

南非 IRP 報告分析

吳東諺 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組，副工程師

自巴黎協定通過後，為考量環保因素對於能源規劃所造成之影響，各國開始大量以 IRP 分析未來 10 至 20 年之能源規劃路徑，IRP 為一評估長期能源規劃的方法，除以最小化成本為目標外，還須滿足多種能源相關目標，如電力系統可靠度、碳排放量、空汙排放量等，而傳統能源規劃多僅以滿足電網之負載需求為主要目標。本文將以南非作為 IRP 之研究對象，先分析該國針對 IRP 之流程與法規制度進行介紹，再分析南非如何針對 IRP 之主要構成項目進行建模，包括目標設定、負載預測、電力資源選項調查、情境制定與資源組合。

一、流程與制度

南非自 2010 年起開始以 IRP(Integrated Resource Planning)之方式進行 2010 至 2030 的長期能源規劃，其新設發電機組須根據 IRP 報告之未來能源規劃進行建置，且在 Electricity Regulations on New Generation Capacity 中規範 IRP 開發的流程須涵蓋以下內容：

1. 能源規劃假設的選擇
2. 決定負載預測
3. 根據能源規劃假設建置模型及不確定性情境
4. 根據最小成本的機組投資需求制訂基礎能源規劃方案
5. 考量基礎能源規劃方案之風險，包含最有可能發生的情境及能源多元化的政策需求
6. 批准及公告 IRP 能源規劃

2010 的 IRP 報告中提到現今能源相關技術及價格變化迅速，特別是再生能源的發展難以預測，為確保南非政府能夠緊跟最新科技發展，IRP 須定期進行更新維護，並以兩年的時間為範例，然而直到今日尚未明確規範更新時間，

導致初期規劃的能源供需假設情境不再有效。直至 2018 年南非能源部門才再度完成 IRP 草案報告更新，並在蒐集公眾意見後於 2019 年發布正式的報告。IRP 流程中除了包含政府內部的規劃，還注重民眾的共同參與，針對此特性南非雖無明確條文規定，但該國能源部門於 2010 年 IRP 草案報告完成後提供民眾固定樣板的 IRP 報告意見表發表看法；2016 十二月與 2017 年一月份邀請各城市之利益相關者參與說明會；2018 年 IRP 草案報告完成後提供 60 天的期限邀請民眾針對內容進行建議。

二、目標設定與負載預測

各國之 IRP 目標皆大同小異，共同目標皆為最小化成本、維持系統可靠度、降低環境影響，以及滿足部分法律規範的相關目標及限制，而南非地區則還強調了促進在地開發的項目及降低水資源的使用。針對負載預測的部分，南非採用多元迴歸分析之作法，根據不同電力使用者進行區分，最終將各部門負載加總獲得全年負載量，並考量 11% 的線路損失，包含農業、交通、家用、公部門、商業、工業與礦業，其中科學和工業研究理事會(Council for Scientific and Industrial Research, CSIR)發現根據不同預測輸入資料所預測出之公部門、商業與工業負載加總後變化不大，因此將此三項結合在一起討論。要建置負載預測之模型首先須選定各部門大量潛在的預測因子，利用不同的預測因子去建置不同的預測模型，透過不停疊帶與比較選定最佳模型，該模型除了利用調整 R 平方檢驗與歷史曲線的擬合度，越接近 1 表示擬合度越高，還須具備 30 以下的低等級多元共線性(multi-collinearity)，此代表預測因子間不得有高度關聯性，最終應盡可能降低預測因子的數量，可發現不同部門預測曲線所使用的預測因子最多不超過 3 個。

在 IRP 中南非共提供低、中、高(低能源密集度)、高(工業維持現況)、垃圾債券狀況(junk status)共 5 種負載情境，能源密集度代表能源與產出之比例關係，低能源密集度源自於第三產業的提升，與工業維持現況具有相同 GDP

的假設；垃圾債券狀況則表示南非陷入國家無法償還債務的風險之中，每年 GDP 成長將大幅下降。在不同負載情境中，僅有人口與線路損失為一定值，不隨情境改變，其餘預測因子則隨情境不同而有不同的假設數值。

三、電力資源選項調查

電力資源選項可分為供給端與需求端，更還有電網建置的考量，一般利用各類能源進行發電的稱為供給端選項，如燃煤、天然氣、核能、太陽光電、風力等，而需求端可大致分為能源效率的改善與負載管理，由使用者為出發點降低負載的需求，達到降低發電量的效用，南非之 IRP 報告針對需求端並無太詳細之描述，因此底下將主要針對供給端與電網建置之考量進行說明。

供給端：

供給端之調查主要用途為調查不同能源別之機組特性與成本花費，各國調查內容大同小異，本文以調查南非燃煤發電為例進行介紹。南非為全球前十大產煤國，燃煤不管在現在或未來都將占據高比例的發電與裝置容量，但考慮到環境與氣候的影響，該國在燃煤發電上將更著重在高效率低與排放技術的投入，包含碳捕捉、使用與儲存。燃煤電廠建設的假設位址為燃煤礦口，能夠大量減少燃煤的運輸成本，因此在環境假設條件上可以發現其海拔高度為 1800m，建置位址明確，且南非假設燃煤皆為基載機組，意味著高使用率與效率，但其運轉彈性與低負載情況下效率較差，應盡量避免頻繁調度。燃煤發電機組技術在南非主要可分為超臨界煤粉 (Ultra Supercritical Pulverized Coal, USPC)、整體煤氣化聯合循環(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)、流化床燃燒(Fluidized bed combustion, FBC)三種，其中 USPC 還分為有無使用排煙脫硫(Flue Gas Desulphurization, FGD)、使用碳捕捉與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)技術；IGCC 分為有無使用 CCS 技術；FBC 分為有無使用 FGD、使用 CCS 技術，合計 8 種發電技術如表 1 所示。

表 1 燃煤發電技術選項

技術選項	USPC without FGD
	USPC with FGD
	USPC with CCS
	IGCC without CCS
	IGCC with CCS
	FBC without FGD
	FBC with FGD
	FBC with CCS

每種技術搭配皆對應不同的機組特性與成本花費，考量項目如表 2 所示，其中提交費用時程之考量可以免去前期一次性鉅額借款，降低利息費用，且在建置過程中可以先讓部分機組先行運轉，使收入提早開始流動。

表 2 燃煤電廠考量項目

考量項目		單位	備註
機組特性	裝置容量	MW	
	機組數量	部	
	最小輸出功率	MW	
	啟動時間	hr	
	升降載率	MW/min	
電廠特性	建置成本	ZAR/kW	採隔夜成本計算
	建造時間	yr	
	提交費用時程	%	列出每年須提交之花費占總花費之百分比，並列出部分機組可實際參與運轉年度
	使用年限	yr	
	電廠效率	%	
	典型/最大/最小	%	

	容量因數		
	水資源使用量	L/MWh	
	吸附劑使用量	kg/MWh	吸附劑材料為石灰岩
燃料特性	燃料能量成本	ZAR/GJ	
	燃料能量含量	MJ/SCM	
電廠維運成本	固定成本	ZAR/kW-yr	
	變動成本	ZAR/MWh	
可用率評估	等效使用率	%	以百分比表示，三者總和為100%
	維護率		
	意外故障率		
熱耗率	年平均	kJ/kWh	不同負載情形下熱耗率不同
	100%負載		
	75%負載		
	50%負載		
	25%負載		
廢氣排放	CO ₂	kg/MWh	
	SO _x		
	NO _x		
	CO		
	顆粒物		
固體廢棄物	FGD 固體	kg/MWh	
	飛灰		
	底灰		
電能成本	等效燃料花費	ZAR/MWh	
	等效維運花費		
	等效資本花費		

電網建置考量：

南非在 IRP 中將電網建置的考量劃分為 27 個地區進行成本計算，並由輸電變電所為出發點進行規劃，輸電變電所統一配置 4 台 500MVA 之變壓器，而為防止成本部分重複計算已存之輸電設施，將二次側為 88 或 132kV 之變壓器進行一等效計算，將各區域總變壓器容量除以 500MVA 來獲取等效變壓器

個數，變壓器個數除以 4 來獲取等效輸電變電所個數。根據輸電變電所 N-1 可靠度標準，2000MW 之變壓器可至少疏散(evacuation)1500MW 之功率，南非利用巧合因子(coincidence factor)、多樣性因子(diversity factor)與使用率(utilization factor)來計算再生能源在此情形下可裝設之容量。巧合因子用於表示發電機實際輸出與裝置容量之比例，考慮了個別機組無法同時達到最大裝置容量之情形，風力發電假設白天為 0.6，夜晚為 0.85；太陽能假設白天為 0.85，夜晚為 0。多樣性因子用於表示各地區之情形略有不同，因此利用此因子區別其中差異。使用率用於表示實際案場容量與可併網最大容量之比例。以表 3 為例，在可疏散(evacuation)1500MW 之功率情形下，當太陽光電巧合因子、多樣性因子、使用率皆為 0.85，其裝置容量最大可為 1765MW。

表 3 再生能源最大裝置容量計算範例

Evacuated Capacity(MW)	Coincidence Factor	Diversity Factor	Utilization Factor	Installed Capacity(MW)
1500	0.85	0.85	0.85	$1500/0.85/0.85*0.85=1765$

四、情境制定與資源組合分析

長期規劃最困難的部分在如何從眾多的目標及各類的期望做出最合適的決策，情境的制定可以幫助我們在 IRP 中選取合適的資源組合，讓能源規劃者了解在各類不確定情形下可能產生的變化，透過情境觀察的結果再決定是否將此類情境納入考量。2010 南非 IRP 的情境制定如表 4 所示，各類情境皆須觀察 Kusile 發電廠建置與否的情形，此外基本情境中還包含延遲建置 Medupi 發電廠 12 個月與延遲建置 Kusile 發電廠 24 個月的選項，主要目的為觀察不建置新電廠所產生的影響。

表 4 南非 2010 IRP 情境設定

情境編號	名稱	主要限制	Kusile 建置
1	基本情境 0.0	限制地區發展選項、無	建置

2	基本情境 0.1	外部限制(如碳稅、相關環境影響限制等)	不建置
3	基本情境 0.2		延期 24 個月，Medupi 延期 12 個月
4	排放限制 1.0	CO ₂ 每年限制 275 公噸	建置
5	排放限制 1.1		不建置
6	排放限制 2.0	自 2025 年起，CO ₂ 每年限制 275 公噸	建置
7	排放限制 2.1		不建置
8	排放限制 3.0	自 2020 年起，CO ₂ 每年限制 220 公噸	建置
9	排放限制 3.1		不建置
10	碳稅 0.0	考量碳稅影響	建置
11	碳稅 0.1		不建置
12	區域發展 0.0	考量區域發展	建置
13	區域發展 0.1		不建置
14	強化 DSM 0.0	自 2015 年起，增加額外 6TWh 的負載端管理	建置
15	強化 DSM 0.1		不建置

底下將介紹基本情境與排放限制情境之分析結果，在基本情境的比較中，當選擇建置 Kusile 發電廠時，在 2020 年會新增作為基載使用的水利機組。二氧化碳排放量直至 2030 持續增加，但同樣能源所產生之二氧化碳逐年下降，且水資源消耗減少，這皆歸功於燃煤發電技術的提升。取消 Kusile 發電廠的建置須於 2017 年新增替代能源，使用 FBC 技術的燃煤發電與閉循環渦輪發電機(Closed Cycle Gas Turbine, CCGT)皆須提前併網，同時導致發電成本的提升。延期 Medupi 及 Kusile 發電廠的建置會促使 CCGT 與 FBC 燃煤在 2017 與 2018 年提前併網，但從長遠來看後續的電力資源選項差異不大，且對於電力系統可靠度無劇烈影響。在排放限制情境中，基載發電機組從原本的燃煤發電更換為核能與燃氣發電，有鑑於核能機組最快 2022 才能上線，在 2010 至 2022 過渡期間將集中開發風力機組，而在不建置 Kusile 發電廠的情形下，南非將開發更多的風力機組，且 CCGT 須提前併網以滿足能源使用需求與維持系統可靠度。若自 2025 年起才限制每年 CO₂ 排放量，至 2022 年前的資源規劃結果與基本情境相近，後續則開始建置大量風力與核能機組，並於 2022

該年興建大量各類天然氣機組。若以最嚴格標準限制 CO₂ 排放量，則南非將自 2015 年起即投入風力機組開發以滿足需求，且不再進行燃煤機組的建置。

五、結論

本文針對南非如何以 IRP 進行能源規劃，政府制訂一法規明訂 IRP 所須包含之項目，且 IRP 之結果須先蒐集利害關係人意見進行修改才算真正完成，目標制訂方面南非主要以最小化成本為目標，並考量電力系統可靠度、環保目標等，較特別處為須盡量降低水資源消耗；負載預測部分依據不同電力使用者進行區分，將各部門預測之負載進行加總，符合 IRP 自終端進行負載預測之概念；電力資源選項分為供給端、需求端及電網建置考量，重點在於調查各類資源選之之運轉特性及成本，各國之考量項目應大同小異；情境制定部分，在 2010 的南非 IRP 報告中情境制訂主要目的為分析 Kusile 發電廠建置與否，並從結果分析最終能源規劃政策。透過本文可以快速了解南非建立 IRP 的過程，並以此為出發點探討未來台灣若執行 IRP 下應如何分工與執行，有助於我國在須考量多種環保目標下做出最大化公眾利益之能源規劃決策。

六、參考文獻：

- [1] Republic Of South Africa. (2009). *Electricity regulations on new generation capacity*
- [2] Cliffe Dekker Hofmeyr. (2019). *The Integrated Resource Plan 2019: A promising future roadmap for generation capacity in South Africa*. Retrieved from <https://www.cliffedekkerhofmeyr.com/en/news/publications/2019/Corporate/energy-alert-22-october-The-Integrated-Resource-Plan-2019-A-promising-future-roadmap-for-generation-capacity-in-South-Africa.html>
- [3] Department of Mineral Resources and Energy. (2019). *Integrated Resource Plan (IRP 2019)*. Republic Of South Africa: Author
- [4] Department of Mineral Resources and Energy. (2017). *Power Generation Technology Data For Integrated Resource Planning*. Republic Of South Africa: Author

- [5] Department of Mineral Resources and Energy. (2010). *Integrated Resource Plan For Electricity* (8th ed.). Republic Of South Africa: Author.