

NEA 「核能與再生能源在低碳電力系統之影響」重點簡析

韓佳佑、陳中舜、葛復光

核能研究所-能源經濟及策略研究中心

2013/10

為因應全球再生能源發電占比越來越高，電網強化與維持系統穩定的投資成本亦越漸受到各國的重視。OECD 核能總署(NEA)於 2012 年針對再生能源與電網整合議題發表了一份重要的報告：Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems [1]，其中特別說明了不同電力形式對電力系統之架構、資金調度及運轉模式的影響。本篇研究主要以芬蘭、法國、德國、韓國¹、英國及美國等六國之電力系統為例，對於風力及太陽能等再生能源大量併入電網後，探討傳輸及配電系統的短期供需平衡與長期所須增加的成本。

然而透過各國電網相關資料的蒐集可發覺，其內容通常僅能呈現個別國家於特定技術條件及再生能源滲透率(Penetration Level)下的成本資料，且不同研究結果所得成本估測之變化相當大，也間接證實了電網在併入再生能源後，量化成本的取得有相當的困難及不確定性。考慮電力系統在併入不同滲透率之再生能源後，其供電總成本的增加將來自於廠級成本(Plant-level cost)²與電網級系統成本(Grid-level system cost)³，兩者間之關係如圖 2-2-1 所示，各國於不同發電技術下

¹需注意的是由於缺乏韓國之系統成本資料，故有關韓國的平衡成本(Balancing Cost)及容量貢獻度(Capacity Credit)是取自於英國，當然有關韓國的廠級成本評估及其電力系統架構則根據韓國國內資料。

²廠級成本表示發電技術於其經濟使用年限內，平均每度電的發電成本。

³電網級系統成本可廣義分為二大類：(1) 電網相關成本，即電力傳輸及配電的額外投資成本，如電網連接(Grid Connection)、強化與延伸(Reinforcement and Extension)成本；(2) 供應與需求平衡成本，即維持供電與負載需求平衡所需的成本，如備用成本(Back-up Costs (adequacy))及平衡成本(Balancing Costs)。

之廠級成本如表 2-2-1 所列。有關再生能源併入系統後，取代傳統電廠部分輸出，對總供電成本的影響如表 2-2-2 所列。以下就以風電及 PV 發電來說明：相較於參考系統(未併聯再生能源系統)，當滲透率為 30% 時，陸域風廠造成電網供電成本平均增加 11%，離岸風廠平均增加 13%，PV 電廠增加 17%，而滲透率為 10% 時增加的供電成本約為 30% 時的 1/4，因此當再生能源高滲透率時，將造成供電成本大幅提升。

表 2-2-3 則為各國於不同再生能源滲透率時，在不考慮再生能源併入電網對傳統電廠燃料及其它可變成本的效益時電網級系統成本的預估結果，其包含有：備用成本(Back-up Costs (adequacy))、平衡成本(Balancing Costs)⁴、電網連接(Grid Connection)成本及電網強化與延伸(Grid Reinforcement and Extension)成本。針對風力發電備用成本來看，其與容量貢獻度(Capacity Credit)⁵及負載因數(Load Factor)有關，以法、德及芬蘭為例，風力發電容量貢獻度約介於 6% 至 15%，美國及英國由於風力機組負載因數較高，故容量貢獻度介於 12% 至 40%(如表 2-2-4 所列[2])，其中離岸風廠因負載因數較高，故容量貢獻度較大。

當風力發電滲透率達 30% 時，一般國家所估測的平衡成本介於 5.3 至 6.41 美元/MWh，且隨滲透率增加而提升，然由於目前英國及韓國電網屬於孤立系統(與我國類似)，預估其在風電併入後之平衡成本將達到 14.15 美元/MWh。

⁴平衡成本：為確保短時間內電網供需平衡及電力系統的穩定度與可靠度，傳輸系統經營者(TSO)所必須承擔的額外成本。

⁵容量貢獻度：對於另外併入的發電機，在維持系統的可靠度下，於尖載期間所能額外提供的電力。容量貢獻度一般是以電廠標稱容量(Nominal Capacity)的比例估測。

離岸風廠之連接成本與其至岸上距離有關，英國與德國分別估計為電廠投資成本的 20% 及 15%；在陸域風廠方面，英國評估連接成本至多僅須電廠投資成本的 5%，然其它國家則評估為 8%。

有關電網在額外併入風電後所需之強化及增設成本，可視為傳輸電網的額外投資成本，美國與韓國皆假設於不同滲透率下有相同的強化與增設成本，分別為美金 53 元/kW 及美金 77.1 元/kW，其它歐洲國家因電網架構及地理環境而異，有相當大的變化範圍，在風電 10% 滲透率下，電網強化成本介於美金 5.4 元/kW(芬蘭)至美金 87.3 元/kW(英國)，而在 30% 滲透率下，電網強化成本介於美金 47.3 元/kW(芬蘭)至美金 540 元/kW(德國)。

再考慮有關太陽光電(PV)的部分，目前僅美國有直接計算 PV 發電之容量貢獻度，其假設在有大量地面裝置下的容量貢獻度介於 11% 至 27%，此間接反映出高負載因數，並且與美國西南部於尖峰負載期間有良好一致性，故美國 PV 可大幅減少備用機組的容量設置；其他歐洲國家則是參考法國數據，在 NEA 模型推估中之容量貢獻度皆小於 0.5%，主因於其尖峰負載是發生在冬令傍晚，實非 PV 操作的最佳時機，導致需要大量的備載機組作為替代。另目前尚無 PV 發電之平衡成本估測，本文則直接引用風電系統所得數據，而 PV 電廠之連接成本是假設為電廠投資成本的 5%。由上所述可知，本文所列 PV 電廠相關電網級成本估計，目前尚未完整，僅供參考。

綜合比較來看，就離岸風電而言，電網連接成本占比最高，而在 PV 方面則

是以備用成本影響最大。歐洲國家的 PV 備用成本顯著高於風電的電網級系統中之各項成本，但在美國及韓國的 PV 備用成本(於滲透率 10% 時，美國的 PV 備用成本為零，韓國則為 9.21 美元/MWh)皆小於離岸風電的電網連接成本，導致韓國與美國的 PV 總電網級系統成本(Total grid-level system costs)未高於離岸風電系統(此點不同於其它歐洲國家)，原因除了歐洲與美國的 PV 容量貢獻度相差甚大外，在韓國方面，其各類傳統能源固定成本皆顯著低於其它國家(如表 2-2-5 所示)；變動成本方面雖然燃料成本較高，但卻享有運維方面的價格優勢，因此低廉的固定成本是導致韓國有較低 PV 備用成本的主因。

若以台灣環境考量，由於台電評估 PV 淨尖峰能力為裝置容量的 20%，與加州條件類似，未來 PV 電網級系統成本是否有可能低於離岸風電，將是值得持續觀察的一個重點。

整體而言，如圖 2-2-2 所示，為英國境內不同發電技術之廠級與電網級系統成本比較，由該圖可知再生能源之廠級成本高於傳統可調度機組，雖然廠級成本會隨再生能源之製程技術進步而下降，然而若考慮與電網整合所需之成本，未來再生能源發電技術所須的供電總成本仍高於核能、燃煤及燃氣等傳統可調度機組。

大量再生能源併入系統後，傳統可調度機組的最低成本發電組合可由剩餘負載曲線(Residual Load Curve)決定，如圖 2-2-3 中右下角之灰色曲線。圖中右上角三條垂直線分別表示有兩項最低發電成本技術之損益平衡點(Breakeven Point)存

在，當運轉時間超過 7,000 小時，核能機組有最低發電成本；在 4,380 至 7,000 小時，燃煤機組發電成本最低；1,410 至 4,380 小時為燃氣複循環(CCGT)⁶機組，而低於 1,410 小時則為燃氣(OCGT)⁷機組。三條垂直線與年負載曲線(圖 2-2-3 中右下角之黑色曲線)之交點，構成在未併入再生能源時各種可調度機組的最低發電成本組合，而與剩餘負載曲線之交點則表示再生能源併入後，傳統可調度機組之最低發電成本組合。結果顯示再生能源併入電網後，基載(核能)機組出力減少，中載(燃煤及燃氣 CCGT)機組出力略為增加，尖載(燃氣 OCGT)機組出力增加最明顯，而再生能源技術之容量貢獻度亦提供系統尖載時之額外需求(如圖 2-2-3 中左下角中間長條圖最上方之淺灰色區域)。此除了對傳統機組運轉產生壓縮效應(Compression Effect)，由於較低發電成本之基載(核能)機組出力減少，取而代之的是較高發電成本之中載及尖載機組出力增加，造成電網整體發電成本提升。以台灣 2012 年各類電廠成本來看，若擴大再生能源用量，而減少有最低發電成本(NT0.68/kWh)的核能發電占比，並改以高成本的 LNG 中、尖載機組(分別為 NT3.2/kWh 及 NT4.7/kWh)作為搭配，可能較不利於長期供電成本之穩定。

再生能源併網之成本與國家電力發展需求、能源情勢及電力政策等因素有關。就台灣風力發展而言，目前陸域風力開發已趨飽和，未來勢必將以離岸風廠為發展主軸。然而根據本報告之結果，離岸風廠所需的電網連接成本相較於陸域風廠高出許多，且隨著風電滲透率之提升，平衡成本及備用成本亦相對增加，故風電

⁶Combined Cycle Gas Turbine (CCGT)

⁷Open Cycle Gas Turbine (OCGT)

併網所產生的總電網級系統成本，未來於離岸風廠規劃時亦必須納入考慮。在 PV 發電方面，主要因備用成本過高，導致其總電網級系統成本遠高於風電系統，此與 PV 容量貢獻度及裝設地點有關，而 PV 電廠的供電總成本亦大於風電系統，故未來若要降低 PV 電廠整體的供電成本，相較於風電系統，需更周延考慮各種影響併網成本之因素。

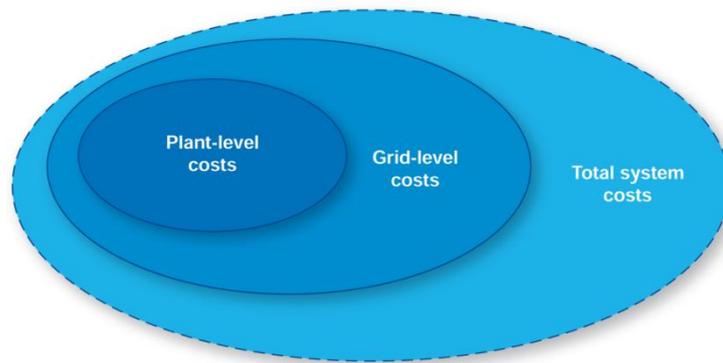


圖 2-2-1 廠級、電網級及總系統成本間之關係

表 2-2-1 OECD 各國於不同發電技術時之廠級成本(美元/MWh)

	Plant-level costs (USD/MWh)					
	Nuclear	Coal	Gas	Onshore wind	Offshore wind	Solar
Finland	73.8	71.6	88.1	111.0	158.4	488.3
France	72.2	85.7	87.3	110.8	143.2	413.4
Germany	67.8	85.7	87.3	119.5	158.4	249.3
Republic of Korea	42.3	69.4	92.3	111.0	174.2	222.3
United Kingdom	86.0	94.3	105.7	113.4	137.4	363.7
United States	63.6	75.5	74.3	93.2	114.2	214.9

表 2-2-2 再生能源不同滲透率時之供電總成本(美元/MWh)

Total cost of electricity supply (USD/MWh)								
		Reference	10% penetration level			30% penetration level		
		Conv. mix	Wind onshore	Wind offshore	Solar	Wind onshore	Wind offshore	Solar
Finland	Total cost of electricity supply	75.9	81.2	86.5	121.8	93.5	109.0	215.9
	Increase in plant-level cost	-	3.5	8.2	41.2	10.5	24.7	123.7
	Grid-level system costs	-	1.8	2.3	4.7	7.1	8.3	16.3
	Cost increase	-	5.3	10.6	45.9	17.6	33.1	140.0
France	Total cost of electricity supply	73.7	79.5	82.9	112.0	92.1	102.5	189.6
	Increase in plant-level cost	-	3.7	6.9	34.0	11.1	20.8	101.9
	Grid-level system costs	-	2.0	2.3	4.3	7.2	7.9	14.0
	Cost increase	-	5.8	9.2	38.3	18.3	28.8	115.9
Germany	Total cost of electricity supply	80.7	86.6	91.3	101.2	105.5	116.9	156.2
	Increase in plant-level cost	-	3.9	7.8	16.9	11.6	23.3	50.6
	Grid-level system costs	-	1.9	2.8	3.6	13.2	12.9	24.9
	Cost increase	-	5.8	10.6	20.4	24.8	36.2	75.4
Rep. of Korea	Total cost of electricity supply	63.8	70.5	77.4	82.8	86.3	107.1	122.8
	Increase in plant-level cost	-	4.7	11.0	15.8	14.1	33.1	47.5
	Grid-level system costs	-	2.0	2.6	3.1	8.4	10.2	11.4
	Cost increase	-	6.7	13.6	19.0	22.5	43.3	59.0
United Kingdom	Total cost of electricity supply	98.3	101.7	105.6	130.6	111.9	123.6	199.4
	Increase in plant-level cost	-	1.5	3.9	26.5	4.5	11.7	79.6
	Grid-level system costs	-	1.9	3.4	5.8	9.1	13.6	21.5
	Cost increase	-	3.4	7.3	32.3	13.6	25.3	101.1
United States	Total cost of electricity supply	72.4	76.1	78.0	88.2	84.6	91.5	123.7
	Increase in plant-level cost	-	2.1	4.2	14.3	6.2	12.5	42.8
	Grid-level system costs	-	1.6	1.4	1.5	6.0	6.5	8.5
	Cost increase	-	3.7	5.6	15.7	12.2	19.1	51.2

註：參考系統為傳統可調度技術(燃氣複循環、燃煤及核能)之混成發電。

Conv. mix = Conventional mix

表 2-2-3 OECD 六國之電網級系統成本(美元/MWh)

Finland												
Technology	Nuclear		Coal		Gas		Onshore wind		Offshore wind		Solar	
	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
Penetration level												
Back-up costs (adequacy)	0.00	0.00	0.06	0.06	0.00	0.00	8.05	9.70	9.68	10.67	21.40	22.04
Balancing costs	0.47	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	2.70	5.30	2.70	5.30	2.70	5.30
Grid connection	1.90	1.90	1.04	1.04	0.56	0.56	6.84	6.84	18.86	18.86	22.02	22.02
Grid reinforcement and extension	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	1.72	0.12	1.04	0.56	4.87
Total grid-level system costs	2.37	2.20	1.10	1.10	0.56	0.56	17.79	23.56	31.36	35.87	46.67	54.22
France												
Technology	Nuclear		Coal		Gas		Onshore wind		Offshore wind		Solar	
	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
Penetration level												
Back-up costs (adequacy)	0.00	0.00	0.08	0.08	0.00	0.00	8.14	8.67	8.14	8.67	19.40	19.81
Balancing costs	0.28	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	1.90	5.01	1.90	5.01	1.90	5.01
Grid connection	1.78	1.78	0.93	0.93	0.54	0.54	6.93	6.93	18.64	18.64	15.97	15.97
Grid reinforcement and extension	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.50	3.50	2.15	2.15	5.77	5.77
Total grid-level system costs	2.07	2.05	1.01	1.01	0.54	0.54	20.47	24.10	30.83	34.47	43.03	46.55
Germany												
Technology	Nuclear		Coal		Gas		Onshore wind		Offshore wind		Solar	
	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
Penetration level												
Back-up costs (adequacy)	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	7.96	8.84	7.96	8.84	19.22	19.71
Balancing costs	0.52	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	3.30	6.41	3.30	6.41	3.30	6.41
Grid connection	1.90	1.90	0.93	0.93	0.54	0.54	6.37	6.37	15.71	15.71	9.44	9.44
Grid reinforcement and extension	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.73	22.23	0.92	11.89	3.69	47.40
Total grid-level system costs	2.42	2.25	0.97	0.97	0.54	0.54	19.36	43.85	27.90	42.85	35.64	82.95
Republic of Korea												
Technology	Nuclear		Coal		Gas		Onshore wind		Offshore wind		Solar	
	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
Penetration level												
Back-up costs (adequacy)	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	2.36	4.04	2.36	4.04	9.21	9.40
Balancing costs	0.88	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	7.63	14.15	7.63	14.15	7.63	14.15
Grid connection	0.87	0.87	0.44	0.44	0.34	0.34	6.84	6.84	23.85	23.85	9.24	9.24
Grid reinforcement and extension	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.81	2.81	2.15	2.15	5.33	5.33
Total grid-level system costs	1.74	1.40	0.46	0.46	0.34	0.34	19.64	27.84	35.99	44.19	31.42	38.12
United Kingdom												
Technology	Nuclear		Coal		Gas		Onshore wind		Offshore wind		Solar	
	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
Penetration level												
Back-up costs (adequacy)	0.00	0.00	0.06	0.06	0.00	0.00	4.05	6.92	4.05	6.92	26.08	26.82
Balancing costs	0.88	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	7.63	14.15	7.63	14.15	7.63	14.15
Grid connection	2.23	2.23	1.27	1.27	0.56	0.56	3.96	3.96	19.81	19.81	15.55	15.55
Grid reinforcement and extension	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.95	5.20	2.57	4.52	8.62	15.18
Total grid-level system costs	3.10	2.76	1.34	1.34	0.56	0.56	18.60	30.23	34.05	45.39	57.89	71.71
United States												
Technology	Nuclear		Coal		Gas		Onshore wind		Offshore wind		Solar	
	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
Penetration level												
Back-up costs (adequacy)	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	5.61	6.14	2.10	6.85	0.00	10.45
Balancing costs	0.16	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	5.00	2.00	5.00	2.00	5.00
Grid connection	1.56	1.56	1.03	1.03	0.51	0.51	6.50	6.50	15.24	15.24	10.05	10.05
Grid reinforcement and extension	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.20	2.20	1.18	1.18	2.77	2.77
Total grid-level system costs	1.72	1.67	1.07	1.07	0.51	0.51	16.30	19.84	20.51	28.26	14.82	28.27

表 2-2-4 OECD 六國之容量貢獻度(%)⁸

	滲透率(%)	芬蘭	法國	德國	韓國	英國	美國	台灣 ⁹
陸域風廠	10	10	7	8	20	22	13	6
	30	6	6	6	14	15	12	
離岸風廠	10	10	11	15	27	30	40	N/a
	30	6	10	11	18	20	20	
PV 電廠	10	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	27	20
	30	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	11	

表 2-2-5 OECD 六國不同發電技術之成本

⁸由於風電系統滲透率越大，其與電力系統間的相互關係越大，故容量貢獻度隨風能滲透率之增加而下降。

⁹台灣目前尚未建置離岸風廠，且亦未區分不同滲透率時之容量貢獻度。

		Plant data			Fixed costs	Variable costs	
		Net capacity (MW)	Electrical conversion (%)	Load factor (%)	Total overnight costs (USD/kW)	Fuel (USD/MWh)	O&M (USD/MWh)
Finland	Nuclear	1 400	33	85	4 101.5	9.3	14.7
	Coal	750	41	85	2 133.5	18.2	6.0
	Gas	480	57	85	1 069.0	61.2	4.5
	Wind onshore	45	100	26	2 348.6	0.0	21.9
	Wind offshore	300	100	43	4 893.0	0.0	46.3
	Solar	1	100	9	4 273.5	0.0	30.0
France	Nuclear	1 630	33	85	3 860.0	9.3	16.0
	Coal	800	46	85	1 904.0	28.2	12.7
	Gas	800	60	85	1 025.0	58.6	6.7
	Wind onshore	45	100	21	1 912.0	0.0	20.6
	Wind offshore	120	100	34	3 824.0	0.0	32.4
	Solar	10	100	13	4 273.5	0.0	81.0
Germany	Nuclear	1 600	33	85	4 102.0	9.3	8.8
	Coal	800	46	85	1 904.0	28.2	12.7
	Gas	800	60	85	1 025.0	58.6	6.7
	Wind onshore	3	100	23	1 934.0	0.0	36.6
	Wind offshore	300	100	43	4 893.0	0.0	46.3
	Solar	1	100	11	2 150.0	0.0	52.9
Republic of Korea	Nuclear	954	33	85	1 876.0	7.9	10.4
	Coal	767	41	85	895.0	31.5	4.3
	Gas	495	57	85	643.0	69.8	4.8
	Wind onshore	45	100	26	2 348.6	0.0	21.9
	Wind offshore	1	100	34	4 893.0	0.0	32.4
	Solar	1	100	14	2 673.0	0.0	30.0
United Kingdom	Nuclear	1 100	33	85	4 816.9	11.1	16.9
	Coal	1 600	44	85	2 611.9	30.7	10.9
	Gas	850	58	85	1 063.6	77.3	6.0
	Wind onshore	100	100	28	2 344.1	0.0	30.9
	Wind offshore	400	100	38	4 052.9	0.0	32.2
	Solar	1	100	10	3 150.0	0.0	39.9
United States	Nuclear	1 350	33	85	3 382.0	9.3	12.9
	Coal	600	39	85	2 108.0	19.6	8.8
	Gas	400	54	85	969.0	49.3	3.6
	Wind onshore	150	100	23	1 973.0	0.0	8.6
	Wind offshore	300	100	43	3 953.0	0.0	23.6
	Solar	5	100	18	3 877.5	0.0	5.7

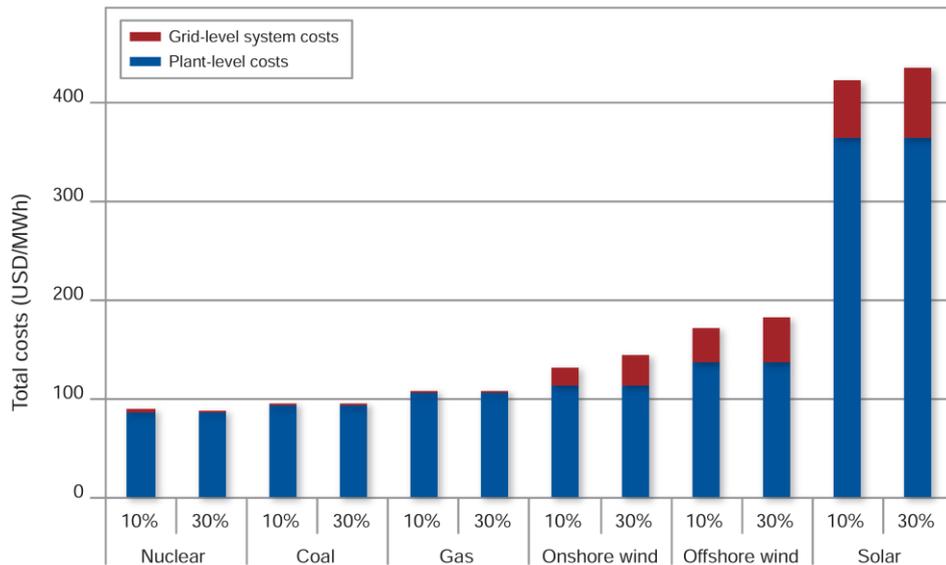
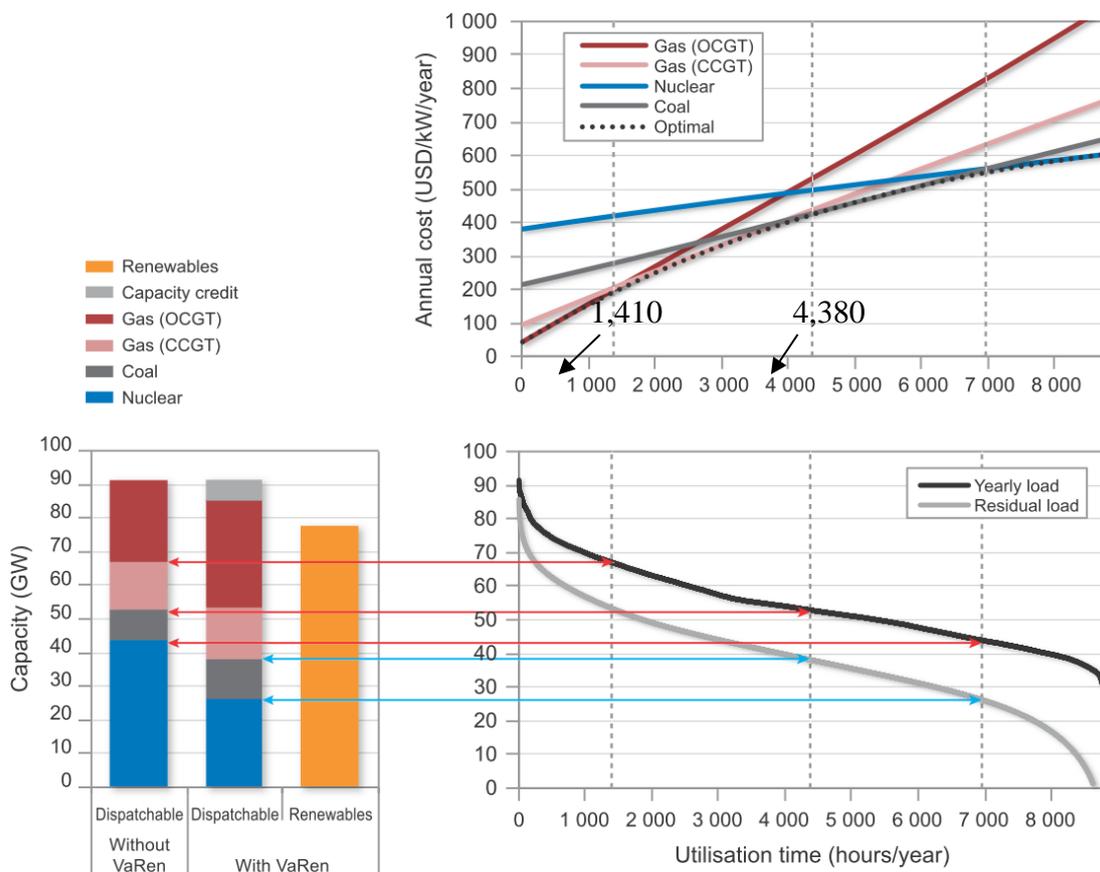


圖 2-2-2 英國境內不同發電技術之廠級與電網級系統成本



Note: "VaRen" means variable renewables.

圖 2-2-3 有無變動再生能源併入電網的最適發電結構¹⁰

參考文獻

1. Nuclear Energy and Renewables – System Effects in Low-carbon Electricity Systems, Nuclear Energy Agency, 2012.
2. 101 年長期電源開發方案，台灣電力公司 電源開發處 民國 101 年 12 月。

¹⁰負載曲線是由法國運輸系統經營者(RTE)提供