

Optimal Analysis of Low-Carbon Power Infrastructure of Taiwan

Shyi-Min Lu

Energy Research Center, National Taiwan University, Taipei, Taiwan
Email: accklk@yahoo.com.tw

Received: Jan. 16th, 2013; revised: Jan. 20th, 2013; accepted: Mar. 2nd, 2013

Copyright © 2013 Shyi-Min Lu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The study assumes that CCS can be successfully applied on the coal-fired and gas-fired power generation in the future, then regardless of the existence of nuclear power, without the substantial expanding of renewables, and with the fossil fuel generation capacity close to the BAU scenario, the overall power and emission reduction objectives can be fully met, with the increase of power cost up to about 34%. This study concludes that CCS is the most economic and effective method for Taiwan to construct a low-carbon power infrastructure. However, the commercialization of CCS in the short-and-medium term is still a question, plus it is no doubt that Taiwan lacks fossil energy but reserves abundant resources of renewable energy. Even renewable energy cannot become power mainstream in the short-and-medium term, under the technology's progress and accumulation in the long-term, at end the renewables will overcome their shortcomings of power instability and partially high price. In the view angle of national energy security, the development of renewable energy is an indispensable ring of Taiwan energy policy.

Keywords: Carbon Capture and Storage (CCS); Power Infrastructure; Low Carbon Emission

台湾低碳电力结构优化分析

吕锡民

国立台湾大学能源研究中心, 台北, 台湾
Email: accklk@yahoo.com.tw

收稿日期: 2013 年 1 月 16 日; 修回日期: 2013 年 1 月 20 日; 录用日期: 2013 年 3 月 2 日

摘 要: 本研究假设 CCS 未来能成功应用在燃煤与燃气发电上之情景, 届时, 不管是否有废核, 在无须大幅扩充再生能源与核电, 并化石燃料发电容量接近 BAU 的情况下, 整体发电与减排目标皆能充分满足, 并且, 发电成本最多增加约 34%。本研究结论是: CCS 是台湾达成低碳电力结构最经济且最有效的方法。然而, CCS 短中期内能否商业化尚是一个疑问, 加上台湾缺乏化石能源, 而再生能源则蕴藏丰富, 不可讳言, 再生能源即使短中期内无法成为发电主流, 但是, 科技长期进步与累积, 终必克服其供电不稳定与价格偏高的缺点, 以能源安全角度来看, 再生能源的发展绝对是台湾能源政策上不可或缺的重要一环。

关键词: 碳捕捉与封存技术; 电力结构; 低碳排放

1. 台湾因应全球暖化之减排目标: 电力部门目标发电量与排碳量

台湾在 2010 年的人年均二氧化碳排放量是 11

吨。若需在 2030 年降至 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)之 B1 情境——全球人年均排放量 5 吨的标准, 则在 2010~2030 年间, 需将人年均排放

量减少 54.5%。根据经济部能源局于 2011 年所作预测, 台湾于 2010~2029 年之年平均供电量成长率为 2.8%, 2029 年所需之供电量将达到 3762.6 亿度。假设此年平均成长率不变, 则 2030 年所需之供电量将达到 3867.9 亿度。

上述供电预测可称为 BAU, 该规划考虑台湾未来经济成长率、产业结构占比、人口成长率、气温、电价、需求面管理、大型开发案或规划案、以及发电燃料价格等八项因素之外, 并考虑台湾在积极减排政策的推动下, 例如, 能源效率的提升、订定国家再生能源发展目标、扩大天然气等方案的纳入。

在 2030 年总供电量为 3867.9 亿度的情况下, 假设 2030 年全国人口为 23.3 百万人, 则每日之人均供电量为 45.5 度, 此处我们定义“供电量”为电厂“发电量”扣除电厂本身自用电力, 如果采用经济部能源局数据, 台湾于 2010 年能源部门自用电力百分比 8.09%, 则台湾于 2030 年的“总发电量”应该为 49.5 度/人日。

依据经济部能源局资料, 我国 2010 年排碳量为 254.4 Mt-CO₂, 在电力系数 0.612 kg-CO₂ 与发电量 247.0 TWh/y 的情况下, 台湾电力部门排碳量为 6.52 公吨二氧化碳/人年(人口数为 23.2 百万), 占全国温室气体排放比例为 59.4%, 本研究假设在 BAU 情境下, 此比例至 2030 年仍将维持不变, 则该年全国排碳量将有 40.6%属于无法以电力取代之杂项排碳。

如前所述, 若以人均排放量 5.0 公吨为台湾 2030 年的减排目标, 则相对于 2010 年的 11.0 公吨, 全国 CO₂ 排放量约需减少 54.5%。本研究合理地假设, 占有 40.6%排碳量的杂项排碳部门在全国各领域积极进行减排的情况下, 其排碳量于 2030 年同样也可减排 54.5%。因此 2030 年时, 此类无法以电力取代的杂项排碳源产生之人均排碳量将减为 $11.0 \times 40.6\% \times (1\% \sim 54.5\%) = 2.03$ 公吨。由此可得 2030 年电力部门人均排碳量之上限为 $5.0 - 2.03 = 2.97$ 公吨, 此即为本研究所设定之 2030 年目标发电排碳量。

2. 台湾现有电力结构与未来开发方案: The BAU Scenario

依据经济部能源局统计资料, 2010 年台湾传统能源发电装置容量为 43.05 GW, 占比 92.83%, 再生能

源发电装置容量为 3.31 GW, 占比 7.14%, 实际上再生能源的发电量仅占 3.37%。另外, 2010 年台湾能源部门二氧化碳总排放量为 167.32 Mt-CO₂, 占比 65.7%, 发电量 247,045 GWh, 能源部门是台湾目前主要温室气体排放部门, 主要原因是使用化石燃料(煤炭、天然气、石油)的火电厂发电量占比太高, 有 78.35%。

又依据经济部能源局参考文献, 我们依据 2010 年至 2025 年的年平均成长速率 11.2%, 预估再生能源在 2030 年的装置容量, 总共有 10.77 GW, 占比 14.16%, 显然台湾政府在未来电力结构规划方面, 已经在朝低碳电力方向进行。值得一提的是, 台湾目前有三座核能电厂在运作, 另有一座新的核电厂在建造当中, 预计在 2016 年以前完工加入营运, 此 2.7 GW 无碳电力的加入, 将对台湾低碳愿景做出卓越贡献, 但是由于 311 日本福岛核灾的发生, 政府决定不再延役旧有的核电厂, 因此, 2030 年的核电装置容量有所减少。至于化石燃料电厂在 2030 年的装置容量, 则是以经济部能源局从 2010 年至 2029 年的长期负载预测与电源开发规划摘要报告中的年平均成长率 2.8% 来预测, 连同核电装置容量, 总共有 65.31 GW, 占比 85.84%。

3. 各种发电技术之特色分析

请参考表 1, 我们针对各式发电技术的排放量、可用率、发电成本与净尖峰出力等参数, 分析其特色与优缺点, 以作为本研究规划台湾未来低碳电力结构之依据。

3.1. 排放量

各式发电技术之碳排放计算方法, 系采用符合 ISO 14000 标准的“生命周期评估法(Life Cycle Assessment, LCA)”, 或称“摇篮至坟墓法(Cradle to Grave)”, 计算时考虑各能源材料在整个制造链, 从原物料开采、提炼、处理、运输等过程, 到最终使用运转、维修、及除役等过程中消耗或产生能源时, 所产生之温室气体排放量。

太阳光电、海洋能发电、水力发电、风力发电等再生能源虽在发电过程中不产生温室气体, 但在制造涡轮机、太阳能板等之过程中仍会释放少量温室

Table 1. The emissions coefficients, capacity factors, generating costs, net peak load factors and scenarios-selecting criteria of each kind of power plants

表 1. 各种发电厂之排放系数、可用率、发电成本、净尖峰出力参数与情景数据选择依据

项次	电厂种类	A	B	C	D	情景选取依据(Priority)
		电力排放系数 (kg-CO ₂ /kWh)	容量因子	发电成本 (NTD/kWh)	净尖峰出力参数	(容量因子) × (净尖峰出力参数) ÷ (电力 排放系数) ÷ (发电成本) = (B × D ÷ A ÷ C)
1	燃煤	0.839	0.78	1.28	0.94	0.68
2	燃煤 + CCS	0.125	0.66	1.8	0.80	2.35
3	燃气	0.389	0.65	1.57	0.98	1.04
4	燃气 + CCS	0.250	0.55	2.2	0.83	0.83
5	燃油	0.778	0.26	1.42	0.9	0.21
6	核电	0.066	0.92	1.7	0.94	7.71
7	水力	0.0115	0.37	2.539	0.7	8.87
8	风电	0.010	0.3	1.75	0.06	1.03
9	PV	0.032	0.15	4.3	0.2	0.22
10	生质能发电	0.018	0.57	2.3	0.5	6.88
11	废弃物发电	0.341	0.52	2.0	0.8	0.61
12	地热发电	0.038	0.9	1.8	0.5	6.58
13	燃料电池	0.664	0.9	2.7	0.85	0.43
14	海洋能发电	0.0375	0.3	3.981	0.85	1.71

数据源: [1-9]。

气体, 因此只能视为低碳能源, 核电的情况也是大致如此。传统燃煤、气、油之电厂在发电过程中会产生大量之温室气体, 但是配合碳捕捉与封存技术, 将使发电排碳量大幅降低。但是 CCS 技术将使发电效率降低 10%~25%, 并导致发电成本增加 20%~85%。本研究假设台湾的火力发电因使用 CCS 技术将使发电效率降低 15%, 导致发电成本则增加 40%。

3.2. 容量因子

此处电厂的容量因子之定义为: 一段时间内, 实际发电量与理论最大发电量的比值。例如, 表 1 当中所列的燃煤、气、油与核电之各个容量因子之计算, 系依据经济部能源局统计数据所记载 2010 年各类电厂之总发电量(GWh)除以理论最大发电量(总装置容量(GW)乘以一年小时数 8760)而得。因此, 可用率较高的电厂表示一年当中, 其实际供电的时间较长。电厂可用率的高低除了影响到发电量大小之外, 更将影响到电厂的发电成本, 一般而言, 单位发电成本是以各类成本总和除以发电量来计算, 所以发电量愈大, 往往发电成本愈低。

3.3. 发电成本

一般电厂的发电成本可分为内部成本与外部成

本, 前者包括建厂、燃料与营运成本, 后者包括影响环境的社会成本。由于本研究已将排碳量列为形成电力结构标竿之一, 所以此处的发电成本系指内部成本, 主要系依据英国 Markal 模型电力部门的数据库估算而得。该模型早在 20 世纪 70 年代即由 Brookhaven National Laboratory 开始发展, 之后再由国际能源署(International Energy Agency, IEA)架构下之能源技术系统分析研究计划(Energy Technology Systems Analysis Program, ETSAP)接手, 以大约 20 年时间发展出来之一长期性、多期性之各种能源系统优化模型。

3.4. 备用容量率

在一年之中, 发电量之需求并非一固定值。以台湾为例, 用电之高峰发生于夏季七月。因此, 规划全国发电结构时, 除了发电系统之全年总发电量能力需满足该年总发电量需求之预测值之外, 发电系统于全年用电需求之最高峰时, 其最大总发电量“净尖峰能力”尚须满足该尖峰用电期间所需发电量“尖峰负载”之预测值。

为避免于尖峰用电期间发生不可预期之用电需求增加, 或发电机组故障而导致“净尖峰能力”低于“尖峰负载”而造成限电或跳电的危机, 各国政府皆要求电力系统之“净尖峰能力”需大于“尖峰负载”

达一定比例以上，此比例称为“备用容量率”。台湾行政院于 2005 年 10 月 5 日第 2960 次院会中通过政策指示，以 16% 作为电力系统“备用容量率”之规划目标。“备用容量率”之计算方式为“净尖峰能力”减去“尖峰负载”后，再除以“尖峰负载”。公、民营电厂与汽电共生系统之贡献皆包含在内。

各发电机组在正常发电情况下，可提供给系统之最大出力，称为“净尖峰能力”。“净尖峰能力”之计算可由发电设施之“装置容量”与“净尖峰出力参数”相乘而得。各电厂之“净尖峰出力参数”如表 1 所示。很显然地，传统电厂具有较高的净尖峰出力参数，这表示其供电据有很高的稳定性，因此可当作主要基载电力。相对地，能源供应不稳定的再生能源，尤其是风电，即使在发电成本已赶上传统电力，但由于尖峰负载能力差，因此在整体电力结构当中无法成为供电主流。

4. 成本优化低碳电力组合

本研究所规划成本优化低碳电力结构情景，详如表 2 所示。其中构成各情景的发电设施包括了所有各类型电厂：有传统的燃煤、气、油、核电，以及再生能源的水力、风力、太阳能、生质能、废弃物能、地热、燃料电池、海洋能等共 12 种。其中，CCS 仅实施在燃煤与燃气发电，虽然核电是一种低碳能源，但在国际一片反核声浪当中，我们不得不将核能装置容量设为零。因此，针对有 CCS 和无核电此两大原则，在满足总发电量需求、人年排碳量与备用容量率三大要求下，求取最低发电成本下的各情景之电力结构。

4.1. 构成各情景的电力结构选取方法

如表 1 所示，并且，依据各参数数值的正向与负向影响，整理出最后一行各类发电的选取权重。详细说明，在四大容量选取参数当中，排放系数与发电成本系为负向参数，其数值越小越好，所以在构成权重中系放在分母。至于可用率与净尖峰出力参数则属于正面影响参数，亦即，其等数值越大，则越有利于发电量与备用容量率等最低标准的达成。表 1 最后一行的权重高低，将为本研究表 2 之规划情景中的各项构成电力结构之选取依据。

当然，要构成一情景，先决条件是必须满足发电

量、排碳量、备用容量率之最低标准，最后的选取要素为最低之发电成本。基本上，本研究系使用微软 Excel 软件包内的“规划求解”加载宏，其主要精神在于应用线性规划求取最佳解。

最后，是该情景的可行性判断，因此我们将各类电厂的情景装置容量与其等 BAU 容量之相对倍数数值列出来，如果高出 BAU 甚多者，则可行性相对地降低。请参考表 2 之表头所示。

4.2. 2030 年 BAU 情境分析

请参考表 2，经过 Excel 试算结果，2030 年 BAU 总发电量 51.07 度/人日的确符合第一节所设定的 49.50 度/人日发电量需求标准，但是该年人年排碳量高达 10.84 ton-CO₂，是 2010 年电力部门人年排碳量 6.49 ton-CO₂ 的 1.67 倍，是 2025 年永续能源政策纲领目标 5.76 ton-CO₂/py 的 1.88 倍，是 IPCC 排碳标准 2.97 ton-CO₂/py 的 3.65 倍。在 2030 年 BAU 情境，所开发的再生能源仅为总潜力的 3.12%，所以发电成本与 2010 年比较几乎没有增加，虽然备用容量率为 9.43%，但这应该不是问题，化石能源发电适度增加即可克服，问题在于人年排碳量，实在太高了。

4.3. 有 CCS 零核能情景分析

请参考表 2 最后一栏，假设 CCS 能顺利运用于化石燃料电厂，在挑战严峻的 2030 年 IPCC 标准且有 CCS 且无核电的情景当中，CCS 化石电厂仍然保 BAU 水平(约 1.2 倍)，而再生能源电厂仅需略微扩充 BAU 的 1.1 倍，在发电成本比 2010 年增加 35.57% 的情况下，即可满足台湾所需发电量与 IPCC 排碳标准。

由本小节的情景分析可知：虽然 CCS 化石燃料电厂排碳量比再生能源电厂略高，但是前者发电成本低且供电稳定，可进而替代核能成为主要低碳电力。

5. 结论与建议

如果 CCS 能成功应用在燃煤与燃气发电，在无核电、较大幅度扩充再生能源的情况下，国内与国际减排目标与发电需求皆能充分满足，而发电成本也不会作太大幅度的增加。另外，2010 年台湾的温室气体排放量约为 2.54 亿吨，而能源部门则为 1.67 亿吨，依据“能源国家型科技计划(NSTPE)”“净煤碳捕捉储存

Table 2. The low-carbon power infrastructure planned for future Taiwan
表 2. 台湾未来低碳电力结构规划

各类情景		2010 年	2030 年 BAU	再生能源潜力全面发展	2030 有 CCS、无核电情景: 2.1 倍 再生能源、1.2 倍 CCS 化石能源
发电设 施种类 及装置 容量 (GW)	燃煤	18.01	31.30	-	0.00
	燃煤 + CCS	-	-	-	44.50
	燃气	15.72	27.30	-	0.00
	燃气 + CCS	-	-	-	26.80
	燃油	4.19	2.43	-	0.00
	核电	5.14	2.70	-	0.00
	水力	1.98	2.67	43.49	11.00
	风电	0.48	3.11	95.51	4.00
	太阳光电	0.02	2.66	155.06	3.00
	生质能发电	0.18	0.34	3.06	1.50
	废弃物发电	0.65	1.25	0.00	1.25
	地热	0.00	0.20	0.71	0.75
	燃料电池	0.00	0.27	0.00	0.00
	海洋能发电	0.00	0.27	14.60	1.00
	总发电量(度/人日)	32.77	51.07	78.02	54.58
比较 参数	台电长期负载预测与电源开发规划 下的 2030 年发电量(度/人日)			49.50	
	人年排碳量(ton-CO ₂)	6.50	10.84	1.47	2.93
	IPCC 规划下的 2030 年标准排碳标准 (公吨二氧化碳/人年)			2.73	
	再生能源潜力占比(%)	1.10	3.12	100.00	8.49
	发电成本增加比(%)	0.00	0.60	92.35	35.57
	备用容量率(%)	19.35	9.43	36.71*	16.37

*: 2030 年。

主轴计划”评估：台湾地质储碳潜力有 100 亿吨，因此，台湾的储碳潜力充分足够满足本文所述的 CCS 所需的储碳容量。本研究建议 CCS 是台湾建构低碳电力结构的可行与有效方法。

参考文献 (References)

- [1] D. Anderson. Costs and finance of abating carbon emissions in the energy sector, 2006.
http://www.hm-treasury.gov.uk/d/stern_review_supporting_technical_material_dennis_anderson_231006.pdf
- [2] Parliamentary Office of Science and Technology. Carbon footprint of electricity generation, 2006.
<http://www.parliament.uk/documents/post/postpn268.pdf>
- [3] B. K. Sovacool. Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. Energy Policy, 2008, 36(8): 2940-2953.
- [4] R. Kannan, N. Strachan, S. Pye, G. Anandarajah and N. B. Ozkan. UK MARKAL model: Chapter 5, electricity and heat generation (and appendix), 2007. <http://www.ukerc.ac.uk>
- [5] 吕锡民. 我国未来的能源结构[J]. 科学发展月刊, 2011, 463(7): 66-71.
- [6] G. Kumbaroglu, R. Madlener, M. Demirel, et al. A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies. Energy Economics, 2008, 30(4): 1882-1908.
- [7] D. Hogg. A changing climate for energy from waste? Final Report for Friends of the Earth, 2006.
http://www.foe.co.uk/resource/reports/changing_climate.pdf
- [8] REN21. Renewables 2007 Global Status Report, 2008.
<http://www.worldwatch.org/files/pdf/renewables2007.pdf>
- [9] NABH Research Center. Fuel cells-converts the energy of hydrogen into electrical energy without the need for combustion, 2012. <http://www.toolbase.org/Technology-Inventory/Electrical-Electronics/chp-fuel-cell>