

FENGDIANBINGWANG  
JI YUNXING JISHU

# 风电并网 及运行技术

吴 涛 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

FENGDIANBINGWANG  
JI YUNXING JISHU

# 风电并网 及运行技术

吴涛 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

为满足风电并网及运行技术的推广与应用,华北电力科学研究院有限责任公司充分发挥其风电并网的工作经验,仔细分析风电并网及运行技术特点,组织众多专家编写本书。本书紧密结合现场实际、全面系统、实用性强,对提高技术人员对风电并网及运行技术的认知具有重要意义。

本书共分五章,包括风力发电现状与规划、风电并网、风电建模及仿真分析、风电调度运行、风电运行控制技术展望。

本书主要适合直接从事风电并网的技术人员和生产管理人员阅读,也可供相关专业人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

风电并网及运行技术/吴涛主编. —北京:中国电力出版社, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4293 - 4

I. ①风… II. ①吴… III. ①风力发电 - 研究 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 067812 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 244 千字

印数 0001—3000 册 定价 38.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

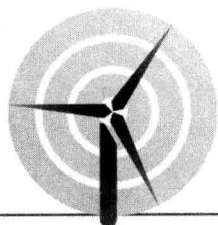
## 编写人员名单

主 编 吴 涛

编写人员（按音序排列）

白 恺	曹天植	崔正湃	郭嘉阳
贺惠民	贾 琳	金海峰	雷为民
李付强	李群炬	李善颖	李 胜
李 烜	梁玉枝	刘海涛	刘汉民
刘 辉	刘 平	刘少波	刘 伟
马继先	孟 超	苗友忠	沈 宇
苏为民	孙 瑜	陶 炜	王 蓓
王 丰	王劲松	徐党国	徐 华
许晓菲	张建峰	赵炜炜	郑 立
周 鑫			

# 序



随着风电的规模化发展，风电并网和消纳问题是目前风电行业最为关注的一个热点。提高电网接纳风电的能力，建设电网友好型的风电厂，保证电力系统的安全运行需从技术、经济和管理等方面提出综合的解决措施。欧洲风电经验已经表明：虽然风电具有波动性，但是，通过对电力系统及其运行方式的改变，在电力系统中是可以接纳高达20%以上比例的风电。

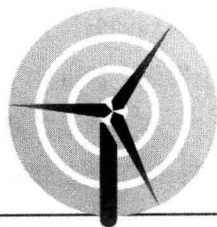
2012年中国风电发电量占总发电量的比例为2%，根据《风电发展“十二五”规划》，到2015年并网运行的风电总装机容量达到1亿千瓦，风电发电量将超过3%。与欧洲国家相比，中国风电在电力系统中占有的比例还很小，但是，风电并网依然是目前一个重要的瓶颈，如何综合解决好风电与电网的和谐发展，建设“风电友好型电网”和“电网友好型风电厂”将直接关系到风能的健康和可持续发展。

本书从“网源协调”的角度，将风电规划、并网、仿真、运行及新技术等内容组成一个有机的整体，结合工程实践，用现场实测和仿真分析相结合的方法研究风电场接入电网后的运行特性。通过研究和分析提出了保证电网系统接入风电后的安全稳定性应采取的措施，特别是对电网继电保护的问题提出了许多建议。

本书作者多年来从事风电运行技术与管理工作，有丰富的实践经验，书中的很多内容是作者在工作实践中的研究成果，有原创性和较强的实用性。对从事风电并网工作的工程技术人员和管理人员以及高等院校的师生来说是一本很好的参考书。

2013年2月10日

# 前 言



目前,我国风力发电正处在快速发展阶段,风力发电相关技术也在不断提高和完善,风力发电的各种参考书籍更是百花齐放,在这琳琅满目的书籍中,大多数是偏重风机理论方面的书籍,从“网源协调”角度研究风电并网运行技术方面的书籍却是寥寥无几。本书围绕“新能源与电网协调发展”的主题,开展风电并网及运行关键技术研究与实践,为广大风电工作者提供技术借鉴,从而提升风电规划和运行人员的技术水平,以确保电网的安全稳定运行。

本书主要特色体现在两个方面:首先,从“网源协调”的角度,将风电规划、并网、仿真、运行及新技术等基本内容串联成一个有机的整体,各部分内容相对独立,也相互联系;其次,密切结合工程实际,基于两次风电场扰动试验数据,采用国内外通用仿真分析软件,通过仿真对比,拟合并修正得到更贴近实际的模型及参数,有利于提高风电并网研究的可信度;同时,在研究风电对电网继电保护影响的基础上,归纳总结提出风电并网继电保护配置原则,然后以某地区为例,分析电网继电保护的配置现状,验证风电并网继电保护配置原则的适应性,指出存在的问题,提出改进措施及建议。

本书包括风力发电现状与规划、风电并网、风电建模及仿真分析、风电调度运行以及风电运行控制技术展望等五章内容。第一章论述风力发电现状、风力发电规划的主要问题。第二章内容包括风电接入电网分析、风电并网继电保护配置、风电机组特性测试及风电场并网检测等。第三章应用国内外通用的风电仿真分析软件,采用仿真与现场试验对比分析的方法,获得比较准确的风电机组模型参数,应用此成果进行大规模风电接入后某电网安全稳定分析,并提出了提高电网稳定的控制措施。第四章讨论风电功率预测、风电调度与优化技术、风电运行特性研究、风电运行异常情况分析等内容。第五章介绍风电机组控制技术,风电场无功补偿技术,风光储联合发电技术,光伏、储能物理数字混合仿真,轻型高压直流输电技术在风电送出中的应用等方面的技术发展。在本书最后的附录中,介绍了目前执行的风电相关文件和标准(国标、电力行业标准、企业标准)等,有需要了解细节的读者可以查阅相关的书籍。

本书部分内容是基于某电网2008年至今科研成果提炼而成,涉及风电并网运行、风电

网继电保护配置以及大规模风电接入后电网安全稳定控制研究等，总结了作者多年实践中遇到的问题及探索，大部分经过了典型算例或工程实践的验证，并在国内外一流学术刊物上发表，因此本书具有较高的独创性和学术水平。

本书由吴涛负责全书的统稿和审核。金海峰负责第一章主要内容的编写与该章的统稿工作；梁玉枝负责第二章主要内容的编写与该章的统稿工作；吴涛、李善颖负责第三章主要内容的编写与该章的统稿工作；金海峰、赵炜炜负责第四章主要内容的编写与该章的统稿工作；李善颖负责第五章主要内容的编写与该章的统稿工作；王劲松负责编写风电机组特性测试相关内容。项目组其他成员在本书的编制过程中贡献了宝贵的经验与时间，在此一并表示感谢。

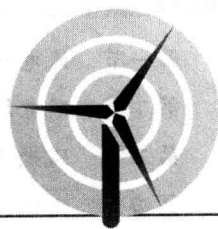
本书主要适合直接从事风电并网的技术人员和生产管理人员阅读，也可供相关专业人员参考使用。

本书在编写过程中，得到了国家电网公司，中国电力科学研究院，国家电网公司华北分部调度通信中心、发展策划部，华北电力科学研究院有限责任公司，张家口供电公司，承德供电公司，国网新源张家口风光储示范电站有限公司，中国电力工程顾问集团华北电力设计院工程有限公司等单位领导专家的热忱帮助，在此一并致谢。

由于时间仓促，书中难免有疏漏或错误之处，敬请读者批评指正。

作者  
2013年2月

# 目 录



序  
前言

## 第一章 风力发电现状与规划

- 第一节 风力发电现状 ..... 1
- 第二节 风力发电规划 ..... 13

## 第二章 风电并网

- 第一节 风电接入电网分析 ..... 19
- 第二节 风电并网继电保护配置 ..... 21
- 第三节 风电机组特性测试及风电场并网检测 ..... 47

## 第三章 风电建模及仿真分析

- 第一节 风电机组的数学模型 ..... 55
- 第二节 风电场扰动试验及风电机组模型参数辨识 ..... 60
- 第三节 大规模风电接入后电网安全稳定分析 ..... 98
- 第四节 风电接入后提高电网电压稳定水平的控制措施 ..... 102

## 第四章 风电调度运行

- 第一节 风电功率预测 ..... 116
- 第二节 风电调度与优化技术 ..... 123
- 第三节 风电运行特性研究 ..... 125
- 第四节 风电运行异常情况分析 ..... 137



## 第五章 风电运行控制技术展望

第一节	风电机组控制技术 .....	144
第二节	风电场无功补偿技术 .....	147
第三节	风光储联合发电技术 .....	149
第四节	光伏、储能物理数字混合仿真 .....	151
第五节	轻型高压直流输电技术在风电送出中的应用 .....	152
附录 目前执行的风电相关文件和标准 .....		154
参考文献 .....		156

## 风力发电现状与规划

随着全球范围内石油、煤炭等化石能源紧缺状况的进一步加剧，以及联合国全球气候变化框架公约和京都议定书等要求，各国政府面临节能减排、温室气体减排的压力增大。目前，主要从两个方面着手解决该问题，一方面采取先进技术手段以降低单位产值的能耗；另一方面促进风能、太阳能等可再生清洁能源的开发利用。

本章将从风力发电现状和风力发电规划两个方面展开论述。

### 第一节 风力发电现状

世界能源消耗量的持续增加，使全球范围内的能源危机形势愈发严峻，缓解能源危机、开发可再生能源、实现能源的可持续发展成为世界各国能源发展战略的重大举措。风能作为可再生能源的重要类别，是地球上最古老、最重要的能源之一，因其可再生、分布广、无污染等特性，风力发电将成为世界可再生能源发展的重要方向。

#### 一、世界风电发展现状

近十年来，风电在世界范围内得到了长足的发展，图 1-1 给出了 1996~2011 年全球风电累计装机容量增长态势。根据全球风能理事会（GWEC）的统计，2011 年全球新增风电装机 40.6GW，至此全球风电装机总量超过 237.6GW，较 2010 年增长了 20.5%。

2011 年超过一半的新增风电装机来自欧美之外的非传统市场，其中贡献最大的要数中国。至此，中国风力发电装机容量超过 60GW，是全球风电装机容量最大的国家。图 1-2 给出了 2011 年全球风电累计装机容量前十名的国家，中国以 62.4GW 的装机总量排在首位，其次是美国和德国，累计装机分别达到 46.9GW 和 29.1GW。

图 1-3 给出了 2011 年全球风电新增装机容量前十名的国家，中国 2011 年新增风电装

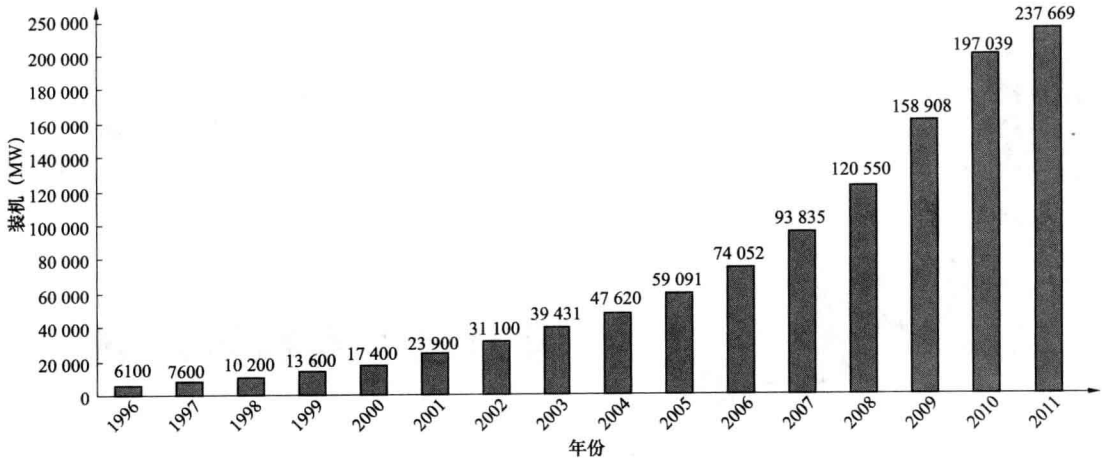
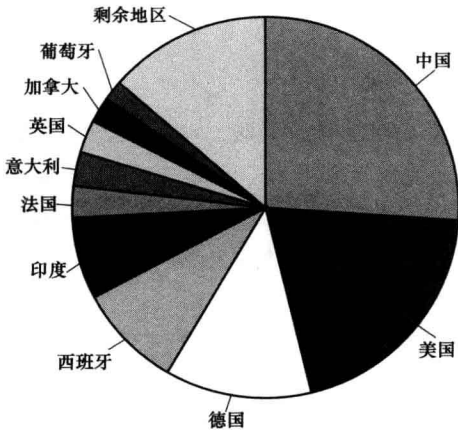


图 1-1 1996~2011 年全球风电累计装机容量增长态势



国家	装机容量 (MW)	占比 (%)
中国	62 364	26.2
美国	46 919	19.7
德国	29 060	12.2
西班牙	21 674	9.1
印度	16 084	6.8
法国	6800	2.9
意大利	6737	2.8
英国	6540	2.7
加拿大	5265	2.2
葡萄牙	4083	1.7
剩余地区	32 143	13.2
前十名总量	205 526	86.5

图 1-2 2011 年全球风电累计装机容量前十名的国家

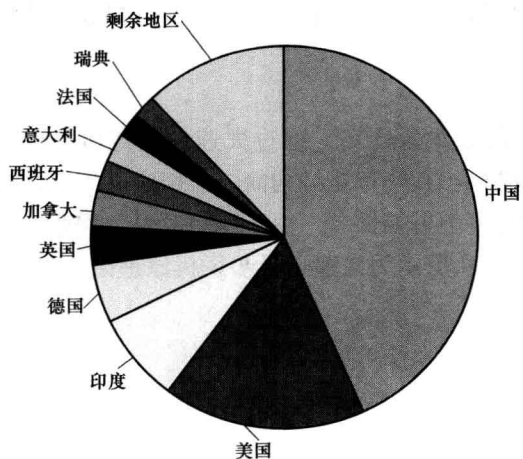
机容量达 17.6GW，几乎占到 2011 年全球新增风机容量的一半，排在首位，其次是美国和印度，新增装机分别为 6.8GW 和 3.0GW。

GWEC 进一步预测，风电未来 5 年在中国仍将保持强劲增长，中国新增风电装机容量到 2015 年将达到 20GW。在经济快速增长和电力需求增加的大背景下，风电在中国的迅猛发展是必然结果。风电产业的迅速崛起在中国应对能源结构多样化、环境保护和节能减排挑战等问题上都将发挥极大作用。因此，GWEC 认为中国仍将是未来 5 年全球风电市场的主力军。

以下将从风机制造水平、开发及并网模式、管理和运行水平三个方面讨论世界范围的风电发展情况。

### (一) 风机制造水平

风力发电设备是风电产业发展的重要支柱。过去几年里，全球风力发电机供应商数量大量增加。2009 年全球十大风机供应商及其市场份额见表 1-1。



国家	装机容量 (MW)	占比 (%)
中国	17 631	43
美国	6810	17
印度	3019	7
德国	2085	5
英国	1293	3.2
加拿大	1267	3.1
西班牙	1050	2.6
意大利	950	2.3
法国	830	2
瑞典	763	1.9
剩余地区	4865	12
前十名总量	35 699	88

图 1-3 2011 年全球风电新增装机容量前十名的国家

表 1-1 2009 年全球十大风机供应商及其市场份额

公 司	容量 (MW)	市场份额 (%)
维斯塔斯 (丹麦)	4766	12.5
GE (美国)	4741	12.4
华锐风电 (中国)	3510	9.2
ENERCON (德国)	3221	8.6
金风 (中国)	2727	7.2
GAMESA (西班牙)	2546	6.7
东方电气 (中国)	2475	6.5
SUSLON (印度)	2421	6.4
西门子风电 (丹麦)	2265	5.9
REPOWER (德国)	1297	3.4
其 他	7033	18.5

目前，欧洲风机制造商总计占据了 89% 的欧洲市场，32% 的美国市场和 37% 的全球市场。全球知名的风机制造商大约有六、七家，分布在丹麦、美国、德国等发达国家。GAMESA 可生产 4MW 风机，德国 ENERCON 可生产 5、6MW 风机。我国当前已经进入和准备进入到风电设备制造领域的厂家大约有七八十家，风电核心技术仍以引进消化国外技术为主。国产兆瓦级风电机组处于规模化生产初期，可批量生产单机容量 2MW 以下的风电机组。

风电机组的种类繁多，从转轴的方向上可以分为水平轴风机和垂直轴风机，从转速控制上可以分为定速风机和变速风机，从功率控制上可以分为定桨距风机和变桨距风机，从风机是否与电网同步可以分为异步风机和同步风机。由上述分类可以组合出许多种风机类型。

目前，国际上风机通常分为以下三个类型：即失速型异步风机、双馈异步风机和直驱同步风机，下面分别介绍它们各自的特点。

### 1. 失速型异步风机

失速型异步风机的特点是叶轮转速恒定，叶片桨距角固定，通过失速控制风机最大出力。一般为三级增速齿轮箱，采用鼠笼型异步发电机。其优点是结构简单、稳定性好、成本低、维护方便。其缺点是风机的有功功率及无功功率的可控性差。由于任何时候均需要从系统吸收无功功率，因此对电网的依赖程度高。图 1-4 所示为失速型异步风机原理图。

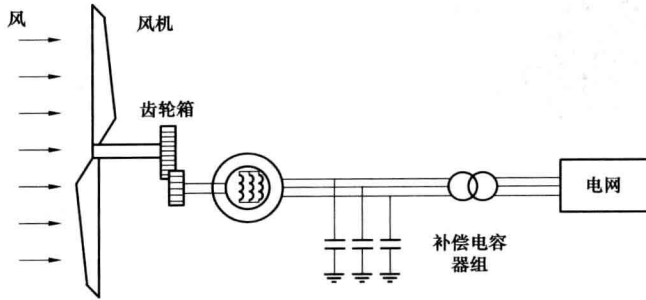


图 1-4 失速型异步风机原理图

### 2. 双馈异步风机

与失速型异步风机相比，双馈异步风机结构上的不同之处是多了个变频器，从而实现变速恒频调节。双馈异步风机的优点是叶轮转速可调，叶片桨距角可控，可以追踪最佳功率曲线，风能利用效率较失速型异步风机高。其变频器容量一般为风机容量的 30%，风机可以进行一定容量的无功功率控制和有功功率控制。其缺点是电气相对复杂，风机成本及维护费用高。图 1-5 所示为双馈异步风机原理图。

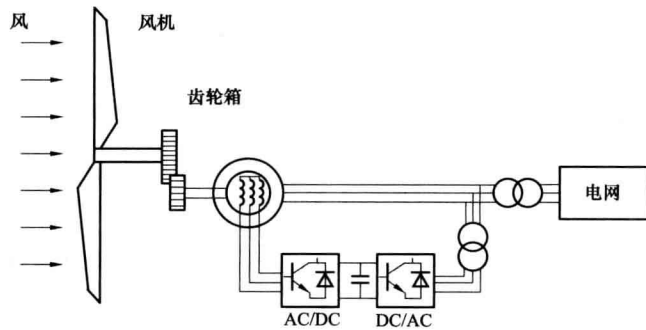


图 1-5 双馈异步风机原理图

图 1-6 给出了双馈异步风机和失速型异步风机的功率输出随风速的变化曲线，可以看出，双馈异步风机的风能利用效率明显高于失速型异步风机。

### 3. 直驱同步风机

直驱同步风机取消了齿轮箱，运行的故障率大大降低，风能利用率高。直接驱动采用多极对的永磁同步发电机，实现全功率范围柔性控制，其可控能力强，但风机成本高。图 1-7

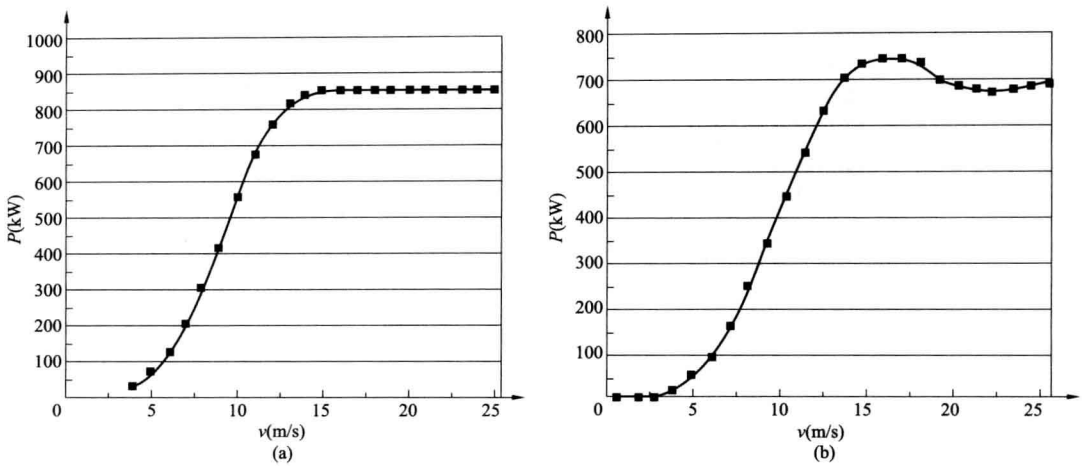


图 1-6 功率输出随风速的变化曲线

(a) 850kW 双馈风机功率曲线；(b) 750kW 失速异步风机功率曲线

所示为直驱同步风机原理图。

国际上的风机制造主要侧重于双馈风机和直驱风机两大类型，仍然有部分失速异步风机在运行中，但需要根据电网公司的相关要求和技术改造。风机的技术性能主要体现在低电压穿越能力、有功功率调整、无功功率调整、运行电压、运行频率等几个方面。

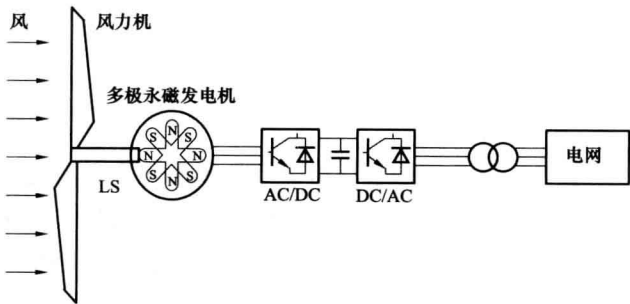


图 1-7 直驱同步风机原理图

## (二) 开发及并网模式

风电接入电网主要有分散接

人和集中接入两种方式。分散接入主要用于风电开发规模小、以就地消纳为主的情况，风电接入电压等级低，对系统运行影响较小。集中接入主要用于风电开发规模大、以异地消纳为主的情况，风电接入电压等级高，远距离输送，对系统运行影响较大。图 1-8 和图 1-9 是两种并网方式的示意图。

由于风能资源分布、风机技术水平、政策导向和负荷需求的差异，世界各国风电发展呈现出多样性特点。世界范围内，欧洲的风电发展处于世界的前端，风机的单机容量逐渐加大，为了更好地利用风能，风机也进行了“以大代小”的措施。另外，除规划中的海上风电外，单个风电场容量均比较小，采用分散式接入配电网系统，分散开发，就地消纳。我国风资源大多远离负荷中心，因此多采用集中接入的方式。

由于海上风力资源条件优于陆地，陆地适于安装风电机组的场址有限，以及在陆地安装风电机组对景观造成影响，产生的噪声可能影响周围的居民，将风电场从陆地向近海发展在欧洲已经成为一种新的趋势。目前近海风电场的开发主要在欧洲的丹麦、英国、荷兰、瑞

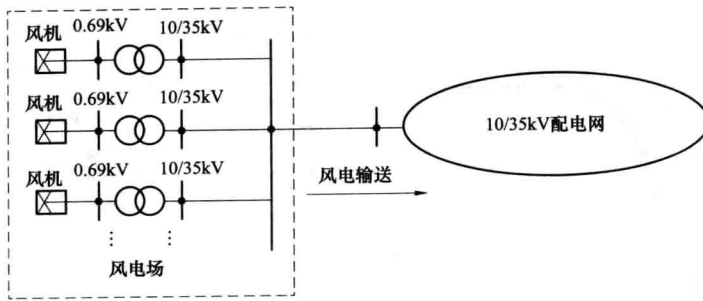


图 1-8 分散接入方式示意图

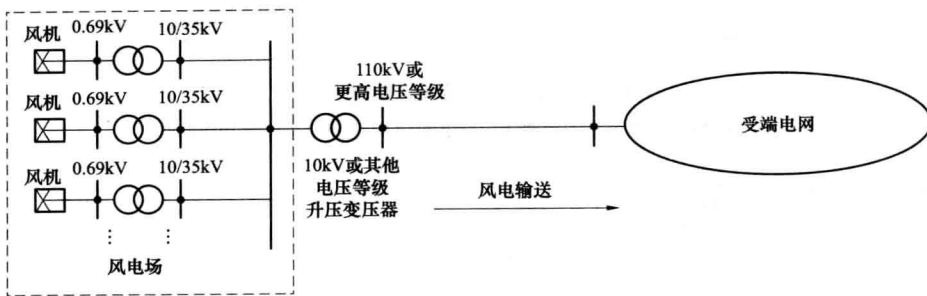


图 1-9 集中接入方式示意图

典、爱尔兰、德国等国家。2010 年欧洲新增海上风电并网容量达 883MW（占欧盟新增风电装机的 9.5%），同比增长 51.72%；累计安装海上风机 1136 台，合计并网容量为 2.96GW，同比增长 24.43%。这些海上风电场 60% 都在浅海区，近海风电场市场广阔，成为欧洲发展风电产业的新动力。

从海上风电累计市场份额看，英国保持领先地位，丹麦、德国和比利时的海上风电在 2010 年均大幅增长。丹麦 BTM 咨询公司预测：到 2015 年，全球海上风电场累计装机容量将达到 18~24GW 之间。

### （三）管理和运行水平

近 20 年来，风电技术在欧洲逐步得到发展和完善，欧洲的德国、丹麦、西班牙等国的风电技术处于世界的前端，这些国家的风电开发和运营取得了丰富的经验，为世界其他国家的风电发展提供了宝贵的参考。

风电渗透率是衡量一个国家风电发展水平的重要指标，它是指风电总发电容量占系统所在地区峰荷的比例或风电在年度电力消费量中所占的比例。欧洲国家大多数采用后者，据统计，2008 年整个欧洲的风电渗透率约为 3%。世界风电发展较快的国家的风电渗透率如表 1-2 所示。

表 1-2 2008 年全球风电装机容量前三名的国家

国家	风电总装机容量 (MW)	风电装机容量占世界总装机容量 (%)	风电渗透率
德国	22 247	24	10%

续表

国家	风电总装机容量 (MW)	风电装机容量占世界总装机容量 (%)	风电渗透率
美国	16 818	18	低于 5%
西班牙	15 145	16	7% 左右

风电渗透率实质上是不同电网结构、不同技术水平及不同外部环境下的产物，随着技术的发展和电网的坚强，风电渗透率可逐步提高。总的来说，风电渗透率受制于以下因素。

### 1. 电网结构

电网的网架结构越强，风电场接入的并网点越远离电网的末梢，风电渗透率就越大，反之则越小。

欧美国电网联系紧密，功率交换能力强，为风电跨区、跨国消纳提供了坚实的基础，欧洲输电联盟（UCTU）是较大同步电网，国家间电能交换超过总用电量的 10%。在我国区域电网之间联系较弱，功率交换能力不强。

### 2. 电源特性

风电的高度间歇性决定了系统中必须有一定比例的可快速调节的其他能源形式与之相配合，才能发挥其经济效益。一般情况下，电网中的水电、燃气机组由于其启动快速，对较高的风电渗透率有益。反之，系统中火电机组尤其冬季供热机组比例越高则限制了风电渗透率。

欧美国在发展风电的同时也大力发展燃油、燃气等调节能力较快的机组。如西班牙通过调整电源结构，改进电网负荷平衡能力，如吸纳更多的气电和水电。我国以火电为主，系统调峰调频能力有限。

### 3. 风机及无功补偿装置的技术水平

欧美国引领着双馈和直驱风机等先进机型的研究方向，控制着风机制造的核心技术，许多成熟产品已经进入商业化运营阶段，也形成了较为全面的风机行业标准，对风电机组的数学模型的测试和验证工作已经进入成熟实施阶段。

由于风电场的电压安全是风电接入系统的最主要的问题，系统的无功/电压特性对风电场接入具有重要意义。在国外，新型的无功补偿装置 SVC 以及调相机等性能良好的无功电源在系统中均占有一定的比例。

国外新装风机都具备有功和无功功率的调节能力，同时对机组的低电压穿越能力也有明确的规定。如德国 2003 年出台了的一套风电标准，2005 年对此进行了修正，其中对机组的低电压穿越能力提出了明确的要求，并要求风机脱网后尽快并网。

### 4. 风电相关技术的发展（如风电出力预测、储能技术）

《加州独立系统运营商可再生能源并网报告》中写到，如果不对可再生能源发电做出预测，他们取代化石燃料的价值将大大降低。国外的气象研究，尤其是微观气象资料（如 100m 内的气象分区预测）的积累和预测已经走过了几十年的历程，丹麦、西班牙等国的风电场的出力预测达到了世界领先水平，如西班牙已经能够达到提前 48h 平均误差不超过 20%，提前 24h 平均误差不超过 10%。

另外，储能技术的发展和运用是解决风电出力间歇性与波动性的重要手段之一，美国超



导公司的超导储能装置已经有了在风电场成功运行的经验。

### 5. 配套的相关政策及补贴

德国等风电发展较快的国家通过政府补贴、电价补贴、减免税收等电价优惠政策推动风电发展。德国要求火电要配合风电运行情况减出力运行，如 E. ON/HANSE 地区 90% 的风电机组均有火电机组作为备用机组。

风电机组的检测和认证是保证风机技术达标的重要环节，欧洲一些国家已经形成了比较成熟的检测认证流程。图 1-10 是德国的认证流程示意图。

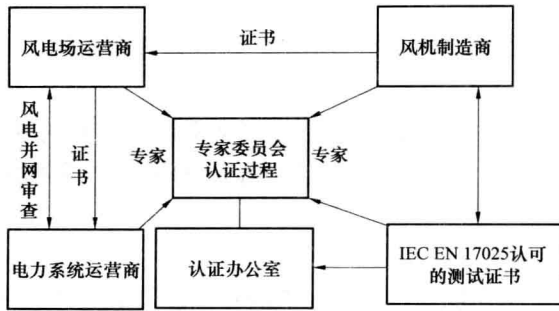


图 1-10 德国的认证流程示意图

德国风电机组的检测主要包括下面几项内容：① 功率特性测试，主要测试风机的功率控制范围；② 噪声测试；③ 载荷测试；④ 电能质量测试，包括谐波、闪变、三相不平衡、电压偏差等指标；⑤ 低电压穿越能力测试；⑥ 有功/无功控制能力测试；⑦ 频率/电压适应性测试，主要测试频率和电压的运行范围；⑧ 抗干扰能力测试。

我国风电机组的检测和认证工作处于起步阶段。2011 年 11 月，国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室落户北京，主要围绕我国风能太阳能技术领域的重大需求，根据我国的环境条件，着力完善风能太阳能标准和检测认证体系，加强相关标准研究、产品检测试验关键技术和认证技术研究，重点建设风电仿真中心、风电机组和太阳能测试中心和风电、光伏发电远程监测中心等。

## 二、我国风电发展现状

我国风电规模的快速增长始于“十一五”初，截至 2011 年底，我国风电累计装机容量达到 62.36GW，年均增速 39.4%。图 1-11 是 2001~2011 年我国风电累计装机情况。

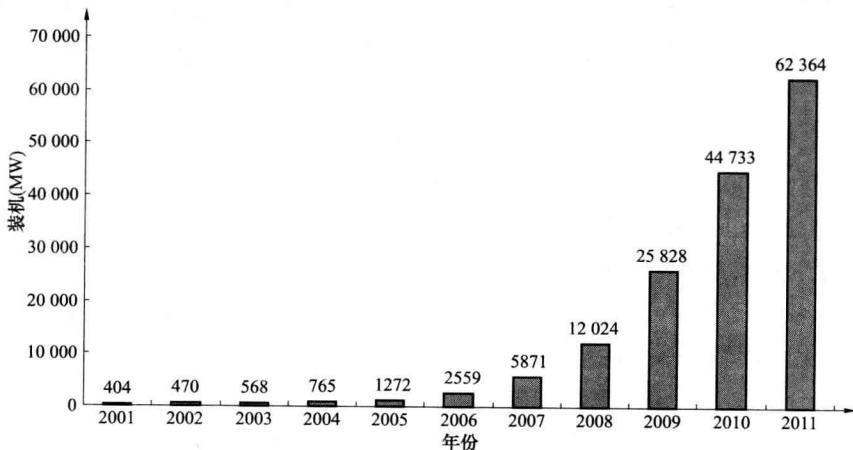


图 1-11 2001~2011 年我国风电累计装机情况