

风能是我国目前开发利用比较成熟的一种新能源,风电事业正在我国蓬勃发展。为了帮助读者了解风力发电知识,我们请长期从事风力发电研究工作的中国科学院电工研究所倪受元研究员撰写了《风力发电》讲座以飨读者。

——编者

风力发电讲座

第六讲 风力发电的现状和展望

倪 受 元

1 世界风电发展概况

风能作为一种清洁的可再生能源,从20世纪70年代中期开始受到世界各国的重视,由于风力发电比其他可再生能源(水能除外)利用在经济上更具有竞争优势,因而发展迅速。

1.1 世界风力发电装机容量迅速扩大

1981年全世界风力发电装机容量不超过1.5万kW,1990年底增至196万kW,到1998年底已达到956万kW,其中德国287.5万kW,美国182万kW,丹麦144.8万kW,印度96.8万kW。世界风电装机容量的增长,20世纪80年代主要集中在美国,但从1986年起,美国过早地停止了对发展风电的优惠政策,而90年代初,欧洲一些国家却建立了较全面的支持可再生能源政策,因而90年代世界风电装机容量的增长主要在欧洲。另外,在发展中国家,印度的风力发电也得到了迅速发展,目前其装机容量已属于世界第4位。图1给出了1981年以来全世界风力发电装机容量的增长情况。

由于风电市场的迅速扩大,也促进了风电制造业的发展。在这方面,丹麦走在世界的最前列,现在全世界安装的风电机组,60%产自丹麦。世界十大风力发电机组生产厂,丹麦就占了6个,目前世界最大的Vestas公司拥有世界风电市场20%的份额,并预计今后15年内生产能力将以每年20%的速度增长。

1.2 风力发电机组的单机容量不断增大

20世纪80年代初,商品化风电机组的单机容量以55kW(风轮直径15~16m)为主,80年代中期到90年代初发展到以100~450kW为主,90年代中后期则以500kW~1MW为主。目前,大中型机组并网发电,已成为世界风能利用的主要形式。为降低单位千瓦造价,节省风电场使用面积,加快风电场建设速度,提高风电的经济效益,不少国家和公司相继提高单机容量,制造出风轮直径大于40m的商品机组。这些机型投向市场,标志着商品机组正在向大型化发展。

1.3 商用风电机组技术日臻成熟

20世纪90年代投入市场的商用风电机组,功率以数百千瓦级为主,水平轴风力发电机组占95%以上,其中大部分是三叶片、上风式。这些机型是在吸取过去较小型机组长期运行经验的基础上,并经逐步改进而定型的,因而技术上已相当成熟,年利用率从80年代的不足60%提高到95%以上,有的达到98%~99%。可以认为,风力发电现在已经成为一种相当可靠的发电方式。

功率调节是风力机的技术关键之一,现在主要有两类功率调节方式:一类是定桨距失速控制,另一类是变桨距控制。定桨距失速控制型风力机利用翼型气动失速特性来限制叶片吸收过大的风能,它没有功率反馈系统和变距执行机构,因而整机结构简单,部件少,造价低,并具有较高的安全系数,有利于市场竞争,所以200kW以下的机组大部分采用失速控制。但失速型

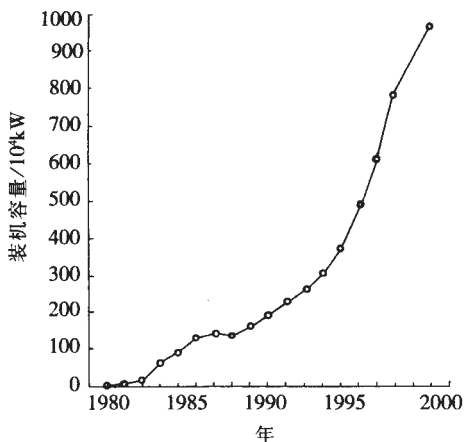


图1 全世界风力发电装机容量的增长情况

叶片本身结构较复杂,成型工艺难度也较大,随着功率增大,叶片加长,所承受的气动推力大,使得叶片的刚度减弱,失速动态特性不易控制,使制造更大型机组受到一定的限制。变桨距型风力机能使风轮叶片的安装角随风速而变化,从而使风轮在各种工况(包括起动、运转和停机)下按最佳参数运行,它可以实现变距起动,顺桨停机,能使额定风速以下工作区段的功率曲线比较丰满,有较高的年发电量,而使额定风速以上的高风速工作区段不超载,不需要过载能力大的发电机等等。当然,它的缺点是需要有一套比较复杂的变距调节机构。现在两种功率调节方案在技术上都比过去有很大改进,因而都是有效、实用的。随着单机容量的进一步增大和技术上更加成熟与完善,变桨距控制可能会逐渐增多。

技术上另一个重要进展是变速恒频风电技术日趋成熟并走向商业化。目前已有两类变速恒频风力发电机组投向市场,一类是采用同步发电机结合交/直/交电力电子变换方案,如德国 Enercon 公司生产的 300kW、450kW 以及更大型的机组等;另一类是采用双馈发电机(结构上类似绕线型感应发电机)转差励磁方案,如美国 Zond 公司的 Z-50 机型等。这种变速风力发电机具有功率/力矩控制能力,利用变速运行和叶片桨距调节,可在所有风速下获得最佳的功率输出。变速运行将从风轮到动力传动系统的功率和力矩尖峰减少至最低程度,从而增强长期可靠运行的能力。不难看出,这种变速风力发电机在今后的大型风电机组中将会得到进一步发展。

1.4 风力发电的经济性日益提高

由于风电市场的扩大、风电机组产量和单机容量的增加以及技术上的进步,使风电机组每千瓦的生产成本在过去近 20 年中稳定下降。80 年代初期,每千瓦的造价约为 3000~4000 美元。而现在,按 1997 年国际上的批量(30 台以上)售价,定桨距失速调节型 300kW 机组约为 925 美/kW,600kW 机组约为 730 美元/kW(含塔架及其基础件,不包括运输费用)。风电场的建设成本每千瓦装机容量约为 1000~1300 美元。

另一方面,由于风电机组设计和工艺的改进(如叶片翼型改进等),性能和可靠性提高,加上塔架高度增加以及风场选址评估方法的改进等,使风电机组的发电能力有相当大的增长,每平方米风轮扫掠面积的年发电量从 80 年代初期的 400~500kWh 提高到目前的 1000kWh 以上。一台标准的 600kW 风力发电机,当各种条件都是最佳状态时,每年可发电约 200 万 kWh,即每平方米风轮扫掠面积的年发电量可达 1400~1500kWh。目前风电场的容量系数(即一年的实际发电量除以装机额定功率与一年 8760 小时的乘积)一般约为 0.25~

0.35。

综合上述情况以及风电场的风力资源、规模、运行维护成本和融资因素(如贷款利率、偿还期等),目前在较好的风场,风力发电的成本约为 5 美分/kWh 左右,已具备与火电竞争的能力。

当然,独立运行的非并网型风电系统,由于需要蓄电池和逆变器等,同时容量系数较小,所以发电成本比并网型机组要高。

2 中国风电发展概况

2.1 中国风电利用的特点

我国风能资源比较丰富,近十几年来,对风能资源状况作了较深入的勘测调查,全国可开发利用的风能资源总量约 2.5 亿 kW。东南沿海和山东、辽宁沿海及其岛屿,内蒙古北部,甘肃、新疆北部以及松花江下游等地区均属风能资源丰富区,年平均风速 $\geq 6\text{m/s}$,有效风能密度 $\geq 200\text{W/m}^2$,有很好的开发利用条件。这些地区中很多地方常规能源贫乏,无电或严重缺电,尤其是新疆、内蒙古的大部分草原牧区以及沿海几千个岛屿,人口分散,电网难以通达,或无电力供应,或采用很贵的柴油发电。在上述地区,利用风力发电,以节约能源,改善环境,缓解电力供应紧张状况,具有重要的现实意义。另一方面,这几年我国的交通条件得到很大的改善,电网覆盖程度有了很大的提高,不少风能资源丰富地区已置于电网覆盖之下,这也为建设大型风电场提供了有利的条件。上述情况决定了我国发展风电的特点是:在风力资源丰富或较丰富的边远无电、缺电地区,以发展小型或中型独立运行的风电系统(包括风力/柴油联合发电和风/光联合发电等)为主,利用风力发电解决边远地区的生活用电和部分生产用电;在风力资源丰富、电网通达的地区,风力发电则作为一种清洁的可再生能源,补充和逐步替代部分常规能源,缓解电力供应紧张的矛盾,提高当地的环境质量,所以应以发展大型风电场为主。

2.2 中国风电的发展与现状

我国风能利用历史悠久,但现代风力发电事业基本上开始于 20 世纪 70 年代,从 80 年代初开始,原国家科委和国家计委将新能源利用列入国家科技攻关计划,其中包括风力发电的科技攻关项目,全国先后共研制出从 50W 到 200kW 机型 40 多种。根据我国的具体情况,为解决地处边远、居住分散、电网难以到达地区的农牧民群众的用电问题,重点推广了户用微型风力发电机,目前全国约为 14 万台百瓦级风电机组在运行,主要分布在内蒙古地区,收到了很好的成效,对解决牧民的生活用电起到了积极作用。几十千瓦到百千瓦级风力/柴油联合发电系统以及几千瓦到几十千瓦级风/光联合发电系统也开展了一些示范应用,但尚未形成规模。

风力发电场的建设是使风能成为真正的补充替代能源和发挥规模效益的主要方式。20世纪80年代中期,我国开始进行并网型风力发电技术的试验和示范,经过十多年的努力,逐步走向规模开发。到1998年底,在全国风能资源丰富的10个省(自治区)已经建设了19个风电场,共安装单机容量从55kW到600kW的风电机组530台,总装机容量达到22.35万kW。其中最大的新疆达坂城风电二场装机5.75万kW,其次是内蒙古的辉腾锡勒风电场,装机3.61万kW。表1给出中国风电场装机容量的发展情况。

- 目前我国风电场建设的基本情况和特点是:
- 1) 尽管近几年我国风电场建设取得了可喜的进展,步入了一个新的发展阶段,但到1997年底,我国风电场总装机容量仅占全国电网总容量0.07%,所以目前还远不能说风力发电已成为我国电力的一支重要力量。它有巨大的发展潜力,需要进一步加速开发和建设。
- 2) 目前我国并网型风力发电机组绝大部分是国外机组,其中丹麦占67%,德国占21%,美国占11%。国产机组仅占约1%,而且由于质量方面的原因,年利用率

较低,说明我国中大型并网风电机组的研究开发和生产大大落后于国外,也落后于我国风电场的建设步伐,必须尽快加速大型风电机组国产化的进程。“九五”期间,我国采取技贸结合的形式,与国外组建合资生产企业,在建设风电场的同时,引进技术,通过消化吸收,达到具备自主开发、自行设计和制造大型风电机组的能力。当前重点是解决300kW、600kW机组的国产化问题。

3) 我国风电场单位容量的综合投资约为1万元/kW,目前我国风力发电的成本约为0.4~0.6元/kWh。虽然就0.4元/kWh而言,已接近新建火电的价位,但总的来说,尚不具备完全商业化生产的条件,仍需要政策上的大力扶持,如保证优惠的上网电价、减免增值税等。风能是清洁的、免费的可再生能源,减免增值税是完全有理由的,这些政策的制定,必将大大推动我国可再生能源利用产业的发展。

风力发电是一个新的产业,虽然目前同常规发电相比,规模还很小,但发展风电是改善我国能源结构、减少污染物排放、保护环境的需求,从长远利益出发是保证可持续发展的战略举措。

3 风力发电的展望

经过20多年的研究开发和运行实践,随着风力发电技术的日益成熟,下一步的目标将是在保证可靠性的基础上,广泛采用先进的技术和工艺,设计制造出经济性更好的物美价廉的大型风力发电机组,以满足国际风电市场的需要。今后十年世界各国风力发电的发展将呈现以下趋势:

3.1 商品化风电机组的单机容量进一步向大型化发展

从过去20年的发展历史看,单机容量的不断增大,是风力发电技术的显著特点之一。单机容量大,有利于降低每千瓦的制造成本,如600kW风电机组比300kW风电机组,单位千瓦的造价约降低20%。而且大型机组采用更高的塔架,更有利于捕获风能,提高年发电量。例如对地处平坦地带的一台风电机组来说,在50m高的塔架上捕获的风能,要比在30m高的塔架上捕获的风能约多20%。

虽然20世纪70年代末和80年代初,美国和西欧一些国家研制、试验的兆瓦级大型风电机组,由于当时的技术条件,在可靠性、经济性以及运行维护等方面,有不尽如人意的地方而未能实现商业化,但也为后来的发展提供了技术上的经验和借鉴。现在,新一代的兆瓦级大型商品机组无疑将很快占领市场。目前如丹麦的

表1 中国风力发电场装机容量发展情况 (到1998年底)							
省、区	风电场名称	1986~	1991~	1996	1997	1998	总装机 容量
		1990	1995				
		(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
新疆	达坂城二场	0	10700	0	46800	0	57500
	达坂城一场	2050	0	4050	0	2400	8500
	布尔津	0	0	1050	0	0	1050
内蒙古	辉腾锡勒	0	0	5400	19800	10900	36100
	朱日和	500	3700	0	0	0	4200
	商都	0	3875	0	0	0	3875
	宝力更	0	1000	0	0	0	1000
广东	南澳	390	8290	0	8750	25350	42780
辽宁	东岗	55	1500	4950	5500	0	12005
	横山	0	1000	4000	0	0	5000
浙江	括苍山	0	0	0	9600	10200	19800
	苍南鹤顶山	0	1255	0	0	9000	10255
	嵊泗	0	300	0	0	0	300
海南	东方	55	0	1500	7200	0	8755
河北	张北	0	0	600	4450	4800	9850
甘肃	玉门	0	0	0	1200	0	1200
福建	平潭	55	200	800	0	0	1055
山东	荣成	165	0	0	0	0	165
	长岛	0	110	0	0	0	110
合 计		3270	31930	22350	103300	62650	223500

Bonus公司、德国的Nordex公司、荷兰的NedWind公司均已具有1MW商品化风电机组进入市场,丹麦的NEG Micon公司Vestas公司已分别有1.5MW及1.65MW的风力发电机产品问世,而且各大公司还在开发更大型的机组。估计下个世纪初,兆瓦级风电机组将成为风电场的主导机型。

3.2 变速恒频风电机组的开发和商品化

目前,安装在世界各地风电场的风力发电机组,绝大多数为恒速运行机组,而采用变速恒频发电系统后,风力机就可以改恒速运行为变速运行,这样就可能使风轮的转速随风速变化并保持一个恒定的最佳叶尖速比,使风力机的风能利用系数在额定风速以下的整个运行风速范围内都处于最大值,从而可比恒速运行获取更多的能量。尤其是这种变速机组可适应不同的风速区,当一台风电机组安装在平均风速与其最佳设计工况的平均风速差别较大的风电场时,变速运行的优势就更加显著了。

恒速运行的另一个弊端是,当风速跃升时,巨大的风能将通过风力机叶片传递给主轴、齿轮箱和发电机等部件,在这些部件上产生很大的机械应力,上述过程的重复出现将会引起这些部件的疲劳损坏。因此,在设计时不得不加大安全系数,从而导致机组重量加大,制造成本增加。当风力发电机采取变速运行时,由风速跃升所产生的巨大风能,部分被加速旋转的风轮所吸收,以动能的形式储存于高速运转的风轮中,从而避免主轴及传动机构承受过大的扭矩及应力;当风速下降时,在电力电子装置的调控下,将高速风轮所释放的能量转变为电能,送入电网。在这里,风轮的加速、减速对风能的阶跃性变化起到了缓冲作用,使风力机内部能量传输部件承受的应力变化比较平稳,防止破坏性机械应力的产生,从而使风电机组的运行更加平稳和安全。

变速运行还有一个好处是,可以降低风力机在低风速运行时的噪音,并可使风轮设计突破原有的框框。恒速运行,风轮转速不能太高,因为在低风速时,环境噪音不大,掩盖不了叶片的气动噪音,所以恒速风轮的叶尖速度一般局限在60m/s左右,相应的叶尖速比在7.5左右。由于空气动力学的原因,风轮转速越低,叶片尺寸就必须越大。而变速机组由于风轮转速与风速成比例变化,所以较少受低风速时噪音的限制,设计中可以采用更大的叶尖速比。同样由于空气动力学原理,较大的叶尖速比,可将叶片做得更薄,从而降低制造成本。变速机组即使设计叶尖速比大于恒速机组,低风速时的转速仍会大大低于恒速机组,因而噪音低,更有竞争性。

目前的恒速机组,大部分使用异步发电机,它在发出有功功率的同时,还需要消耗无功功率(通常是安装电容器,以补偿大部分消耗的无功)。而现代变速风电

机组却能十分精确地控制功率因数,甚至向电网输送无功,改善系统的功率因数。

由于以上原因,变速风电机组越来越受到风电界的重视,特别是在进一步发展的大型机组中将更为引人注目。当然,决定变速机组设计是否成功的一个关键是变速恒频发电系统及其控制装置的设计。由于现代电力电子技术和控制技术的发展,这一问题在技术上已经得到很好的解决,在经济上电力电子变换系统的成本也在日益下降,这些都为变速风电机组的推广应用,提供了良好的条件和前景。

3.3 机械方面的改进

在机械方面通过结构动力学的研究,改进设计,避免或减少由于风的扰动而引起的有害机械负荷,减少部件所受的应力,从而减轻有关部件及机组整体的重量,进一步降低成本。

改进机械结构的另一个动向是采用新型整体式驱动系统,集主传动轴、变速箱和偏航系统为一体,这样就减少了零、部件数目,同时增强了传动系统的刚性和强度,降低了安装、维护和保养的费用。

3.4 空气动力方面的改进

在空气动力方面最重要的发展是进行新型叶片的翼型设计,以捕获更多的风能。如美国国家可再生能源实验室(NREL)开发了一种新型叶片,现场试验表明:在捕获风能上,新型叶片比早期的风力机叶片要大20%以上。现在的叶片,最大风能利用系数约为0.45左右,在叶片翼型的改进上还有较大的发展空间。

采用柔性叶片也是一个发展动向,利用新型材料(如新型工程塑料等)进行设计制造,使其对应于风况的变化能够改变它们的空气动力型面,从而改善空气动力响应和叶片受力状况,增加可靠性和对风能的捕获量。

另外,还在开发新的空气动力控制装置,如叶片上的副翼,它能够简单、有效地限制转子的旋转速度,比机械刹车更可靠,并且费用低。

以上从技术上阐述了风电机组的发展前景,随着这些技术的成熟和完善,以及风电场选址评估和运行管理水平的进一步提高,必然会给风力发电带来更好的效益。近几年内,风电机组的价格降到800美元/kW(含塔架)以下,风力发电的成本降到4美分/kWh(包括运行维护费)以下,应该是完全可能的,甚至有可能降到600美元/kW和3美分/kWh,那时风电将成为最廉价的能源之一。

总之,风力发电由于其效益上的优势,将首先成为可与常规能源发电相竞争的新能源发电方式。一个大规模开发利用风能的时代,一个利用风力发电造福于人类的时代将会到来。