

日射量對太陽能電廠發電的影響

楊智堯¹ 謝宜桓²

索拉能源股份有限公司¹ 國立臺灣大學氣候變遷與永續發展國際學位學程²

摘要

氣候變遷的議題日漸受到重視，自 2009 年再生能源發展條例通過後，台灣的再生能源占比也逐年增加，尤其太陽能在近幾年發展特別迅速。今年在夏季尖峰用電期間，根據台電的公開資訊，太陽能的發電占比，甚至可以達全台發電的 5% 以上。而太陽能的發電多寡，與太陽的日射量息息相關。本研究將介紹本團隊利用向日葵 8 號衛星反演日射量計算太陽能電廠的發電量；並分析 2020 年 6 月 21 日台灣難得一見的日環食天文事件，進行此計算方法之驗證。

根據台北市立天文館的資訊顯示，此次日環食天文事件，台灣本島自下午 4 點 13 分至 4 點 15 分食甚期間，遮蔽率從北到南最高超過 90%，大幅影響地表的日射量，進而影響太陽能的發電量。自索拉能源所管理的 46 個太陽能案場，每 10 分鐘一筆的發電量顯示，食甚附近地點的發電量減少約 95%。雖然未來短期之內台灣不易觀測到日全食、日環食的事件，(下次台灣地區之日偏食發生的時間是 2023 年 4 月 20 日，最大食分約 0.15)，但根據此事件之驗證，有助於了解目前發電量計算方法之限制，並有助於討論相關影響太陽能發電量之事件及其特性。

關鍵字：日射量、太陽能、日食

一、前言

台灣自 2009 年通過再生能源發展條例之後，開始建立、實施了躉購制度(Feed-In Tariff, 簡稱 FIT)於台灣之再生能源市場，也使得再生能源的投資或使用中財務的成本方面，能有明確的評估跟預期。目前因太陽能的基本技術門檻較低，環境爭議較少，在台灣之再生能源市場中佔大宗；根據台灣電力公司統計至 2019 年底的公開資訊，台灣的電力系統裝置容量是 4777.9 萬瓩，總發電度數為 2324.7 億度。而太陽能裝置容量約占 359.8 萬瓩，發電度數為 39.62 億度，與 2018 年的 26.55 億度相比，大幅成長了 50% 左右，而這趨勢也還在持續當中。

而根據本公司營運資料顯示，近年安裝太陽能發電除源自 FIT 制度下之財務誘因外，對屋頂型之雞舍、鴨舍或工廠廠房，甚至因為安裝太陽能板，達到額外降溫的效果。因此使得目前推動太陽能發

電之阻礙降低；而除了企業參與外，也有很多公民電廠的發起，讓一般民眾也能一同參與再生能源的投資及發展。也因此，除太陽能發電之硬體建設外，服務也將成為此產業中重要之一環。

太陽能的發電多寡，主要受日照的影響最多，溫度、風速及落塵等則為次要因素。大型的太陽能案場，大多會在當地安裝日照計，方便維運管理。然而日照計也一樣會受落塵的影響，且不見得每一個案場之規模皆能設置日照計。因此本研究參考鄭等(2017)使用日本向日葵 8 號同步衛星反演日射量資料進行輔助，建立日射量與太陽能發電量間之換算系統，除能協助在小型案場之維運外，未來在儀器(日照計)異常的情況下，此系統可以當作備援或協助維運之其他用途。

而本研究除介紹此系統之建立流程外，並以台灣於 2020 年 6 月 21 日發生之日環食天文事件

作為驗證討論對象。本次日環食事件，主要的環食帶經過雲林、嘉義、台南等太陽能裝置較多的縣市，其他縣市也有受日偏食影響，因此在資料上可說是個難得一見的個案。在現行制度之下，此事件主要影響的是台電的調度方面，但在未來在電業自由化，甚至電價自由化之後，對於這樣特殊事件的應變，將會是各別再生能源廠商重要業務之一。

二、資料來源及演算法

(一)、衛星資料

Himawari-8 向日葵 8 號衛星，為西北太平洋地區重要的地球同步衛星，由日本所發射，位於赤道、東經 140.7 度，衛星軌道距地面約 35800 公里。衛星資料來源為千葉大學研究資料庫，除定期排程及衛星食等特別事件之外，時間解析度約 10 分鐘左右，水平空間解析度部分，可見光波段(0.64 μm)約 0.5 公里，紅外線波段(10.4 μm 及 12.3 μm)約 2 公里。將千葉大學之原始檔案處理後，參考鄭等(2017)之方法進行日射量進行反演，水平空間解析度約 0.5 公里。自衛星資料反演成日射量資訊，需考慮天文因素及大氣因素後進行計算。

1. 天文因素

天文因素主要受太陽入射角度之影響，因地球自轉平面與繞太陽公轉之平面並非平行，且公轉軌道為橢圓形，故產生太陽赤緯角。根據 Cooper(1969)之太陽赤緯角 δ 之定義：

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin[360/365 \cdot (J + 284)]$$

J：太陽日，1 月 1 日為 1；非閏年之 12 月 31 日為 365。

得知太陽赤緯角後，可對太陽天頂角進行計算。太陽天頂角為太陽與天頂之夾角，與仰角相加為 90 度。天頂角 θ 之餘弦值為：

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

其中為 ϕ 地理緯度， β 為傾角， γ 為方位角， ω 為時角。由於氣象觀測為水平面，故傾角為零，使 $\cos \beta = 1$ ， $\sin \beta = 0$ 。

$$\text{使 } \cos \theta = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

2. 大氣因素

太陽輻射自太空穿越大氣層時，受水氣、臭氧、懸浮微粒、雲及其他氣體吸收或散射作用影響，能直接到達地表的為直接日射量，其餘的為散射日射量。

(1). 直接日射量：

$$S_{dir} = I \cos \theta \alpha_o \alpha_r \alpha_w \alpha_a$$

(2). 散射日射量：

$$S_{ifr} = I \cos \theta \alpha_o (1 - \alpha_r) 0.5 \alpha_a$$

$$S_{ifa} = I \cos \theta \alpha_o \alpha_r \alpha_w (1 - \alpha_a) F_c \omega_o$$

I：太陽常數

α_o ：臭氧穿透率

α_r ：雷利散射穿透率

α_w ：水氣穿透率

α_a ：懸浮微粒穿透率

F_c ：懸浮微粒散射量占全部散射量之比例

ω_o ：單次散射反照率

3. 雲層影響

將日射量分為有雲及晴空狀態計算。參考 Tanahashi (2000,2001)之定義：當太陽天頂角小於 50 度，且返照率小於 0.15 時為晴空，反之為有雲狀態。有雲狀態時，需利用可見光、紅外線波段，計算返照率及衰減係數，而後得到有雲時的日射量。將其計算方式分為兩類：

(1). 晴空： $S_{dir} + S_{ifr} + S_{ifa}$

(2). 有雲： $(S_{dir} + S_{ifr} + S_{ifa})(1 - r \cdot A)$

r：太陽日射衰減係數

A：可見光波段接受之反照率

(二)、電廠資料

實際發電資料來自索拉能源股份有限公司所管理的太陽能電廠，資料時間解析度為 5 分鐘一筆，監控資料可用於了解電廠發電狀況，作為拿到實際電費收入前的預估資訊。本此研究使用的電廠監控資料，裝置容量規模約為 8MW，共 46 個案場。

三、衛星資料與測站及電廠比較

測站日射量資料來源為中央氣象局觀測資料查詢系統 (CWB Observation Data Inquire System, CODIS)，時間解析度為 1 小時，因此將衛星日射量資料處理成一小時，並將其單位轉換成 MJ/m² 後，取台北、台中、台南、花蓮，作為北中南東的四個比較點。分析 2017~2019 年的資料，排除衛星資料庫於早上 6 點至傍晚 6 點有缺值，以及氣象測站儀器校正及缺值資料後的每小時資料散佈圖。其結果如圖 1 及表 1 所示，北中南東四個測站的相關係數範圍約 0.91~0.97，台北測站及花蓮測站衛星反演日射量較氣象局觀測值些微高估，台中測站及台南測站則是些微低估。平均絕對誤差的數值上，台北測站為 57.67W/m² (約 0.20MJ/m²)，台中測站為 55.75W/m² (約 0.20MJ/m²)，台南測站為 52.91W/m²(約 0.19MJ/m²)，花蓮測站為 80.55W/m² (約 0.29MJ/m²)。

表 1. 中央氣象局測站全天空日射量與衛星反演日射量分析表，分別為測站站名、相關係數、平均絕對誤差 (Mean Absolute Error, MAE)、平均誤差 (Mean Error, ME)、均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE)。

站名	相關係數	MAE	ME	RMSE
梧棲	0.9739	0.159	0.014	0.242
新屋	0.9741	0.165	-0.031	0.248
新竹	0.9676	0.175	-0.009	0.259
基隆	0.9725	0.18	-0.055	0.263
永康	0.9671	0.176	-0.009	0.264
高雄	0.972	0.181	0.068	0.268
蘇澳	0.9658	0.181	0.044	0.273
嘉義	0.9678	0.19	0.072	0.275
臺南	0.9718	0.188	-0.088	0.277
大武	0.9719	0.195	-0.041	0.277
臺中	0.9654	0.19	-0.072	0.283
臺東	0.966	0.199	-0.013	0.283
臺北	0.954	0.198	0.056	0.294
成功	0.9585	0.209	-0.001	0.307
宜蘭	0.9546	0.216	-0.039	0.322

板橋	0.9407	0.209	0.031	0.335
鞍部	0.9336	0.222	0.094	0.339
竹子湖	0.9415	0.235	-0.03	0.349
蘭嶼	0.9392	0.245	-0.029	0.363
恆春	0.929	0.238	0.063	0.378
淡水	0.9187	0.246	0.104	0.415
阿里山	0.8947	0.265	0.042	0.422
日月潭	0.9015	0.268	-0.014	0.427
花蓮	0.9144	0.286	0.011	0.433
玉山	0.9246	0.363	-0.228	0.519

與局屬測站比較後，得知衛星反演日射量大致上能掌握日射量多寡的趨勢，並且高度正相關。為了與測站資料時間解析度一致，將 5 分鐘資料轉換成小時資料，案場資料為一個位在雲林縣內的屋頂型太陽能案場，散佈圖如圖 2 所示，黑色線為 100%轉換的輔助線，紅線為非線性的回歸式。可知日射量轉換至太陽能的過程，為非線性過程，隨著日射量逐漸增加，轉換至發電量的比例將因半導體不同溫度的特性而逐漸降低。當我們了解這樣的特性之後，可以利用其關係，將衛星反演日射量做其他的應用。

四、日食當日實際發電資料

2020 年 6 月 21 日台灣發生日食天文事件，開始時間在下午 2 點 50 分左右，結束時間約為下午 5 點 25 分，發電資料來自 46 個索拉能源所管理的電廠監控資訊，每十分鐘一筆發電度數資訊。如圖 3 顯示，黑色虛線為純晴空計算方式的發電量，藍色實線為實際電廠整合後的監控發電數據，紅色實線為衛星反演日射量，橘色虛線為經由日環食區遮蔽率校正後的發電量。上午 8 點至下午 3 點前，衛星反演日射量與發電量的趨勢大致符合，主要與晴空的差異是來自於天氣因素的影響(如雲量、雲頂溫度及降雨等)。2 點 50 分後，日食開始初期，由於太陽受月亮逐漸遮蔽，可見光波段的雲反照率下降，在沒有校正的情況下，可見光反照率降低的情況與雲量減少的效應雷同，將使原有計算結果逐

漸高估，直到逼近晴空的計算結果，需經過遮蔽率修正，其結果才會接近真實狀況。由於案場並非皆在環食區內，因此使用環食帶的遮蔽率會略微低估發電量。但可從圖中的時序圖得知，衛星反演日射亮經校正後，可以計算出合理的發電量情況。未來的日食事件再度發生前，就先從天文的資訊做事前的因應。

五、討論及結論

再生能源常被視為氣候調適的方法之一，但隨著其裝置容量逐年增加，對於電網的穩定性影響不容忽視。本研究使用了向日葵 8 號同步衛星的資料，並參考鄭等(2017)的做法，計算出衛星反演日射量。衛星反演日射量除了跟氣象測站有高度的相關性之外，透過了解日射量與太陽能發電的關係後，計算出在不同日射量之下，應有的太陽能發電狀況。在 2020 年 6 月 21 日的日食天文事件中，發現衛星反演日射量，在日食期間，因可見光波段受日食影響反照率，導致其結果高估誤判，需特別考慮太陽受月亮的遮蔽率，才能較合理的計算出該時間之日射量，並利用其數值計算出日食過程的發電結果。

台灣目前再生能源大多採用躉購機制，以固定費率販售給台電 20 年，但未來台灣若逐漸走向電業自由化，供電將日趨多元，對於使用氣象資訊應用在再生能源上，將逐漸有其價值，而本計算方式未來則有助於在不同天氣事件下，快速估計各案場應有的太陽能發電量。雖然日環食這樣特殊的事件在短時間內，並不會再度發生，但下一次重要之天文事件為：2023 年 4 月 20 日近中午，台灣地區可見最大食分 0.15 左右的日偏食。屆時台灣的太陽能總裝置容量勢必更高，因此此事件對於太陽能發電甚至電網的影響，值得持續關注，並必須提前做好相對應之技術研發。

參考文獻

鄭光浩、葉子葵、胥立南、章鶴群與張育承，2017: 應用 Himawari-8 估計臺灣地表日射量之校驗及探討，106 年天氣分析與預報研討會論全文彙編，中央氣象局，臺北市。

Cooper, P. I., 1969: "The absorption of solar radiation in solar stills", *Solar Energy*, 12, 333-346.

Tanahashi, S., H. Kawamura, T. Takahashi, and H.

Yusa, 2000: "Improved Estimates of Hourly Insolation from GMS S-VISSR Data", *Remote Sens. Environ.*, 74, 409-413.

Tanahashi, S., H. Kawamura, T. Takahashi, and H.

Yusa, 2001: "A system to distribute satellite incident solar radiation in real-time", *Remote Sens. Environ.*, 75, 412-422.

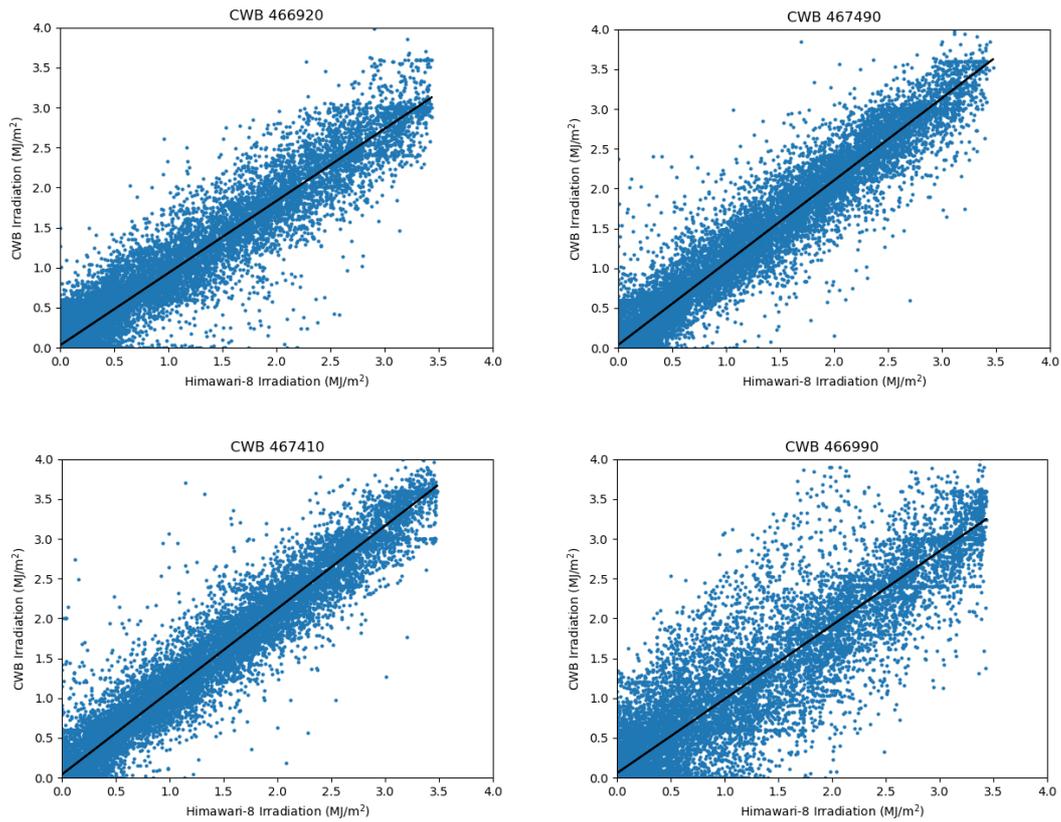


圖 1. 衛星反演日射量(x 軸)與中央氣象局屬測站日射量觀測資料(y 軸)散佈圖。由左至右，由上至下，依序為台北測站、台中測站、台南測站、花蓮測站。資料時間為 2017 年至 2019 年。

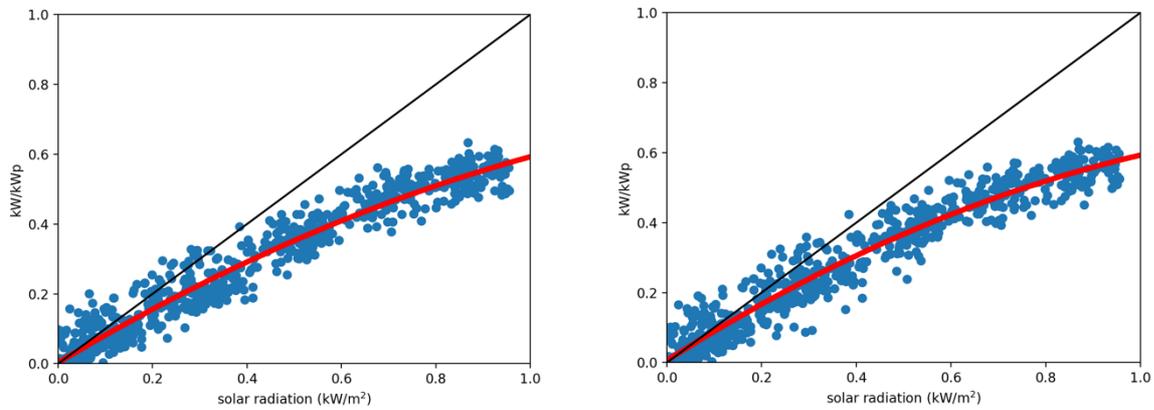


圖 2. 衛星反演日射量(x 軸)與實際每 kW 裝置容量之每小時發電量度數(y 軸)的散佈圖。黑色線為 100%轉換的輔助線，紅線為非線性的回歸式。

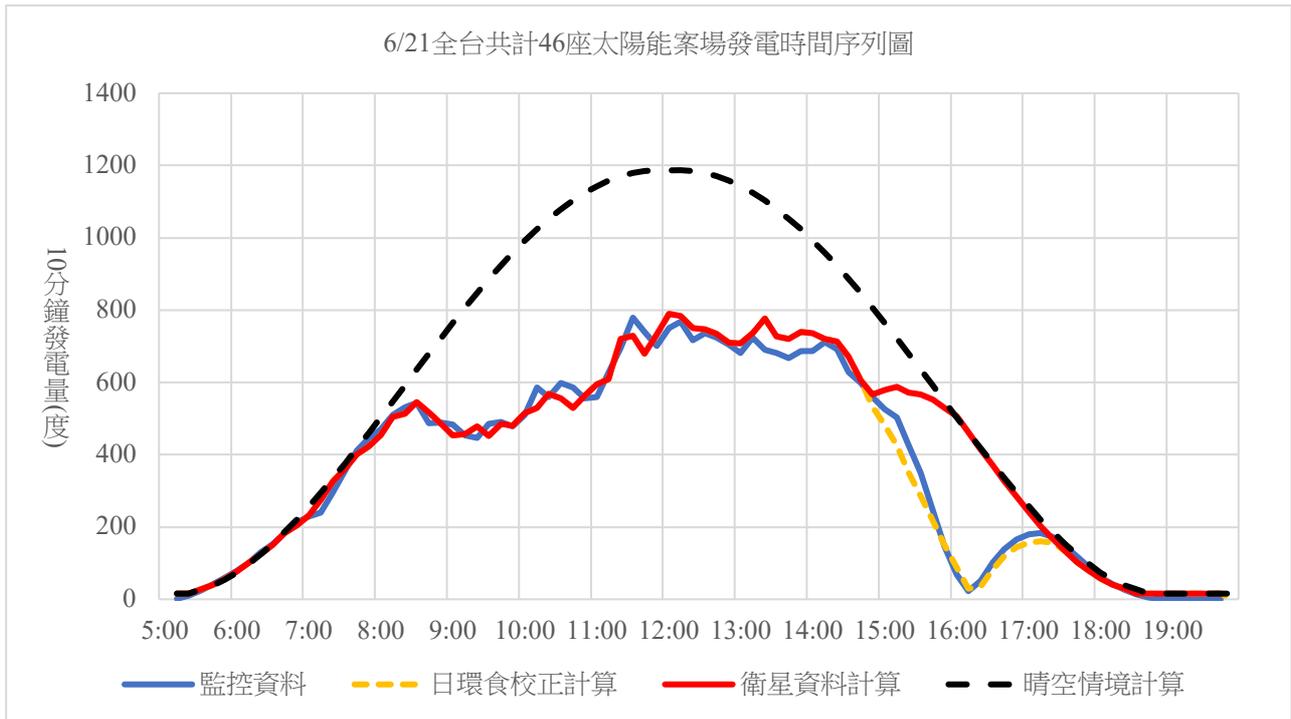


圖 3. 2020 年 6 月 21 日日環食天文事件，實際發電監控數據及衛星反演日射量資料計算時序圖。藍線為索拉能源管理之實際發電監控數據，紅色實線則使用衛星反演日射量，計算每 10 分鐘發電量，黑色虛線為假設晴空情境後，衛星反演日射量再計算至每 10 分鐘發電量，橘色虛線為紅色線考慮日環食區域之遮蔽率後，校正日射量後得到的結果。