



計畫案號：SBB0421012

國家中山科學研究院

計畫案號：SBB0421012

計畫名稱：儲能系統併電衝擊分析

期末報告 修改版

執行期限：104 年 9 月 25 日 至 104 年 12 月 20 日

所需預算：新台幣 18 萬元整

計畫執行機構：中華科技大學

計畫主持人：航空電子系 連畊宇 助理教授

共同主持人：中原大學 電機工程系 陳士麟教授

中 華 民 國 1 0 4 年 1 2 月

一、 研究背景

住宅型儲能系統係指運用太陽光電(photovoltaic,PV)進行儲能(Battery Energy System,BESS)用於供電給住宅用戶的一套直/交流供電系統，中科院二所擬建置此系統於高雄縣甲仙鄉的小林二村，供應約二十家的住宅用電。惟建置前台電要求進行系統衝擊分析，俾確認該直/交流供電系統不影響台電饋線之正常供電。

圖 1 所示者為供應小林二村用電的台電 11.4kV 饋線(為 BD46 饋線)，該饋線是由美濃二次變電所(S/S)所引出，至小林二村饋線長 17.3 公里，於 14.1 公里處供電給大愛村，該村設置大量的太陽光電(如圖:容量為 1650kW)，因此，台電擔心日照時段大愛村及小林二村的 PV 逆送電力以及 PV 瞬時減少出力對於 BD46 饋線上其它用戶的影響。前者係造成饋線的電壓昇，而後者造成該饋線的電壓變動。至於 PV 換流器所造成的諧波亦不利於該饋線的供電品質。

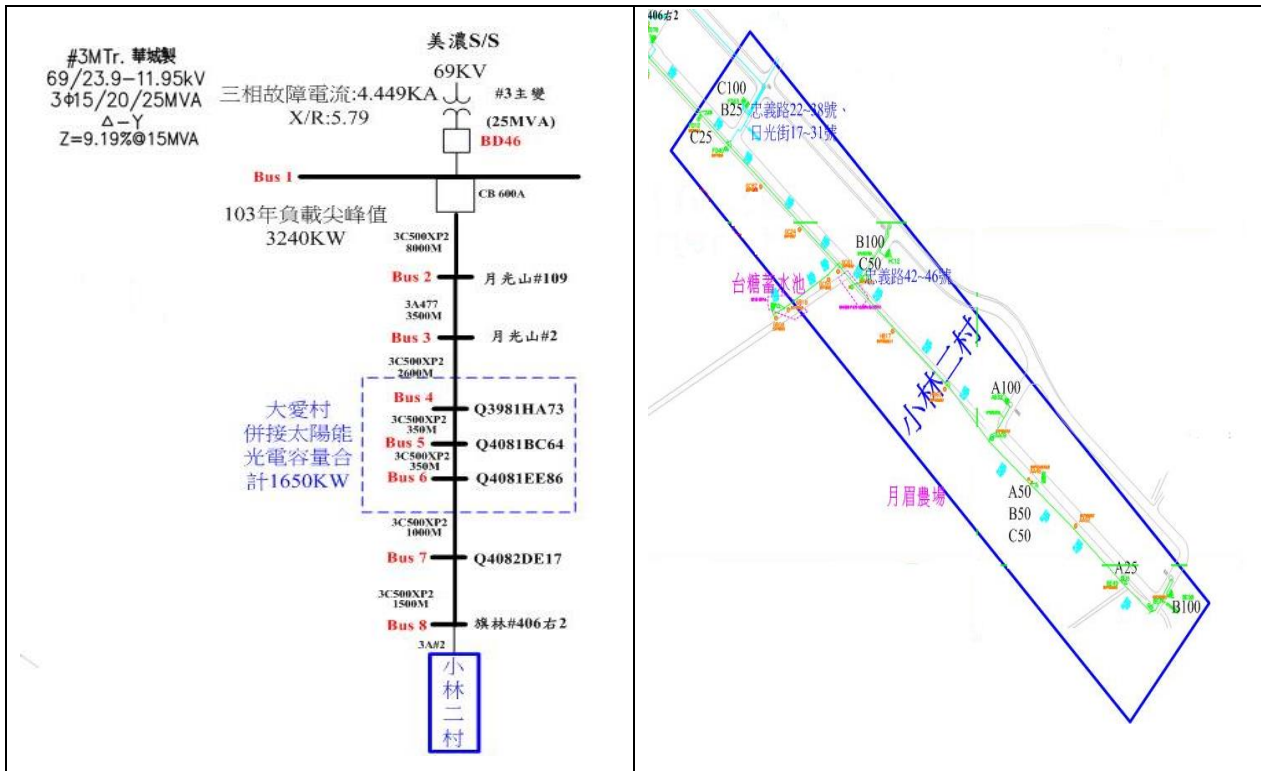


圖 1 本案設置 PV+BESS 的 15 戶所併聯的台電饋線

二、 本儲能系統的運轉模式

每一個用戶的尖峰需量約 3kVA，功率因數約為 0.9，用電量在夜間 17~21 時，估計日照時段，係皆由 PV 向蓄電池充電。用戶特性如表 1，表 1 顯示:日照的時段(如表 1 的 11~16 時)，住宅用電平均不到 1kW。每戶屋頂安裝 PV 容量為 3kWp，PV 如圖 2。每戶系統獨立運作。每戶系統的單線圖如圖 3，參考表 1 當中於日照時段 11:00-16:00 以每戶至少 2kW 向電池進行充電，充飽電池至 10 kWh 並於夜間放電，而鋰鐵電池用戶為 7 戶、鉛酸為 8 戶。其中儲能系統的充放電取決於電池管理系統(Battery Management System, BMS)的預設值，該值係考量電池的溫度及充電狀態(State of Charge, SOC)予以設定。當日照時，BMS 預設的電池向電池充電亦可同時對用戶供電(約 1kW 用戶)，當電池電壓達到飽和電壓(臨界電壓上限值，相當於 10kW 時)則停止充電。至於電池對用戶放電，亦取決於 BMS 設定，只要電池電壓在臨界(下限)電壓以上，則保持對用戶放電。圖 4 為本案設置的鉛酸電池，圖 5 為其控制流程，電力經由 PV 先傳送至 MPPT，再傳向電池或是換流器。換言之，當 PV 瞬間減少出力，若電池電壓大於其臨界電壓下限值，則由電池瞬間補充 PV 出力之不足。本儲能系統包括換流器設備的供電容量為 5.5kW，但本案(小林二村)換流器的最大出力設定為 3.0kW；於夜間 PV 停止出力，而由蓄電池供電，直到 3kWh 的電池電壓下降至預設下限時，停止追電，電池再進入休眠狀態。

表 1 住戶的用電特性(註:粗體字為本案的 15 戶住宅)

地址	日平均(度)	11~16 點(度)	電池種類
忠義路 22 號	6.9	2	鉛酸
忠義路 26 號	10.9	2.4	鋰鐵
忠義路 28 號	10.6	2.3	鉛酸
忠義路 30 號	11.0	3.8	鉛酸
忠義路 38 號	5.9	2.1	汰役
忠義路 42 號	7.5	1.6	鉛酸
忠義路 46 號	7.3	1	鋰鐵
忠義路 32 號	0	0	
忠義路 36 號	2.0	0.3	
日光二街 17 號	10.7	1.9	鉛酸
日光二街 19 號	6.3	1.8	鋰鐵
日光二街 21 號	5.8	1.2	鉛酸
日光二街 23 號	9.5	0.7	鋰鐵
日光二街 25 號	7.9	1.3	鉛酸
日光二街 27 號	4.5	0.4	汰役
日光二街 29 號	6.4	0.3	鋰鐵
日光二街 31 號	8.8	2.6	鉛酸
日光二街 37 號	7.4	1	
日光二街 39 號	13.0	2.7	
日光二街 33 號	2.1	0.5	
日光二街 35 號	1.6	0.4	



圖 2 $3kW_p$ 住宅屋頂設置之外觀

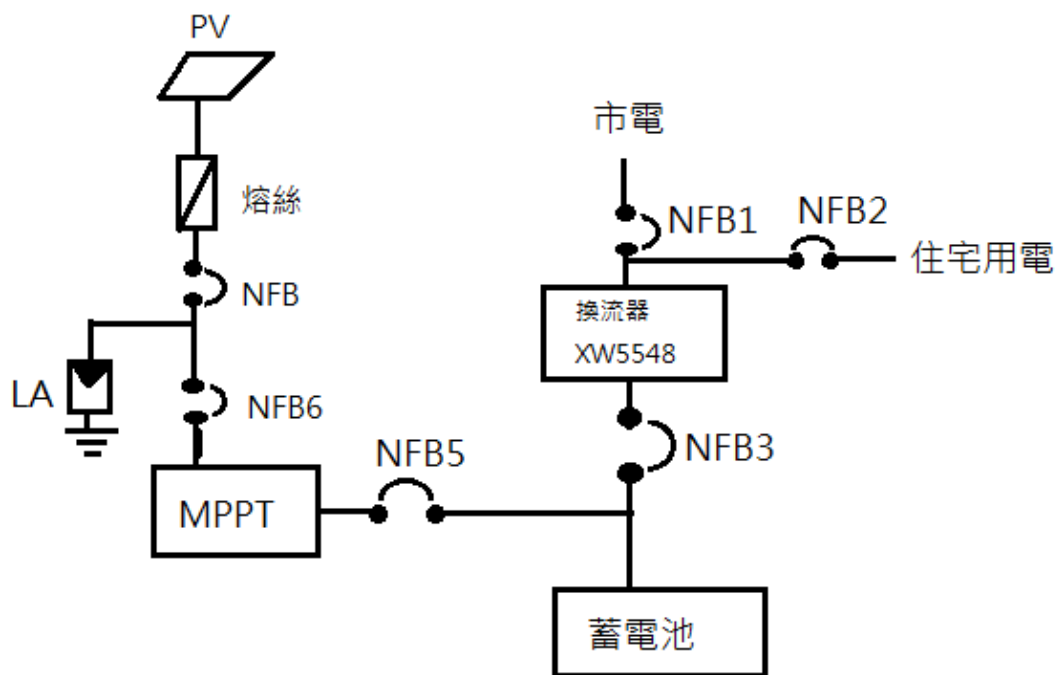


圖 3 各住戶儲能系統單線圖

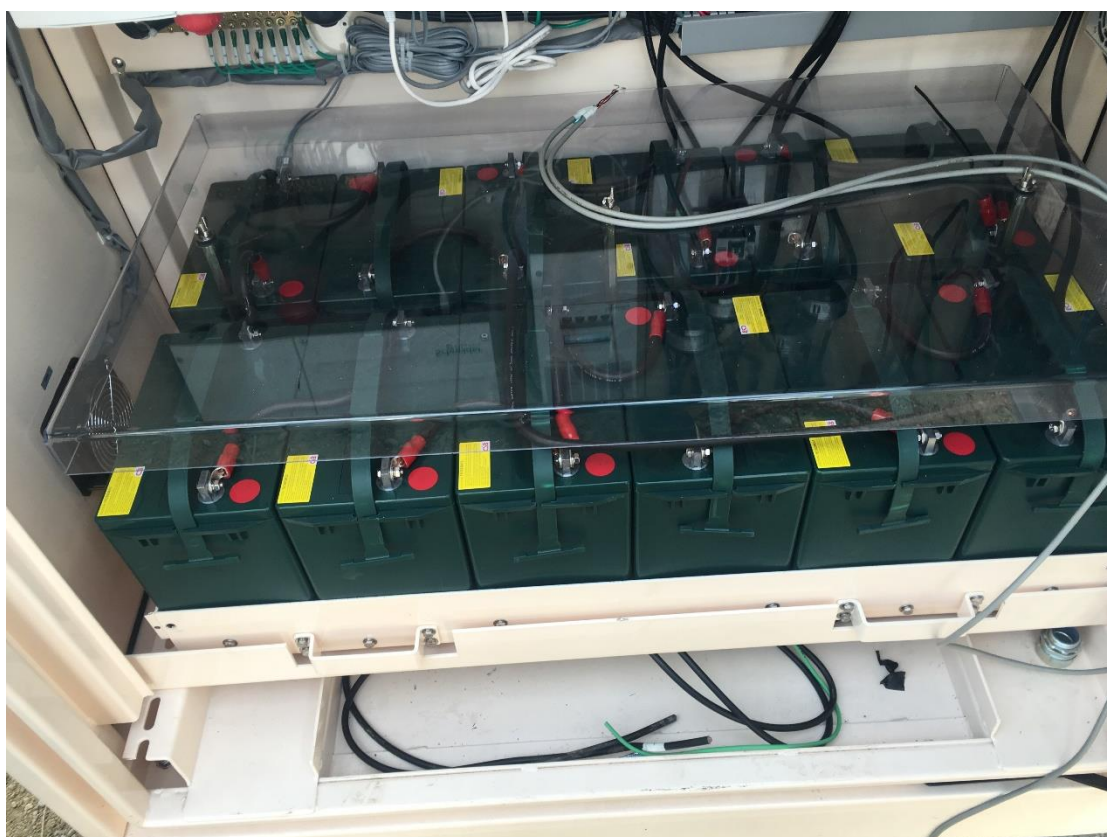


圖 4 本案所設置的鉛酸電池



圖 5 本案對各住戶所設置的換流器(XW5548)外觀

三、 本儲能系統的異常/故障保護機制

圖 3 亦顯示本儲能系統的故障保護設計，顯示:各迴路均有熔絲或無熔絲斷路器(NFB)保護，若儲能系統內部發生故障可由 NFB 隔離故障。如圖所示:PV 設置快速熔絲可在 5 秒內熔斷俾保護 PV，至於最大功率追蹤、蓄電池或換流器，除由 NFB 在 1 分鐘內隔離故障以外，換流器 XW5548 本身設置高速跳脫元件，能在 1 秒內隔離故障。表 2 為其規格。但若換流器的控制迴路故障，則換流器在用戶側會自動停止出力。由於各住宅的儲能系統係單獨設置，單一住宅的儲能系統突然停止出力對於 11.4kV 饋線變壓器的高低壓側所造成的電壓變動率影響有限。

表 2 本案換流器 XW5548 的規格

Device short name	XW+ 5548 NA
Inverter AC output	
Output power (continuous) at 25°C	5500 W
Overload 30 min / 60 sec at 25°C	7000 W / 9500 W
Output power (continuous) at 40°C	4500 W
Maximum output current 60 seconds (rms)	82 A (120 V); 41 A (240 V)
Output frequency (selectable)	50 / 60 Hz
Output voltage	L-N: 120 V +/- 3%; L-L: 240 V +/- 3%
Total harmonic distortion (THD) at rated power	< 5%
Idle consumption search mode	< 8 W
Input DC voltage range	42 to 60 V (48 V Nominal)
Maximum input DC current	150 A
Charger DC output	
Maximum output charge current	110 A
Output voltage range	40 - 64 V (48 V Nominal)

Charge control	Three stage, two stage, boost, custom
Charge temperature compensation	Battery temperature sensor included
Power factor corrected charging	0.98
Compatible battery types	Flooded (default), Gel, AGM, LiON, custom*
Batter bank range (scaled to PV array size)	440 - 10000 Ah
AC input	
AC 1 (grid) input current (selectable limit)	3 - 60 A (60 A default)
AC 2 (generator) input current (selectable limit)	3 - 60 A (60 A default)
Automatic transfer relay rating / typical transfer time	60 A / 8 ms
AC input voltage limits (bypass/charge mode)	L-N: 78 - 140 V (120 V nominal)
	L-L: 160 - 270 V (240 V nominal)
AC input frequency range (bypass/charge mode)	55 - 65 Hz (default); 52 - 68 Hz (allowable)
AC grid-tie output	
Grid sell current range on AC1(selectable limit)	0 to 40 A (120 V) / 0 to 20 A (240 V)
Grid sell voltage range on AC1	L-N:105.5 to 132 +/- 1.5 V
(auto adjusts entering sell mode)	L-L: 211 to 264 +/- 3.0 V
Grid sell frequency range on AC1	59.4 to 60.4 +/- 0.05 Hz
(auto adjust entering sell mode)	
Efficiency	
Peak	95.7%
CEC weighted efficiency	93.0%
General specifications	
Part number	865-5548-01
Product / shipping weight	53.5 kg (118.0 lb) / 75.0 kg (165.0 lb)

Product dimensions (H x W x D)	58 x 41 x 23 cm (23 x 16 x 9 in)
Shipping dimensions (H x W x D)	71.1 x 57.2 x 39.4 cm (28.0 x 22.5 x 15.5 in)
IP degree of protection	NEMA Type 1 Indoor
Operating air temperature range	-25°C to 70°C (-13°F to 158°F) (power derated above 25°C (77°F))
Warranty (Depending on the country of installation)	2 or 5 years
Features	
System monitoring and network communications	Available
Intelligent features	Grid sell, peak load shave, generator support, prioritized consumption of battery or external DC energy
Auxiliary port	0 to 12 V, maximum 250 mA DC output, selectable triggers
Off-grid AC coupling	Frequency control
Multi-unit operation	Single and split phase: up to four units in parallel, three phase: up to 12 units in multi-cluster configuration with external AC contractor
Regulatory approval	
Safety	UL1741, CSA 107.1
EMC directive	FCC and Industry Canada Class B
Interconnect	IEEE 1547 and CSA 107.1

四、 本案 15 戶住宅與市電電源之相對位置

圖 6 為本案小林二村設置儲能系統 15 戶的地理位置，圖右方近活動中心的饋線變壓器(B25，C100)負責供電忠義路 22, 26~30, 38 號等 5 戶及日光街 17~31 號等 8 戶，共計 13 戶；圖左方遠離活動中心的饋線變壓器(B100，C50)供應忠義路 42, 46 號等 2 戶的用電。

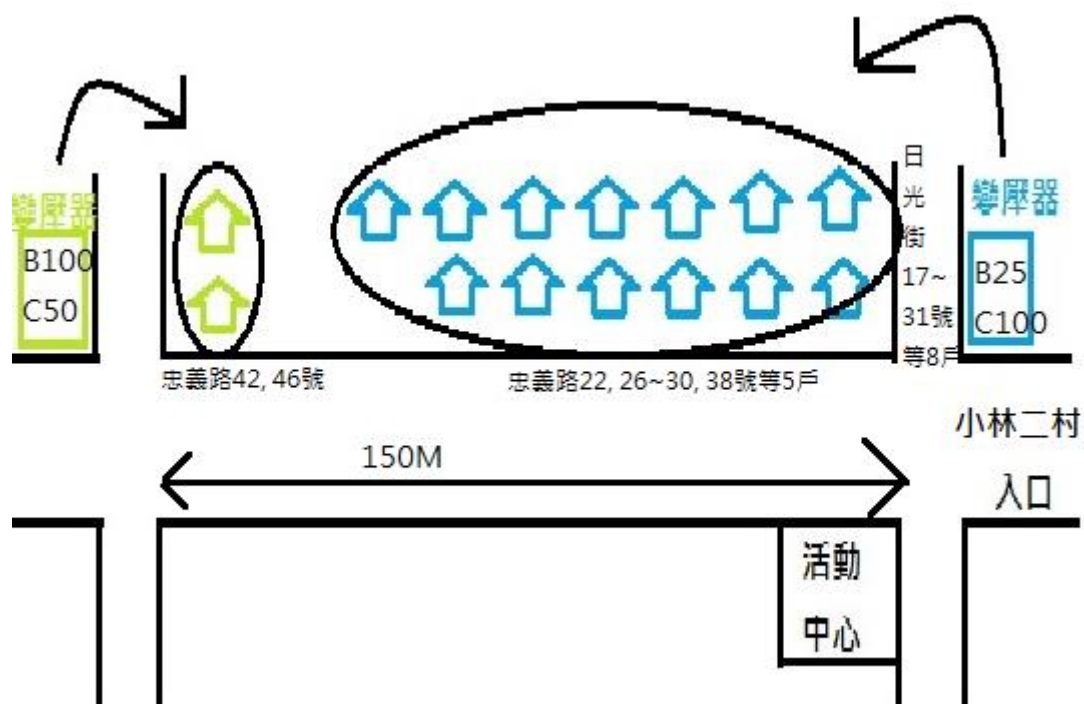


圖 6 15 戶及其引接之台電饋線變壓器的相對位置



(a)



(b)



(c)

圖 7 本案 15 戶及台電饋線變壓器之空照圖: (a)全覽圖； (b)近活動中心的饋線變壓器； (c)遠活動中心的饋線變壓器

五、 15 戶系統所併聯台電饋線的參數

參閱圖 1，BD46 饋線於 25MVA 主變壓器低壓側的系統短路容量為 88MVA($=\sqrt{3} \times 11.4kV \times 4.449kA$)，饋線採用 500MCM 及 477 兩型導線。經由圖 1 右側小林二村近上方的兩組饋線變壓器供應本案 15 戶的用電，如圖 7 所示。

六、 對於台電饋線的異常/故障本儲能系統的保護機制

當 BD46 饋線發生故障，本儲能系統的換流器(XW5548)會偵測故障電流自動跳脫停止出力而與市電系統絕聯；在 BD46 執行工作行電時，XW5548 亦能偵測低電源而自動跳脫。

七、 本儲能系統之逆送電力

在尖峰時段，用戶需量略大於 3KVA(PF=0.9)，且本儲能系統的換流器限制出力為 3KW。因此，當尖峰時段不會逆送電力。但在離峰深夜時段，若用戶需量甚低，有可能會逆送電力；惟此時，大愛村的 PV 系統亦已停止出力，此外，本 15 戶係獨立運作，若每戶平均逆送 2KW，亦總計 30KW，對於饋線的影響相當有限。

八、 評估諧波、電壓變動率及電壓降

1. 小林二村的系統阻抗估計結果

$$\text{SET } S_{base} = 15\text{MVA } V_b = 11.4\text{kV } Z_b = \frac{(11.4\text{kV})^2}{15\text{MVA}} = 8.664\Omega$$
$$Z_{sys} = \frac{\frac{15\text{MVA}}{87.84\text{MVA}}}{5.79\%} + j \frac{15}{87.83} = 0.0294 + j0.1707\Omega = 0.0199\angle 80.227 \text{ pu}$$

在全長 17.3 公里當中，部分架空線係屬雙回線共桿佈置，換言之，另一回線(指非小林二村供電線)的負載電流，亦會在小林二村的供電線上感應電壓，惟二回線間距以及二回線的序電流角度差均會舒緩此感應電壓的結果。為保守計，茲取

單回線阻抗的 1.5 倍考慮之。

$$Z_{500MCM}(\text{正序}) = (8 + 0.35 + 0.35 + 2.6 + 1 + 1.5\text{km}) \times (0.11265 + j0.1398\Omega/\text{km}) \times 1.5 = 3.7155 \angle 51.1383^\circ \Omega = 0.4287 \angle 51.1383^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} Z_{500MCM}(\text{零序}) &= (8 + 0.35 + 0.35 + 2.6 + 1 + 1.5\text{km}) \\ &\times (0.69569 + j0.22673\Omega/\text{km}) \times 1.5 = 15.135 \angle 18.051^\circ \Omega \\ &= 1.74675 \angle 15.051^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{477}(\text{正序}) &= 3.5(\text{km}) \times (0.1353 + j0.3005 \Omega/\text{km}) \times 1.5 = 1.7301 \angle 65.76^\circ \Omega \\ &= 0.19965 \angle 65.76^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{477}(\text{零序}) &= 3.5(\text{km}) \times (0.3 + j1.764 \Omega/\text{km}) \times 1.5 = 9.393 \angle 80.348^\circ \Omega \\ &= 1.08405 \angle 80.348^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

2. 在饋線變壓器高壓側的電壓變動率分析

$$\text{設每一用戶為 } 3\text{KVA}, \quad I_{base} = \frac{15\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 220} = 39364.79 \text{ A}$$

此 15 戶係由總計 4 台單向變壓器供電(如圖 6)，合計容量為 275kVA，其中，B 相容量為 125kVA，C 相 150kVA。

$$\text{A 相} = 0$$

$$\text{B 相} = (15 \times 3) \times \frac{125}{275} = 20.4545\text{kVA}$$

$$\text{C 相} = 45 \times \frac{150}{275} = 24.545\text{kVA}$$

$$I_A = 0, \quad I_B = \frac{20.4545\text{kVA}}{220\text{V}} = 82.975\text{A}, \quad I_C = \frac{24.545\text{kVA}}{220\text{V}} = 111.568\text{A}$$

$$I_A(\text{pu}) = \frac{I_A}{I_{base}} = 0$$

$$I_B(\text{pu}) = \frac{I_B}{I_{base}} = 2.3618 \times 10^{-3}$$

$$I_C(pu) = \frac{I_C}{I_{base}} = 2.8342 \times 10^{-3}$$

$$I_0 = 1.732 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

$$I_1 = 8.689 \times 10^{-4} \angle -171.051 \text{ pu}$$

$$I_2 = 8.7667 \times 10^{-4} \angle 171.051 \text{ pu}$$

在饋線變壓器高壓側的電壓變動率

$$\Delta V_0 = I_0 \times (Z_{500MCM}^0 + Z_{477}^0 + Z_{sys}) = 4.20049 \times 10^{-3} \angle 39.4778 \text{ pu}$$

$$\Delta V_1 = I_1 \times (Z_{500MCM}^1 + Z_{477}^1 + Z_{sys}) = 5.5791 \times 10^{-4} \angle -114.544 \text{ pu}$$

$$\Delta V_2 = I_2 \times (Z_{500MCM}^2 + Z_{477}^2 + Z_{sys}) = 5.629 \times 10^{-4} \angle -132.442 \text{ pu}$$

電壓變動率：

$$\Delta V_A = 3.1582 \times 10^{-3} \angle 33.598$$

$$\Delta V_B = 4.5882 \times 10^{-3} \angle 40.8946$$

$$\Delta V_C = 4.8775 \times 10^{-3} \angle 41.9459$$

3. 在饋線變壓器低壓側的電壓變動率分析

因為 C 相的高壓側電壓變動率最大，因此選擇 C50 變壓器(3.08% @25KVA)評估

其低壓側的電壓變動率

$$Z_{C50} = 3.08\% \times \frac{5MVA}{50kVA} = j3.08(pu)$$

低壓線長度以平均 60m 估計(參考圖 6，兩組變壓器的距離為 150m，各組的低

壓線約 75m，以保守計，假設這 15 戶係集中為於離變壓器 60m 處，而其餘未設

PV+BESS 的住戶亦係集中位於此 60m 處：

$$Z_b = \frac{(220V)^2}{5MVA} = 9.68 \times 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{低壓線}^1 = Z_{低壓線}^2 = (0.06km)(0.498 + j0.12\Omega/km) = 0.02988 + j7.2 \times 10^{-3}\Omega$$

$$= 3.1751\angle 13.157 \text{ pu}$$

$$Z_{低壓線}^0 = (0.06km)(0.7918 + j0.3048\Omega/km) = 0.047508 + j0.018288\Omega$$

$$= 5.2589\angle 21.053 \text{ pu}$$

考量低壓線及饋線變壓器阻抗：

$$\Delta V_0 = I_0 \times (Z_{低壓線}^0 + Z_{B25} + Z_{500MCM}^0 + Z_{477}^0 + Z_{sys}) = 0.01628\angle 43.8415 \text{ pu}$$

$$\Delta V_1 = I_1 \times (Z_{低壓線}^1 + Z_{B25} + Z_{500MCM}^1 + Z_{477}^1 + Z_{sys})$$

$$= 4.814 \times 10^{-3}\angle -119.513 \text{ pu}$$

$$\Delta V_2 = I_2 \times (Z_{低壓線}^2 + Z_{B25} + Z_{500MCM}^2 + Z_{477}^2 + Z_{sys})$$

$$= 4.8567 \times 10^{-3}\angle -137.411 \text{ pu}$$

$$\Delta V_A = 0.00693\angle 33.2582$$

$$\Delta V_B = 0.01973\angle 45.077$$

$$\Delta V_C = 0.02231\angle 46.0168$$

評估結果顯示：在饋線變壓器低壓側的電壓變動率皆低於 2.5%

4. 諧波分析

本研究曾針對本案換流器於中科院區量測其諧波，量測時換流器與台電併聯，供電給負載箱，測試線圖如圖 8。

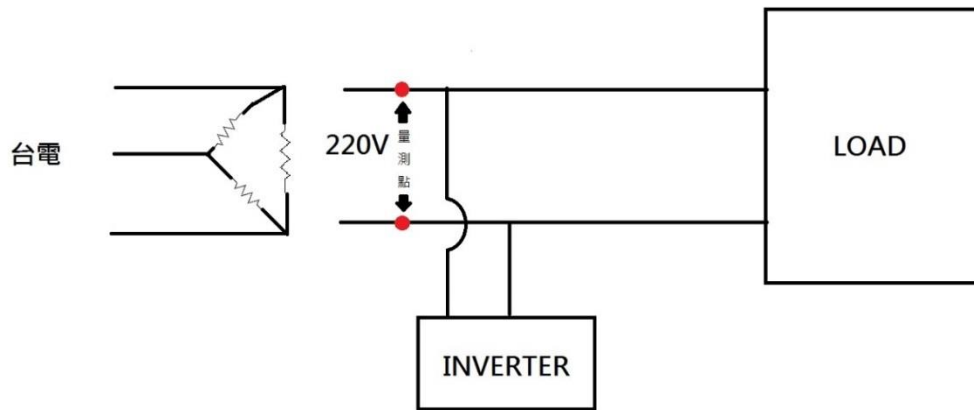


圖 8 於實驗室量測換流器的諧波之量測單線圖

IEEE519-2014之諧波限制值：(a)諧波電流；(b)諧波電壓

(a)

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order(odd harmonics)						
I_{sc} / I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0			15.0

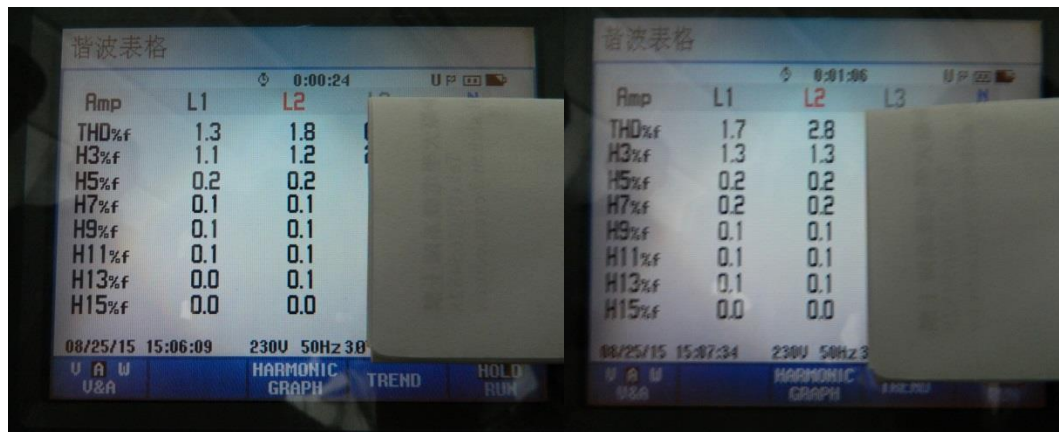
(b)

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic(%)	Total harmonic distortion THD(%)
$V \leq 1.0\text{kV}$	5.0	8.0

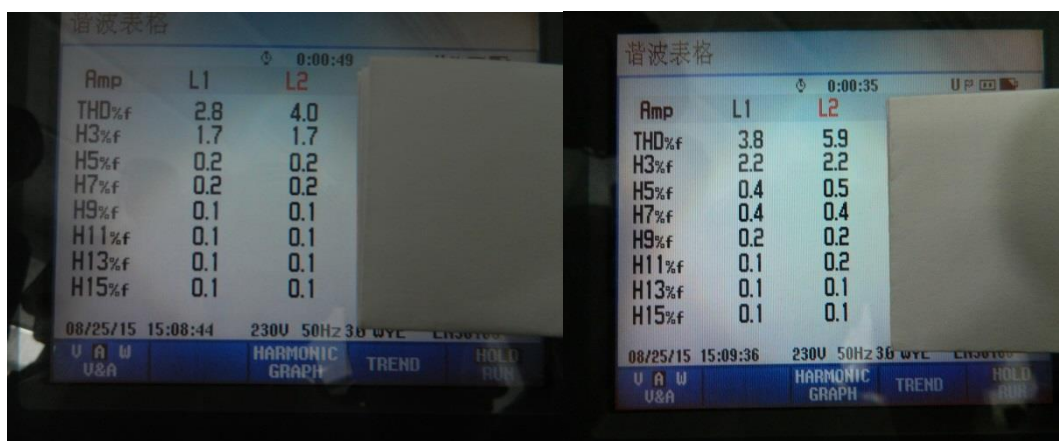
表 3 IEEE519-2014



圖 9 諧波量側示意图



(a)(b)



(c)(d)

圖 10 諧波量測儀器 Fluke 於不同負載下之讀值:(a)1kW (b)2kW (c)3kW (4)4kW)

圖 10 顯示 3、5、7 次諧波電流失真率皆低於表 3 所示 IEEE519 最低失真率的要求。圖 10 為諧波在 1kW、2 kW、3 kW、4 kW 等不同負載下最嚴重的諧波量側結果。

茲取 3kW 負載下的諧波讀值(圖 10(c))，三次諧波電流相當於零序電流

$$I_{A,3rd} = I_A \times 1.7\% = 0 \text{ pu}$$

$$I_{B,3rd} = I_B \times 1.7\% = 4.015 \times 10^{-5} \text{ pu}$$

$$I_{C,3rd} = I_C \times 1.7\% = 4.8181 \times 10^{-5} \text{ pu}$$

顯示:最大諧波電流低於表 3 IEEE519 的最嚴格限制值(7%)取三相平均:

$$\frac{I_{A,3rd} + I_{B,3rd} + I_{C,3rd}}{3} = 2.9443 \times 10^{-5} \text{ pu}$$

茲取此三相諧波電流在低壓側 60m 處所造成的三次諧波電壓:

$$\begin{aligned} 2.9443 \times 10^{-5} \times (Z_{500MCM}^{0,3th} + Z_{477}^{0,3th} + Z_{sys}^{3th} + Z_{低壓}^{0,3th} + Z_{C50}^{3th}) \\ = 6.0876 \times 10^{-4} \angle 70.8585 = V_{3rd} \end{aligned}$$

三次諧波電壓失真率為 HD%=0.06% 低於表 3 IEEE519 諧波電壓失真率(5%)要求

五次諧波相當於負序:

$$I_{A,5th} = I_A \times 0.2\% = 0$$

$$I_{B,5th} = I_B \times 0.2\% = 4.732 \times 10^{-6}$$

$$I_{C,5th} = I_C \times 0.2\% = 5.6684 \times 10^{-6}$$

$$\frac{I_{A,5th} + I_{B,5th} + I_{C,5th}}{3} = 3.464 \times 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} 3.464 \times 10^{-6} \times (Z_{500MCM}^{2,5th} + Z_{477}^{2,5th} + Z_{sys}^{5th} + Z_{低壓}^{2,5th} + Z_{C50}^{5th}) \\ = 7.607 \times 10^{-5} \angle 80.9729 = V_{5th} \end{aligned}$$

五次諧波失真率: HD%=0.007% 低於圖 7 IEEE519 諧波電壓失真率(5%)要求

七次諧波相當於正序:

$$I_{A,7th} = I_A \times 0.2\% = 0$$

$$I_{B,7th} = I_B \times 0.2\% = 4.7236 \times 10^{-6}$$

$$I_{C,7th} = I_C \times 0.2\% = 5.6684 \times 10^{-6}$$

$$\frac{I_{A,7th} + I_{B,7th} + I_{C,7th}}{3} = 3.464 \times 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} & 3.464 \times 10^{-6} \times \left(Z_{500MCM}^{1,7th} + Z_{477}^{1,7th} + Z_{sys}^{7th} + Z_{低壓}^{1,7th} + Z_{C50}^{1,7th} \right) \\ & = 1.0586 \times 10^{-4} \angle 83.5259 = V_{7th} \end{aligned}$$

七次諧波失真率: HD%=0.01% 亦低於 IEEE-519 所要求的 5%

5. 電壓降

BD46 饋線於尖峰時段由於大愛村設置高達 1650kW 的 PV，可能會造成饋線的電壓升，惟此時(參閱表 1，日照時段為係由 PV 向蓄電池充電)本案的 15 戶並無逆送電力至 BD46 饋線，遂不影響 BD46 饋線的電壓升。至於深夜，由於大愛村的 PV 已停止出力，雖然本案的 15 戶或會有逆送電力，由於本案換流器出力限制在 3kW，於深夜假設每戶需量低至 1kW，遂僅逆送 2kW，15 戶總計僅 30kW，相對於深夜的饋線負載茲以保守估計約為 592kVA($=\sqrt{3} \times 11.4kV \times 30A$)，對於 BD46 饋線的電壓升遂影響有限。

九、 結論與建議

本案經予評估 pv 出力瞬減所造成的電壓變動率以及換流器諧波所造成的諧波失真率皆符合台電及 IEEE519 標準之要求。二者皆係指在饋線變壓器低壓線距離變壓器 60m 處(相當於用戶電表處)側的電壓變動率；諧波電流電壓失真率。至於電壓降、逆送電力以及本儲能系統的故障隔離特性，經予評估，皆不會造成饋線運轉上的困擾。