

新疆大学“211工程”优秀学术著作出版基金资助

风电并网技术

袁铁江 晁勤 李建林 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

风电并网技术

袁铁江 晁勤 李建林 著



机械工业出版社

风电出力时变特性使其在大规模接入电网时遇到很多技术问题,备受业界关注。本书针对风电并网涉及的风力发电机组建模、风电并网电力系统的安全稳定和电能质量分析、风电极限穿透功率、风电优化调度、风电功率预报、风电并网电力系统继电保护和电源规划等方面,结合实际案例,系统地向读者阐述了风电并网技术的原理和方法。

本书可供高等院校相关专业的本科生、研究生使用,也可供从事风力发电相关工作的专业人士参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

风电并网技术/袁铁江,晁勤,李建林著. —北京:
机械工业出版社, 2012. 9
ISBN 978-7-111-38351-2

I. ①风… II. ①袁…②晁…③李… III. ①风力发电-研究 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 187342 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 付承桂 责任编辑: 任 鑫
版式设计: 霍永明 责任校对: 胡艳萍
责任印制: 杨 曦
北京京丰印刷厂印刷
2012 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm×239mm·17.25 印张·343 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-38351-2
定价: 39.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

社服务中心: (010)88361066
销售一部: (010)68326294
销售二部: (010)88379649
读者购书热线: (010)88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>
机工官网: <http://www.cmpbook.com>
机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>
封面无防伪标均为盗版

前 言

风电作为一种清洁可再生能源，是破解人类面临的环境污染和能源短缺困境的必然选择，但由于风电出力的随机和波动等特性，大规模风电并网技术决定了风电发展的前景。为满足广大间歇式新能源发电科技工作者的需求，《风电并网技术》即将面世。本书针对风力发电机组建模、风电并网电力系统的安全稳定和电能质量分析、风电极限穿透功率、风电优化调度、风电功率预报、风电并网电力系统继电保护和电源规划等方面，结合实际案例阐述风电并网技术对于风电发展的决定性意义，归纳总结风电并网涉及的关键技术问题。主要包括：介绍主流风力发电机组的通用机械、电气结构、并网方法及其物理特性和数学模型，基于具体的常用电力系统仿真分析平台结合具体的机型介绍仿真模型，探讨大规模风电并网对电力系统的安全稳定和电能质量的影响、原理、分析方法和解决措施；介绍风电穿透功率的基本概念、影响因素，并结合具体的案例介绍极限穿透功率的计算模型和方法；介绍风电功率预测的基本概念，重点阐述了短期功率预报对电力系统并网的意义、短期功率预报的方法和误差分析等提高预报准确度的措施；介绍风电大规模并网对传统电力系统优化调度形成的挑战，在此基础上阐述大规模风电并网电力系统环境/经济调度的概念、原理和数学模型；仿真分析风力发电机组及其组合形成的风电场的短路特性，据此介绍风电对风电场内部和风电场并网联络线保护可能形成的影响和解决措施；介绍风电对传统电力系统电源规划带来的影响，进一步介绍风电并网电力系统规划的方法和模型。通过本书，读者将能够便捷地了解当前风电技术发展的最新进展和并网技术的概貌。希望本书能够对涵盖高校本科生、研究生和工程技术人员的多层次的广大读者有一定的帮助。

本书由新疆大学风电并网技术研发团队的袁铁江、晁勤统稿，李建林审阅，其中第1章、第6章、第7章和第9章由袁铁江编写，第2章、第3章、第4章、第5章由晁勤编写，第8章由李建林编写。

感谢新疆科技支撑项目(201132116)、新疆大学“211工程”优秀学术著作出版基金、“可再生能源发电及并网控制”教育部工程研究中心、国家自然科学基金(50667002、51067009、51167018)、新疆自然科学基金(2009211B04、2010211A10、2011211A017)为本书出版提供的支持!

感谢新疆大学研究生院王维庆教授、新疆电力调度通信中心常喜强、

孙谊嫻等在风电功率预报和电网调度等方面的专业指导和资料收集方面提供的帮助。感谢新疆大学电气工程学院的谢丽蓉副教授等同仁为本书编写提供的资料。感谢中国电力科学研究院电工所、中国科学院电工研究所、清华大学和西安交通大学等院所给予的相关学术交流机会。

感谢新疆大学风电并网技术研发团队的历届研究生院海、和晓新、王纯琦、文玉玲、袁建党、闫广新、张峰、曹慧、胡立强、邢文琦、李江、刘新刚、程磊、崔璐、张俊、何桂雄、田易之、王厚军、戴训江和孙成祥等为本书编写提供的资料。在这里还要感谢研究生杨琳、唐彬伟、熊雄、杨白洁、王筱、李有义、任天鸿、张龙音、刘伟、朱鑫、孔飞飞、曾信义、李星等在本书编写过程中所做的资料整理工作。还要感谢书中引注和未曾引注的所有文献的作者的辛勤工作。

本书在写作的过程中得到了业内众多专家、学者的帮助和审阅，在此一并表示感谢。

最后还要感谢机械工业出版社的付承桂等编辑为本书出版所付出的辛勤劳动。

风电并网技术的理论和应用技术的研究有待于进一步的探索和完善，囿于作者的知识和经验，书中观点或者结论难免有瑕疵，恳请读者原谅和不吝指正！

目 录

前言

第 1 章 并网技术决定风电的未来	1
1.1 引言	1
1.2 风力发电并网问题的产生	1
1.2.1 风力发电的基本原理	1
1.2.2 风电出力特性与电网安全稳定运行的矛盾	4
1.3 并网技术决定风电的发展	7
1.3.1 风电并网关键技术的发展及面临的主要挑战	7
1.3.2 并网技术对风电的影响	10
1.4 某百万千瓦级风电场并入电网的理论研究	11
1.4.1 项目的主要研究目标	11
1.4.2 项目的研究成果	12
第 2 章 并网型风力发电机组及其仿真建模	46
2.1 引言	46
2.2 风力发电机组仿真建模的基本问题	46
2.2.1 风力发电机组仿真模型的通用构成模块	46
2.2.2 电磁和机电暂态仿真	51
2.3 并网型异步风力发电机组	52
2.3.1 恒速恒频异步风力发电机组的结构和基本原理	52
2.3.2 异步风力发电机组并网方法	54
2.4 双馈风力发电机组的建模及控制策略	55
2.4.1 双馈风力发电机组的结构和基本原理	55
2.4.2 双馈风力发电机组的并网方式	59
2.4.3 双馈风力发电机组的仿真建模	60
2.5 基于某区域电网的风力发电机组仿真模型应用示例	70
2.5.1 风速扰动下系统的动态仿真	71
2.5.2 系统侧故障下系统的动态仿真	74
2.5.3 解耦控制方案的仿真分析	77
2.5.4 双馈风力发电机组模糊控制仿真	79
2.6 直驱永磁同步风力发电机组	81
2.6.1 直驱永磁同步风力发电机组简介	81
2.6.2 直驱永磁同步风力发电机组并网方法	82

2.6.3	并网型直驱永磁同步风力发电机组建模	83
2.6.4	控制策略部分	85
2.6.5	仿真分析	90
第3章	风电并网电力系统稳定性分析	99
3.1	引言	99
3.2	风电并网电力系统的电压稳定性分析	100
3.2.1	电力系统电压稳定分析的基本原理	100
3.2.2	风电对电力系统电压稳定的影响及其解决措施	103
3.2.3	风电并网系统电压稳定性仿真分析示例	111
3.3	风电并网电力系统的频率稳定性分析	119
3.3.1	风电并网电力系统频率稳定分析的基本原理	119
3.3.2	风电对电力系统频率稳定的影响及其解决措施	122
3.3.3	风电并网系统频率稳定性仿真分析示例	126
第4章	风电并网电力系统电能质量评估	133
4.1	引言	133
4.2	风电对其并网电力系统的电能质量的影响	133
4.2.1	电力系统电能质量的基本概念	133
4.2.2	风电对其并网电力系统电能质量的影响	137
4.3	风电并网电力系统电能质量评估	142
4.3.1	电能质量评估的基本方法	142
4.3.2	风电场引起电网电压偏差评估	143
4.3.3	风电场引起电网电压闪变评估	144
4.3.4	风电场注入谐波的评估	146
4.4	算例仿真分析	149
4.4.1	算例系统介绍	149
4.4.2	对风电场接入电网引起的电压偏差问题进行分析	150
4.4.3	对风电场接入电网引起的电压闪变问题进行分析	156
4.4.4	对风电场接入电网引起的谐波问题进行分析	158
4.4.5	小结	162
第5章	风电穿透功率极限	164
5.1	引言	164
5.2	何谓风电穿透功率极限	164
5.3	影响风电穿透功率极限的主要因素	165
5.4	基于带约束最优化方法的风电穿透功率极限计算	167
5.4.1	最优化理论简介	167
5.4.2	最优化问题的基本概念	167
5.4.3	风电穿透功率极限的最优化问题	167
5.4.4	带约束最优化问题的解法	169

5.4.5 基于遗传算法 (GA) 的风电穿透功率极限计算示例	170
5.5 基于数字仿真法的风电穿透功率极限计算	178
5.5.1 数字仿真法简介	178
5.5.2 稳态仿真求取风电穿透功率极限	178
5.5.3 稳态仿真求取风电穿透功率极限算例	179
5.5.4 动态仿真求取风电穿透功率极限	180
5.5.5 基于电压及功角稳定约束的风电穿透功率极限的动态仿真计算示例	181
5.5.6 基于频率稳定约束的风电穿透功率极限的动态仿真计算示例	183
5.6 基于频率静特性约束法的风电穿透功率极限计算	184
5.6.1 频率静特性约束法求取风电穿透功率极限计算原理	184
5.6.2 基于频率静特性约束的风电穿透功率极限计算示例	185
5.7 本章小结	185
第6章 风电功率短期预测	187
6.1 引言	187
6.2 风电功率短期预测	187
6.2.1 风电功率预测的基本概念和要求	187
6.2.2 风电功率预测的分类	188
6.2.3 风电功率短期预测的基本原理	190
6.2.4 基于神经网络的风电功率短期预测	192
6.3 风电功率短期预测误差分析	195
6.3.1 产生预测误差的原因	196
6.3.2 提高预测准确度的手段	197
6.3.3 预测误差的评估指标	198
6.4 基于神经网络的风电功率短期预测实例	199
6.4.1 预预测思路	199
6.4.2 误差预测思路	200
6.4.3 预预测和误差预测思路验证	200
6.4.4 基于误差预测值的风电场出力短期预预测值的修正	202
6.4.5 算例分析	203
6.4.6 结论	203
第7章 大规模风电并网电力系统优化调度	205
7.1 引言	205
7.2 大规模风电并网电力系统优化调度建模	205
7.2.1 电力系统经济调度基本概念	205
7.2.2 大规模风电对其并网电力系统调度的影响	210
7.2.3 风电电价计算	212
7.2.4 大规模风电并网电力系统优化调度建模	213
7.3 基于遗传算法的大规模风电并网系统优化调度示例	217

7.3.1	遗传算法	217
7.3.2	基于 GA 的大规模风电并网系统优化调度算例分析	218
第 8 章 风电并网电力系统继电保护		223
8.1	引言	223
8.2	风电对其并网电力系统继电保护的影响	223
8.2.1	风电系统继电保护简介	223
8.2.2	并网风力发电机组短路特性及对保护的影响	228
8.3	并网风电场继电保护的主要措施	234
8.3.1	风电场低电压穿越评价指标	234
8.3.2	风电场继电保护的改进措施	236
8.4	算例仿真分析	239
8.4.1	故障点因素对风力发电机组短路特性的影响	239
8.4.2	故障类型因素对风力发电机组短路特性的影响	240
8.4.3	风力发电机类型因素对风力发电机组短路特性的影响	242
8.4.4	转子侧装设 Crowbar 保护电路前后对风力发电机组短路特性的影响	242
8.4.5	行波保护应用于风电场	244
第 9 章 风电并网电力系统规划		247
9.1	引言	247
9.2	风电对传统电力系统规划的影响	247
9.2.1	电力系统规划的基本概念	247
9.2.2	风电对传统电力系统规划的影响	248
9.3	风电并网电力系统规划	251
9.3.1	风电并网电力系统规划建模	251
9.3.2	风电并网电力系统可靠性评估	262
9.3.3	风电并网电力系统规划示例	263

第 1 章 并网技术决定风电的未来

1.1 引言

受制于风速时变等条件的制约，风力发电具有间歇性、随机性和波动性等特性，在电能还无法低成本大规模存储的技术条件下，现代电力系统中电能的“发、输、用”是实时动态平衡的，这就形成了风电出力特性与电力系统对电源出力要求间的矛盾。风电并网对现代电力系统的安全稳定运行、电能质量控制、经济调度和电力系统规划等都构成了挑战。随着风电装机容量和并网比例的扩大，这种挑战日益严峻，并逐渐成为制约风电产业进一步发展的瓶颈。一句话，并网技术决定风电未来。

本章主要介绍了风电并网问题产生的原因、风电并网涉及的关键技术及其现状、未来发展趋势等。最后介绍了某百万千瓦级风电场并入电网理论研究课题的主要内容及其取得的初步研究成果。

1.2 风力发电并网问题的产生

1.2.1 风力发电的基本原理

GB/T 2900.53—2001《电工术语 风力发电机组》中描述：风力发电机组是将风的动能转换为电能的系统。风能是由于阳光照射至地表引起的不同区域地表温度差异产生的，所以从本质上讲风能是太阳能的一种表现形式。因此，广义地说风力发电机组是以太阳能为热源，以大气为工质的热能转换叶片式发电机。

同飞机的机翼一样，现代风力发电机组的风轮采用空气动力学原理驱动（见图 1-1a）。风并非“推”动风轮叶片，而是吹过风轮叶片形成叶片反面的压差，这种压差会产生升力 Y ，令风轮旋转并不断横切风流（见图 1-1b），风轮在风力的作用下旋转，将风的动能转变为风轮的机械能，带动发电机旋转发电。

利用风力发电机组发电是一种清洁的、可持续的能源利用方式，人们自然希望这种优质的能源能够得到充分的利用。然而，由于风力发电机组本身构造的原因，如叶片数量有限、气流通过风力发电机组时遭受的阻力等原因，导致风力发电机组并不能提取风能的所有功率。根据 Betz 定律，风力发电机组捕获风能的最大效率

η_{\max} 可用式(1-1)来计算。

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 A} = \frac{\frac{8}{27}\rho A v_1^3}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 A} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (1-1)$$

由式(1-1)可知,理论上风力发电机组能够提取的最大风能仅占全部风能的59.3%,而大多数风力发电机组只能提取全部风能的40%或者更少。

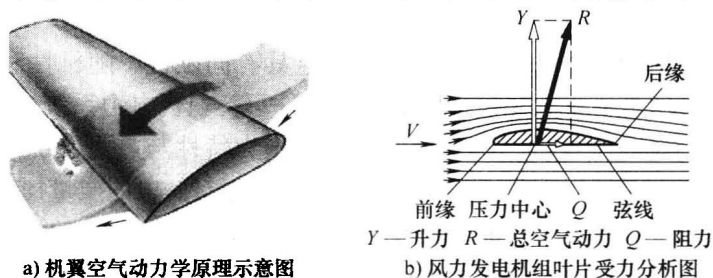


图 1-1 风力发电机原理

风力发电机组根据其容量大小和用途,可以分为离网型风力发电机组和并网型风力发电机组。

1. 离网型风力发电系统

顾名思义,离网型的风力发电系统不接入电网运行。通常其容量较小,额定容量在100W~10kW不等,多配合蓄电池使用。离网型风力发电系统发出的电能首先经过蓄电池储存起来,然后由蓄电池向用电器供电。在负荷密度小、用电安全等级低且电网难以架设的地区,特别是风资源丰富的西藏、青海等省份的农牧民家庭,可使用小型的离网型风力发电机组发电,以供应电视、电灯和收录机等家用电器的用电。离网型风力发电系统结构如图1-2所示,我国可批量生产的几种离网型风力发电机组型号及技术参数见表1-1。

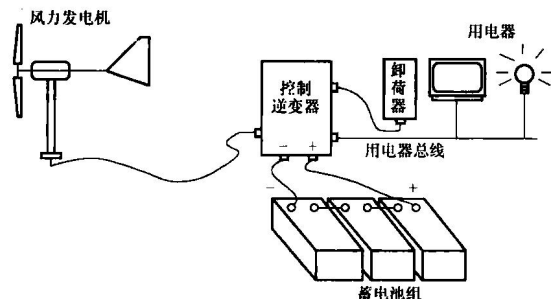


图 1-2 离网型风力发电系统结构示意图

表 1-1 我国可批量生产的几种离网型风力发电机组的型号及技术参数

序号	产品型号	风轮直径 /m	叶片数	风轮中心高 /m	起动风速 /(m/s)	额定风速 /(m/s)	停机风速 /(m/s)	额定功率 /W	额定电压 /V	重量 /kg
1	FD2-100	2	2	5	3	6	18	100	28	80
2	FD2-150	2	2	6	3	7	40	150	28	100
3	FD2.1-200	2.1	3	7	3	8	25	200	28	150
4	FD2.5-300	2.5	3	7	3	8	25	300	42	175
5	FD3-500	3	3	7	3	8	25	500	42	185
6	FD4-1K	4	3	9	3	8	25	1000	56	285
7	FD5,4-2K	5.4	3	9	4	8	25	2000	110	1500
8	FD7-3K	7	3	8	4	8	25	3000	115	1700
9	FD7-10K	7	2	12	4	11.5	60	10000	220	3000

2. 并网型风力发电系统

并网型风力发电系统是指风力发电机组与电网相连，向电网输送有功功率，同时从电网吸收或者向电网发出无功功率的风力发电系统，一般包括风力发电机组及其并网装置、线路、变压器等。目前，常见的并网型风力发电系统主要有恒速异步风力发电系统、变速双馈异步风力发电系统和变速永磁直驱同步风力发电系统等三种，如图 1-3 ~ 图 1-5 所示。

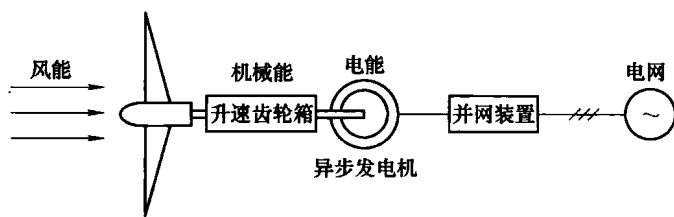


图 1-3 恒速异步风力发电系统结构示意图

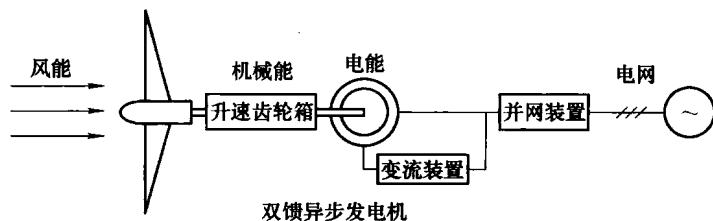


图 1-4 变速双馈异步风力发电系统结构示意图

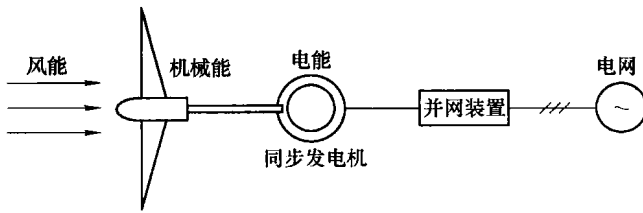


图 1-5 变速永磁直驱同步风力发电系统结构示意图

不同的风力发电机组采用不同的方法进行并网。

恒速异步风力发电机组并网的方法主要有直接并网法、准同期并网法、降压并网法和利用晶闸管的软并网法。

变速双馈异步风力发电系统的并网方式主要是基于准同期并网控制技术，包括空负荷、独立负荷、孤岛和电动等 4 种并网方法。

变速永磁直驱同步风力发电系统采用永磁同步发电机，故其并网方法采用同步发电机并网方法，包括准同期并网方法和自同期并网方法。

以上风力发电机组的并网方法在书中后续部分（第 2 章 2.3、2.4 和 2.6 节）将做进一步的详细介绍。

1.2.2 风电出力特性与电网安全稳定运行的矛盾

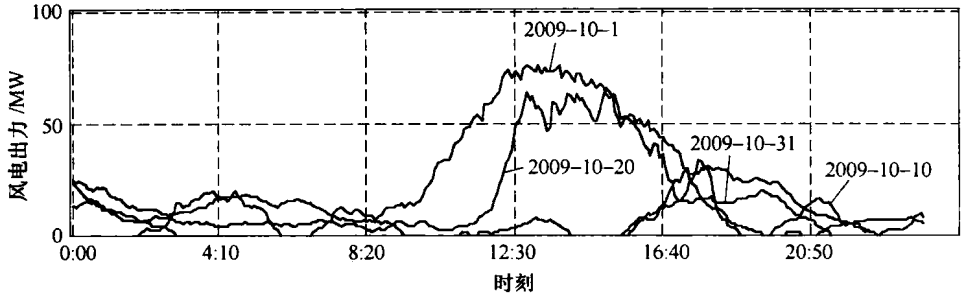
1. 风力发电机组的出力特性

由于自然界的风速是不断变化的，故风力发电机组的出力也随时变化。根据风速的不同，风力发电机组启动不同的运行模式。当风速大于切入风速（如金风 70/1500 型、金风 77/1500 型等风力发电机的切入风速为 3m/s）时，风力发电机组启动并网运行；当风速低于切入风速时，风力发电机组停机，并与电网解列；当风速大于切出风速（如金风 70/1500 型、金风 77/1500 型等风发电机的切出风速为 25m/s）时，为保证风力发电机组的安全，风力发电机也要停机。即使风力发电机组处于并网运行状态，其出力大小也随风速大小的变化而变化。因此风力发电机出力具有较大的随机性：出力无规律；波动性：出力大小变化快；间歇性：出力时断时续等特性。图 1-6a、b 分别为某风电场一日内和一月内的出力曲线，出力曲线清楚地反映了风电出力的时变特性。

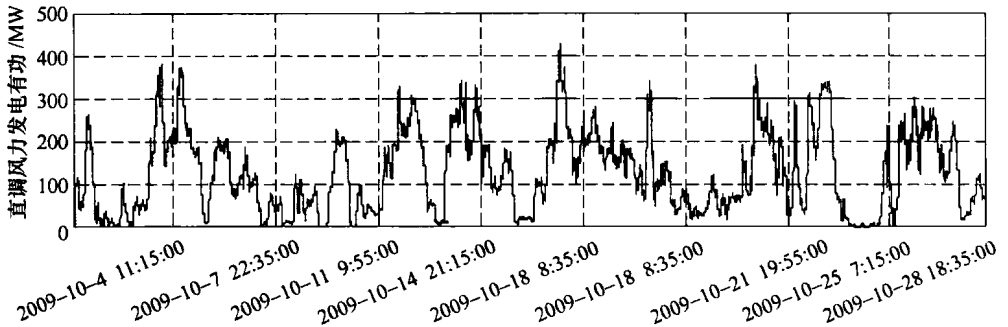
2. 风电并网同电网安全稳定运行的矛盾

正是由于风电场出力的随机性和不稳定性，使得其并网发电遇到很大阻力。现代电力系统的“发”、“输”、“用”的同时性特性要求电源出力可控、可预期和稳定。显然，风电出力特性与现代电力系统对电源出力特性的要求是相矛盾的。大规模风电并网必然会造成现代电力系统安全稳定、电能质量等控制的困难，严重时甚

至会出现大面积的风力发电机组脱网、系统频率和电压失稳等殃及整个电网安全稳定运行的大型事故，给人们生活造成严重干扰，使国家生产蒙受巨大损失。这便是风电出力特性同电网安全稳定运行之间最直接的矛盾。



a) 某风电场日出力曲线



b) 某风电场月出力曲线

图 1-6 某风电场一日内和一月内的出力曲线

大规模风电并网对电力系统电能质量和安全稳定运行控制所形成的主要挑战包括以下几个方面。

(1) 风电并网引起的电网电压波动问题

例如，很多大中型的并网型风力发电系统都采用了异步发电机，异步发电机启动时需要从电网中吸收无功功率，这对电网侧的电压有较大影响，尤其是当风电场并网点位于电气结构相对薄弱的电网末梢时，这种效果就会被放大。这种情况下，风力发电机组并网启动时产生的电压波动是不容忽视的，严重时会导致电网电压下降的加剧，甚至引起电网电压崩溃。不幸的是，受制于风资源分布的限制，很大一部分并网风电场并网点都位于电网电气结构相对薄弱的电网末梢处。

(2) 风电并网引起的电网谐波污染

现代风力发电机组大多是变速恒频类型的机组，需要采用大容量的电力电子器件来实现风力发电机组输出电能的频率、电压和波形满足并网要求。对于风力发电机组来说，发电机本身产生的谐波是可以忽略的，谐波主要是由大容量电力电子

元器件构成的电能转换系统、控制元器件和电容器等产生的。

(3) 并网风电场的低电压穿越问题

低电压穿越 (Low Voltage Ride Through, LVRT) 是指在风电场并网点电压跌落时, 风电场能够保持低电压穿越并网, 甚至向电网提供一定的无功功率, 支持电网恢复, 直到电网恢复正常, 从而“穿越”这个低电压时间 (区域)。对于一个风电大规模并网的电网来说, 电压跌落时风力发电机组脱网, 势必影响到电网的稳定性。现在风电发展较快的国家都已经认识到这个问题, 并出台了风电并网的相关要求。对电网电压短时间内跌落情况下, 做出了风力发电机组脱网的限制。GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》中对 LVRT 的要求: 对于风力发电机组具有在并网点电压跌至 20% 额定电压时能够保证不脱网连续运行 625ms 的能力, 且风电场并网点电压在发生跌落 2s 内能够恢复到标称电压的 90% 时, 风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行。研究表明, 直驱风力发电机组具有相对较好的 LVRT 能力。

(4) 风电对电力系统频率稳定性的影响

由于风力发电有功出力具有随机、间歇和波动等特性, 在风电穿透功率较大的情况下, 不利于人们对电网进行调频控制, 风电功率的波动必然会对电网的频率产生一定的影响。反过来, 系统频率的变化又会对风力发电机组的运行状态带来影响。各国风电接入电力系统的导则都要求风力发电机组能够在一定的频率范围内正常运行, 频率超过一定范围后限制出力运行或延迟一定时间后退出运行, 以维持系统的频率稳定。GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》对此的规定见表 1-2。

表 1-2 风电场在不同电力系统频率范围内的运行规定

电力系统频率范围	要 求
低于 48Hz	根据风电场内风力发电机组允许运行的最低频率而定
48 ~ 49.5Hz	每次频率低于 49.5Hz 时, 要求风电场具有至少运行 30min 的能力
49.5 ~ 50.2Hz	连续运行
高于 50.2Hz	每次频率高于 50.2Hz 时, 要求风电场具有至少运行 5min 的能力, 并执行电力系统调度部门下达的降低出力或高周切机策略, 不允许停机状态的风力发电机组并网

(5) 风电对电力系统继电保护的影响

风电出力时变特性、风电场内部的运行方式和风力发电机组类型的不同对保护的影响也是不同的。比如, 当风速在起动风速附近变化时, 异步风力发电机组允许短时在电动机状态下运行, 风电场与电网之间联络线的功率流向有时是双向的。因此, 风电场继电保护装置的配置和整定应充分考虑到这种运行方式。目前广泛应用的变速恒频风力发电机组是通过整流逆变装置与电网连接的, 电力电子器件的存在

使得电网与风力发电机组之间没有了直接的联系，因此可以减少风电对电网的直接冲击，而且故障后的电压恢复也较快。但故障发生后，变速恒频风力发电机组为保护整流逆变装置而从电网中断开，电网在临近风电场处发生短路故障时风力发电机组不能提供持续的故障电流，容易发生继电保护装置拒动等情况。

(6) 风电的穿透功率水平对电力系统的影响

风电穿透功率水平反映了风电装机容量相对于风电并网电力系统负荷容量的比例的大小。风电穿透功率水平高，则意味着维持电力系统“发”、“输”、“用”同时性的难度就越高，风电对电力系统电能质量和安全稳定运行控制构成的挑战就越大。

由此可见，风电接入电网对系统的稳定性与电能质量的影响是不可忽视的，这些问题处理不当不仅会危害用户的正常用电，而且也严重制约了风能的有效利用，限制了风电的大规模发展，甚至会造成整个电网的瓦解，随着风电并网比例的提高，风电出力特性与电网安全稳定运行之间的矛盾也日益凸显。

此外，风电还会对电力系统规划、电力市场等方面构成挑战。

1.3 并网技术决定风电的发展

1.3.1 风电并网关键技术的发展及面临的主要挑战

为有效应对日益严峻的能源短缺和环境污染等困境，风电等洁净、可再生能源电能大规模并网将成为必然。然而风电出力的时变特性，与电网安全稳定运行对电源输出功率的稳定性要求是相矛盾的，甚至是有害的。要从根本上解决风电并网这一影响风电发展的技术难题，必须深入了解风力发电系统及其并网系统的方方面面。在风能转化技术逐步成熟的过程中，风电并网涉及的关键技术都取得了长足的进步。下面来了解一下风电并网涉及的关键技术。

1. 风力发电系统建模与仿真技术

对风力发电系统进行准确的建模，通过仿真实验把握风力发电系统与电力系统的相互影响，是研究风力发电及其并网的各项关键技术的有效工具。并网风力发电系统仿真建模技术主要包括：根据不同类型风力发电机组的机械、电气物理特性和工作机理，建立各种类型风力发电机组、风电场静态与动态数学模型，进一步在电力系统仿真分析平台（如 DVRTS）中搭建其机电暂态或者电磁暂态仿真模块和典型参数设置，并与实验数据进行对比分析，确定模型的有效性。

含有异步型和双馈型风力发电机组的风电场的建模研究虽已达到一定深度，但对于含有直驱型风力发电机组的风电场模型研究涉足尚浅。同时，对大型风电场动态等效模型的广域时空分布特性研究较少，较难全面把握风力发电机组及风电场动

态行为对大规模风电并网后对电网安全稳定和电能质量的影响。

2. 风电并网电力系统稳定性分析和控制技术

风电并网电力系统稳定性分析和控制技术，对于了解和解决风电并网对电力系统安全稳定运行的影响至关重要。风电并网电力系统稳定性分析和控制技术的主要内容包括：①风电对其并网电力系统的静态、暂态和动态电压、频率和功角稳定性影响的分析和控制技术；②风电并网电力系统的静态、暂态和动态电压、频率和功角稳定性分析和控制技术。

风电并网电力系统稳定性分析由于受实际生产安全的制约，仅限于在大型电力系统软件中进行仿真实验分析。而之前提到风力发电及其并网建模与仿真技术的发展还存在诸多挑战，故实验结果与实际情况的吻合度有待提高。同时，现阶段国内外研发的各种风电并网电力系统稳定性控制技术在稳定电力系统某项指标的同时，也可能带来新的稳定性问题，具有局限性。

3. 风电并网电力系统电能质量评估技术

风电出力的时变特性对电力系统电能质量有很大的影响，是制约风电大规模并网的一个重要约束。正确评估这种影响及其产生原因，有助于采取适当的技术手段和方法来解决风电对电力系统电能质量的负面影响，有利于推动风电大规模并网发电。风电并网电力系统电能质量评估技术主要包括：风电对电力系统电能质量影响机理的研究，风电并网电力系统电能质量的评估指标及其标准的研究和制定，风电并网电力系统电能质量的评估方法、原理和治理措施的研究等。

由于风电并网电能质量评估技术是以现场数据采集或实验室仿真实验为基础的，受制于现有数据采集和分析手段的不足，电能质量评估结果准确度受影响，这将对影响机理研究、评估指标及其标准的研究和制定产生影响。

4. 风电极限穿透功率

风电并网电力系统中风电极限穿透功率水平的研究内容重要包括：风电极限穿透功率的计算原理和方法，制约风电极限穿透功率水平的主要因素和影响机理，提高风电极限穿透功率水平的方法和措施。由于风电场对系统的影响极为复杂且分析计算困难，至今尚无唯一确定的风电极限穿透功率计算方法，如带约束的优化方法，由于约束条件和优化算法，其计算结果的准确性受到影响。

5. 风电功率预测技术

高质量的风电功率预测技术有助于降低风电并网系统备用容量水平，提高风力发电及其并网控制系统的预警时间和动作裕度，提高电力系统风电极限穿透功率水平，确保风能得到最大限度的利用等。因此，风电功率预测技术对风电并网电力系统的规划、建设、运行及调度具有重要意义。风电功率预测技术主要包括：风电功率预测方法、原理及评价标准。

虽然国外已开发出多套风电功率预测（预报）系统，但其存在准确度不高等