

Economical Model Analysis of Power to Gas

Xuejun Yang¹, Fang Xu²

¹Research Institute of Xinjiang Clean Energy Technology, Hami Xinjiang

²Xinjiang Goldwind Tianyi Experimental Wind Farm, Urumqi Xinjiang

Email: yangxunjun@goldwind.com.cn

Received: Oct. 14th, 2016; accepted: Oct. 31st, 2016; published: Nov. 3rd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The initial investment in equipment and land for renewable power such as wind power and significance of addressing wind curtailment and improving renewable penetration rate is obvious. This article gives a general introduction to the technical route of Power to Gas and the present progress in China and abroad. The energy storage model of integrating curtailed wind energy with hydrogen production is established based on real time data throughout a whole year in a wind farm and in this model two operation scenarios are assumed. From the model, several conclusions of addressing heavy wind curtailment are withdrawn and economical availability is analyzed. As well, this article points out the potential problems of this route in real hydrogen production system. At the end, the related industry context of "Power to Gas" is talked.

Keywords

Wind Power Hydrogen Production, Wind Curtailment, Economic Model

Power to Gas经济模型分析

杨学军¹, 许方²

¹新疆洁净能源技术研究院, 新疆 哈密

²新疆金风天翼试验风电场, 新疆 乌鲁木齐

Email: yangxunjun@goldwind.com.cn

收稿日期: 2016年10月14日; 录用日期: 2016年10月31日; 发布日期: 2016年11月3日

文章引用: 杨学军, 许方. Power to Gas 经济模型分析[J]. 低碳经济, 2016, 5(4): 37-42.

<http://dx.doi.org/10.12677/jlce.2016.54006>

摘要

对于风力发电等可再生电力, 初始设备和场地投资十分巨大, 解决弃风限电问题和进一步提高可再生能源的比例意义重大。通过风能制氢的方式, 不仅能解决可再生电力的储能问题, 而且可以多元化能源形式, 促进能源体系安全。本文简要介绍了Power to Gas的技术路线和国内外进展, 通过实际风场的全年数据来建立储能经济模型, 假设了风能制氢的两种运行模式, 进而研究了风能制氢在解决当前国内严重弃风限电问题的规律和经济可行性, 也指出该技术路线在实际风能制氢电解槽运行中存在的潜在问题, 最后讨论了风能制氢技术路线的上下游产业关联性。

关键词

风能制氢, 弃风, 经济模型

1. 引言

2015年“三北”地区风电弃风限电问题进一步加剧, 弃风电量达到339亿千瓦时; 全国风电平均年利用小时数下降到1728小时, 比2014年下降165小时[1]。

氢可作为一种储能载体, 同时也是一种化工原料, 其市场定位包括两个方面, 其一是当前大力发展的可再生能源储能市场, 其二是氢气直接作为产品, 应用于煤化工、燃气市场等市场。Power to Gas技术路线[2]即是将电力转化成氢气(或者间接转化为其他可燃气体), 因此作为多元化能源形式以及解决弃风限电问题, 该技术路线在国内外都有积极探索[3][4][5], 并于2016年中国“两会”提案中有所体现, 提案指出应结合国内实际情况, 做好顶层设计, 积极推进相关实验研究平台以及示范项目的建设, 利用好国内外技术研发能力, 推动电转化气产业的快速发展[6]。

美国于2007年3月第一次启动了风能制氢Wind2H2项目, 该项目采用多余的风电进行电解制氢, 氢气进行储存, 根据需要采用氢气内燃机或燃料电池发电补充电力。

美国能源部(DOE)的目标是到2017年, 风能制氢成本力争低于2美元/kg。德国EON公司2012年8月开始建设一座每小时产生约360立方米的风能制氢电厂, 将风能储存于燃气网中。从2013年起, 多余的电力将不被电网消纳, 过剩的电能将送往燃气厂。2012年10月, 在为电网提供电力的同时, 德国Thüga集团将太阳能和风能电解制得的氢气添加到市政燃气网络中, 氢能进入市政燃气网络的模拟将持续到2016年。

在国内, 风能制氢和燃气管网结合起来, 既可以避免地域限制, 又可以实现能量远距离输送, 而且储能的容量规模较大, 成本低, 可以大大提高风电在能源中的比例。假设天然气管网的每年输送总气量按1000亿立方估算, 采用现有的天然气管网储运掺氢2%的混氢天然气, 其中氢气为20亿立方米, 则一年大约可以储存电能90亿千瓦时; 如果按20%的比例储存电网多余的风电, 则大约可以储存20.00 GW风电场半年的发电量(等效标准小时数按2000h估算), 对于促进能源体系的安全是有促进意义的。

2. 经济模型假设和分析

2.1. 经济模型假设

以国内某风电场为例, 采用多余的风电电解制氢(受并网限制), 风场装机容量为99 MW, 66台1.5 MW机组, 配有10 MW制氢电解槽。本模型基于所有机组全年10分钟平均数据来进行全年数据分析, 有文

章[7][8]研究了电解槽的运行模式, 主要分为稳定功率运行和波动功率下运行。本文经过分析选择了其中波动运行的电解槽模式, 该模式可以再分为以下两种运行子模式讨论, 其一是风电和网电配合使用制氢的连续模式, 即: 如果风力发电机没有运行或者不能满足制氢系统的最低功率时, 由电网提供额外电力, 其二是只有风电制氢的不连续模式, 也即是说当风速处于风机的切入风速和切出风速之间, 只有风力发电机提供制氢电力。本模型做以下几点基本假设:

1) 电解槽在波动运行中的效率 μ 不变, $\mu = 5 \text{ m}^3\text{H}_2/\text{kWh}$, 与风场功率的随动时间延迟为 0, 其制氢量与其功率波动为线性关系, 波动区间为 25%~100%, 即: 制氢系统的最小运行功率是其额定功率的 25%, 对于连续波动运行模式, 当风场的出力小于制氢系统的最小运行功率时, 则由电网提供电力并满足制氢系统处于最小功率状态, 对于非连续波动运行模式, 当风场的出力小于制氢系统的最小运行功率时, 则停止制氢系统的运行;

2) 10MW 电解槽价格为 4600 元/kW;

3) 所使用的电网电力价格为 0.52 元/kWh;

4) 风场除了基本检修以外, 其运行正常, 不存在意外停机;

5) 本模型的原始数据为该风场的原始 10 分钟平均数据, 选取风速、风机功率、限电功率等参数, 每个参数全年中一共有 52560 个点, 因此能够代表该地区的风资源以及发电情况, 所有的计算都按照 1) 中的假设模式进行, 风场数据的计算结果直接反映在表 1 和表 2 中。风场的数据处理公式和计算过程比较简单, 未有复杂的数学处理过程, 因此本文并未给出详细的计算过程。

$$Q_{H_2} = E_{H_2} / \mu \quad (1)$$

$$Q_{H_2} = 2Q_{O_2} \quad (2)$$

其中 Q_{H_2} 是氢气的体积, Q_{O_2} 是氧气的体积, E_{H_2} 为制氢系统总耗电量, μ 为制氢系统效率。

模式 1: 制氢系统连续运行

$$E_{H_2} = E_{grid} + E_{wind} \quad (3)$$

E_{grid} 为制氢系统消耗的电网电力, E_{wind} 为制氢系统消耗的风电量。

模式 2: 制氢系统不连续运行

$$E_{H_2} = E_{wind} \quad (4)$$

E_{wind} 为制氢系统消耗的风电量。

静态回收期:

$$\text{静态回收期} = \text{初期投入成本} / \text{每年的静态收益} \quad (5)$$

2.2. 模型分析

在表 1 和表 2 中, 本文设定了几种情形:

1) 不同氢气价格;

2) 考虑氧气和不考虑氧气的收益;

3) 连续运行(见表 1)和不连续运行(见表 2)模式, 也即是电解槽是否使用电网电力的两种模式。

因此, 由表 1 和表 2 可以得出本文模型中以下几个分析结果:

1) 氢气价格的影响, 10 MW 条件下, 氢气价格大幅提高, 无论电解槽系统是否连续运行模式, 其经济性都明显提高;

2) 无论电解槽系统是否连续运行模式, 氧气作为另外一个副产品氧气, 对于提高经济型有促进作用,

Table 1. Electrolyser continuous scenario with power output between 25% and 100%
表 1. 电解槽在 25%~100% 之间连续波动运行模式

系统参数	电解槽功率 MW	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	系统单价元/kW	4600.0	4600.0	4600.0	4600.0	4600.0
	氧气存储系统元/kW	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0
收益产品 类型	氢气	8,090,970.8	8,090,970.8	8,090,970.8	11,285,059.5	8,090,970.8
	氢气价格元/Nm ³	1.5	2.6	2.7	2.7	2.3
	氧气	4,045,485.4	4,045,485.4	4,045,485.4	5,642,529.8	4,045,485.4
	氧气价格	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	补贴元/Nm ³	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
成本支出	年维护费万元	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0
	网电价格元/kWh	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
风场数据	总用电(限电 + 网电)kWh	40,454,853.9	40,454,853.9	40,454,853.9	56,425,297.7	40,454,853.9
	年消耗限电电量 kWh	27,597,368.8	27,597,368.8	27,597,368.8	30,710,327.6	27,597,368.8
	限电量利用率	22.0%	22.0%	22.0%	23.3%	22.0%
	风电所占比例	72.0%	72.0%	72.0%	54.4%	72.0%
	年消耗网电 kWh	12,857,485.1	12,857,485.1	12,857,485.1	25,714,970.1	12,857,485.1
	静态收益(氢气)万元	545.1	1435.1	1516.0	1709.8	1222.3
	静态收益(氢气 + 氧气)万元	727.1	1617.1	1698.0	1963.7	1404.3
不同类型 收益	静态收益(氢气 + 补贴)万元	949.6	1839.6	1920.5	2274.0	1626.8
	静态收益(氢气 + 氧气 + 补贴)万元	1131.7	2021.7	2102.6	2528.0	1808.9
	固定资产总投资不含氧气系统万元	4600.0	4600.0	4600.0	4600.0	4600.0
	固定资产总投资含有氧气系统万元	4950.0	4950.0	4950.0	4950.0	4950.0
	固定资产残值	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0
	静态回收期(氢气)	13.9	3.6	3.4	3.0	4.4
	静态回收期(氢气 + 氧气)	9.5	3.4	3.2	2.7	4.0
不同类型 回收期	静态回收期(氢气 + 补贴)万元	6.1	2.7	2.6	2.1	3.1
	静态回收期(氢气 + 氧气 + 补贴)	5.2	2.6	2.5	2.1	3.0

对于 CDM 机制的碳减排等补贴也是同样的道理;

3) 使用电网电力参与电解槽制氢, 可以使得整个系统的弃风利用比例提高, 显而易见这是由于风电输出功率的波动性和不连续性引起的;

4) 当氢气价格较低时, 不连续运行模式的经济性要优于连续运行模式下经济性, 这是由于氢气价格过低带来的整体效益不足以抵消使用电网电力带来的成本;

5) 当氢气价格较高时, 电解槽系统增加电网电力的使用占比, 可以提高经济性, 本文发现临界点在于 2.3 元/Nm³。

3. 结论和问题分析

本文模型中氢气平衡价格点 2.3 元/Nm³, 当氢气价格超过了平衡点价格, 电网电量使用的越多其系

Table 2. Electrolyser uncontinuous senario with power output between 25% and 100%
表 2. 电解槽在 25%~100%之间不连续波动运行

系统参数	电解槽功率 MW	10	10	10
	系统单价元/kW	4600	4600	4600
	氧气存储系统元/kW	350	350	350
收益产品类型	氢气	5,229,554	5,229,554	5,229,554
	氢气价格元/Nm ³	1.5	2	2.6
	氧气	2,614,777	2,614,777	2,614,777
	氧气价格元/Nm ³	0.45	0.45	0.45
	补贴元/Nm ³	0.5	0.5	0.5
成本支出	年维护费万元	230	230	230
	网电价格元/kWh	0.52	0.52	0.52
	总用电(即限电)kWh	26,147,770.53	26,147,770.53	26,147,770.53
风场数据	限电量利用率	20.86%	20.86%	20.86%
	标准风电小时数 H	277.30	277.30	277.30
	年消耗电网 kWh	0	0	0
不同类型收益	静态收益(氢气)万元	784.43	1045.91	1359.68
	静态收益(氢气 + 氧气)万元	902.10	1163.58	1477.35
	静态收益(氢气 + 补贴)万元	1045.91	1307.39	1621.16
	静态收益(氢气 + 氧气 + 补贴)万元	1163.58	1425.05	1738.83
	固定资产总投资不含有氧系统万元	4600	4600	4600
	固定资产总投资含有氧气系统万元	4950	4950	4950
	固定资产残值	230	230	230
不同类型回收期	静态回收期(氢气)	7.88	5.36	3.87
	静态回收期(氢气 + 氧气)	7.02	5.06	3.78
	静态回收期(氢气 + 补贴)	5.36	4.06	3.14
	静态回收期(氢气 + 氧气 + 补贴)	5.06	3.95	3.13

统的经济性就越好, 这是因为制氢系统是波动运行的, 尽量多的用了弃风电量; 相反, 当氢气价格当然模型计算出来的氢气平衡价格点是要随着网电价格、制氢系统耗电效率、电解槽功率和风资源分布的变化而变化的, 其他风场的数据分析需要参考以上几种因素的具体变化。

氢气作为原料和能源两种形式同时存在, 其市场是不同的, 因此该平衡点价格是分析风电就地多元化应用的关键参数。比如煤化工使用的氢气价格要求比较低, 但是纯度要求不高, 燃料电池使用的氢气价格一般比较高, 其纯度要求也高。

当前风电波动条件下电解槽长周期运行并未有先例, 这会引起的电解槽性能下降[9] [10], 是本文模型假设中没有完全考虑的, 因此需要增加一定的折减系数之后才能用于实际经济模型评价。

由于电解制氢的单位电耗直接决定制氢成本, 因此研究和应用电解电耗尽可能低的电解槽技术是十分关键的。当前制氢电解槽技术主要有碱性电解槽、PEM 电解槽和高温固体氧化物电解槽。其中三者的技术成熟度依次降低, 但是制氢效率依次增加, 目前大型化应用主要以碱性电解槽为主, PEM 电解槽和

高温固体氧化物电解是下一代电解槽技术。虽然高温固体氧化物电解槽技术不成熟, 但电解制氢电耗最低, 其制氢成本基本与化石能源制氢成本相当, 是电解制氢最有潜力的技术, 值得我们长期持续关注和投入。

4. 行业关联性

当前国内合成氨工业主要是以煤和天然气为主, 风电制氢的纯度较高, 氢气在合成氨或尿素生产工艺后段加入, 可以提高生产产率和生产效率, 降低生产能耗, 节省煤或者天然气消耗, 减少碳排放, 减轻污水处理的压力。对于煤制甲醇工业, 采用电解制氢和氧气进行甲醇生产, 较传统工艺生产一吨甲醇大约可以节约 50% 的煤, 减少约 60% 的二氧化碳排放, 同时可以减少昂贵的空分装置和 CO 变换设备投资。低掺入比混合天然气可以直接用于家用燃气, 可以提高燃烧效率、降低燃料成本, 同时实现天然气资源的节约。此外, 高纯度氢气的需求场合也十分众多, 比如电子工业(半导体、太阳能等)、热电厂、食品加工业、精细化工等; 对于国内外都在大力发展的燃料电池汽车, 作为下一代新能源汽车, 风能制氢对于加氢站的氢气来源是十分关键的。

这些一方面促进可再生比重在整个能源体系中的提高, 同时根据不同地区的产业格局促进了电力就地消纳, 也丰富了能源的多样化。

参考文献 (References)

- [1] 中国国家能源局. 关于做好 2016 年度风电消纳工作有关要求的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/18/content_5055168.htm
- [2] 王业磊, 赵俊华, 文福拴, 等. 具有电转气功能的多能源系统的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 1-10.
- [3] 张健, 孙天宇, 王庆阳, 等. 对 Power-to-Gas 的环保性和经济性分析[J]. 资源节约与环保, 2015(4): 40-41.
- [4] 何铮. 以风电制氢替代干气, 煤制氢战略意义重大[J]. 中国石化, 2013(8): 32-34.
- [5] Gahleitner, G. (2013) Hydrogen from Renewable Electricity: An international Review of Power-to-Gas Pilot for Stationary Applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 2039-2061. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.010>
- [6] 李小琳. 加快发展电转气(P2G)技术[EB/OL]. <http://www.ocpe.com.cn/show-20079-lists-55.html>
- [7] Zhang, G.T. and Wan, X.H. (2014) A Wind-Hydrogen Energy Storage System Model for Massive Wind Energy Curtailment. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 1243-1252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.11.003>
- [8] Beccali, M., Brunone, S., Finocchiaro, P. and Galletto, J.M. (2013) Method for Size Optimisation of Large Wind-hydrogen Systems with High Penetration on Power Grids. *Applied Energy*, **102**, 534-544. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.037>
- [9] Bergen, A., Pitt, L., Rowe, A., Wild, P. and Djilali, N. (2009) Transient Electrolyser Response in a Renewable-Regenerative Energy System. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 64-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.007>
- [10] 张开悦, 刘伟华, 陈晖, 等. 碱性电解水析氢电极的研究进展[J]. 化工进展, 2015, 10(34): 3680-3778.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jlce@hanspub.org