

文章编号: 2095-0411 (2011) 03-0074-05

# 分布式风力发电供电系统的研究进展\*

陈少杰<sup>1,2</sup>, 钱苏翔<sup>1,2</sup>, 熊远生<sup>2</sup>

(1. 常州大学 机械与能源工程学院, 江苏 常州 213016; 2. 嘉兴学院 机电工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

**摘要:** 分布式风力发电因投资省、发电方式灵活、环境兼容好等特点, 日益普遍地与大电网联合运行, 给现代电力发电系统运行与控制带来巨大的变化, 因此, 研究分布式风力发电具有重要的理论意义和重大的应用价值。概述了分布式发电的意义及国内外的现状和应用前景, 简要介绍了分布式风力发电系统的关键性问题, 最后对分布式风力发电的未来研究方向和需要进一步研究的问题作了展望。

**关键词:** 分布式发电; 风力机; 并网; 进展

**中图分类号:** TM614 **文献标识码:** A

## Research Progress of Distributed Wind Power Generation Systems

CHEN Shao-jie<sup>1,2</sup>, QIAN Su-xiang<sup>1,2</sup>, XIONG Yuan-sheng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China;  
2. School of Electromechanical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China)

**Abstract:** The distributed generation (DG) possesses the following advantages: saving investment, flexibility and compatibility. The joint operation of DG with power grid brings tremendous variation in control and operation for modern power system. The current situations of distributed generation at home and overseas and the significance of distributed generation are reviewed. The key problems of distributed generation system are briefly introduces. The development trend of DG research and some future problems are discussed.

**key words:** distributed generation (DG); wind turbine; grid interconnection; progress

为了应对电力能源挑战, 西方发达国家的电力供应已从单一集中式供电(大机组、大电厂、大电网)转向采用集中式供电与中小型分布式供电方式的合理结合, 这种被全球能源与电力专家公认能节省投资、降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性的主要方式, 现已成为电力工业的发展方向<sup>[1]</sup>。

### 1 分布式风力发电的意义

我国人口众多, 自身资源有限, 按照传统的以

煤为主的集中式的能源利用方式将难以满足我国未来的能源需求, 而依靠能源进口不仅存在着能源安全的严重制约, 也将面临一系列新的问题和矛盾; 同时, 随着我国燃料结构的变化, 高峰期电力负荷越来越大。因此, 我们必须立足于现有的可再生能

\* 收稿日期: 2011-03-07

基金项目: 浙江省教育厅重大科技攻关项目 (ZD2009005); 嘉兴市科技计划项目 (2008AY2024)

作者简介: 陈少杰 (1983-), 男, 安徽六安人, 硕士; 通讯联系人: 钱苏翔。

源等资源, 全力提高资源利用效率, 扩大资源的综合利用范围。可再生能源的高效利用无疑是解决问题的关键, 同时, 它也是解决我国环境污染和保障我国电力安全的重要途径之一。由国务院制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中, 能源被放在了重点发展领域的首位, 明确提出要大力开展“可再生能源低成本规模化开发利用”以及“间歇式电源并网及输配技术”, 特别是其中第4和第5个优先主题都考虑了分布式发电供能技术的开发利用问题<sup>[2]</sup>。分布式发电(Distributed Generation, 简称DG)一般指发电功率在几kW至50mW的中小型模块化、分散式、布置在用户附近为用户供电的发电方式, 它通过将各种不同的能源形式转换为电能加以融合, 各种能源转换设施被看作是分布式电源, 相互连接形成“微网”(Microgrid)<sup>[3-4]</sup>, 可广泛使用于办公楼、小区、工厂、电力供应不足的场所、重要民用设施与国防工程等。分布式风力发电系统的构成如图1所示。

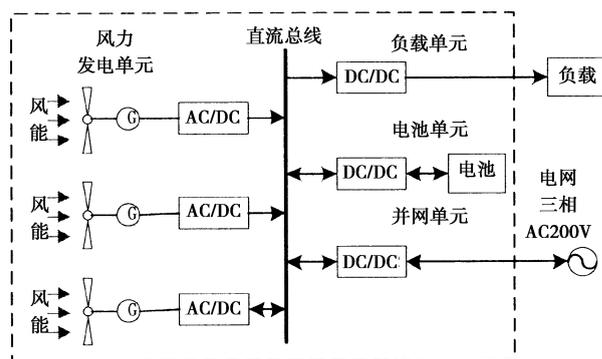


图1 分布式风力发电系统的构成

Fig. 1 Distributed wind power generation systems

微网可以独立运行作为负荷供电, 也可以与常规的配电系统并网运行。并网运行有助于更好地满足用户对供电可靠性、电能质量等的要求, 可以实现负荷就近供电, 降低系统运行损耗, 有助于保证分布式能源的运行经济性; 而分布式电源也可以独立运行, 从而有效缓解电力系统调峰、备用等问题, 有助于防止大面积停电事故的发生, 有效地提高电力系统的抗灾能力。总之, 将分布式发电供能系统以微网的形式接入到大电网并网运行, 并与大电网相互支撑, 是发挥分布式发电供能系统效能的最有效方式。随着分布式发电与供能技术的发展, 风能与太阳能等可再生能源作为分布式电源并网发电是必然趋势。但同时, 分布式电源并网将与电力系统产生相互影响, 分布式电源的并网运行必须以不降

低整个系统的可靠性、不会给其他电力用户带来电能质量问题、不会影响到互联电网运行的经济性为前提。只有当分布式电源保证质量、合理配置并与大电网良好配合的情况下, 才能真正体现分布式供能与大电网互为补充的优点<sup>[4-5]</sup>。因此, 为了充分发挥分布式发电的作用, 充分利用可再生能源, 避免其存在的不利影响, 研究可再生能源的发电机理、提高发电装备设计制造水平与性能、研究分布式发电系统与微网运行控制技术、开发关键电力电子设备, 具有重要的现实意义。

在多种可再生能源中, 风电是目前发展最快、技术最为成熟、成本最低、最具有大规模开发利用和商业化条件的产业<sup>[6]</sup>。从风力发电机组容量上分, 风力发电机组主要分为大型风力发电机组与中小型风力发电机组; 从风能利用方式上分, 主要分为并网型和离网型风力发电机组。目前, 新装的大型风力发电机组基本上在兆瓦级以上, 而中小型风力发电机组主要以百瓦级(主要用于风光互补路灯与中小型设备离网供电)与千瓦级为主, 少数达10—50kW。大型风力发电机组主要用于年平均风速为6m/s或以上的高风速区(如海上、沿海、新疆与内蒙古)的风电场, 采用集中式发电。对于占全国国土面积76%的低风速区(年平均风速为3—5m/s), 由于风速小且不稳定, 因此达不到风电场选址的要求, 只能推广应用中小型风力发电机组<sup>[7]</sup>; 这些中小型风力发电机组投资小, 具有更大的灵活性, 可广泛用于城镇户院、中小型社区、公园、别墅庭院、农村住宅、旷野、山区、度假村、海岛、农牧区、渔业养殖场、边防哨所、部队、轮船、气象台、电视差转台与电信移动通讯基站等, 采用离网或并网运行, 市场前景广阔<sup>[8-10]</sup>。

另一方面, 分布式发电系统集成涉及到并网逆变器关键电力电子设备的开发, 这些都是风能与太阳能等“间歇性”可再生能源分布式发电的通用设备, 其中, 并网逆变器效率的提高是提升间歇性可再生能源利用率的关键手段, 相关技术及设备的产业化也有望成为我国新能源产业的重要组成部分, 从而促进国省包括光伏利用在内的新能源产业的发展。综上所述, 分布式风力发电供能系统集成技术研究是充分利用风能资源的必然要求, 对推动新能源产业的发展与能源利用结构的调整具有重要意义。

## 2 国内外研究概况

## 2.1 国外研究状况

近几年来, 分布式风力发电技术在美国、日本、欧洲发展较快, 取得了大量成果并投入到应用中, 分布式发电已在电力市场中占相当比重, 为此而发展起来的零售电力市场框架也趋向成熟。在能源短缺 and 环境保护双重压力下, 欧洲传统的电力系统和电力市场正在经历着巨大的转变, 促使欧盟在第五、第六和第七框架计划“能源、环境与可持续发展”主题下支持了一系列与可再生能源和分布式发电接入技术有关的研究项目<sup>[11]</sup>。仅在 2002—2006 这 4 年中就有超过一百家机构 (包括电力公司, 设备制造商, 高校和研究机构等) 参与了这些项目, 其总预算达 3400 万欧元。这些研究项目之间既各有侧重又相互联系, 内容涵盖了从理论研究、技术应用到市场开发的各个层面, 构成了一个相对完整的体系结构。以意大利为例, 目前分布式风力发电每年发电总量为 100GW·h 以上<sup>[12]</sup>。在美国, 2001 年就颁布“关于分布式电源与电力系统互联的标准草案” (IEEE P1547), 并通过了有关法令让部分分布式发电上网运行, 据美国分布式电力联盟 (DPCA) 的研究估计, 未来 20 年, DG 将获未来新增发电容量的 20% (35GW), 而据美国电力科学研究院 (EPRI) 估计, 2010 年 DG 的市场可达 2.5—5.0GW/a。在日本, 以冷热电联产 (主要使用燃气轮机与内燃机) 为代表的分布式发电技术也获得广泛的应用, 分布式风力发电装机容量已占发电装机总量的 13.4%。

## 2.2 国内研究状况

我国分布式发电系统应用方面, 虽然经过一些开发, 例如上海、广州、北京楼宇三联供系统采用柴油燃气轮机作为分布式电源, 在北京与深圳等地建立了并网式光伏电站, 但整体利用水平依然很低, 在发展速度和水平上还远低于大多数发达国家。因此, 在《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年)》中, 第 4 和第 5 个优先主题都考虑了分布式发电技术的开发利用问题。随着电力体制改革的深化, 分布式发电技术和电力电子技术的发展, 在下一个 10 年左右的时间里, 分布式发电在传统电力系统中将会有实质性的增长。风力发电机的分布式发电研究与应用方面, 我国与欧美也存在很大差距。在欧美, 分布式发电是中小型风力发电系统的主要应用领域; 而在国内,

风力发电系统则主要用于海岛、牧场等无电力输送环境中的离网发电。

## 3 分布式风力发电系统的关键问题

### 3.1 分布式风力发电机研制方面

考虑到分布式发电系统的安全性、可靠性、经济性与适用广泛性的要求, 需要风力发电机有较宽的工作风速范围 (3—25m/s), 在不稳定的自然风中, 能可靠运行并有良好的电能品质, 能捕获最大风能以提高发电效率、降低单位功率发电成本。以上技术在大型风力发电机中得到了较好的解决, 例如, 为捕获最大风能, 大型风力发电机目前主要通过两个阶段来实现<sup>[13]</sup>, 如图 2 所示, 在额定风速 (14m/s) 以下时, 通过调节发电机反力矩使转速跟随风速变化, 在高于额定风速时, 通过变桨距系统使系统输出功率稳定。所谓变桨距指安装在轮毂上的叶片通过控制改变其桨距角的大小, 定桨距是指桨叶与轮毂的连接是固定的, 桨距角固定不变, 即当风速变化时, 桨叶的迎风角度不能随之变化。在中小型风力机方面, 目前市场上中小型风力机通常采用定桨距, 其功率输出曲线如图 3 所示, 即当风速大于额定风速 (11m/s) 时, 其输出功率下降, 所捕获风能减少, 降低了发电效率, 提高了发电成本。

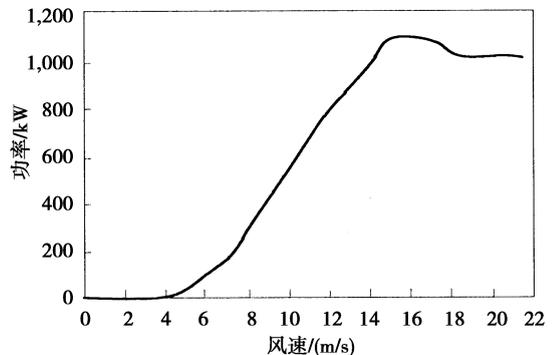


图 2 1 MW 变桨距变速风力机功率曲线

Fig. 2 1MW variable-speed variable-pitch wind generator power curve

总之, 中小型定桨距风力发电机不符合分布式并网发电的要求, 但大型风力发电机的相关技术不能简单移植到中小型风力发电机中, 因为大型风力发电机与中小型风力发电机在结构与成本上存在着很大差别, 二者间变桨技术的简单移植没有可行性。因此, 考虑到分布式并网发电的要求, 需要针对中小型风力发电机的特点, 兼顾成本与可靠性,

进行专门设计。在这方面, 南京航空航天大学做了一些基础性的研究, 内蒙古工业大学与水利部牧区水利科学研究所研究了以作用在风轮扫略面上的风压为控制信号的全程变桨距风能转换机理, 并设计了风力机中央主弹簧离心变桨装置<sup>[14,15]</sup>, 沈阳工业大学也对中小型风力机风轮转速检测与变桨距调速控制进行了研究<sup>[16]</sup>, 但相关装置与方法在风力机的对风性能、限速稳定性与刹车安全性等方面还缺乏系统设计, 尤其针对更大功率(5kW以上)的风力机变桨系统方面的研究还不多见。

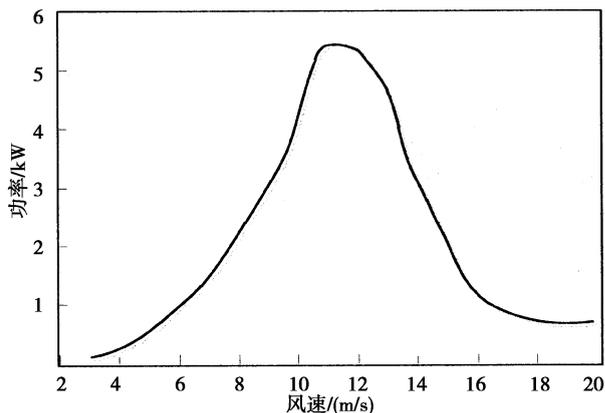


图3 5 kW 定桨距风力机功率曲线

Fig. 3 5 kW fixed-pitch wind generator power curve

### 3.2 分布式发电理论与技术研究方面

许多学者针对间歇性分布式电源对电力系统的影响、分布式发电并网运行控制与保护等方面做了大量研究, 并取得了许多共识。在引入 DG 后的电力系统负荷预测与规划问题方面, 文献 [17-19] 探讨了包含 DG 的配电网规划, 侧重于研究 DG 的接入位置和容量对电力系统的影响, 但在 DG 对系统可靠性影响方面缺乏深入的研究。实际上, 在引入 DG 后, DG 对电力系统的可靠性和稳定性影响是多方面的, 既有积极的一面, 也有消极的一面。DG 并网后将会对电网提供给其他用户的电能质量产生潜在的影响, 这些电能质量问题包括电压调整、电压闪变、电压不平衡、谐波畸变和直流注入等几方面<sup>[20]</sup>。文献 [21] 介绍了 DG 与电网互联的 3 种常见接口形式, 对异步发电机、无励磁调节能力的同步发电机和燃料电池等几种典型 DG 的运行方式和控制特性进行了研究, 建立了各自在潮流计算中所需的数学模型, 并在此基础上提出了基于灵敏度补偿的配电网潮流计算方法, 该方法适合包含各种不同 DG 形式的多电源配电系统。文献 [22] 分析和研究了风电场并网运行时, 风电场风

速扰动、风电场容量、电网  $R/X$  (联络线阻抗  $Z = R + jX$ ) 的比值特性以及并网点短路容量等因素对电能质量的影响。文献 [23] 介绍了 DG 接入系统中改善电能质量问题的一种新的算法, 利用现有 DG 系统的非线性来控制有功和无功并减轻不平衡和谐波, 使系统仿效 APF 或 DSTATCOM 的功能, 提出了灵活式分布式发电系统 FDG (Flexible Distributed Generation), 该系统包括一个电压调整的模糊逻辑控制器 (FLC) 和基于 ADALINE 的处理单元来解决不平衡、谐波和无功补偿。文献 [24] 描述了统一电能质量调节器和 DG 系统的结合运行, 该系统包括一个串联逆变器 (补偿源端的电压干扰)、一个并联逆变器和通过整流器与 DC 线连接的分布式发电机, 可补偿在并行运行和独立运行情况下电压骤降和升高、电压中断、谐波和无功功率。文献 [25] 考虑了风力发电机容量与配电网短路容量 (短路电流有效值与短路处的正常工作电压的乘积) 的比值对电压稳定性的影响, 该比值较高的电网在有利的运行条件下能成功地调节电压, 而电压稳定特性可能又是限制该比值继续增加的重要因素。文献 [26] 介绍了风电场接入一个农场电网的实例, 指出低短路容量和高  $R/X$  比值将使得系统稳态电压发生较大的变化。目前, 针对基于中小型风力发电机的分布式发电系统方面, 对 DG 本身、并网运行与供能系统的理论研究还不多见, 也缺少稳态、暂态、稳定性分析的完整模型与快速仿真技术研究, 这在一定程度上影响了分布式风力发电系统的大规模应用。

## 4 发展趋势展望

分布式发电技术是集中供电模式之外的重要补充, 将成为我国未来能源领域的一个重要发展方向。今后涉及到的主要研究方向有:

(1) 在现有中小型风力发电机基础上进行改进设计, 研制面向分布式发电的高效、可靠、低成本、大功率 (5-50kW) 的并网型变桨距中小型风力发电机, 从分布式电源本身入手提高电能质量。

(2) 从间歇式能源最大功率点跟踪技术、微型电网拓扑结构、孤岛检测与保护方法、微型电网能量管理四个角度入手, 研发相适应的高效率、模块化、高可靠性、能量管理方便的并网逆变器。并且, 为提高分布式发电系统运行可靠性, 防孤岛危害发生, 并充分利用风能资源, 研究开发集成并网

/独立双模式切换控制的并网逆变器,通过间接电流控制等技术,控制并网运行时的输出电流,使逆变器的输出电压在双模式下均处于可控状态,在大电网出现故障时,可以获得切换过程的平滑过渡,实现无缝切换。

(3) 针对 DG 的运行具有很强独立性和随机性的特点,研究建立对 DG 实现全面监测、控制和调度的新型 SCADA 体系,研究含有分布式能源的新型电力系统控制中心。

(4) 研究建立新型电力公司与用户的关系体系,妥善研究制定与 DG 有关的法律、法规和行业规范,研究分布式发电对电力市场的影响。

## 5 结 论

随着电力电子技术的发展,分布式风力发电系统的性能将逐步提高,成本逐步降低,其在电能生产中所占的比重有望持续增大。我国在应用方面,与欧美日等发达国家差距巨大。目前,国内已经制定了相关的法规和政策,鼓励并引导相关产业的发展。随着电力体制改革的深化,相关产业在未来 10 年内将会有实质性的增长。目前的关键在于结合我国电网的实际,深入而系统地研究相关理论与技术问题,并结合示范工程建设推动相关技术的应用。

## 参考文献:

- [1] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响[J].电力系统自动化,2001,25(12):53-56.
- [2] 中华人民共和国国务院.国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)[R].北京:中国法制出版社,2006.
- [3] Khatam W, Salama M M A. Distributed generation technologies, definitions and benefits [J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71 (2): 119-128.
- [4] 盛鲲,孔力,齐智平,等.新型电网—微电网(Microgrid)研究综述[J].继电器,2007,35(12):75-80.
- [5] 王成山,李鹏.分布式发电系统仿真理论与方法[J].电力科学与技术学报,2008,23(1):8-12.
- [6] 严陆光,陈俊武.中国能源可持续发展若干重大问题研究[M].北京:科学出版社,2007.
- [7] 顾为东.中国风电产业发展新战略与风电非并网理论[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [8] Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg. Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1 323-1 332.
- [9] 中国能源研究会.促进中国农村地区分散性可再生能源发电系统发展的政策研究[R].北京:科学技术出版社,2002.
- [10] 李德孚.中小型风力发电行业现状与发展趋势[J].农业工程技术,2007,15(1):47-50.
- [11] European Commission. Towards smart power networks—lessons learned from european research FP5 projects [R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005.
- [12] B Delfino. Modeling of the integration of distributed generation into the electrical system [J]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 (1): 170-175.
- [13] 叶杭冶.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [14] 吴永忠,贾斌,刘伟.全程变桨距风能转换装置的研究[J].可再生能源,2005,11(6):24-27.
- [15] 程荣香,张瑞强.风力机中央主弹簧离心变桨装置[J].可再生能源,2005,11(6):59-60.
- [16] 瞿辉,潘建,田军.FD12-30KW直驱永磁离网/并网型风力发电机组[J].可再生能源,2007,25(5):93-95.
- [17] Celli G, PILO F. Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks [C] //In Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Meeting. Sydney: Power Engineering, 2001: 81-86.
- [18] 王志群,朱守真,周双喜,等.分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J].电力系统及其自动化学报,2004,28(16):56-60.
- [19] Koichi Nara, Yasuhiro Hayashi, Kazushige Ikeda, et al. Application of tabu search to optimal placement of distributed generators [J]. IEEE Trons on Power Delievery, 2001, 16(2): 918-921.
- [20] 丁明,王敏.分布式发电技术[J].电力自动化备,2004,24(7):31:36.
- [21] 陈海众,陈金富,段献忠.含分布式电源的配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2006,30(1):35.
- [22] 吴学光.风电场并网的数学建模及遗传算法模型优化研究[D].武汉:武汉大学,2000.
- [23] Mostafa I, Marei, Ehab F, et al. A novel control algorithm for the DG interface to mitigate power quality problems [J]. IEEE Transactions on Power De II Very, 2004, 19 (3): 1 384-1 392.
- [24] B Han, B Bae, H Kim, et al. Cornbined operation of unified power-quality conditioner with distributed generation [J]. IEEE Transactions OFt Power Delivery, 2006, 21 (1): 330-338.
- [25] Jenkins N, Strbac G, Jenkins. Impact of embedded generation on distribution system voltage stability [J]. IEEE Colloquium on Voltage CoHapse, 1997, 11 (3): 9/1-9/4.
- [26] Craig L M, Jenkins N. Performance of a wind turbine connected to a weak rural network [J]. Wind Engineering, 1995, 19 (3): 27-30.