

◀ 替代能源与新能源 ▶

世界风力发电现状与前景预测

罗承先

(原中国石化信息中心, 北京 100011)

摘 要 全球可再生能源发电装机容量中风电占有压倒性优势, 今后有望成为欧洲、亚洲、北美的主要电力来源。2011 年中国以 62GW 的累计装机容量蝉联世界第一, 按照我国“十二五”规划目标, 预计到 2015 年风电装机容量将达到 $1 \times 10^6 \text{ kW}$, 年发电量 $1900 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。GWEC 和 Greenpeace 预测, 今后 20 年风力发电将成为世界主力电源, 2030 年装机容量有可能达到 $23 \times 10^6 \text{ kW}$, 可供应世界电力需求的 22%。欧美正大力开发海上风电产业。欧洲是世界海上风电发展的先驱和产业中心, 欧洲企业不仅拥有自己的核心技术, 而且还向世界各地输出技术, 今后欧洲海上风力发电将急速增长。美国采取与英国、德国等欧洲厂家相同的战略, 大力发展海上风力发电。我国海上风电产业刚刚起步, 预计 2015 年海上风电装机 $500 \times 10^6 \text{ kW}$ 。日本学者大岛教授推算了不同电源的发电成本: 包括政府财政补贴, 运行年限 30 年的核电站发电成本为 12.06 日元/(kW·h); 按标准设备利用率, 风力发电成本 11.30 日元/(kW·h), 与核电相比已经有竞争力。假设风况好时设备利用率达到 35%, 发电成本为 7.95 日元/(kW·h), 比核电低得多。

关键词 风力发电 海上风电 装机容量 电力需求 发电成本 设备利用率

1 前言

全球可再生能源发电装机容量中风电占有压倒性优势, 在被利用的可再生能源中风能占了一半以上, 而风力发电也是可再生能源应用技术中最为领先的。近年世界风力发电高速增长, 前景光明。本文阐述了世界风力发电、海上风力发电的开发现状以及其前景预测, 并讨论风力发电的真实成本。

2 世界风力发电开发方兴未艾

2.1 世界风力发电开发现状^[1]

据世界风能协会(GWEC)的统计, 2010 年全球风力发电装机容量 194.4GW(风车约 17×10^4 台), 比 2009 年的 158.7GW 增加了 22.5%。自 20 世纪 90 年代以来, 风力发电装机容量呈指数级增长。目前世界电力约 2% 由风电供应^[2], 欧盟(EU)平均约 5% 由风电供应, 到 2020 年全球风电供应量将占电力供应总量的 12%。

全球风力发电开发状况按地域划分, 欧洲、亚洲、北美共占世界的 97.2%, 分别为 44.3%、30.2% 和 22.7%。与 2009 年比较, 令人瞩目的是亚洲大陆的开发进展。2009 年亚洲与北美处于同一水平, 仅 2010 年一年就远超北美, 这主要源于中国的跃进开发。风力发电多极化也反映出全球经济活动的多

极化。按国家划分, 风力发电装机容量中国居第一位(42287MW, 占 21.75%), 其后是美国(40180MW, 占 20.67%)、德国(27214MW, 占 14.00%)、西班牙(20676MW, 占 10.64%)、印度(13065MW, 占 6.72%)等。按企业划分, 前 10 位中中国占 4 位, 欧洲占 4 位, 其次是美国、印度各占 1 位, 丹麦的 Vestas 居第一位(见表 1)。数年之前一直是德国、西班牙、丹麦等欧洲国家拉动世界风电开发, 然而近两年中国、美国突飞猛进, 今后风力发电有望成为欧洲、亚洲、北美的主要电力来源。从中长期来看, 随着发展中国家经济的发展, 中东、南美、非洲也将进行风力发电开发。

2010 年风电对电力供应贡献率最大的国家是丹麦, 达 19.3%(2009 年时丹麦即达 19.3%), 其次是西班牙 16.4%、德国 6%、美国 2%。2010 年西班牙可再生能源发电量已占电力供应总量的 35%, 其中风电的重要性最高, 2011 年 3 月风力发电提高到电

作者简介: 罗承先, 高级工程师, 1962 年毕业于四川大学化学系有机化学专业, 曾在化工部吉化研究院、化工部第二胶片厂、中国石化信息研究所(信息中心)从事有机合成、信息编译报道、信息调研等工作, 已发表论文多篇。

力供应总量的 21%, 成为最大的电力供应来源^[3]。同时电力出口旺盛, 2010 年出口葡萄牙、摩洛哥、安道尔、法国共 8490GW·h, 比上年增长 4.8%, 对法国的电力出口量首次超过从法国的进口量。如今电力与葡萄酒一样, 成为西班牙(人口 4600 万)重要的出口产业。西班牙 1998 年正式引入风力发电, 目前约有风车 1.9×10^4 台。2010 年风力发电装机容量达到 2067×10^4 kW, 实际发电 42976GW·h, 超过德国的 36500GW·h; 风力发电占供电总量的 16.4%, 超过德国的 6.2%。

表 1 2010 年按国家与企业分风电装机容量分布

排 名	国 家	装机容量/ MW	企 业	占全球装 机比例, %
1	中 国	42287	Vestas(丹麦)	14.8
2	美 国	40180	华锐风电(中)	11.1
3	德 国	27214	GEwind(美)	9.6
4	西班牙	20676	金属科技(中)	9.5
5	印 度	13065	Enercon(德)	7.2
6	法 国	5660	Suzulon 能源(印度)	6.9
7	英 国	5204	东方电气(中)	6.7
8	加拿大	4009	Gamesa(西班牙)	6.6
9	丹 麦	3752	Siemens(德)	5.9
10	葡萄牙	3702	国电联动(中)	4.2
11	其 他	28641	其 他	17.5

注: 国家数据源自“日本能源学会誌, 2011, 90(8): 765”; 企业数据源自“ENECO, 2011, 44(10): 34”; 两组数据存在差异。

2012 年 2 月 7 日 GWEC 发布最新统计数据^[4], 2011 年全球新增风电装机容量 41GW, 实现了 21% 的增长, 风电市场整体前景仍被看好。2011 年中国风电装机容量新增 18GW, 占全球增量的 44%。快速增长的结果使得中国以 62GW 的累计装机容量蝉联世界第一。按照我国“十二五”规划目标, 预计

到 2015 年风电装机容量将达到 1×10^8 kW, 年发电量 1900×10^8 kW·h, 其中海上风电 500×10^4 kW。与同时公布的太阳能发电目标(装机容量 1500×10^4 kW, 年发电量 200×10^8 kW·h)相比, 风电在中国可再生能源中所占比重仍遥遥领先。

2.2 风电开发前景预测^[5]

根据 2010 年 10 月 GWEC 和绿色和平国际组织(Greenpeace)的预测, 今后 20 年风力发电将成为世界主力电源。2030 年装机容量将达到 23×10^8 kW, 可供应世界电力需求的 22%。GWEC 和 Greenpeace 的长期预测见表 2。

根据过去实绩、现行政策、市场发展动向并考虑未来能源政策, 预计风力发电装机容量年均增长率将达 25%。GWEC 称, 过去 10 年风电装机容量年均增长率为 28%, 所以 25% 的高增长率也是完全可以达到的。基准方案设想风电装机容量 2010~2020 年间每年增加 $2000 \times 10^4 \sim 2600 \times 10^4$ kW, 2030 年新增 4100×10^4 kW。中增长方案与基准方案相比, 2010 年新增 4000×10^4 kW, 预计 2015 年新增 6300×10^4 kW, 2020 年新增 9000×10^4 kW, 2030 年新增 1.5×10^8 kW。中增长方案预计 2020 年风电总装机容量达到 8.3×10^8 kW, 2030 年达到约 18×10^8 kW, 为基准方案的 3 倍以上。高增长方案预计 2020 年新增 1.2×10^8 kW, 2030 年新增 1.85×10^8 kW, 总装机容量 2020 年达到 10×10^8 kW 以上, 2030 年达到 23×10^8 kW。按照 IEA 的基准方案预测, 2010 年新增风电装机容量 2680×10^4 kW, 2020 年总装机容量 4.15×10^8 kW, 2030 年总装机容量 5.73×10^8 kW。GWEC 认为基准方案(即 IEA 的预测)过低, 特别是中国新增风电设备大大减少, 与实际情况差距太大。

表 2 世界风力发电装机容量预测^①

项 目	2007年	2008年	2009年	2010年	2015年	2020年	2030年
基准方案 ^②	装机容量/MW	93864	120297	158505	185258	295783	572733
	发电量/(TW·h)	206	263	347	406	725	1405
中增长 方案 ^③	装机容量/MW	93864	120297	158505	198717	460364	832251
	发电量/(TW·h)	206	263	347	435	1129	2041
高增长 方案 ^④	装机容量/MW	93864	120297	158505	201657	533233	1071415
	发电量/(TW·h)	206	263	347	442	1308	2628

注: ①资料源自“ENECO, 2011, 44(1): 57”; ②执行现行政策, 采用国际能源机构(IEA)2009 年的世界能源预测数据; ③采取支持可再生能源的政策; ④采取大力支持风力发电的政策。

中国政府于 2009 年 11 月宣布, 至 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年减少 40%~

45%, 为此, 非化石能源(可再生能源和核能)占一次能源消费的比例将由 2009 年的 7.1% 提高至 2020

年的15%。在可再生能源中中国政府最期待的是风力发电。2007年中国政府公布《可再生能源中长期发展规划》,其中风电开发目标为装机容量2010年 $500\times 10^4\text{kW}$ 、2020年 $3000\times 10^4\text{kW}$,2008年又将2010年的开发目标上调至 $1000\times 10^4\text{kW}$,而实际上2010年已远远超过该目标。于是GWEC认为,今后20年中国风电开发将飞速增长。GWEC和Greenpeace对中国的预测按照基准方案,风电装机容量2020年、2030年分别达到 $7000\times 10^4\text{kW}$ 和 $9500\times 10^4\text{kW}$;中增长方案,预计2020年、2030年分别达到 $2\times 10^8\text{kW}$ 和 $4\times 10^8\text{kW}$;高增长方案,预计2020年、2030年分别达到 $2.5\times 10^8\text{kW}$ 和 $5.13\times 10^8\text{kW}$ 。中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会发表的《中国风电发展报告2010》指出,中国2020年、2030年风力发电装机容量保守预测将分别达到 $1.5\times 10^8\text{kW}$ 和 $2.5\times 10^8\text{kW}$;乐观预测分别为 $2\times 10^8\text{kW}$ 和 $3\times 10^8\text{kW}$;大胆预测分别为 $2.3\times 10^8\text{kW}$ 和 $3.8\times 10^8\text{kW}$ 。该报告中大胆预测,2050年中国风电装机容量将扩大至 $6.8\times 10^8\text{kW}$ 。中国的动向肯定将左右世界风电规模。

2009年底,印度风力发电装机容量达到 $1093\times 10^4\text{kW}$,其特点是集中在泰米尔纳德邦南部等地区,仅该邦运转的风力发电就达 $460\times 10^4\text{kW}$ 。近年,马哈拉施特拉邦、古吉拉特邦、拉贾斯坦邦等邦的开发活动也很活跃。印度风力发电开发与中国的差别在于,中国以中央政府为中心开发包括风电在内的可再生能源,而印度是以邦政府为中心,没有明确的可再生能源政策,完全基于2003年电力事业法的条款进行可再生能源开发。按GWEC对印度风力发电开发的预测,中增长方案预计2020年、2030年分别扩大至 $4600\times 10^4\text{kW}$ 和 $1.08\times 10^8\text{kW}$,高增长方案预计2020年、2030年分别扩大至 $6500\times 10^4\text{kW}$ 和 $1.6\times 10^8\text{kW}$ 。

据美国能源部(DOE)公布的《2010年风能技术市场报告》^[6],与2008年、2009年相比,2010年美国风电装机容量增速大幅下降,但仍是仅次于中国的世界风电开发增速最快的国家之一。受全球金融危机的后续影响,天然气和电力批发价格相对较低,加之2010年新风电装置需求减缓及能源总需求下降,造成与2009年(约10GW)和2008年(超过8GW)相比,2010年美国并网的风电新增装机容量仅有约5GW。2010年美国风电占新增发电装机容量的

25%,新投资为110亿美元。由于较低的风力发电机和风电价格,以及2012年联邦政府对风能的强有力激励措施,预计2011年风电装机容量的年增长率将比2010年有中等程度增加,而且2012年还将进一步增加,但仍会低于2009年的高增长值,其部分原因是电力批发价格相对较低和对新增发电装机容量的需求有限。奥巴马向衰退中的汽车产业工人指出^[7],今后风电产业将取代汽车产业,重振美国经济,同时宣布2030年美国风力发电将达到电力供应需求的20%(装机容量 $3\times 10^8\text{kW}$)。

欧洲各国正在推进由依赖核电的能源政策向自然能源(指不依赖资源的自然现象的能源,如太阳能、风能、波浪能等)转换^[8]。2010年7月德国环境局(UBA)宣布,到2050年电力100%由自然能源提供。欧洲可再生能源协会(EREC)也设想,到2050年欧洲全部能源需求由自然能源提供。按照EREC的设想,2050年自然能源占欧洲电力供应的比率:风电31%、光伏27%、地热12%、生物质能10%、水电9%、海洋3%。2011年,全球最大的国际环保NGO(非政府组织)之一世界自然基金会(WWF)发表报告称,研究成果表明,2050年世界能源需求全部由自然能源提供在经济、技术上是可能的。

3 海上风电开发快速增长

世界风能陆上资源储量约 $4\times 10^4\text{TW}\cdot\text{h}$,该值为世界电力需求的2倍以上,而海上资源储量为陆上的10倍。陆上风电机组商业装置的设备利用率必须达到20%~25%,海上风电机组建设费用上升,达到成本核算有利水平的设备利用率需35%~40%。欧洲海上风电机组的设备利用率已有数例大幅度超过40%^[2]。

3.1 欧美大力开发海上风电

欧洲是世界海上风电发展的先驱和海上风电产业中心^[9],拥有先进的核心技术,海上风电建设正朝着大规模、深水化、离岸化方向发展。很多的先进技术,如风电双馈齿轮驱动技术、无齿轮直驱技术和混合驱动技术三大核心技术都是首先在欧洲发展起来的。海上风机制造商也基本上都在欧洲,如德国的西门子(Siemens)公司和Repower公司、丹麦的Vestas公司等。这些企业不仅拥有自己的核心技术,产品的关键部件都是自主设计制造,而且还是其他国家设备制造企业的重要技术供应商,向世界

各地输出技术,我国 30 多家制造企业的原始技术均来自欧洲。1991~2009 年欧洲建设并投入运营 38 座海上风电场,装机容量达到 2050MW,占世界海上风电装机容量的 2/3 以上,其中一半以上是近 5 年建成的。

以德国、英国为首的欧洲蜂拥建设海上风力发电^[10]。2010 年全球海上风电新建装机 $144 \times 10^4 \text{ kW}$,而 2020 年仅欧洲就预计建设 $4000 \times 10^4 \text{ kW}$ 。比之陆上建设,海上风电对环境的影响小,加上风量多、发电量大,按欧洲风力发电协会的资料(见表 3),今后欧洲海上风力发电将急速增长。

表 3 欧洲海上风力发电装机容量预测

年 份	陆上风电装机容量/ 10^4 kW	海上风电装机容量/ 10^4 kW	风电所占份额, %
2020 年	19000	4000	16
2030 年	25000	15000	29
2050 年	27500	46000	50

资料来源: ENECO, 2011, 44(10): 11。

欧洲大力推进海上风力发电的原因还在于:一是输电线路投资。海上风力发电场通常远离电力需求地区,不论海上还是陆上都必须大规模投资扩建输电线路,欧洲企业可以承包输电线路建设工程。例如,德国北海海上风力发电项目到德国本土的输电线路工程由瑞士 ABB 公司承包,金额达 10 亿欧元。ABB 可承包德国 3 个海上风电项目的输电线路建设工程。今后,欧洲建设的多个海上风电输电线路项目,将成为欧洲企业巨大的收益来源,并创造较多的就业岗位。输电线路建设费用最终可能由电力用户负担,将来很可能涉及到电力价格上涨,但如果采用发电效率高、发电比较成本低的海上风电,负担相对会低一些。二是发电设备。需要承受强风的海上风力发电设备要求比陆上的坚固耐用,目前有制造最优良的海上风力发电设备的企业是德国的西门子和丹麦的 Vestas。

英国热心海上风力发电^[11],原因是北海油田的产量比 1999 年高峰时下降了 1/4,因而明确提出应用石油、天然气开发培育的海洋技术开发风能、海洋能和扩大就业的战略。英国举国推进海上风电,据 2010 年 5 月 20 日“Independent”报道,“2050 年英国海洋可再生能源将达到与 $10 \times 10^9 \text{ bbl}$ 石油相同价值的水平,雇员 14.5 万人”。英国计划投资 1000

亿英镑扩大海上风力发电,20 年内扩大至现在的 40 倍,约 $4000 \times 10^4 \text{ kW}$,全国电力消费的 1/3 由海上风电提供。受福岛核事故影响^[7],德国决定 2022 年关闭全部核电站,可再生能源发电的比率由现在的 17% 扩大至 2020 年的 35%,投资 50 亿欧元建设 10 座大型海上风电场,设置从北海到慕尼黑、斯图加特等南部工业区的干线电网。2010 年秋,丹麦驻日本大使在日本风力能源协会的专题讨论会上,就气候变暖对策做了题为《2050 年丹麦将完全不使用石油、天然气和煤》的演讲,丹麦风力发电已占电力供应的 20%,随着海上风电的扩大,将提高至 60%。

在风电设备、太阳能电池组件生产方面^[10],美国企业的生产成本无法与以中国为首的新兴国家企业竞争,美国 Evergreen solar 公司、Spectra watt 公司和 Solindra 公司相继破产。据报道,Solindra 公司太阳能电池组件生产成本 1.8 美元/W,而中国仅为 1.1 美元/W,目前美国市场销售的太阳能电池组件 70% 为中国生产。尽管如此,美国政府以及 DOE 仍然继续支持可再生能源政策。DOE 提出的 2012 年度预算方案,增加了关于太阳能、风能等可再生能源的预算额度。由于普通陆上风电设备与中国、印度厂家难以竞争,因此 DOE 大力支持(新兴国家企业尚未从事的)海上风电产业。鉴于海上风电发电量相对较大,在输电线路敷设、发电设备等方面,美国采取与英国、德国等欧洲厂家相同的战略,大力发展海上风力发电。

3.2 中国海上风电开发刚刚起步^[4,9]

据我国第三次风能资源普查,我国陆上风能资源技术可开发量约 $2.97 \times 10^8 \text{ kW}$,而海上风能储量是陆上的 3 倍。按中国风能协会和 WWF 的估算,离海岸线 100km、中心高度 100m 范围内 7m/s 以上风力给我国带来的潜在发电量为年均 $110 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$,与欧洲北海的风电资源相当。

虽然我国拥有丰富的海上风能资源,但海上风电产业的发展却比较缓慢。从我国已建成风电场的分布情况看,约一半在沿海地区的陆上,2009 年以前没有一座风电场建设在海上。直到 2010 年我国海上风电产业才取得实质性进展,建成第一座海上风力发电场——上海东海大桥海上风电场。该风电场总装机容量 102MW,年上网电量 $2.6 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。2011 年 12 月 28 日,龙源电力在江苏如东海上(潮

间带)150MW 示范风电场一期工程 99.3MW 投产发电。再加上 2010 年 9 月投产的如东 32MW(潮间带)试验风电场,龙源电力已在如东县建成了全国规模最大的海上风电场,总装机容量达到 131.3MW。西门子正是在这个海上风电项目中跑赢了国内企业。在这之前,在陆上风电领域,由于发改委 2005 年出台了一项规定风电设备国产化率要达到 70%以上的政策,国外风机厂商的市场份额已经从 2004 年的 80%左右削减到了 30%左右。

按照“十二五”可再生能源规划,2015 年中国海上风电装机 $500 \times 10^4 \text{ kW}$,业内人士预测这可能带来一个 800 亿元的市场。在外资企业正积极行动进入我国海上风电市场之时,国内企业也在快马加鞭。华锐风电位于江苏盐城的风电基地目前已经实现了 3MW 风机的批量生产,并且计划在 2012 年推出 5MW 海上机组。目前,国家能源局正在组织各省、区、市开展海上风电规划,推进海上风电示范项目建设,重点开发建设江苏、山东海上风电基地,推进河北、上海、浙江、福建、广东、广西、海南等省市区市的海上风电建设。海上风电将成为沿海省市未来能源供给的主要来源。

4 风力发电的真实成本^[12,13]

图 1 是日本 2010 年《能源白皮书》给出的不同能源的发电单价(单位价格),其中核能发电单价 5~6 日元/(kW·h),火力发电(LNG)7~8 日元/(kW·h),风力发电(大规模)10~14 日元/(kW·h)。核能发电单价最低,被认为是显示核电经济性优势的根据。与此相反,2010 年大岛教授根据过去各年度有价证券报告的实际业绩推算,表明与其他电源相比核电成本较高,风电成本最低。两者的推算方法区别在于前者基于模型计算,后者是根据实际数值推算。

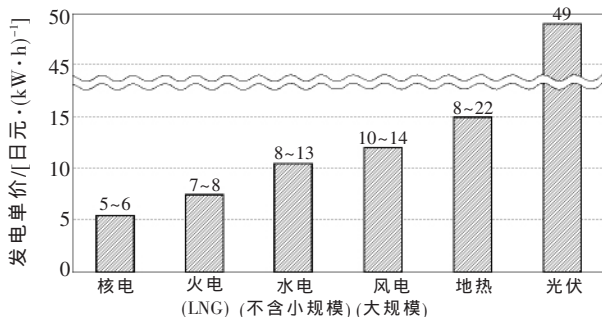


图 1 不同能源的发电单价

资料来源:《能源白皮书》2010 年版

4.1 发电费用涵盖的范围

鉴于福岛第一核电站事故,很有必要重新就核电和其他电源的发电成本进行推算。《能源白皮书》的依据是 2004 年日本综合资源能源调查会电力分会成本研究小组的报告(简称小组报告),小组报告沿袭了与经合组织(OECD)核能机构(NEA)基本相同的方法计算发电单价。约 30 年以前,国际能源机构(IEA)/NEA 就已经运用“运行年限发电成本方式”进行推算。按 IEA/NEA 的推算方式:

$$\text{发电成本} = (\text{投资} + \text{燃料费} + \text{运行维护费}) / \text{发电量}$$

发电量为每种电源发电设施在运行年限内的发电总量,发电成本即发电量 1kW·h 的平均费用。这种方式明显未考虑二氧化碳排放的环境费用。

此次大岛采用 2010 年 OECD 公布的“Projected Costs of Generating Electricity”(简称 2010 年版)方法推算发电成本。每年费用和发电量的价格用折扣率使之还原为现在的价格,OECD 采用 5% 和 10% 两种折扣率,而大岛教授采用接近日本实际情况的 5%。推算时必须注意两点:一是发电费用包括的范围,二是推算的模型条件。“费用范围”要包括环境费用,因为化石燃料排放二氧化碳。2010 年版首次列入排放 1t 二氧化碳的环境费用为 30 美元,大岛的计算也采用这个数值,然而考虑到防止地球气候变暖,该数值仍然过小。不仅火力发电存在二氧化碳排放问题,所有电源伴随发电均产生环境外部费用。例如风力发电,能源是风,其本身非常环保,但能源转化为电力必须建造风机,伴随着选址建设就会影响环境,出现噪音、与鸟类生存冲突、破坏景观等。因此,为了正确推算按电源分类的发电成本,即使是自然能源也必须估算环境外部费用。

核电站反应堆的退役同样存在废物处理费用,也就是环境费用,尤其是乏燃料后处理中的环境费用。核电还有一项费用是政府的财政补贴,电力公司的经费中不含这项费用,因此小组报告的发电成本不包含该项支出。但是,考虑到核电维护、推进不能缺少这项支出,作为核电的补充费用应该计算在内。大岛教授计算时采用每种电源 2000~2007 年度平均财政支出的单价。同时,核电运行昼夜输出功率几乎一定,不能弹性应对电力需求的变化。如增加核能发电,夜间发电量有超过电力需求的危险,为此需要采用抽水蓄能电站来参与调峰。按大岛教

授的计算,2000~2007年度“核能+抽水蓄能”的发电成本上升1日元/(kW·h)。

4.2 核电运行时间设定为60年过长

“模型条件”包括3个重要参数——设定运行年限、设备利用率、后端费用。

4.2.1 设定运行年限

OECD所设定的运行年限:光伏发电、风力发电25年,火力发电(LNG)30年,煤电、地热发电40年,核能发电60年,水力发电80年。问题在于核电设定的60年。OECD在2005年版中设定核电运行年限为40年,2010年版延长了20年达到60年。关于这一点,即使在OECD报告审核组内也有争论。运行年限设定延长,将来费用必定缩小,有可能缩小到无视核反应堆退役费用的程度。同时,投资大的核电站,运行年限愈长,发电成本愈低。但是,长期运行必定带来设备材质老化和技术陈旧,安全性降低。福岛第一核电站1号机组运行已40年,运行年限延长到60年过长。运行30年的核电机组,就有必要向国家提交关于时效变化对策的技术评价和长期维护计划。考虑到安全性,核电运行年限设定为30年较为妥当。

4.2.2 设备利用率

关于设备利用率,OECD的设定存在问题。2005年版和2010年版的核电、火力发电的设备利用率设定为85%。实际上核电2000~2009年的平均设备利用率仅有约69%,大岛的推算设定为70%。

4.2.3 后端费用

按OECD(2010年版)直接处理乏燃料的单程方式,或经处理提取钚再次用作燃料的核燃料循环方式,后端费用均为2.33美元/(kW·h)。不能认为这可以正确反映各国的费用。大岛的推算参考了小组报告,小组报告的数值也仅是今后将乏燃料中的一半进行后处理。日本政府的基本方针是将乏燃料全部进行后处理,因此很有必要重新探讨。全部处理的费用很容易被预想为小组报告(2004年)的2倍。同时,位于日本青森县的六所村后处理厂按40年的定额运行,该设定不现实。六所村后处理厂的投产时间比当初的计划推迟了13年以上,即使开工率设为50%也不奇怪。考虑到这些情况,后处理总费用最低也要42万亿日元,即后处理的发电成本为1.76日元/(kW·h)。

模型设定条件应尽可能根据实际进行设置修订。按照不同电源设定模型装置,煤电($80 \times 10^4 \text{ kW}$)、LNG火电($160 \times 10^4 \text{ kW}$)、中小水电($1.6 \times 10^4 \text{ kW}$)采用日本向OECD提出的设定数据,核电($133 \times 10^4 \text{ kW}$)、风力发电($4.5 \times 10^4 \text{ kW}$)、光伏发电($0.1 \times 10^4 \text{ kW}$)采用各国向OECD提出数据的中位数值。原因是日本没有提出风力和光伏的数据,而日本提出的核电数据是1kW投资约31万日元,但同一地点建设2号机组、3号机组的费用接近,在新的地点建设将达到近40万日元/kW,甚至超过50万日元/kW,大岛教授采用OECD的中位数值42万日元/kW。地热发电计算不采用OECD的中位数值,采用日本地热发电研究会(2009年)的计算条件。

4.3 核电成本高

大岛教授推算的不同电源的发电成本如图2所示。包括政府的财政补贴,运行年限30年的核电站发电成本为12.06日元/(kW·h)、煤电9.43日元/(kW·h)、LNG火电10.87日元/(kW·h),核电比煤电和LNG火电都高。关于核电费用的上述推算评价仍不充分,核电还必须有事故的核损害赔偿保险和补偿契约。但是,这类赔付是有额度限制的,无法满足类似福岛第一核电站事故那样的特大型事故的赔偿。如果包括去污和生态恢复措施,金额肯定达到天文数字,但这些都没有包含在现实的核能发电成本中。若再考虑到这一点,核能发电的实际费用会更高。

4.4 风电成本比核电低

从以上推算分析可以看出,发电成本计算公式应为:

$$\text{发电成本} = (\text{投资} + \text{燃料费} + \text{运行维护费} + \text{环境费用} + \text{补充费用}) / \text{发电量}$$

补充费用包括财政补贴、与核电配套的抽水蓄能电站、事故赔偿等。

大岛教授的计算按标准设备利用率,风力发电成本11.30日元/(kW·h),与核电比较已经有竞争力。地热发电按模型装置为12.43日元/(kW·h),仅比核电高约0.4日元/(kW·h)。但是不能简单地将这样的发电成本引入风力发电或地热发电,因为它们的发电成本主要取决于资源量和设备费用两大因素。对于地热发电,地热资源条件好的日本大分县菅原地区发电成本比模型装置低,推算为10.22日

元/(kW·h),几乎与核电成本相同。对于风力发电,设备利用率随风况好坏而变化,假设风况好时设备利用率达到35%,发电成本为7.95日元/(kW·h),比核电低得多。实际在日本也存在风况好的地方,经济产业省核能安全保安院(2010年)称,北海道宗谷综合振兴局辖区内的风力发电设备利用率(2009年度)平均34.9%、根室振兴局辖区内31.4%。

投资费用随选址条件和发电厂规模而变化。风

车建设的规模优势,可以节约建设单价。同时,技术开发和熟练程度提高也可以降低控制设备费、施工费、设计费等。2010年日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)称,2030年的技术开发目标是建造费用比当前降低30%、发电量提高20%。受福岛核事故影响,建设新的核电站要求更加严格的安全对策,投资和管理费用必将随之提高,其结果必然导致发电成本进一步增加。

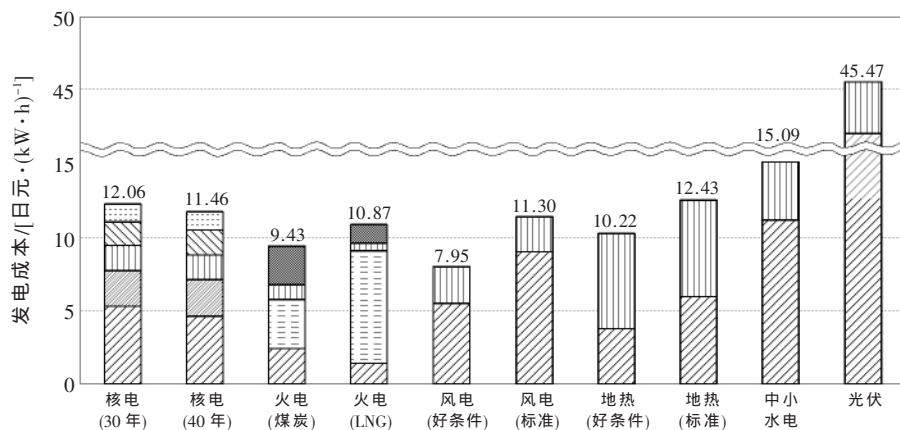


图2 不同电源的发电成本

■ 投资; ■ 核反应堆退役费用; ■ 运行维护费; ■ 财政补贴费;
■ 抽水蓄能追加费; ■ 燃料费; ■ 二氧化碳排放费

4.5 遗留问题

大岛教授这种明确统一基准、推算比较各种电源发电成本的做法具有很大意义,遗留问题之一是如何按各种电源如核电、火电、风电等自身特点进行考虑。例如核电,结果随环境费用而变化,核电投资占所需费用的比重极大,设定运行年限愈长,发电成本愈低。使用化石燃料的火力发电,燃料费所占比重大,受化石燃料价格波动影响很大。风力发电完全没有燃料费,但涉及风况好坏等自然条件、并入电网的入网费用,这些都受风电场地很大影响,风力发电成本随场地条件变化较大。自然能源发电的经济性与地区能源管理系统关系密切。

参考文献:

- [1] 风力[J].日本能源学会誌,2011,90(8):765-766.
- [2] 長沼 二巳.風力発電の原理[J].日本能源学会誌,2011,90(6):573-578.
- [3] クレメンテ・アルバレス.太陽の国・スペインの風力・太陽熱発電最新事情[J].エコノミスト,2011-06-07:83-85.

- [4] 李银莲,李桂琴.风能发电:调整期的新机会[J].中国经营报,2012-2-13(48).
- [5] 窪田 秀雄.2030年に風力が電力需要の22%カバーも[J].ENEKO,2011,44(1):56-59.
- [6] 美国发表2010风能技术市场报告[J].中外能源,2010,16(10):115.
- [7] 牛山 泉.風力発電の世界発電成長率30%経済効果は自動車業並み[J].エコノミスト,2011-08-23:86-88.
- [8] 松原 弘直.自然エネルギーが急拡大 欧州は電力100%賄うシナリオ[J].エコノミスト,2011-05-24:34-35.
- [9] 郭越,王占坤.中欧海上风电产业发展比较[J].中外能源,2011,16(3):26-30.
- [10] 山本 隆三.産業育成を助けない,世界の時流を外れた日本の政策[J].ENEKO,2011,44(10):10-13.
- [11] フジサンケイビジネスアイ.洋上風力 英13兆円旋風[J].ENEKO,2010,43(7):66-67.
- [12] 大島 堅一,木村 啓二.本当のコスト比較 標準的風力発電は原発より安い[J].エコノミスト,2011-08-09:74-76.
- [13] うえた かずひろ.正確な発電コスト推計に必要な視点[J].エコノミスト,2011-08-23:56-59.

(编辑 张 峰)

Wind Power Generation Today in the World and Prospect Forecast

Luo Chengxian

(Former SINOPEC Center of Information, Beijing 100011)

[Abstract] Wind power accounts for a predominant share of the world's installed renewable energy-based power generating capacity and is expected to become the main source of electricity in Europe, Asia and North America. In 2011, China's installed wind power generating capacity stood at 62GW, the largest world-wide. According to the country's Twelfth Five Year Plan, China's installed wind power generating capacity will reach $1 \times 10^8 \text{ kW}$ and annual wind power output will reach $1900 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ by 2015. GWEC and Greenpeace have both predicted that wind power will be a key source of electricity for the world in the next 20 years. By 2030, the world's installed wind power generating capacity is expected to hit $23 \times 10^8 \text{ kW}$, representing 22% of the world's electricity demand. European and American countries are stepping up their effort to develop offshore wind power resources. Europe was the first region to develop offshore wind power resources in the world and remains the center of this industry. European enterprises not only have their own core expertise but are also exporting technology to other parts of the world. Europe's offshore wind power industry is expected to grow rapidly over the next few years. The United States has adopted a similar strategy to European countries such as the United Kingdom and Germany in developing offshore wind power. China has just started out in developing offshore wind power and its installed offshore wind power generating capacity is expected to reach $500 \times 10^4 \text{ kW}$ by 2015. According to a Japanese professor's calculations of costs of generating electricity using different energy sources, if government subsidies are included, the cost of a nuclear power station with a 30 year life is 12.06 yen/(kW·h); and if as per the standard equipment utilization factor, the cost of a wind power plant is 11.30 yen/(kW·h). This suggests that wind power is more competitive than nuclear power. Assuming the equipment utilization factor reaches 35% when good wind conditions are available, the cost of wind power generation will be only 7.95 yen/(kW·h), much lower than that of nuclear power generation.

[Keywords] wind power generation; offshore wind power; installed generating capacity; power demand; cost of generating electricity; equipment utilization factor

· 能源知识 ·

风能发展史

①5000年前古埃及人发明了利用风能航行的带风帆的船。3000年前出现了为碾米和提水提供动力的风力机。②1888年美国诞生第一台自动运行的风力发电机,其发电功率仅12kW,叶轮直径17m,有144个叶片。③二战期间,两叶片或三叶片风力发电机在丹麦投入运营,采用与柴油发电机配套的直流发电机。④1950年第一台交流风力发电机在丹麦诞生。⑤1973年第一次石油危机之后,丹麦、德国、英国和美国加大对大型风力发电机的研发力度。⑥1979年两台630kW的风力发电机诞生,一台是变桨距控制,另一台是失速控制。⑦1980~1981年,现代风力发电机技术取得突破,风力发电成本下降50%,风力发电产业成为新兴产业。⑧上世纪80年代初,美国在加利福尼亚州建设数千台风力发电机,单机容量50~100kW,单个风电厂装机容量超过 $10 \times 10^4 \text{ kW}$ 。⑨目前丹麦拥有世界上最大的海上风电场,风电总装机量为2000MW,其中最大的陆地风电厂总装机容量26.25MW。

(供稿 舟 丹)