

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.02.012

# 风力发电技术与系统仿真

张晓山<sup>1,2</sup>, 肖强晖<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;  
2. 湖南有色金属职业技术学院 机电系, 湖南 株洲 412006)

**摘要:** 阐述了国内外风力发电的发展现状, 及风电机组大型化、变桨变速功率调节、直驱永磁发电机、海上风电等风力发电技术的研究现状, 并以双馈风力发电机系统为研究对象, 利用 MATLAB/Simulink, 建立了双馈风力发电系统仿真模型。仿真结果显示, 风力发电系统的电压、电流及有功功率输出波形完全符合电力设计规范要求。

**关键词:** 风力发电; 风电技术; 系统仿真

**中图分类号:** TM614

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2013)02-0054-05

## The Wind Power Generation Technology and the System Simulation

Zhang Xiaoshan<sup>1,2</sup>, Xiao Qianghui<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Nonferrous Metals Vocational and Technical College, Zhuzhou Hunan 412006, China)

**Abstract:** Elaborates the development situation of wind power generation at home and abroad, and summarizes the technology research from aspects of large scale wind turbine, adjustable speed and power regulation, direct-drive permanent magnet generator and offshore wind power, etc. Taking the double-fed wind power generation system as the research object, establishes the simulation model by MATLAB/Simulink. The simulation result shows that the voltage, current and active power output waveforms of the wind power generation system fully meet the requirements of power design specification.

**Keywords:** wind power generation; wind power technique; system simulation

人类生存和发展所需要的常规能源日渐枯竭, 高碳电力使环境日益恶化, 这是当前全球面临的严峻问题。因此, 世界各国高度重视可再生能源的开发利用, 风能、太阳能、潮汐能、地热能等的开发利用成为研究的重点。风能的能量大, 分布广, 无污染, 易转换, 可再生, 与其他可再生能源相比, 更容易开发利用, 因此, 大力开发风能成为世界各国的共同选择。

## 1 风力发电现状

作为一种可再生能源, 风能的蕴藏量较大, 全球风能资源总量约为  $2.74 \times 10^9$  MW, 其中, 可利用的风能为  $2.00 \times 10^7$  MW, 是地球上可利用水能的20倍<sup>[1]</sup>。2011年, 全球风电产业新增风电装机容量达41 000 MW, 全球累计风电装机容量达238 000 MW。截至2012年底, 全球实现风电场商业运营的国家有

收稿日期: 2013-01-08

作者简介: 张晓山(1964-), 男, 湖南株洲人, 湖南有色金属职业技术学院讲师, 工程师, 湖南工业大学硕士生, 主要从事风力发电, 太阳能应用及电子技术应用方面的教学与研究, E-mail: 471761668@qq.com

75个,其中,风电技术发达的国家有:丹麦、西班牙、德国、美国;风电装机容量前6名的国家依次为:中国、美国、德国、西班牙、印度和丹麦;世界风电产品生产企业前5强为:丹麦 Vestas、美国 GEwind、中国华锐、德国 Enercon、中国金风,这5家企业占据了国内外风电市场的半壁江山。(注:以上材料及本文未标注来源的材料均来自于“中国能源网”及“中国风力发电网”)

### 1.1 国内风电发展状况

我国风能储量位居全球第一,开发利用潜力巨大。截至2012年底,全国并网风电总装机容量达60 830 MW,占全国总发电量的2%,位居第三。2012年全国并网发电情况统计见表1。

表1 2012年全国并网发电情况统计

Table 1 Statistics of national grid generation in 2012

类别	装机容量		全年发电量	
	总量 /MW	同比增长 /%	总量 / (亿kW·h)	同比增长 /%
火电	819 000	5.5	39 100	0.3
水电	248 900	6.8	8 641	29.3
风电	60 830	31.6	1 004	35.5
核电	12 570	0	982	12.6
光电	3 280	47.8	35	414.4

2012年,全国各地区新增装机容量前3名是:内蒙古自治区(新增1 700 MW)、山东(新增1 400 MW)、河北(新增1 100 MW)。内蒙古自治区在风电发展规模上一直位居中国风电产业之首,其累计装机容量达17 590 MW,紧随其后的是河北、甘肃和辽宁,累计装机容量都超过5 000 MW。

2012年,国内各风电机组制造企业新增装机容量排名依次为:金风科技,新增装机容量2 520 MW;联合动力,新增装机容量2 050 MW;华锐风电,新增装机容量1 770 MW;明阳风电,新增装机容量1 510 MW;湘电风能,新增装机容量1 150 MW。

在经历了引进技术、消化吸收、自主创新3个阶段后,我国的风电产业日益发展壮大,赢得历史性发展机遇。国内5 MW容量等级的风电产品相继下线,兆瓦级机组在国内风电市场逐渐普及,风电装备制造产业的产业集中度进一步提高,国产机组的国内市场占有率逐年提高,只用了短短几年就走完了欧美国家几十年的发展历程,成为风力装备制造和发电运营的风电大国,位列世界第一。然而相关问题也不断出现,中国要成为风电强国,仍需不断努力。

首先,国内风电装备制造市场竞争日趋激烈,企业盈利大幅下降,导致许多企业不断裁员;二是风电机组的核心设计、制造技术及专利仍由国外几家企业掌握,我国企业每年需支付大量专利、软件、生

产许可及技术咨询等费用;三是风力机、控制系统、逆变器需大量进口,同时一些核心零部件如轴承、叶片和齿轮箱等,与国外同类产品相比,其质量、寿命及可靠性尚有较大差距;四是我国风电发展规划与电网规划不相协调,导致2011年中国风电“弃风”比例超过12%,达100亿kW·h<sup>[2]</sup>,2012年“弃风”比例达16%,超过200亿kW·h,送电并网难成为制约风电发展的瓶颈;五是风电产品出口受阻,如美国商务部2012年12月18日做出终裁,认定中国向美国出口的应用级风塔存在倾销和补贴行为,对中国风电出口实施“双反”。

为了摆脱能源危机和不再受制于人,中国风力发电行业应努力解决以下问题:逐步解决风电技术标准和规范不健全的问题,建立健全完善统一的风电标准规范体系;加强自主创新,掌握核心技术;加大电网建设力度,合理规范风电开发。

### 1.2 国外风电发展状况

丹麦于1890年研制出风力发电机,1891年建立了世界上最早的风电场<sup>[3]</sup>。20世纪90年代,一些欧美国家制定了风力发电的优惠政策,奠定了风电发展的基础。进入21世纪后,国外风力发电产业迅速发展,风电装机容量高速增长。目前,丹麦的风力发电已占本国电力的20%,西班牙为13%,葡萄牙为12%,爱尔兰为9%,德国为8%。

在国外风力发电的发展历程中,国家相关政策发挥了决定性的作用。如美国在2009—2011年期间,在奥巴马政府7 870亿美元的包含减税政策的经济刺激方案中,“生产税返还”政策补贴总额高达131.43亿美元,其中约一半用于风电补贴。再如美国政府投资数十亿美元,用以制造风电涡轮机和建设智能电网,计划于2009—2029年,每年新增风力发电能力400~1 600 MW,到2030年,风力发电总容量将累计增至30 500 MW,届时,风力发电将满足电力需求的20%。欧洲的风电大国也不甘落后,纷纷制定风电优惠政策,大力投资风电。德国规划到2020年可再生能源发电占25%~30%,未来几年内将在海岸建设大型风力发电场。过去10年间,欧美风力发电机组总装机容量增加了10倍,风力发电成本下降了60%,已接近常规发电及核电成本,风力发电和水利发电共同改善了这些国家的电力结构,减少了大气污染,对保护环境起到了重要的作用。

## 2 风力发电技术

风电技术是空气动力学、电机学、材料学、机械

传动、自动控制、电力电子技术等多学科的综合技术<sup>[4]</sup>。虽然风电发展已约100年,但直至20世纪70年代才逐渐受到人们的重视,国内外现有的风电技术未能充分展现风能的优势,风电技术还有较大的发展空间。与世界先进技术比较,我国在中小型风电领域保持同步甚至领先的水平,但在风电机组大型化、先进控制策略和优化技术等方面还有较大差距。

### 2.1 风电机组大型化技术

风电机组大型化技术可大幅提高风能的利用率和转换效率,是并网型风电场建设的关键技术。我国国电联合动力技术(连云港)有限公司近日宣布,其自主设计研发的6 MW海上风力发电机组在山东潍坊风场顺利并网发电,该机组配套的风电叶片长66.5 m,开创了风电装备制造的先河。德国Repower公司于2004年研制出第一台5 MW风电机,Enercon公司开发出第二代直驱式6 MW风电机。丹麦Vestas公司于2013年初开始测试单机容量为8 MW的风电机。英国Arup公司10 MW的海上新型风力发电机将于2013—2014年建成。

### 2.2 水平轴风电机组技术

水平轴风电机组具有转轴短、风能转换效率高、经济性好的特点,已占到95%以上的市场份额,成为风力机的主流。另外,具有对风好、变速装置简单、安装方便等优点的垂直轴风电机组,其转轴长、风能转换效率低、经济性较差、启停机和变桨困难,目前其市场份额较小,但在微风发电等方面占有优势,也值得研究和开发。

### 2.3 变桨变速功率调节技术

早期的风力机采用定桨距装置,其桨叶与轮毂的连接(桨距角)固定不变,风力机的输出功率随风速大小变化,较不稳定。后来,改进桨叶形状,利用桨叶翼型本身所具有的失速特性,即气流的攻角增大到失速条件时,桨叶的表面产生涡流,将发电机的功率输出限制在一定范围内,得到平稳的功率输出。这种装置的控制简单,运行可靠,但叶片质量大,导致桨叶及支撑部件受力较大,容易疲劳或磨损,机组的整体效率也较低。为了克服定桨距的弱点,一种变桨距装置应运而生,其由传动齿轮箱、伺服电机和驱动控制部分组成,其原理是根据风速和发电机转速来调整叶片桨距角,使风力机在风速较大范围变化时保持输出功率基本不变,可大幅提高风能转换效率。

近年来发展起来的变桨变速恒频风力发电机组,能够通过励磁控制和变桨距调节,实现发电机组在风速大范围变化时仍能保持最佳状态运行。具体表

现在:转速不再影响输出电压的频率、幅值和相位;低风速时,能够根据风速变化保持最佳叶尖速比,以获得最大风能;高风速时,能自动调节风力机桨距角,保证风电机组的输出功率平稳和安全运行;风能转换效率进一步提高,控制更加平稳、安全和高效。变桨变速恒频风力发电机组因具有以上显著优点,得到了广泛应用,在全球已安装运行的2 MW及以上的机组中约占95%。

### 2.4 双馈异步发电机技术

变速恒频双馈风力发电系统是目前世界风电场应用最多的主流机型,采用转子交流励磁双馈发电机,其结构与绕线式异步电机类似。这种双馈绕线型异步发电系统的风能利用系数高,不但能吸收由风速突变所产生的能量波动,且可避免主轴及传动机构承受过大的扭矩和应力,还可自由调整有功和无功功率,改善系统的功率因数,方便实现对频率和电压等电量的调节。同时,变速恒频控制的核心双向变频器连接在转子电路与电网之间,对变频器的容量要求较低,约为发电机容量的1/3,因此,该变频器的成本及设计难度均大大降低,保证了发电机组的运行安全。目前,广泛使用的这种交流励磁发电机存在滑环和电刷带来的电磁干扰较大、维护频繁等缺点,因此,对可靠性要求更高的无刷双馈电机的研究成为风电业当前及未来研究的热点。

### 2.5 直驱永磁发电机技术

直驱永磁发电机是由风力机直接驱动发电机发电,无需双馈机组的变速齿轮箱,减轻了整机质量,同时也减少了机械故障的发生,提高了机组的风能转换效率、运行可靠性和寿命,降低了运营成本。但直驱风电的定子电流经变流器馈入电网,变流器全功率运行,对变流器的设计要求以及元器件的要求都较高。随着电力电子器件及技术的进步,全功率变流器的效率与可靠性大幅提高,成本却大幅下降,无需励磁的直驱永磁发电机的高效低故障率优势便愈发凸显。直驱式变速恒频技术、全功率变流并网技术可有效提高系统的运行可靠性和寿命,有利于实现低电压穿越,近年来得到迅速发展<sup>[5]</sup>。如专门生产经营直驱机组的德国Enercon公司,其产品已占到德国风电产业新增风电装机容量55%以上的市场份额;西门子公司在丹麦安装了2台3 MW的直驱式风电机;我国金风科技有限公司与德国Vensys公司合作研制出1.5 MW直驱式风电机,目前已有约1 000台正在运行发电;我国湘电公司自主研制的2 MW直驱风电机组也已大规模进入风电市场。与此同时,整合了直驱和双馈技术的半直驱式风电机组的研发也

取得了重大突破,开始出现在世界风电市场。

## 2.6 大型风电机关键部件技术

风力发电专用高压发电机研制成功,使发电效率进一步提高,而与之配套的高压三电平变流器技术又大大降低了功率器件的损耗,使逆变效率达到98%以上;桨叶形状的优化与大型化,以及制作材料的高强度与轻量化技术都大幅提高了叶片吸收风能的效率;大型风电机组齿轮箱技术明显提高,降低了风电机组的维护量与成本。

## 2.7 智能化控制技术

智能化控制技术的应用进一步提高了风电机组的可靠性和寿命,促进了风电场的建设及运营技术的提高。计算机技术与先进控制技术应用到风电领域后,并网运行的风力发电控制技术得到了发展,控制方式从单一的定桨距失速控制向变桨距和变速恒频控制方向发展,并最终向智能型控制发展。

## 2.8 低电压穿越技术

风力发电机组单机容量不断增大,风电场规模也不断扩大,电网低电压故障导致大面积风电机组与电网脱离的现象将严重影响电力系统的运行稳定性。因此,随着接入电网的风力发电机容量的不断增加,电网对风电场的要求越来越高,要求风电机组具有一定的低电压穿越能力,即要求发电机组在电网因故障出现电压跌落的情况下不脱网,并能够在故障切除后尽快帮助电力系统恢复稳定运行。很多国家对风电场并网做出了严格的规定,要求风电机组必须具有良好的低电压穿越能力才能并入电网。因此,全球主要风电设备生产企业的风电机组大都通过了低电压穿越性能试验<sup>[2]</sup>。

## 2.9 离网型发电技术

离网型发电机主要是中小容量机型,应用的地域广,潜力大,其技术越来越成熟,其全球装机总容量有可能超过并网型风力发电机组容量。我国的中小型风力发电机的应用相对于大型机组要早十几年,其技术成熟,设计与制造在世界处于领先水平,大量出口欧美及东南亚地区,为我国离网型发电奠

定了技术和物资基础。全球远离电网而风能丰富的山区、荒漠、戈壁滩以及海岛等地区,采用离网型分布式风力发电厂就近送电,不但可以解决用电难题,还可大大降低供电成本,发展前景较好。

## 2.10 海上风电技术

海面占地球表面积的70%以上,海上风力比陆地更大、更稳定,海上风电的潜在能量达1 600 000 MW,是陆上风电(280 000 MW)的5.7倍。目前,海上风电机组的安装技术主要有两种:一种是在浅海域采用的着底型结构,另一种是在深海域采用的浮体型结构。目前,浮体型结构的成本约为着底型结构的2倍。欧洲的浅海域多,因此较多采用着底型结构;日本的近海水深,故以浮体型结构为主。丹麦于1991年建成了第一个海上风电场,随后,欧洲迅速推广海上风电技术。截至2012年6月30日,欧洲共建设56个风电场,总计1 503台海上风电机组已经全部并网,并计划在未来4年里在海上风电领域投资超过40亿欧元,进一步扩大再生能源发电规模。美国也不甘落后,计划于2013年上半年建设美国首座海上风力发电厂。我国自主设计研发的6 MW海上风力发电机组在山东潍坊风场顺利并网发电,这标志着我国海上风电成功迈入高水平行列。发展海上风电,解决电力需求矛盾,是风电发展的长期趋势<sup>[6]</sup>。可以预见,高端的海上风机产品在未来两三年内将逐步扩大研发规模,并成为市场海上风机产品的主流。

## 3 风力发电系统仿真

应用较广泛的风力发电系统主要有双馈、直驱和半直驱,采用仿真技术研究风力发电系统,其结论较接近于实际结果,而且可以大大简化开发过程,可节省大量的人力、物力和时间,具有推广价值。图1是以双馈风力发电机系统为研究对象,利用MATLAB/Simulink建立的双馈风力发电系统仿真模型,其中,电机为异步电机模型,在对话框中选择转子形式为绕线式。

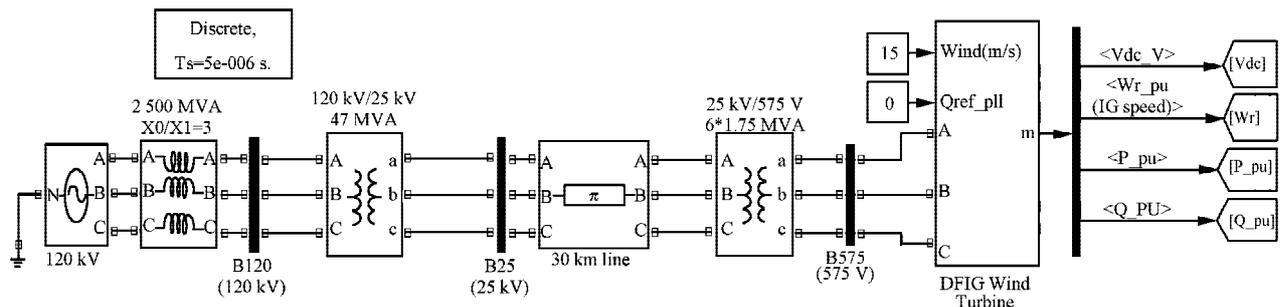


图1 双馈风力发电系统仿真模型

Fig. 1 Simulation model of double-fed wind power generation system

仿真模型中定子与三相电网直接相连，而转子通过交—直—交型的双脉冲宽度调制（pulse width modulation, PWM）变流器与电网相连，构成双馈异步电机。仿真结果如图2~4所示，其电压、电流及有功功率输出波形完全符合电力设计规范要求。

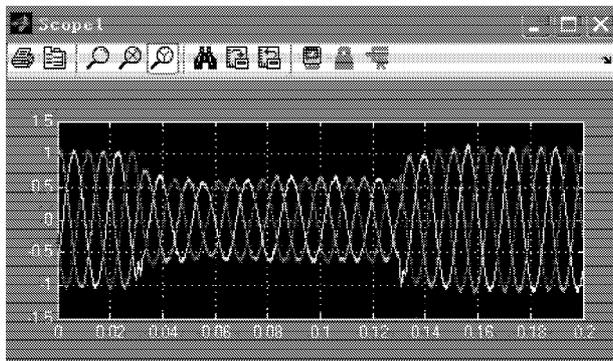


图2 575 V母线三相电压波形

Fig. 2 Three-phase voltage waveform for 575 V bus

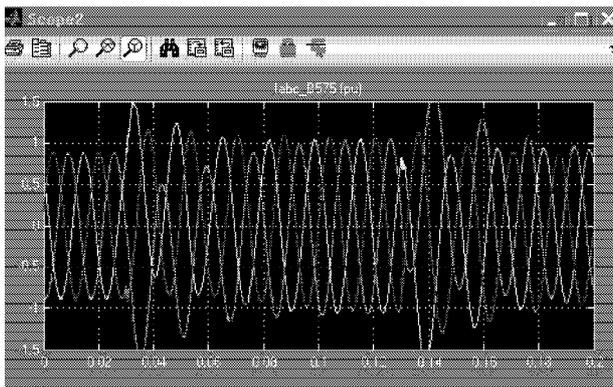


图3 575 V母线三相电流波形

Fig. 3 Three-phase current waveform for 575 V bus

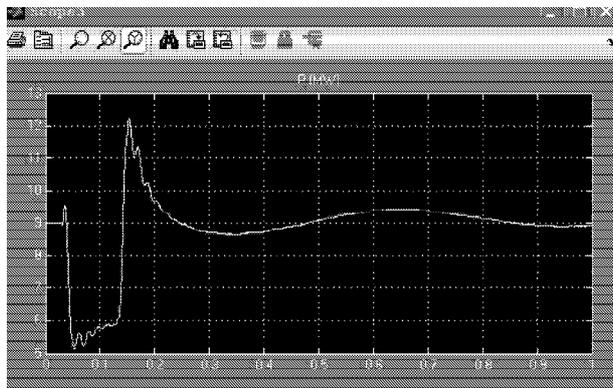


图4 575 V母线有功功率

Fig. 4 575 V bus active power

## 4 结语

人类对能源的需求越来越大，煤、天然气及石油等常规能源却在不断减少，大力推广风电，进一步增强风电在能源结构中的战略地位，将是未来能源开发利用的发展趋势。尽管目前全球风电发展还存在一些问题，但世界各风电大国将以更加优惠的政策继续支持风电事业，风电产业在未来若干年都将继续保持高速增长，风电技术也将进入快速发展的黄金时期。

### 参考文献:

- [1] 任丽蓉. 我国风力发电现状及其技术发展[J]. 科技经济市场, 2011(4): 17-18.  
Ren Lirong. Present Situation and the Development of the Technology of Wind Power Generation in China[J]. Science and Economy Market, 2011(4): 17-18.
- [2] 胡志鹏. 大规模风电的并网瓶颈及其对策[J]. 电气制造, 2011(7): 72-74.  
Hu Zhipeng. Bottleneck of Large Grid-Connected Wind Power and the Countermeasures to It[J]. Electrical Manufacturing, 2011(7): 72-74.
- [3] 韩永奇, 韩晨曦. 中国风电产业的发展与前景[J]. 新材料产业, 2010(12): 8-10.  
Han Yongqi, Han Chenxi. Development and Future of Wind Power Industry in China[J]. Advanced Materials Industry, 2010(12): 8-10.
- [4] 张明锋, 邓凯, 陈波, 等. 中国风电产业现状与发展[J]. 机电工程, 2010, 27(1): 1-3, 14.  
Zhang Mingfeng, Deng Kai, Chen Bo, et al. Status and Development of Chinese Wind Power Industry[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(1): 1-3, 14.
- [5] 张胜男, 潘波. 双馈、直驱风力发电机特点分析[J]. 防爆电机, 2012, 47(3): 1-3, 6.  
Zhang Shengnan, Pan Bo. Analysis on Characteristics of Doubly-Fed and Direct-Drive Wind Power Generator[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2012, 47(3): 1-3, 6.
- [6] 马艳洁. 永磁直驱风力发电机结构发展研究[J]. 机械设计与制造, 2012(6): 282-284.  
Ma Yanjie. Development Research of Direct Driven Permanent Magnet Wind Power Generator[J]. Machinery Design and Manufacturing, 2012(6): 282-284.

(责任编辑: 徐海燕)