

# 大规模海上风电的非并网多元化应用研究

## ——变海上风电场输电上岸为直接输产品上岸的探索

顾为东

(江苏省宏观经济研究院,南京 210013)

[摘要] 针对海上风电大规模发展成本高、并网难、故障概率高的瓶颈,提出了一种海上大规模风电非并网多元化应用系统。该系统突破海上大规模风电并网的单一应用模式,通过必要的技术创新与集成,将大规模海上风电与高载能产业(如海水淡化、电解水制氢和电解铝等)直接耦合形成一个完整的新系统,变海上风电场输电上岸为直接输产品上岸,不仅破解了大规模、超大规模海上风电应用难题,而且大幅度节省海上风电场投资成本,提高了风电利用效率,具有十分重要的现实和战略意义。

[关键词] 海上风电;非并网;海水淡化;制氢;电解铝

[中图分类号] F4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)11-0078-05

## 1 前言

2008年,中国二氧化碳排放量为 $71.2 \times 10^8$  t,约占世界排放总量 $316 \times 10^8$  t的1/4,是世界上最大的温室气体排放国<sup>[1]</sup>,中国政府已承诺2020年单位GDP碳排放将比2005年减少40%~45%,将面临巨大的二氧化碳减排压力。而风能作为一种最廉价、最方便、最清洁的绿色环保可再生能源之一,在二氧化碳减排方面有很大潜力。中国拥有丰富的风能资源,根据最新的测算,中国陆上50 m高风电可开发量为 $23.5 \times 10^8$  kW,海上风资源可开发量目前还没有最新数据,但最保守预计应为原有 $2.5 \times 10^8$  kW的4至6倍。中国风电装机容量从2005—2009年也实现了连续5年每年翻番,2009年风电总装机容量 $2601 \times 10^4$  kW,位居全球第二<sup>[2]</sup>。

但是,中国大规模风电正面临并网难题。根据中国工信部的数据显示,2009年中国风电对电网贡

献率为0.75%,约 $988 \times 10^4$  kW风力机不能并网发电,占总装机容量37.8%<sup>[3]</sup>。因此,科学、高效解决中国充分发挥风资源优势、推动大规模风能利用、实现温室气体减排目标,已成为能源界和政府共同的重要任务。

## 2 我国大规模海上风电发展现状

我国大陆的海岸线长,风能资源丰富,具备了大规模发展海上风电的条件。随着上海东海大桥 $10 \times 10^4$  kW海上风电场34台机组实现全部并网发电,中国海上风电发展开始进入“加速期”。目前已有上海、江苏、浙江、山东和福建等多个省市区提出了各自的海上风电发展规划。预计到2015年中国海上风电装机容量将达到 $500 \times 10^4$  kW,到2020年增长至 $3000 \times 10^4$  kW以上。

随着我国越来越多海上大型风电场的上马,建设和运行中众多制约因素也将日益凸显<sup>[4]</sup>。首先海上风电场施工难度和集中输变电、建设费用高,约

[收稿日期] 2010-08-23

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划(“973”项目)(2007CB210300);中国-加拿大政府国际科技合作项目(21010DFA61540)

[作者简介] 顾为东(1956—),男,江苏盐城市人,江苏省宏观经济研究院博士,研究方向为非并网风电应用、国际经济与区域经济;

E-mail: guwd@zjzw.net

为 2 万 ~ 2.5 万元/kW, 远高于陆上风电的 8 000 万 ~ 10 000 万元/kW, 而其中输配电系统占总成本的 25 % ~ 35 % (由输电线路远近决定)。其次是电网受限, 海上风电场由于施工难度和集中输变电、建设费用高等经济性问题, 难以像陆上建成分布式风场, 必须大规模开发, 而大规模海上风电场的开发, 所发巨大电能在没有水电或燃气发电调峰的情况下, 风电对电网贡献率难以超过 10 %, 这是一个世界性难题<sup>[5]</sup>。即使在电网容量巨大的华东地区, 也面临着海上风电场强大电流对电网接口的冲击。

海上大规模风电非并网多元化应用系统突破海上大规模风电并网的单一应用模式, 通过必要的技术创新与集成, 将大规模海上风电与高载能产业 (如海水淡化、电解水制氢和电解铝等) 直接耦合形成一个完整的新系统, 变海上风电场输电上岸为直接输产品上岸, 破解了大规模、超大规模海上风电应用难题。

对于海水淡化和制氢的非并网风电应用设备, 为塔式结构, 并整体安放于风机塔筒内, 组成一体化成套装置, 变海上风电场输电上岸为直接输产品上岸, 不仅节省海上风电场投资成本的 25 % ~ 35 % (由输电线路远近决定), 而且使风电利用效率提高 8 % ~ 12 %, 具有十分重要的战略意义和显著的经济价值。

### 3 非并网风电的基本理论

“非并网风电”理论是由笔者于 1985 年首次以论文形式提出的<sup>[6]</sup>。非并网风电是指大规模风电系统的终端负荷不再是传统的单一电网, 而是通过必要的技术创新与集成, 直接应用于一系列能适应风电特性的高载能产业及其他特殊领域。项目围绕影响中国风电规模化、产业化发展的三个难题开展研究: 在没有水电或燃气发电等调峰情况下, 风电在电网中的贡献率难以超过 10 %; 风力机结构复杂, 风电价格远高于煤电; 缺乏有自主知识产权的核心技术。由于原创性、系统创新性突出, 学科交叉特点鲜明, “大规模非并网风电系统的基础研究”项目于 2007 年 7 月获得国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 的立项。项目研究的目标是: 建立 100 % 消耗大规模风电场电力的非并网风电应用系统, 解决大规模、超大规模风电场电量的应用难题; 构建高效率、高可靠性、低成本的大规模非并网风电系统, 系统内风电价格接近或低于煤电; 实现大规模风电发

展的社会效益、环境效益和经济效益的统一。

风电的这种非并网运行方式的优势体现在:

1) 非并网风电系统采用直流电, 回避风电上网电压差、相位差、频率差难以控制的问题, 绕开电网这一限制风电大规模应用的瓶颈。

2) 突破终端负荷使用风电的局限, 使风电在大规模非并网风电系统中的供电比重达到 100 %。

3) “非并网风电”将引发风电在风力设计、输变电线路上变电所功能的一系列简化, 最终实现风能利用效率的提高和风电成本的降低<sup>[7]</sup>。

### 4 海上大规模风电的非并网多元化应用系统

海上大规模风电的非并网多元化应用包括非并网风电海水淡化系统、非并网电解水制氢系统等。它提供一种适应风电特性、100 % 应用海上大规模风电直接进行工业化生产, 就地使用廉价清洁且可再生的海上大规模非并网风电为能源, 变输电上岸为输产品上岸, 不仅大幅度降低了海水风电场的投资成本, 而且还有效提高了风电的利用效率, 如图 1 所示。

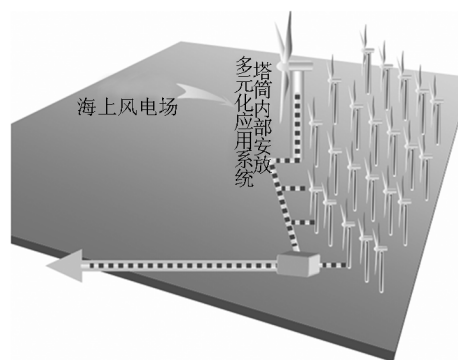


图 1 海上大规模风电的非并网多元化应用变输电上岸为输产品上岸示意图

Fig. 1 Changing offshore wind power transmission into product transmission ashore in the non-grid-connected diverse application of large-scale offshore wind power

海上大规模风电的非并网多元化应用系统主要有海上非并网风机、控制系统、电力变换器、新型海水淡化、电解水制氢或电解铝海水平台等部分组成, 如图 2 所示。

### 5 海上大规模非并网风电海水淡化系统

海水淡化, 又称“海水脱盐”, 是通过物理、化学或物理化学方法从海水中获取淡水的技术和过程,

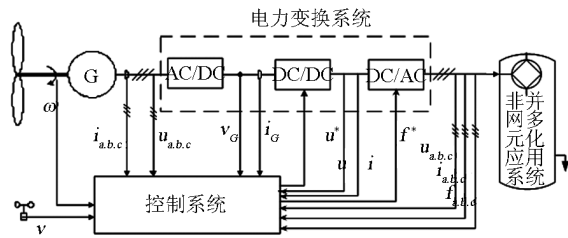
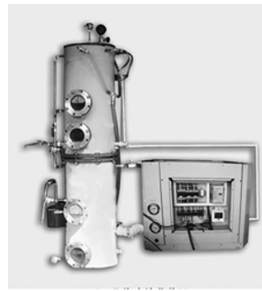


图2 海上大规模风电的非并网多元应用系统结构框图

Fig. 2 The system structure of the non-grid-connected diverse application of large-scale offshore wind power



(a)两效风电海水淡化验证平台



(b)三效风电海水淡化验证平台

图3 海水淡化验证平台

Fig. 3 Desalination verifying platform with wind power

电压时,装置开始生产气体,在电解槽阴极产生氢气、阳极产生氧气。气体在压力作用下,通过冷却器冷却后分别进入氢氧槽,再由调节阀控制输出,后进入纯化系统纯化,制成满足工业生产要求的气体。在气体生产过程中,通过循环泵不断的补充水电解过程中消耗的水,并由水冷系统控制碱水温度,使其保持在正常工作温度。

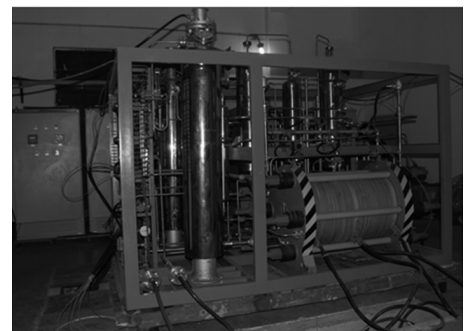


图4 10 Nm<sup>3</sup>/h 压力型碱性水电解制氢系统装置图

Fig. 4 The equipment with 10 Nm<sup>3</sup>/h of the pressure alkaline water electrolysis hydrogen production system

图5 试验影响曲线表明,在 5 ~ 15 A/dm<sup>2</sup> 区间里,电流密度的大幅度变化只影响氢气产量,而不影响电流效率和氢气质量,揭示了风电与电解水制氢的耦合机理(已成为中国《小型氢能综合能源系统性能评价方法》国家标准的重要内容)。因此,可以将大规模风电通过必需的技术创新和集成与制氢工业直接耦合。

海上大规模非并网风电电解水制氢系统,风电不经过电网直接应用于电解水制氢,将不稳定的风能转变为稳定的氢能输出。该系统为降低风电场成本,提高风电利用率,突破风电发展瓶颈,走出了一

它是解决水资源短缺的重要途径。

新型大规模非并网风电海水淡化系统提供一种适应风电特性、100%应用海上风电进行海水淡化的工业性生产系统。通过低温多级高效风电海水淡化新工艺,借助热泵高效、节能特性,直接使用非并网风电为能源,在变风况情况下,实现淡化过程温度、压力和流量三者动态平衡。

系统利用海上非并网风力发电机发出的直流电,直接耦合为新型的低温多效热泵海水淡化装置中使用的热泵、水泵及真空泵等的工作电源。其工作时的物理表现为:风大时,海水淡化设备处理量加大,淡水产量增加;风小时,海水淡化设备处理量减小,淡水产量减少;无风时,海水淡化设备停止生产。新型海水淡化设备为塔式结构,并整体安放于风机塔筒内,组成一体化成套装置,充分利用海上风力机彼此分散的特点,解决了岸上大规模、超大规模海水淡化造成的点源污染难题<sup>[8]</sup>。

目前,该方法已完成2效和3效试验设备的加工生产(见图3),已获国家发明专利“低温多级高效风电海水淡化方法及其装置”(ZL200710019522.6),并获得中国-加拿大政府国际科技合作项目资助(No. 21010DFA61540)。

## 6 海上大规模非并网风电电解水制氢系统

氢能具有清洁高效的特点,被认为是未来最有潜力的能源载体之一。在目前的各种制氢技术中,利用可再生能源所产生的电能作为动力来电解水是最为成熟和最有潜力的技术。

海上大规模非并网风电电解水制氢系统采用的压力型碱性水电解制氢装置图,如图4所示。该装置的核心设备为电解槽,由若干小室串接而成,额定工作电压为直流50V。当工作电压大于产气阈值

条有中国特色的大规模风电多元化发展之路,可形成千亿(元)级的新兴战略性产业。

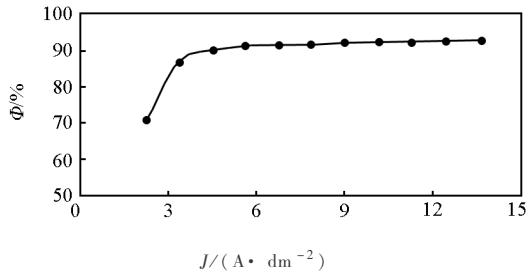


图5 电流密度和产氢效率的关系曲线

Fig. 5 The hydrogen production efficiency curve under different current densities

## 7 海上大规模非并网风电多元化应用系统特点及意义

海上大规模非并网风电多元化应用充分尊重中国风电发展的特性和规律,突破海上大规模风电并网的单一应用模式。通过必要的技术创新与集成,将大规模海上风电与高载能产业(如海水淡化、电解水制氢和电解铝等)直接耦合形成一个完整的新系统,破解了大规模、超大规模海上风电应用难题,将有利于在中国海上风能资源丰富的地区建设成若干绿色低碳的高载能工业园区,形成若干个千亿元级的新兴战略型绿色产业。该系统具有以下几个显著特点:

1) 100% 利用海上风电,将替代大量的化石能源,大大减少温室气体排放,有效实现低成本产品供给,解决了大规模、超大规模海上风电应用难题。

2) 可以大规模开展,突破风电在电网中的比例不超过 10% 的局限,也不会给电网带来冲击。

3) 新型多元化应用设备为塔式结构,并整体安放于风机塔筒内,组成一体化成套装置,变海上风电场输电上岸为直接输产品上岸,省略了繁杂的输变电系统(至少省却低速直驱风机的逆变、2 级升压、高压输电、2 级降压,最后到达终端负荷等环节)和

复杂的海底电力电缆(目前的海底电缆因埋在淤泥中,散热条件差,需循环油散热等降温措施),从而节省海上风电场投资成本的 25% ~ 35% (由输电线路远近决定),并使风电利用效率提高 8% ~ 12%。

4) 全球范围内具有很好的商业前景。海上大规模非并网风电多元化应用系统结合我国丰富的海上风能资源,可以建设一系列利用大规模海上风电直接进行大规模海水淡化、电解水制氢和电解铝等产业基地,直接输出工业产品,有利于国家可再生能源的开发利用和保障国家能源安全,有利于缓解我国二氧化碳减排方面的国际压力。

## 参考文献

- [1] Netherlands Environmental Assessment Agency. No growth in total global CO<sub>2</sub> emissions in 2009[EB/OL]. [http://www.pbl.nl/en/publications/2010/No-growth-in-total-global-CO<sub>2</sub>-emissions-in-2009.html](http://www.pbl.nl/en/publications/2010/No-growth-in-total-global-CO2-emissions-in-2009.html).
- [2] 中国风能协会. 2009 年风电装机容量[EB/OL]. <http://www.cwea.org.cn/upload/201006102>.
- [3] 中国电力企业联合会. 2009 年电力工业快报统计数据一览[EB/OL]. <http://www.cec.org.cn/html/deptnews/2010/1/7/201017166413867.html>.
- [4] 缪国平,朱仁传,程建生,等. 海上风电场建设与海洋工程装备研发中若干水动力学关键技术问题[J]. 上海造船, 2009, 77(1): 19-25.
- [5] Maegaard P. Wind energy development and application prospects of non-grid-connected wind power[C]//Proceedings of 2009 World Non-Grid-Connected. VSA: Wind Power and Energy Conference. New York:IEEE Press, 2009.
- [6] 顾为东. 利用风能资源开发苏北滩涂[J]. 江苏工学院学报, 1986, 7(4): 82-87.
- [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] Gu W, He X. Development of an innovative seawater desalination system using non-grid-connected wind power[C]//Proceedings of 2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference. New York:IEEE Press, 2009: 483-480.

# Research on the non-grid-connected diverse application of large-scale offshore wind power—exploration on changing offshore wind power transmission into product transmission ashore

Gu Weidong

(Jiangsu Academy of Macroeconomic Research, Nanjing 210013, China)

[ **Abstract** ] For high cost, hard grid connection and high failure probability of large-scale offshore wind power, a non-grid-connected diverse application system is proposed. Breaking the single on-grid application mode of large-scale offshore wind power, the system directly couples offshore wind power with high-energy consumption industries (such as seawater desalination, hydrogen production by water electrolysis and electrolytic aluminum, etc.) into a new and full one through the necessary technical innovation and integration. It uses offshore wind power and changes power transmission into product transmission ashore, which not only breaks the difficult problem of large-scale, super-large-scale wind power application but also saves the investment of offshore wind farms and increases the utilization efficiency of wind energy. As a result, the system is of great practical and strategic significance.

[ **Key words** ] offshore wind power; non-grid-connected; seawater desalination; hydrogen production; electrolytic aluminum

---

(上接 59 页)

## The split installation and application of offshore wind turbine generator systems

Sun Guangxi<sup>1</sup>, Huang Yaxin<sup>2</sup>

(1. CCCC Third Harbor Engineering Co. Ltd., Lianyungang, Jiangsu 222042, China;

2. Engineering Institute of Engineer Corporations, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

[ **Abstract** ] The installation methods used in offshore wind farm around the world were summarized, and the process of split installation, the set necessity and principles of assembly base were analyzed. 8 kinds of typical land-based assembly programs and the assembly technology of main parts were summarized. An installation method was proposed by sitting of the diving boat. The diving installation ship was made by installing a crane, and was located in the seabed during the operation to hoist the turbine components. The installation method is suitable for offshore wind farm construction. The application of the installation method in the test turbine project of Jiangsu Xiangshui offshore wind farm was introduced in the paper finally.

[ **Key words** ] offshore wind farm; method of assembled on shore; method of split installation; application