变流器及其控制模型	134
5.1.3 变流器保护系统模型	138
5.2 功率控制环和电流控制环时间尺度下的模型	140
5.2.1 发电机变流器组的“三态”特性	140
5.2.2 发电机模型	141
5.2.3 变流器及其控制模型	146
5.2.4 变流器保护系统模型	149
5.3 动态模型中的机组保护	151
5.4 本章小结	152
参考文献	153
第6章 风电机组的动态建模	154
6.1 典型风电机组的详细模型	154
6.1.1 双馈风电机组	154
6.1.2 采用同步发电机的全功率风电机组	154
6.1.3 采用鼠笼感应发电机的全功率风电机组	156
6.2 面向机组分析设计的模型	156
6.2.1 机组有功发电控制模型	156
6.2.2 风电机组整机线性化模型	162
6.2.3 机械振动及气弹耦合研究模型	166
6.2.4 机组机电-电磁耦合分析模型	170
6.2.5 气动-气弹-机电-电磁耦合精细化模型	175
6.2.6 风电机组的阻抗分析模型	182
6.3 面向电网分析的模型	185
6.3.1 电磁暂态模型分析	185



6.3.2	机电暂态模型分析	186
6.3.3	动态模型的性能比较	188
6.4	风电机组的电压源控制模型	203
6.4.1	全功率机型电压源控制模型	204
6.4.2	双馈机型电压源控制模型	205
6.4.3	仿真分析	206
6.5	本章小结	213
	参考文献	213
第7章	风电场的动态等值建模	215
7.1	风电场等值建模研究的基本方法及进展	215
7.1.1	风电场等值基本方法	215
7.1.2	风电场等值模型的研究进展	217
7.2	风电机组的同调判别	218
7.2.1	风场主导动态特性影响因素分析	218
7.2.2	对电力系统阻尼特性的影响分析	224
7.3	风电场的典型结构	236
7.3.1	风电场升压站电气接线	236
7.3.2	风电场场内汇集线路接线方式	239
7.4	风电场聚合建模方法	240
7.4.1	风电场机组分群方法	240
7.4.2	参数聚合方法	241
7.4.3	基于功率曲线的风电场单机聚合模型仿真验证及误差分析	244
7.5	风场集电线路对聚合模型精度的影响	250
7.5.1	静态输出精度	250
7.5.2	电网故障情况下聚合模型的动态特性误差	251
7.5.3	风速波动情况下聚合模型输出特性误差	253
7.6	风电场降阶模型	254
7.6.1	风电场中长期等值模型	254
7.6.2	基于虚拟风机的风电场自适应静态等值模型	256
7.7	本章小结	257
	参考文献	257
第8章	模型的参数辨识与提取	260
8.1	风力机气动曲线辨识	260
8.2	轴系参数辨识	262
8.3	机械模型的参数辨识	264



8.3.1 转动惯量	264
8.3.2 传动系统的等效刚度系数	264
8.3.3 传动系统的阻尼系数	265
8.3.4 非扭转机械模型中的参数	266
8.4 变流器参数辨识	267
8.5 本章小结	268
参考文献	268
第9章 风电模型工程应用案例	269
9.1 双馈风电机组传动系统载荷疲劳测试评价及扭振抑制	269
9.1.1 研究内容及相互关系	269
9.1.2 疲劳测试与评价方法	270
9.1.3 联合仿真建模	273
9.1.4 仿真结果	276
9.2 风电场群接入电力系统的安全稳定分析	278
9.2.1 系统概况	278
9.2.2 风电场的动态等值建模	280
9.2.3 安全稳定分析示例结果	280
9.3 大型风电场经柔性直流接入电网动态仿真分析	285
9.3.1 案例工程系统概况	285
9.3.2 风电场的建模及并网仿真分析	287
9.3.3 风电场经柔直接入系统建模及仿真分析	301
9.4 大型风电场场站控制器硬件在环实时仿真——控制策略验证	307
9.4.1 RT-LAB 实时仿真平台	307
9.4.2 虚拟风电场仿真平台结构	309
9.4.3 基于 RT-LAB 的虚拟风电场建模	310
9.4.4 风电场的控制器及控制策略仿真验证	311
9.5 风储协调控制器硬件在环实时仿真	314
9.5.1 RTDS 的软硬件特点	314
9.5.2 基于 RTDS 的风储协调控制系统硬件在环建模	316
9.5.3 基于 RTDS 的风储平抑功率波动运行控制策略验证	325
9.6 本章小结	329
参考文献	329
附录 A 风电机组参数	330
附录 B 风电机组故障保护参数	335

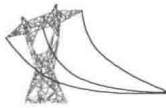


第 1 章 概 述

1.1 风力发电系统建模的意义

为了应对能源危机和环境问题,人类不断努力寻找可以替代化石燃料的新能源。以风能、太阳能、潮汐能、生物质能、地热能等可再生能源开发利用为代表的能源革命,翻开了人类用能的新篇章,也将对人类的生产和生活方式产生深远的影响。可再生新能源的开发利用还将给传统电力系统的组网方式和运行控制带来革命性的转变。风能以其技术成熟度、可实现性和成本的相对优势,在世界各国得到了广泛的开发利用。中国风电资源丰富,陆上可开发容量约为 25.7 亿 kW;海上 5~25m 水深以内的近海区域、海平面以上 50m 高度的风电可开发容量约为 2 亿 kW,5~50m 水深、70m 高度海上风电可开发容量约为 5 亿 kW;还有部分潮间带及潮下带滩涂资源,深海风能资源丰富。目前的总装机容量已位列世界首位^[1]。其中,东北、华北和西北“三北”地区的风能资源最为丰富,大型千万千瓦级风电基地相继在这些地区落成。然而,风电的随机波动性对电网高渗透率接纳风电提出了前所未有的挑战。位于西北部的大型风电基地与东南沿海地区的负荷中心,由于地理位置相距较大而带来的风电消纳和送出问题、风电与负荷间存在明显的反调峰特性等,将对电力系统的安全稳定运行产生重要的影响,同时对电网的灵活可调性提出了更高要求^[1]。因此,电力系统动态分析和安全控制的仿真计算中不可避免地需要融入风力发电系统。另一方面,风力发电机组的发电控制、载荷优化、故障穿越、虚拟同步控制等技术也需要不断研究发展,作为仿真计算基础的风力发电系统模型必不可少。

建模依赖于对物理规律本身的认知程度和计算机仿真技术的发展,这两者存在着相互依赖和相互制约的关系。风电机组本身包含多种非线性机构的复杂系统,具有不同时间尺度动态特性。对于电力系计算而言,详细的风电机组模型计算量过大,往往会使得计算难以进行,而简化后的模型则可能隐藏某些动态现象,影响分析计算结果的准确性。此外,大型互联系统各部分的模型计算时间尺度不匹配也可能造成计算不收敛或结果不正确。针对不同的研究问题,只有恰当的模型才可以在正确表现风电机组与电网间相互作用的同时又具有计算优势。另一方面,模型参数的准确性对于仿真结果的可信度也是十分重要的。建立风电



机组和风电场的模型是研究并网风电与电网相互作用的基础,也是研究风电机组本身特性及控制的基础。

1.2 风电动态模型及分类

有关风力发电系统的研究可以概括地分为机组整机自身运行与控制的研究和风电并网研究两大方面。前者需要的是风电机组模型,后者注重风电场等值模型。目前常用的风电机组模型根据其关注的问题又可以分为空气动力学模态分析模型、机电耦合载荷分析模型、电气控制分析模型等。模型对机组中与待研究问题相关的部分进行了详细描述,其余部分做了不同程度的简化。风电机组完整的详细模型是跨领域的,对仿真分析手段和工具提出了较高的要求,解决的方法涉及不同领域软件的联合建模仿真。

面向机组本身特性分析与控制研究的动态模型需要满足一定外部激励下响应的精度要求。由于风电机组特性包含气动、机械以及电气等多领域,很难在统一的平台上建立完整的多模态、多领域、多场景风电机组动态模型,因此,在面向机组特性分析与控制研究建模时,通常又根据研究问题的需要,分为以下几类:载荷分析、气动-气弹特性、多模态机电耦合特性以及并网电气特性等。由于存在时间尺度上的差异,在研究特定问题时,可对复杂的多模态、多场景模型进行一定程度的简化降阶,得出满足响应精度要求的研究模型。

面向电力系统分析与控制研究的风电机组和风电场的动态模型应能满足电力系统稳定性分析和保护整定的需要。电力系统分析对稳定性的划分包含静态稳定、动态稳定以及暂态稳定。针对每类稳定性问题都应给出相应的风电模型,这主要考虑计算代价以及风电模型与电力系统其他元件模型精度的一致性。风电机组、风电场模型不准确,可能导致稳定性分析结论错误和保护整定不合理,所以风电机组的建模应借鉴火电机组在不同稳定分析以及保护整定程序下的建模和简化方法,并且考虑风电机组、风电场的差异性,得出能用于电力系统稳定性分析和保护整定的模型。

1.3 动态建模的基本方法

模型主要分为物理模型和数学模型。物理模型是根据相似性原理,构建原系统的等价模型,通过实验来反映原物理系统的动态特性;数学模型是对原物理模型进行进一步抽象,得到描述原物理模型的一组状态方程,然后通过数字计算机



仿真来模拟原系统的动态特性。构建等价物理模型需要耗费大量的资源且价格昂贵,如果在对物理系统不够了解的情况下,很容易造成系统的损坏,不适合反复实验。随着计算机技术的飞速发展,计算机运算能力大幅提高,采用构建数学模型进行数字仿真的优势越来越明显,主要为投入成本低、能够反复实验、灵活性强、可模拟系统规模大。模拟实际物理特性的精度主要取决于数学模型的详细程度。因此,对风电机组的建模通常先构建数学模型,在计算机上进行数字仿真,然后可通过构建物理模型或直接使用实际投入运行的风电机组进行实验测试,验证所建模型的准确性。

数学模型又可分为机理模型和辨识模型两大类,相应的建模方法简述如下^[2]。

1.3.1 机理建模

机理建模是根据研究对象的物理机理建立动力学方程,可较准确地反映对象的动静态行为,是使用最广泛的建模方法。其优点是模型及参数机理内涵和物理意义明确,但对对象认知程度的制约和大量存在的非线性问题是影响该方法模型精度的主要因素。风电机组的机理建模可以分为模型假设、建立数学模型和模型验证三个部分。

(1) 模型假设:模型假设是建模的前提,模型假设是根据研究目的做出的,是物理模型进一步抽象成数学模型的必要条件。

(2) 建立数学模型:数学模型的建立过程,就是在模型假设的前提下,对物理模型应用基本的物理规律和原理,进一步抽象成数学方程的过程。

(3) 模型验证:模型验证主要是对正确性和精度(误差)进行评估。正确性就是所建立的数学模型能否正确反映实际物理过程。精度(误差)用来评估模型的优良。影响模型精度的因素主要有两个方面,一个是来自模型本身(模型假设带来的误差),另一个是来自用于模型验证的参数。风电机组模型验证方法主要有与实际机组测试结果比对和与物理模型测试结果比对。在一定条件下,不同仿真软件的比对结果也可作为参考。

1.3.2 辨识建模

辨识模型是通过输入输出数据采用系统辨识的方法建立的模型。这类模型不需要对研究对象内部的详细物理机理进行描述,更关注输入输出特性,因此只需要部分先验知识以及系统的输入输出数据,减少了物理机理分析过程。辨识又可分为结构辨识和参数辨识,对于大部分物理系统,一般都是按先验知识选定模型结构后,辨识其中参数。辨识过程大概包括以下步骤^[2]。

(1) 根据先验知识和建模目的选择模型类别和结构。