



“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

新能源发电并网技术丛书

*Modeling and Simulation for
Grid Integration of Renewable Energy Generation*

朱凌志 董存 陈宁 等 编著

新能源发电建模 与并网仿真技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“十二五” “十三五” 国家重点图书出版规划项目

新 能 源 发 电 并 网 技 术 丛 书

朱凌志 董存 陈宁 等 编著

新能源发电建模 与并网仿真技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书为《新能源发电并网技术丛书》之一,从基本原理、建模方法、模型参数测试与验证和仿真实例等多个方面,对风力发电、光伏发电和光热发电等主要的的新能源发电系统机电暂态建模方法进行了较为全面的介绍。本书首先简要介绍了风力发电、光伏发电、光热发电等新能源发电技术的主要原理,然后分别介绍了主流风电机组、光伏发电、光热发电的并网仿真模型以及风电场和光伏电站场站级控制系统模型,在此基础上,结合 IEC 及我国相关标准,介绍了新能源发电模型参数的测试及验证技术;最后,通过典型算例系统的仿真分析,对比了风电、光伏发电与常规水火电对电网安全稳定性影响方面的差异。

本书对从事新能源发电建模、并网分析及运行控制等方面研究工作的科技工作者具有一定的参考价值,也可供新能源领域的工程技术人员借鉴参考。

图书在版编目(CIP)数据

新能源发电建模与并网仿真技术 / 朱凌志, 董存, 陈宁等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 12
(新能源发电并网技术丛书)
ISBN 978-7-5170-7219-5

I. ①新… II. ①朱… ②董… ③陈… III. ①新能源
—发电—研究 IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第274930号

书 名	新能源发电并网技术丛书 新能源发电建模与并网仿真技术 XIN NENGYUAN FADIAN JIANMO YU BINGWANG FANGZHEN JISHU
作 者	朱凌志 董 存 陈 宁 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.75印张 324千字
版 次	2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷
定 价	56.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

丛 书 编 委 会

主 任 丁 杰

副主任 朱凌志 吴福保

委 员 (按姓氏拼音排序)

陈 宁 崔 方 赫卫国 秦筱迪

陶以彬 许晓慧 杨 波 叶季蕾

张军军 周 海 周邺飞

本书编委会

主 编 朱凌志

副主编 董 存 陈 宁

参编人员（按姓氏拼音排序）

葛路明 霍 超 柯贤波 牛拴保

钱敏慧 曲立楠 王湘艳 张 磊

赵大伟 赵 亮



随着全球应对气候变化呼声的日益高涨以及能源短缺、能源供应安全形势的日趋严峻，风能、太阳能、生物质能、海洋能等新能源以其清洁、安全、可再生的特点，在各国能源战略中的地位不断提高。其中风能、太阳能相对而言成本较低、技术较成熟、可靠性较高，近年来发展迅猛，并开始能源供应中发挥重要作用。我国于2006年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，政府部门通过特许权招标，制定风电、光伏分区上网电价，出台光伏电价补贴机制等一系列措施，逐步建立了支持新能源开发利用的补贴和政策体系。至此，我国风电进入快速发展阶段，连续5年实现增长率超100%，并于2012年6月装机容量超过美国，成为世界第一风电大国。截至2014年年底，全国光伏发电装机容量达到2805万kW，成为仅次于德国的世界光伏装机第二大国。

根据国家规划，我国风电装机容量2020年将达到2亿kW。华北、东北、西北等“三北”地区以及江苏、山东沿海地区的风电主要以大规模集中开发为主，装机规模约占全国风电开发规模的70%，将建成9个千万千瓦级风电基地；中部地区则以分散式开发为主。光伏发电装机容量预计2020年将达到1亿kW。与风电开发不同，我国光伏发电呈现“大规模开发，集中远距离输送”与“分散式开发，就地利用”并举的模式，太阳能资源丰富的西北、华北等地区适宜建设大型地面光伏电站，中东部发达地区则以分布式光伏为主，我国新能源在未来一段时间仍将保持快速发展的态势。

然而，在快速发展的同时，我国新能源也遇到了一系列亟待解决的问题，其中新能源的并网问题已经成为社会各界关注的焦点，如新能源并网接入问题、包含大规模新能源的系统安全稳定问题、新能源的消纳问题以及新能源分布式并网带来的配电网技术和管理问题等。

新能源并网技术已经得到了国家、地方、行业、企业以及全社会的广泛关注。自“十一五”以来，国家科技部在新能源并网技术方面设立了多个“973”“863”以及科技支撑计划等重大科技项目，行业中诸多企业也在新能

源并网技术方面开展了大量研究和实践，在新能源并网技术方面取得了丰硕的成果，有力地促进了新能源发电产业的发展。

中国电力科学研究院作为国家电网公司直属科研单位，在新能源并网等方面主持和参与了多项国家“973”“863”以及科技支撑计划和国家电网公司科技项目，开展了大量与生产实践相关的针对性研究，主要涉及新能源并网的建模、仿真、分析、规划等基础理论和方法，新能源并网的实验、检测、评估、验证及装备研制等方面的技术研究和相关标准制定，风电、光伏发电功率预测及资源评估等气象技术研发应用，新能源并网的智能控制和调度运行技术研发应用，分布式电源、微电网以及储能的系统集成及运行控制技术研发应用等。这些研发所形成的科研成果与现场应用，在我国新能源发电产业高速发展中起到了重要的作用。

本次编著的《新能源发电并网技术丛书》内容包括电力系统储能应用技术、风力发电和光伏发电预测技术、光伏发电并网试验检测技术、微电网运行与控制、新能源发电建模与仿真技术、数值天气预报产品在新能源功率预测中的应用、光伏发电认证及实证技术、新能源调度技术与并网管理、分布式电源并网运行控制技术、电力电子技术在智能配电网中的应用等多个方面。该丛书是中国电力科学研究院等单位在新能源发电并网领域的探索、实践以及在大量现场应用基础上的总结，是我国首套从多个角度系统化阐述大规模及分布式新能源并网技术研究与实践的著作。希望该丛书的出版，能够吸引更多国内外专家、学者以及有志从事新能源行业的专业人士，进一步深化开展新能源并网技术的研究及应用，为促进我国新能源发电产业的技术进步发挥更大的作用！

中国科学院院士、中国电力科学研究院名誉院长：

周孝信



前言

QIANYAN

以潮流计算和机电暂态仿真为基础的分析计算是电力系统规划、日常运行方式安排、控制策略制定的主要手段，模型和参数的准确性一直是电力系统运行人员关注的重点。目前在静态网络元件、常规发电机组及其控制系统、负荷、直流输电等方面的建模研究和参数实测已经较为深入，进入了工程实用阶段。在新能源发电建模方面，相关的理论研究较多，但在电力系统规划和运行中的应用尚处于起步阶段。近年来，以风力发电、光伏发电为代表的新能源发电快速发展，对电力系统的影响也日趋显著。早期电力系统运行人员在日常运行方式计算中对新能源发电模型的考虑较为简单，仅用负荷平衡新能源的出力或者仅用典型模型和典型参数，这种方式无法真实反映新能源对电力系统安全稳定的影响，得出的结论必然是不准确的。随着新能源在电力系统中的占比日益提高，新能源并网安全问题、消纳问题已经成为很多地区电网运行面临的重要问题，这就要求电力系统仿真计算能够准确反映包含大规模新能源发电的系统的动态特性，准确反映新能源运行特性对电力系统安全稳定的影响，以便运行人员科学合理安排电网运行方式，保障新能源的最大消纳。

准确的模型和参数是实现含大规模新能源发电的电力系统精确仿真的基础。在新能源发电建模方面，目前已经有不少相关的研究和著作，但这些研究和著作大多着眼于新能源发电本体的控制技术，如风力发电、光伏发电的最大功率跟踪技术，变流器/逆变器的有功功率、无功功率解耦控制等，所提出的模型一般是相对详细的器件级理论模型，更适合作为设备研发方面的参考，而不适用于研究大规模新能源接入与电网的交互影响。中国电力科学研究院自 21 世纪初开始，陆续开展了多项风力发电、光伏发电的建模、参数实测以及新能源发电与电网交互影响方面的课题研究，并着力于推动研究成果的工程应用。

本书是对中国电力科学研究院在新能源发电建模、参数实测、并网分析方面部分研究成果的提炼和总结。内容涉及新能源发电技术及基本原理、风电机组建模技术、光伏发电建模技术、光热发电建模技术、新能源电站控制系统模型、新能源发电模型参数辨识及验证技术,以及新能源发电并网仿真分析等。

本书共8章,其中第1章由陈宁、朱凌志、董存和牛拴保编写,第2章由陈宁和王湘艳编写,第3章由钱敏慧、张磊编写,第4章由曲立楠、葛路明、朱凌志和柯贤波编写,第5章由赵亮和王湘艳编写,第6章由钱敏慧、赵大伟和朱凌志编写,第7章由曲立楠、葛路明、朱凌志和董存编写,第8章由朱凌志、曲立楠和霍超编写。此外,全书编写过程中还得到了姜达军、韩华玲、于若英、刘艳章、彭佩佩等同事的大力协助。全书主要由朱凌志、董存、陈宁审稿,朱凌志统稿完成。

本书在编写过程中参阅了很多前辈的工作成果,引用了大量标准、新能源发电设备试验和测试数据,在此对国家电力调度控制中心、西北电力调控分中心、国网浙江省电力有限公司、国网青海省电力有限公司、国网新疆电力有限公司、国网河南省电力有限公司、国网宁夏电力有限公司、阳光电源股份有限公司、华为技术有限公司等单位表示特别感谢。本书在编写过程中听取了电力科学研究院王伟胜的中肯意见并采纳了相关建议;与此同时,丛书编委会丁杰、吴福保等给予了相关帮助;此外,顾锦汶教授亦给予了宝贵的意见。在此一并向他们致以衷心的感谢!

本书的成果来自国家重点研发计划项目:高比例可再生能源并网的电力系统规划与运行基础理论(2016YFB0900100)。

限于作者水平和实践经验,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2018年11月



序	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 我国新能源发展概况	1
1.2 新能源接入对电力系统的影响	2
1.3 新能源发电建模与仿真研究进展	4
1.4 主要内容	7
参考文献	8
第2章 新能源发电技术及基本原理	11
2.1 风力发电	11
2.2 光伏发电	18
2.3 光热发电	28
参考文献	36
第3章 风电机组建模技术	37
3.1 风电机组的模型结构	37
3.2 风轮模型	39
3.3 双馈风电机组及其控制系统模型	43
3.4 全功率永磁风电机组及其控制系统模型	55
3.5 风电机组的通用化模型	70
参考文献	78
第4章 光伏发电建模技术	81
4.1 光伏发电的模型结构	81
4.2 光伏阵列模型	82
4.3 光伏逆变器模型	86
4.4 逆变器群等值模型	99
参考文献	109

第5章 光热发电建模技术	111
5.1 光热发电系统的模型结构	111
5.2 聚光集热系统模型	114
5.3 储热系统模型	132
5.4 蒸汽发生系统模型	136
5.5 汽轮发电系统模型	139
5.6 光热电站运行特性仿真	140
参考文献	147
第6章 新能源电站控制系统模型	149
6.1 新能源电站的典型结构	149
6.2 新能源电站并网控制要求	150
6.3 新能源电站有功功率控制	154
6.4 新能源电站无功功率控制	157
6.5 新能源电站控制系统模型	160
6.6 算例分析	166
参考文献	170
第7章 新能源发电模型参数辨识及验证技术	172
7.1 模型参数测试思路	172
7.2 试验和辨识方法	176
7.3 模型验证	182
7.4 模型验证案例	190
参考文献	198
第8章 新能源发电并网仿真分析	200
8.1 算例系统	200
8.2 新能源电站接入电网静态特性分析	202
8.3 新能源发电并网功角稳定性分析	204
8.4 新能源并网的暂态电压稳定性分析	213
8.5 新能源发电并网频率调节特性分析	217

第1章 绪 论

1.1 我国新能源发展概况

随着化石能源的日趋枯竭和全球对于温室气体排放引起的气候变化问题的关注,以风能、太阳能为代表的新能源因具有可持续性、清洁、环保等特点,已成为当今与未来能源的发展方向。

我国政府高度重视气候变化问题,积极实施节能减排,大力发展新能源。2006年5月,全国人民代表大会颁布了《中华人民共和国可再生能源法》,国家有关部委随后出台了一系列的配套政策、管理规定和办法,明确了可再生能源发电优先上网、全额收购、价格优惠及社会公摊的政策。2007年6月,国家发展和改革委员会发布了《中国应对气候变化国家方案》,提出了2010年单位GDP能耗比2005年降低20%,可再生能源开发利用在一次能源供应中的比重达到10%等目标。8月,国务院常务会议审议并通过了《可再生能源中长期发展规划》。同时,一系列支持风电和光伏发电发展的电价政策、补贴政策以及管理政策陆续出台,极大地促进了我国风电、光伏发电的发展。2016年11月和12月,国家能源局分别发布了《风电发展“十三五”规划》和《太阳能发展“十三五”规划》,提出我国太阳能发电和风力发电在“十三五”期间的发展总目标。其中,到2020年,风电总装机容量达到2.1亿kW以上,海上风电并网装机容量达到500万kW;太阳能发电装机容量达到1.1亿kW以上。

在风电发展方面,按照集中开发和分散发展并举的原则,推进风电有序、快速、健康发展。在“三北”等风能资源丰富地区,结合电网布局、电力市场、电力外送通道,优化风电开布局,有序推进风电的规模化发展,以特许权招标项目和试验示范项目建设带动风电技术进步和设备制造产业升级,为海上风电大规模开发建设打好基础。在风能资源分散的内陆地区,因地制宜推动分散接入低压配电网的风电开发,为风电发展开辟新的途径。目前,已建成以甘肃酒泉、新疆哈密等为代表的一批风电基地。

在太阳能发电发展方面,在中东部地区建设与建筑结合的分布式光伏发电系统,在青海、新疆等太阳能资源丰富和未利用土地资源丰富的地区,以增加当地电力供应为目的建设集中式地面光伏电站,以经济性与光伏电站基本相当为前提建设一批光热电站。目前,已建成以青海为代表的一批太阳能发电基地,江苏、浙江等省份的分布式光伏发电也快速发展。

截至2017年年底,我国风电装机容量1.64亿kW、光伏发电装机容量1.3亿kW

(其中分布式光伏发电装机容量 2966 万 kW), 分别同比增长 10.5% 和 68.7%。可再生能源发电装机容量约占全部电力装机容量的 36.6%, 同比上升 2.1 个百分点, 可再生能源的清洁能源替代作用日益凸显。

1.2 新能源接入对电力系统的影响

1.2.1 新能源的技术特点及运行特性

1. 特点

风电和光伏发电受风、光等资源影响, 其出力呈现明显的间歇性和波动性。以甘肃某年出力数据为例, 经统计分析发现有如下特点:

(1) 出力波动明显。风电日平均出力波动范围很大, 最小值接近于 0, 最大值接近全天满发。

(2) 出力随机性强。在相同月份, 会连续数日日平均出力达到额定出力, 同时, 也可能连续数日日平均出力不足 20% 额定出力甚至于 0; 对于相邻日, 存在发电量近似相等, 而出力曲线差异巨大的情况。

2. 运行特性

风电和光伏发电均采用电力电子接口设备并网, 其运行特性不同于常规机组, 主要表现在:

(1) 缺乏转动惯量。风轮叶片等效转动惯量虽然很大, 但由于目前主流的双馈、直驱型风电机组均采用电力电子变流器实现有功、无功的解耦控制, 采用锁相环跟踪电网频率, 对电网的频率变化不敏感, 因此风轮叶片的转动惯量无法作用到电网中。光伏发电无转动部件, 在不增加额外措施和控制策略的基础上, 对电网没有转动惯量。

(2) 过载能力不足。由于电力电子器件承受过压、过流的能力不足, 因此风电机组、光伏逆变器无法承受电网故障带来的设备过压或者过流。在系统发生短路时, 逆变器接口的发电设备提供的短路电流基本与额定电流相当, 对电力系统的支撑能力明显弱于同步发电机组。而由于电力电子器件耐受过电压能力弱, 在送端直流闭锁等可能导致的系统高电压工况下, 风电机组、光伏逆变器发生脱网的风险很高。

(3) 一次调频能力不足。现有标准对新能源发电调频能力未做要求, 新能源发电难以对系统提供有效的有功调节支撑, 对电网频率稳定性造成的影响正日益显现。

(4) 电压调节能力未能充分利用。风电机组、光伏逆变器虽然自身具备一定的无功输出能力, 但由于电站机组数量多, 实现整站的协调控制难度较大, 目前风电机组、光伏逆变器的无功功率调节能力均未能充分发挥。

1.2.2 对调度运行的影响

研究人员做了大量研究分析工作, 从消纳问题、调峰及备用容量等方面探讨了大规



模新能源发电并网对电力系统调度运行的影响。

1. 消纳问题

大规模新能源接入电力系统后,增加了系统的调节负担,常规电源不仅要跟随负荷变化,还要平衡新能源发电的出力波动。当新能源发电出力超过系统调节范围时,就必须控制新能源出力以保证系统动态平衡,从而产生弃风、弃光。

截至2017年年底,我国可再生能源发电量1.7万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占全部发电量的26.4%。其中,风电电量3057亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,弃风电量419亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,弃风率12%;光伏发电电量1182亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,弃光电量73亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,弃光率6%。

2. 对系统调峰容量的影响

新能源发电具有不确定性,特别是风电,其功率波动常常与用电负荷波动趋势相反,即在负荷高峰时段可能无风可发电,而在负荷低谷时段又可能来大风而需要满发。同时风电机组功率由风速决定,功率变化速率较快,需要系统为之提供足够快的调峰速率。因此,风电的运行相当于产生“削谷填峰”的反调峰效果,加大了电网的等效峰谷差,扩大了全网调峰的范围和容量需求。

我国电源结构以火电为主,燃气发电等快速调节电源配置不足,导致系统调峰能力严重不足,在我国“三北”地区更为突出,尤其在冬天后半夜低负荷但风电高出力情况下,相当一部分火电机组承担供热任务,这些机组实行“以热定电”,机组调峰能力降低,进一步增加了全网调峰容量需求。

以甘肃省为例,甘肃全省具备调峰能力的发电机组容量约为8GW,受水电、火电机组运行方式以及检修等因素的影响,最大可调容量约为5GW,考虑事故备用、负荷备用以及电网结构的限制等,全省所有机组不同时期的总调峰能力约为4GW。其中,1.5GW用于常规负荷调峰,能够承担新能源调峰的容量仅为2.5GW。如果考虑通过跨省资源参与调峰,则涉及调度管理和电力交易模式等一系列管理问题。因此,在现有技术水平下,局部地区电网的整体调峰能力无法满足需求。

1.2.3 对安全稳定的影响

1. 电网抗扰动能力下降

电力系统稳定运行的核心是能量的瞬时平衡。对交流电网而言,瞬时平衡的根本在于同步,当系统发生故障或扰动,产生功率冲击引起频率波动时,依靠大量旋转设备的转动惯性进行调节。系统调频能力主要与3个因素有关:①系统有效转动惯量;②机组调频能力;③负荷频率特性。系统有效转动惯量越大,机组调频能力越强,负荷频率特性越好,承受有功功率冲击、频率波动的能力越强。

大规模新能源接入电网后,大量常规电源被替代,系统调频、调压能力减弱,电网抗扰动能力下降,在出现大功率缺失的情况下,易引发全网频率问题。以西北电网和东北电网为例,西北电网在68GW负荷水平下,功率损失3.5GW,若网内无风电,系统

频率下跌 0.65Hz, 若网内风电出力达到 12GW, 则频率下跌 0.95Hz; 东北电网 55GW 负荷水平下, 功率损失 3GW, 若网内无风电, 系统频率下跌 0.7Hz, 若网内风电出力达到 10GW, 频率下跌 1.1Hz。

2. 发生连锁故障的风险增加

新能源发电设备对高频和过电压的耐受能力较差, 当系统发生扰动, 频率、电压发生变化时, 新能源发电设备容易大规模脱网, 引发严重的连锁性故障。随着新能源发电占比的提升, 该问题将日益突出。

以哈密—郑州±800kV 特高压直流工程(简称天中直流)为例, 送端电网暂态过电压约为 1.2 倍额定电压时, 火电等常规机组仍能正常运行, 但风电等新能源机组有可能大规模连锁脱网。

以灵绍、银东等多直流送端区域为例, 单一交流故障可导致近区多回直流功率同时短时大幅跌落, 引起系统频率超过 50.5Hz, 存在新能源大规模脱网风险。

3. 发生次同步振荡的风险增加

与传统电网中同步、异步概念不同, 电力电子设备诱发次同步/超同步振荡后, 可能仍会并网运行, 持续威胁电网安全运行。

新能源发电采用的电力电子设备普遍采用基于 Park 变换的 dq 旋转坐标轴控制方式, 超同步(70Hz)的振荡分量将会耦合出次同步(30Hz)的振荡分量(关于 50Hz 对称), 若风电阻抗与电网阻抗相互耦合, 会引起系统不稳定。

近年来, 在电网实际运行中, 在新疆、甘肃、宁夏、河北等风电富集地区多次监测到由风电机组产生的次同步谐波。2015 年 7 月 1 日, 新疆哈密山北地区风电机组持续产生次同步谐波, 导致花园火电厂的机组轴系次同步扭振保护动作, 3 台 660MW 火电机组相继跳闸。随着风电、光伏发电的快速发展, 由新能源引起的电网次同步振荡风险进一步加大。

1.3 新能源发电建模与仿真研究进展

电力系统仿真计算既是电力系统动态分析与安全控制的基本工具, 也是电力生产部门用于指导电网运行的基本依据。电力系统建模是仿真计算的基础, 模型及参数不准会使计算结果与实际情况不符。或偏保守, 造成不必要的资源浪费, 影响电力系统运行的经济性; 或偏激进, 在极端情况下会改变分析结论或者掩盖一些重要的现象, 对系统构成潜在危险。

传统的电力系统建模最主要的工作是确定“四大参数”, 即励磁系统及其调节器参数、原动机及其调节器参数、同步发电机参数和电力负荷参数。除此之外, 还包括动态等值建模、输电线路建模和动力系统建模等。

大规模新能源发电并网后, 由于采用电力电子接口设备并网, 电力电子设备的快速



响应特性使得系统在功角稳定、频率稳定和电压稳定等传统稳定问题之外，又出现了新的稳定问题。为了适应电力系统稳定分析的需要，必须建立能够准确反映新能源发电特性的模型。

1.3.1 风力发电建模的技术进展

风力发电建模是一个循序渐进的过程。在机电暂态时间尺度，自 2003 年以来，陆续有多个国际组织密切关注和跟进，包括美国西部联合电力系统（Western System Coordinating Council, WECC）、国际大电网会议（International Conference on Large High Voltage Electric System, Conference International des Grands Reseaux Electriques, CIGRE）、国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）和北美电力可靠性委员会（North American Electric Reliability Council, NERC）等。截至 2010 年，风力发电建模技术进展可简要归纳如图 1-1 所示。

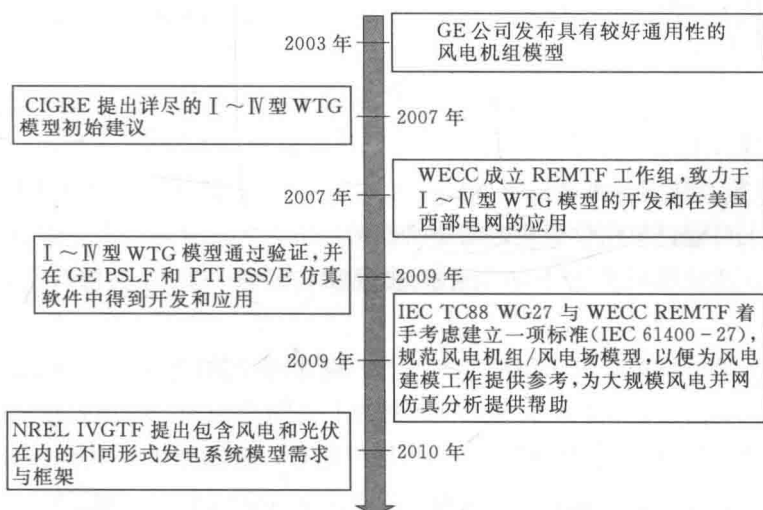


图 1-1 风力发电建模技术进展

WECC REMTF—Western Electricity Coordinating Council Renewable Energy Modeling Task Force;
IEC TC88 WG27—International Electrotechnical Commission Technical Committee 88 Working Group 27;
NREL IVGTF—Nation Renewable Energy Laboratory Integration of Variable Generation Task Force

目前，在 EPRI、CIGRE、WECC TEMTF、IEC TC88 WG27、NREL、SNL，以及多家设备厂商（包括 ABB、Siemens、Nordex、Enernex、Enercon、GE、Vestas 等）的积极努力下，除场站级控制系统外，模型的其他部分均得到验证，并在 GE PSLF、PTI PSS/E 及 DIgSILENT PowerFactory 软件中得到开发和应用。其中，GE PSLF 和 PTI PSS/E 采用受控电流源作为并网接口，而 DIgSILENT PowerFactory 采用静态发电机替代电源及电力电子变换器作为并网接口，通过控制静态发电机有功电流和无功电流的参考值，实现对风力发电系统向电网注入有功功率、无功功率的控制。从并网接口的标准化来看，DIgSILENT PowerFactory 软件实现了风电等一类新能源发电系统模型

的通用化。

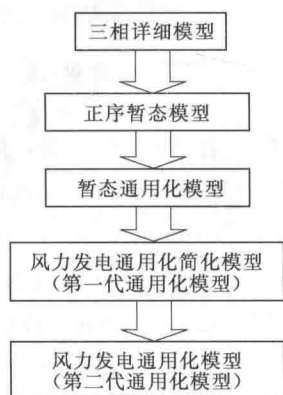


图 1-2 风力发电建模发展过程

从技术实现方面上看,面向电力系统安全稳定分析的需求,对风力发电系统详细模型进行简化是建立风力发电机电暂态模型的有效途径,其发展过程如图 1-2 所示。具有通用化特征的风力发电机电暂态模型的起源为复杂的三相详细模型,也称为 PSCAD 模型,该模型考虑电力电子装置的快速动态特性,用于控制器的设计和详细动态特性分析。通过忽略详细模型中与正序计算无关的部分,可以推导得到正序暂态模型。这两个模型由厂商持有,且不适用于电力系统暂态计算。在正序暂态模型的基础上,提炼不同厂商同类产品的共性,并对外公开,得到的模型即为暂态通用化模型,例如,GE 公司于 2003 年发布的风电机组模型。暂态通用化模型降低了研究人员和工程技术人员对厂商的依赖程度,但遗憾的是其仍离不开产品个性环节的支撑,如 C_p 曲线等。

为了避开厂商对模型的限制,使之适用于大电网仿真,围绕 IEC 定义了以下四类风电机组:①定速风电机组(I型);②滑差控制变速风电机组(II型);③双馈变速风电机组(III型);④全功率变频风电机组(IV型)。研究人员和工程技术人员通过忽略模拟快速动态特性的环节,保留合理的共性模块,简化受保密限制的环节,建立了风力发电通用化简化模型,即第一代通用化模型,并取得推广应用。

随着风力发电模型验证队伍的不断扩大,越来越多的厂商对第一代通用化模型的正确性和通用性提出质疑,从而促使其不断改进,最终形成风力发电通用化模型,即第二代通用化模型。第二代通用化模型模块化特征明显,各功能模块具有相对标准的形式,作用可得到充分发挥,减少了模型在设计、建立和应用过程中的重复性工作。

1.3.2 光伏发电建模的技术进展

相比于风力发电建模,光伏发电建模起步稍晚。2009 年,GE 公司率先发布了其自用的光伏电站稳定分析模型结构,充分考虑光伏发电并网技术要求及并网特性。随后,经过 WECC 和 NERC 的联合研究,在 GE 模型的基础上,综合考虑了国际上其他组织机构的并网技术要求,发布了 WECC 光伏发电机电暂态通用模型结构,包括站级控制模型和逆变器模型,更清晰地明确了各模块与电站各物理系统的对应。但由于其参考 GE 模型,重点主要放在了光伏电站的无功控制,而在很大程度上忽略了有功控制。

国内关于适用于电力系统分析的光伏发电模型研究也起步于 2009 年。中国电力科学研究院于 2010 年发布了 PSASP 第一版光伏模型,2012 年发布了 BPA 第一版光伏模型,两种光伏模型只有逆变器模型,仅考虑了逆变器正常运行工况下的双环控制策略,而未能描述逆变器的故障穿越特性,此外也缺乏实际逆变器的参数。2014 年,中国电