

出國報告（出國類別：實習）

即時動態模擬系統應用技術研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：林閔洲 電機研究專員

派赴國家/地區：加拿大

出國期間：108年6月2日至6月16日

報告日期：108年8月14日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：即時動態模擬系統應用技術研習

頁數 40 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話 台灣電力公司/陳德隆/2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

林閔洲/台灣電力公司/綜合研究所/電機研究專員/8078-2228

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：108年6月2日至6月16日

派赴國家/地區：加拿大

報告日期：108年8月14日

關鍵詞：即時動態模擬(Real-Time simulation)、即時數位模擬器(Real-Time Digital Simulator)、功率級硬體閉迴路(Power Hardware in the Loop, PHIL)、再生能源(Renewable Energy)

內容摘要：(二百至三百字)

電力系統發生故障事故時，必須藉由事故肇因分析獲得可靠資訊，進而找出

故障主因及擬定預防措施。然系統故障往往並非僅是單一設備所引起，是由不同設備連鎖動作所導致，良好之分析工具可有效提升分析效率，縮短分析工作時間，以及提升分析結果準確度。本公司利用即時動態模擬系統進行事故分析工作已有數年經驗，已成功針對發電、輸電及配電系統…等設備故障分析提供協助，改善系統運轉問題，以及縮短停電調查時間，有效減少因調查停電而無法發電之停電損失。本計畫目的面對未來再生能源發電佔系統比例逐漸升高，預備分析工具及技術做為因應，參訪學術單位了解學術應用，並學習即時模擬系統與傳統模擬程式之共通模擬技術。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網（<https://report.nat.gov.tw/reportwork>）

目錄

行政院及所屬各機關出國報告提要	2
目錄	4
一、 前言	5
1.1. 出國緣由與目的	5
1.2. 出返國行程	5
二、 即時動態模擬系統應用技術	6
2.1. 即時動態模擬系統介紹	6
2.2. RTDS Technologies 公司基本介紹	8
2.3. 再生能源模擬應用	11
2.4. 功率級硬體閉迴路應用	17
2.5. 電力電子設備應用	22
2.6. 參訪曼尼托巴大學	25
2.7. 跨平台共通模擬應用	28
三、 結論	38
4.1. 心得與建議	38
4.2. 出國期間所遭遇之困難與特殊事項	39
四、 參考資料	40

一、前言

1.1.出國緣由與目的

電力系統係由多項電力設備相互連接組成，例如發電機、變壓器、輸電線路、電抗器、電容器...等，而當電力系統發生故障事故時，必須藉由事故肇因分析獲得可靠資訊，進而找出故障主因及擬定預防措施。然系統故障往往並非僅是單一設備所引起，是由不同設備連鎖動作所導致，並且可能伴隨著不同型態之故障(如單相或多相故障，接地或非接地型故障)，以至於增加故障分析之困難度。有鑒於此，故障分析工具則扮演至關重要角色，良好之分析工具可有效提升分析效率，縮短分析工作時間，以及提升分析結果準確度，故國際上提出一即時模擬分析工具可符合上述要求。本公司利用即時動態模擬系統進行事故分析工作已有數年經驗，成功針對核能電廠、水火力發電廠、超高壓輸電線路、變電所，以及配電線路...等設備故障分析提供協助，改善系統運轉問題，以及縮短停電調查時間，有效減少因調查停電而無法發電之停電損失。

本計畫目的藉由參加加拿大 RTDS Technologies 公司所舉辦之進階訓練課程，學習微電網及再生能源之模型建置與分析技術，用以面對未來再生能源發電佔系統比例逐漸升高，本國將面臨不同於傳統電網運轉與調度之挑戰，必須具備相關分析工具及技術做為因應。另外，藉由參訪合作開發即時模擬系統之學術單位-曼尼托巴大學，除欣賞已有百年歷史之美麗校園外，更能夠了解學術領域應用及此設備之發源地。最後，參觀 Power Tech Labs 不僅學習即時模擬系統與傳統模擬程式之共通模擬(co-simulation)技術外，該單位為加拿大 BC 省水力發電公司轄下之研究試驗部門，除模擬技術交流外亦可參訪其電力試驗技術，作為本公司參考借鏡。

1.2.出返國行程

本出國計畫自 108 年 6 月 2 日起，至 108 年 6 月 16 日止，全程共計 15 天，詳細行程如下表所示：

日期	起訖地點	工作紀要
6/2	台北-溫尼伯 (Winnipeg)	去程
6/3~6/9	RTDS Technologies Inc. 溫尼伯	學習進階訓練課程包含電力電子應用、再生能源太陽能與風能、功率級硬體閉迴路、高壓直流傳輸等操作技巧與應用方法。
6/10~6/11	University of Manitoba；溫尼伯-溫 哥華(Vancouver)	研討即時動態進階模擬邏輯應用及電力電子模擬技術，交流學術研究成果及應用實例。參訪完畢搭機前往下一任務地點。(溫尼伯-溫哥華)
6/12~6/15	Power Tech Labs 溫哥 華	學習電力系統暫態分析軟體(TSAT)結合即時動態模擬，混合式共通模擬技術。
6/16~6/17	溫哥華-台北	返程

二、 即時動態模擬系統應用技術

2.1. 即時動態模擬系統介紹

電力系統模擬分析商用軟體迄今已有數十年歷史，主要可分為即時型(Real-time)與非即時型(non-real-time 或 offline)，其中即時動態模擬(Real-Time Simulation)拜電腦運算能力進步所賜，可將電力系統元件分為數個子系統(Subsystem)後交由不同硬體之處理器(CPU)平行運算，藉由平行運算可比傳統離線式模擬軟體運算速度更快，進而達成即時模擬要求。所謂「即時性」意即於真實世界過了一秒鐘時，模擬也僅須一秒鐘即運算出結果；不同於傳統非即時模擬程式，如須模擬一秒鐘之系統響應，往往需費時數分鐘才能運算出結果，若所分析之系統規模越大，所需運算的時間則更長，故以往系統分析工作需要花費較多時間進行模擬運算。

而除了以即時型與非即時型模擬軟體分類外，另一主要分類則是以求解方

式進行分類，電力系統分析主要求解方式可分為向量方式(phasor)及電磁暫態方式(Electromagnetic Transient, EMT，以下簡稱 EMT 模擬)，向量方式係將電力系統視為三相平衡系統，因此可以等效為單相系統考慮其正序成分(Positive Sequence component)進行分析，藉此簡化系統複雜度但仍可達到分析之準確度，一般常用於大型系統之系統規劃及運轉調度使用。而電磁暫態方式須建立完整之三相模型，並且考慮非線性之元件，藉以模擬各元件間細部響應達成暫態分析工作，典型應用於小規模區域系統之電力設備動作行為模擬分析，如開關投切、設備高頻變化、輸電線/電纜投切變化...等。其中主要商用軟體中，離線型向量式的有 Siemens 公司的 PSS/e、Power Tech Lab 公司的 DSA Tools、MATLAB 中的 SimPowerSystems，離線型 EMT 模擬分析軟體 PSCAD、EMTP...等；即時型 EMT 模擬主要有 OPAL-RT 公司所開發之 HYPERSIM 模擬器^[1]及 RTDS Technologies 公司所開發之 RTDS(Real Time Digital Simulator，以下簡稱 RTDS)模擬器^[2]為最具代表性。

隨著即時動態模擬技術進步，國際上應用此技術的單位日益增加，動態模擬應用領域涵蓋微電網模擬、資通訊網路安全、功率級硬體閉迴路測試、高壓直流傳輸、彈性交流傳輸系統、保護設備測試、電力電子設備、向量量測單元，以及智慧電網 IEC 61850...等應用領域，應用領域非常廣泛，提供更多分析模型以及驗證技巧。

應用領域中之硬體閉迴路技術(Hardware in the Loop, HIL)，即為利用『即時模擬』之特點，使其與真實設備相互連結如圖 1 所示，以模擬系統模擬真實電網，透過輸入/輸出(Input/Output, I/O，以下簡稱 I/O)介面輸出電力設備裝設位置之電壓及電流信號，再經過功率放大器將信號輸出接至電力設備，如圖中之保護電驛；接著，再將電驛動作信號透過 I/O 介面回傳至模擬系統中，控制模擬系統中之斷路器是否執行跳脫或是投入。因此，藉由模擬系統輸出信號接至電力設備後，再由設備送出信號回授至模擬系統，即構成一迴路架構，利用此技術可驗證設備接入系統後所產生反應是否符合真實所需，有助於驗證過往

無法測試之設備。不同於過往測試工作。只能以虛擬信號且固定測試點方式來進行測試，測試信號與真實安裝於電網依然存在誤差，導致雖然測試結果正常但因為不符合真實系統情形，使得設備最後上線運轉時產生誤動作等情形，對運轉與維護人員造成不少困擾。

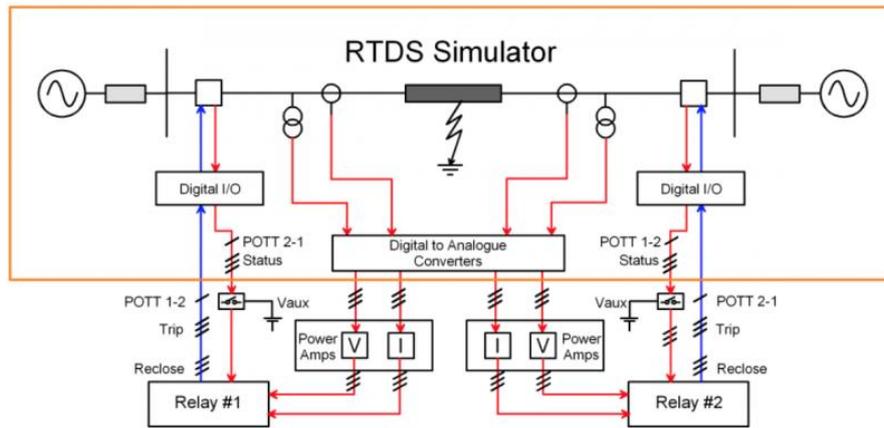


圖 1 硬體閉迴路測試架構(圖片參考自 RTDS 公司網站)

隨著即時動態模擬技術應用日趨成長，在電力領域中不論是電力公司、研究機構、學術單位，以及設備製造商...等，有助於提升研究品質、改善提升運維效率、進行新技術開發，並全面驗證產品品質。未來電網架構改變，再生能源與電力電子設備持續增加，此技術將可提供良好輔助，使電力發展能夠克服不同挑戰。

2.2. RTDS Technologies 公司基本介紹

本次參訪行程其中之一為赴加拿大曼尼托巴省參訪 RTDS Technologies 公司(以下簡稱 RTDS 公司)並學習即時動態模擬系統進階課程。RTDS 公司位於曼尼托巴大學 Smart Park 園區內，園區內公司除電力研究領域外，農業研究也是其主要發展領域。圖 2 所示為 RTDS 公司外觀以及筆者與工程師合影，該公司建築特色之一為橫跨湖面上並且獲得綠建築獎項。如此規劃發人省思公司於追求進步時，除了科技發展成功外，如何降低對環境的影響，使得公司永續經營，能為地球貢獻一份心力，更是令人佩服規劃者之眼界。圖 3 為 RTDS 公司

管理主管之一名為 Rudi Wiercks，該主管主要負責技術類發展，與各國電力公司、研究機構、學術單位常有互動交流。Rudi 對於台灣電力系統很有興趣，他表示台灣不同於北美地區之大系統，大型系統彼此連結能夠互相支援，小型系統反而在運轉調度上有很多大系統所無法發現之處；另外筆者與他分享交流本公司利用 RTDS 模擬系統於台澎海纜合聯模擬，以及接入實體同步電驛用以操作分析合聯過程，作為合聯前置研究內容，亦提供回饋使用者心得，使他們能夠針對使用者心得進行設備改善及優化，雙方獲益良多。



圖 2 筆者與 RTDS 工程師合照



圖 3 筆者與 RTDS 公司主管合照

圖 4 為本次課程主要場所-RTDS 公司之 Training Room，以及 Training Room 中所包含之設備。設備中主要包含模擬主機，其訓練課程可同時提供數

十位學員進行模擬操作，並可見其不同時期所開發之設備依然能夠運作良好，新舊設備也能夠擁有良好相容性，其中部分設備更已使用十幾年，能夠向使用者證明其設備品質。除了軟體模擬外，另一值得注意之處為模擬主機旁安裝了包含不同製造廠家之保護電驛、變電所自動化協定轉換器、電力電子設備模擬單元...等，這些設備研究主題及使用型號與本公司現行運轉設備十分相近，因此，在本公司進行應用領域研究工作時，使用相同型號設備能夠更直觀互相交流擷取彼此經驗，提升研究成果品質。圖 5 為 RTDS 公司設備生產之測試實驗室，其元件由加拿大各地工廠提供後，集中至 RTDS 公司進行組裝、佈線、測試，由此可見設備之軟硬體技術皆由該公司所掌握，不僅控管品質以及整體系統之效能，對產品由開發直至售後充滿信心，提供全球顧客更完善之服務。



圖 4 RTDS 公司之 Training Room



圖 5 RTDS 設備生產之測試實驗室

2.3. 再生能源模擬應用

本次參加即時動態模擬系統進階課程，學習再生能源模型建立以及功率級硬體閉迴路測試。隨著未來再生能源佔系統比例越來越高，再生能源不穩定之輸出將造成系統運轉難題，利用 EMT 模擬方式建置模型能夠更完整掌握再生能源設備之變動，藉以發現於再生能源高佔比下，電力設備端與系統端所會遭遇的問題。

圖 6 所示為微電網模型 1 架構圖，其中有三項分散式能源(Distributed Energy Resources, DERs)為太陽光電、儲能系統以及發電機。圖 7 至圖 9 分別為儲能系統、太陽能及發電機模型，由圖中可見太陽光電及儲能系統係透過 DC/AC 電壓源轉換器(Voltage Source Converter, VSC)與電網相互連結，並在模型中增加 AC 側發生短路接地故障；發電機模型中包含了調速機(Governor)及勵磁機(Exciter)模型。

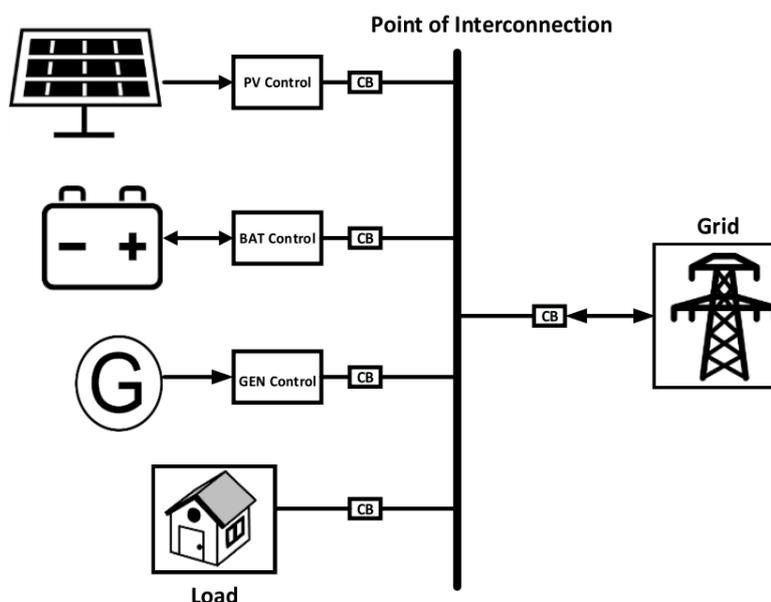


圖 6 微電網模型 1 架構圖

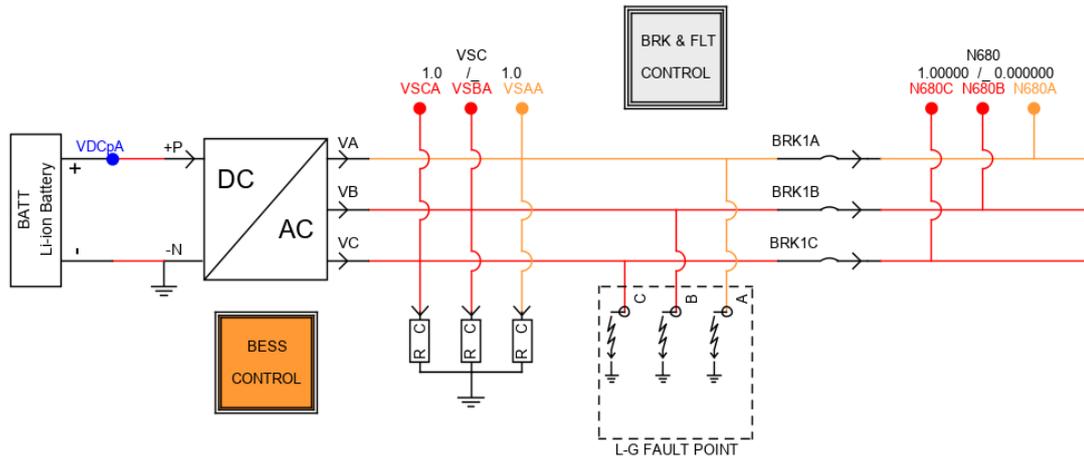


圖 7 儲能系統模型

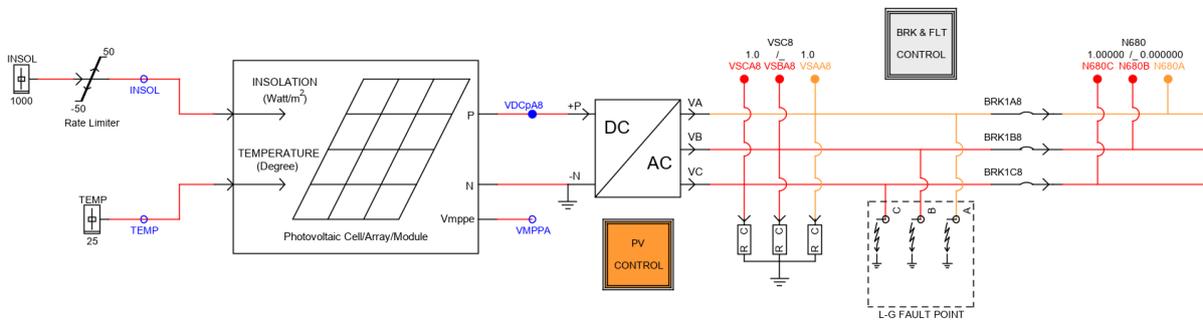


圖 8 太陽能模型

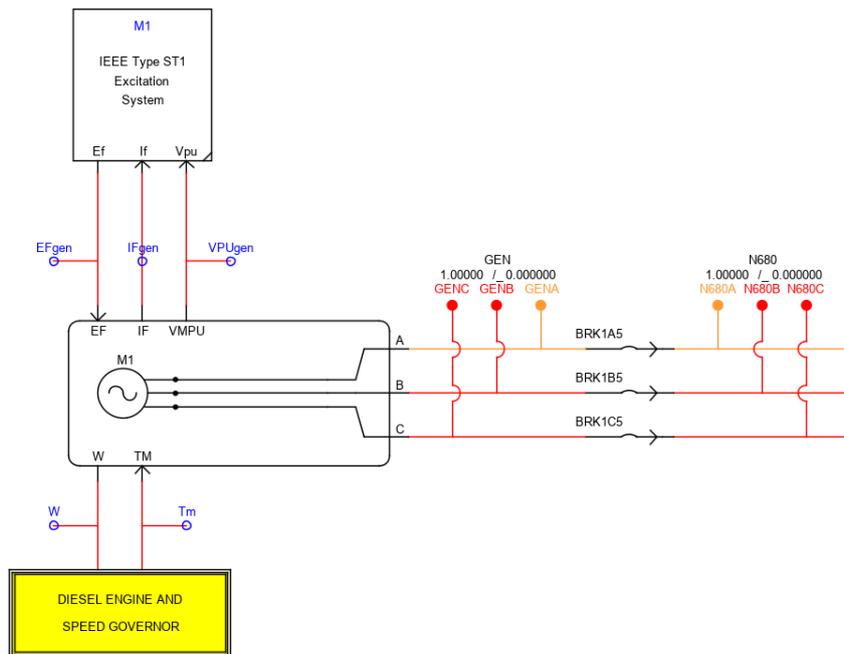


圖 9 發電機模型

此模型可以測試在併網(Grid Connected Operation)時及孤島運轉(Islanded Operation)下情境。首先，在併網情境下，可以得知負載由發電機與太陽能供電，儲能系統則由電網提供能量進行充電，如圖 10 所示。接著測試孤島運轉情境，由圖 11 可見缺少了電網供電後，發電機提高出力以維持負載所需電力，此時儲能系統亦放電提供能量。在圖 12 中，模擬發生 5 週波故障後，發電機需要多久時間才能將系統頻率恢復至穩定範圍。

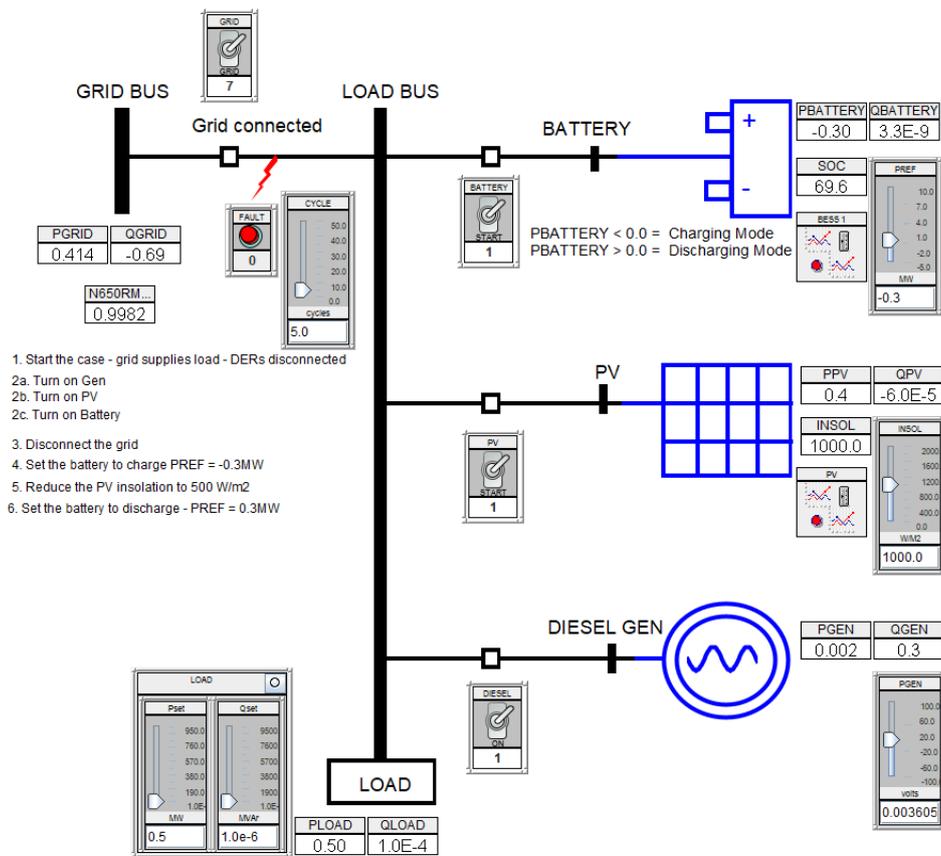


圖 10 模擬併網情境

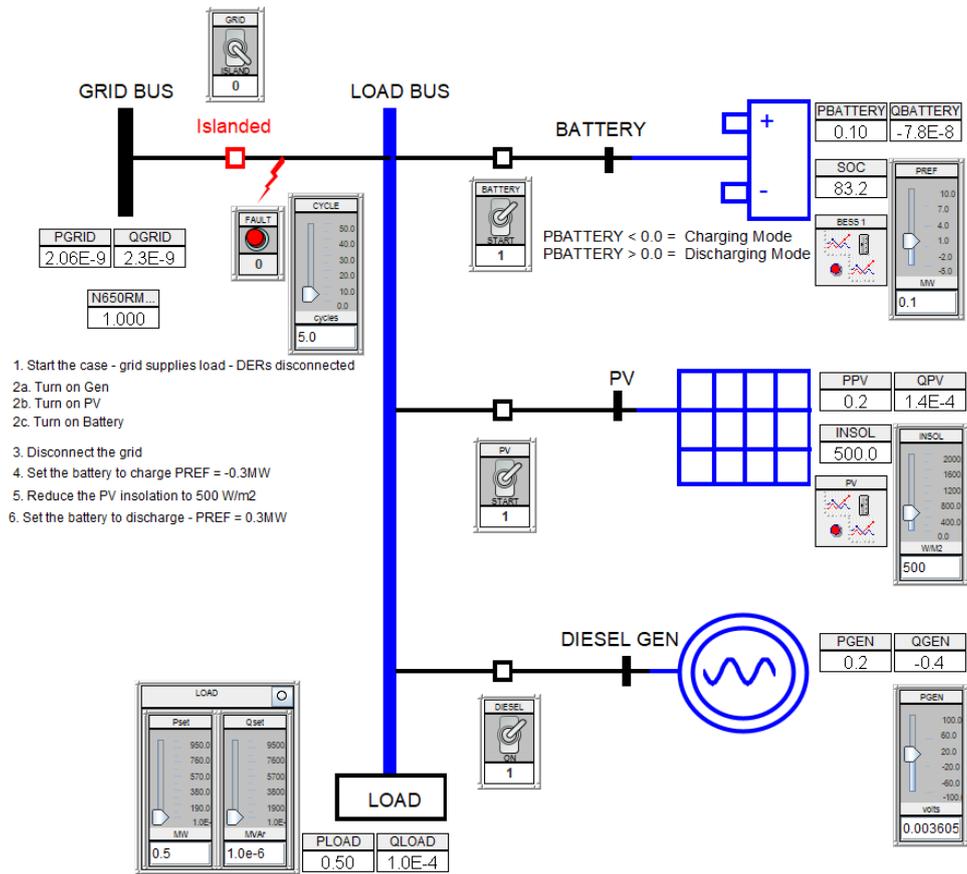


圖 11 模擬孤島運轉情境

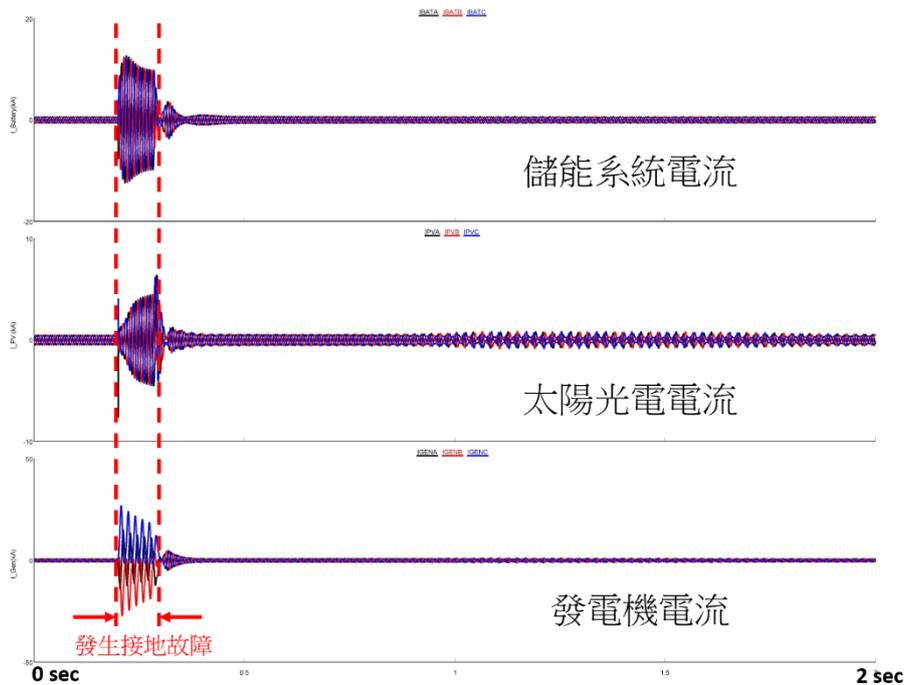


圖 12 模擬孤島運轉發生故障情境

利用微電網模型 1 能夠了解如何建構再生能源模型，設定各個元件參數與如何運作，以及在不同運轉模式下，各個元件間相互關係，可以提供學員明確且清晰的觀念。接著介紹微電網模型 2，此模型則提供了較為完整之架構，以及增加了雙饋式風力發電機組(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)，架構圖如圖 13 所示。在模型中於 BUS 1 位置加入切換式電容器，用以控制與穩定微電網與系統電網連接點之電壓。另外也考慮微電網孤島運轉後，重新併聯加入系統，其同步併聯條件如表 1 所示，必須模擬符合同步條件限制後才能夠成功併入系統。除此之外，在負載端亦加入低頻卸載保護，其低頻保護條件如表 2 所示。由模擬條件可見此模型更貼近真實系統配置，不僅提供再生能源運轉資訊外，更提供了電網運轉、保護規劃等相關元素，使得分析更為完整。

表 1 微電網模型 2 同步併聯條件

DERs 總容量 (kVA)	頻率差 (Δf , Hz)	電壓差 (ΔV , %)	相角差 ($\Delta\phi$, °)
1,500 ~ 10,000	0.1	3	10

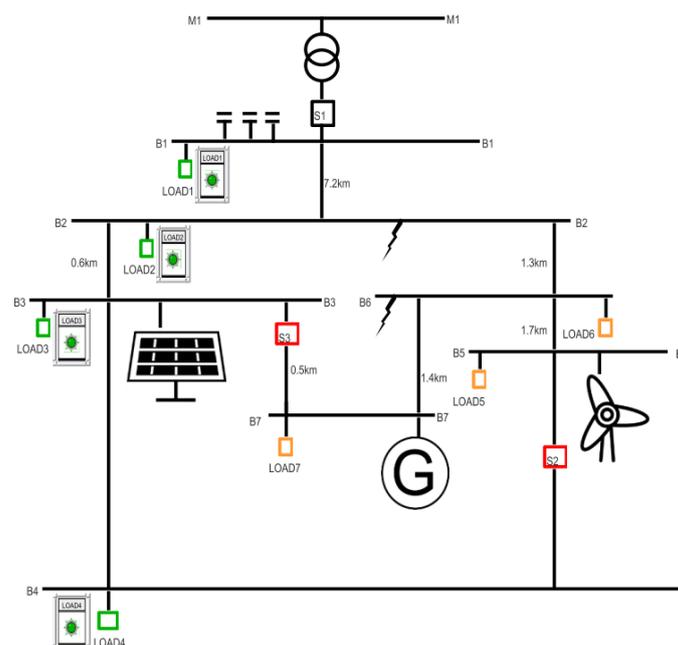


圖 13 微電網模型 2 架構圖

表 2 微電網模型 2 低頻卸載條件

段數	卸載條件	時間 (sec)	負載
1	$f < 59.5\text{Hz}$ 或 $\frac{df}{dt} > 1.5 \frac{\text{Hz}}{\text{sec}}$	0.1	LOAD 1
2	$f < 58.7\text{Hz}$ 或 $\frac{df}{dt} > 1.5 \frac{\text{Hz}}{\text{sec}}$	0.08	LOAD 2
3	$f \leq 58.3\text{Hz}$	0.08	LOAD 3
4	$f \leq 58.0\text{Hz}$	0.08	LOAD 4

首先模擬孤島模式之情境，將微電網與系統解聯後系統會遭受擾動而擺動，須待到系統回復穩定，這點與真實系統一致。待系統穩定後，模擬微電網發生故障，故障時系統頻率下降將導致低頻電驛動作，當符合表 2 所述卸載條件時，該段負載即被卸除，卸載至頻率能夠回復後藉以保持微電網頻率穩定，模擬波形如圖 14 所示，待頻率穩定後再逐步恢復負載併聯。

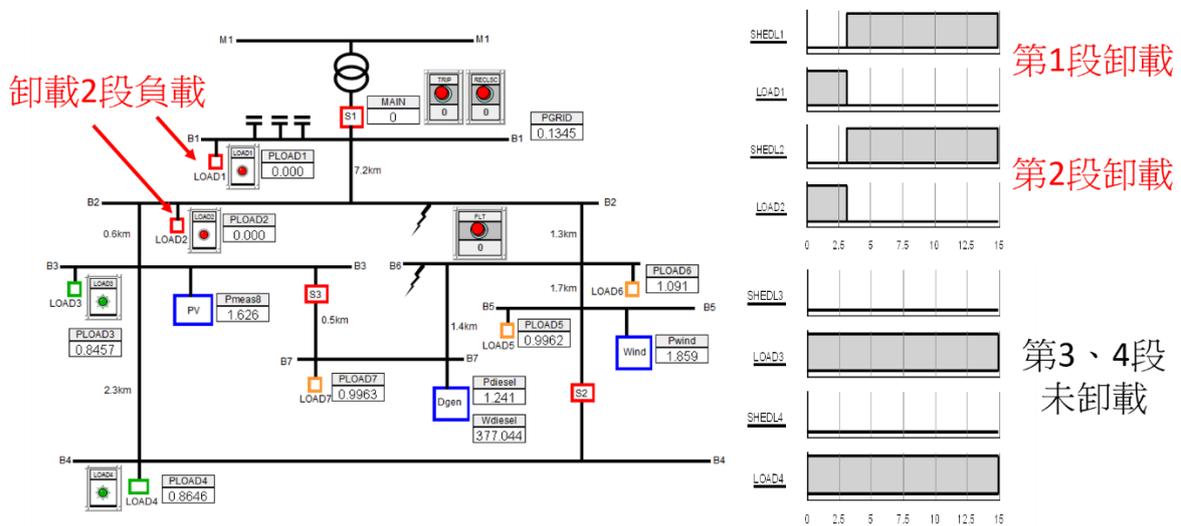


圖 14 模擬故障低頻卸載情境

接著，模擬微電網由孤島模式併聯至主電網系統中，並確認同步條件是否符合。若不符合表 1 同步條件時，則無法將斷路器 S1 投入，為了符合同步條

件，須併入切換式電容器，並觀察 BUS 1 電壓、頻率、相角與主電網系統同步後，此時才能夠將斷路器 S1 投入，投入波形如圖 15 所示。由模擬過程可以了解微電網運作之情形，並且與真實系統十分相似，目前台灣離島再生能源比例漸高，此模型應用於建立微電網有許多可參考之處。

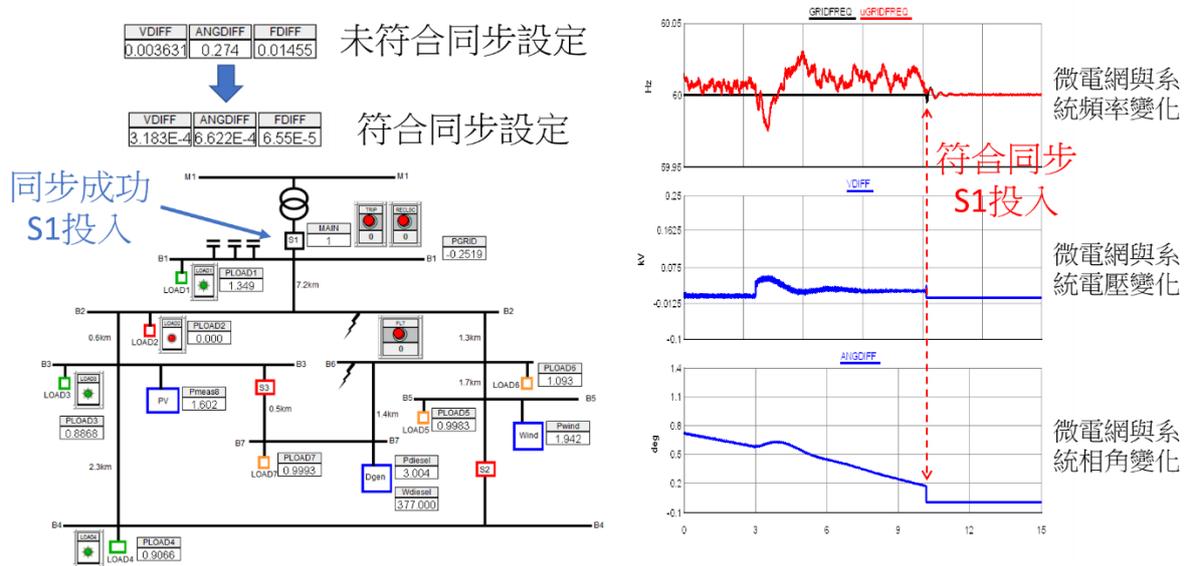


圖 15 模擬微電網同步併聯至系統情境

2.4. 功率級硬體閉迴路應用

功率級硬體閉迴路(Power Hardware in the Loop, PHIL，以下簡稱 PHIL)主要可用於測試再生能源加入系統時，遭遇系統擾動時，其保護規劃及抗系統擾動之能力，不僅可驗證設備品質是否與製造商宣稱規格一致；在再生能源佔系統比例越來越高時，更須確認系統發生故障時，再生能源能否維持穩定輸出，提供故障穿越能力(Fault Ride Through)，避免同時跳脫，而引起故障範圍擴大。全球電力公司與研究機構，皆致力於研究如何因應未來再生能源日益增加所造成的影響，而功率級硬體閉迴路功能，便能提供良好的研究與分析平台。

圖 16 所示為控制級硬體閉迴路架構圖，主要藉由數位/類比轉換(D/A converter)之輸入/出(I/O)介面，透過放大器將信號送至被測物，再經由數位輸入介面將被測物動作情況回授至模擬系統中。不同於控制級硬體閉迴路架構，

主要的差異在於放大器扮演的角色，在 PHIL 架構中，必須選用四象限功率放大器。所謂四象限，若放大器輸出電壓電流時功率為正值，亦即為電壓與電流個別可為正值與負值，如此可完整呈現設備與電網連結之真實響應。

如圖 17 所示，將真實電網建置於即時動態模擬器中，利用模擬器之輸入/出介面，經過放大器與再生能源設備連結，設備輸出電流經過感測器回授至模擬系統中，組成閉迴路之測試架構。除了應用類比輸出/入介面外，亦可利用數位通信介面，已有廠商可提供數位通信介面與模擬系統溝通，如圖 18 所示為德國 SPS 四象限放大器，其透過 AURORA 通信協定，可與模擬系統相互溝通。數位通信介面的優點可以減少類比介面之轉換延遲，使系統反應更快速。

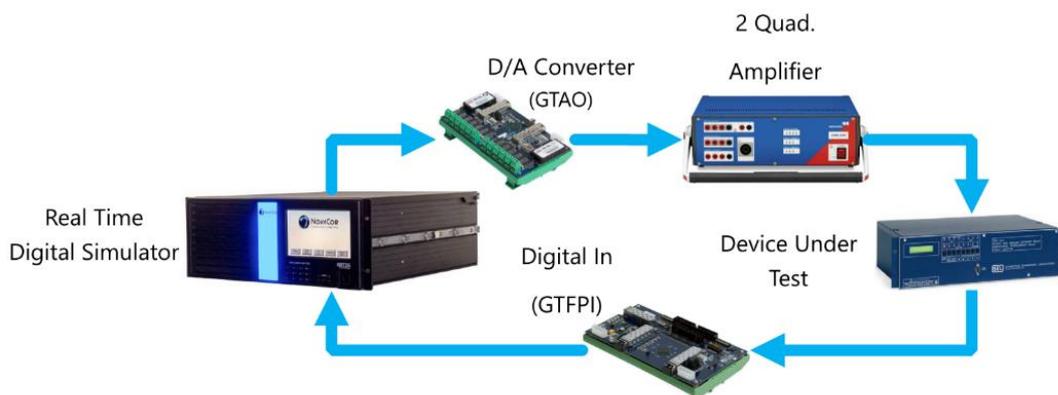


圖 16 控制級硬體閉迴路架構圖

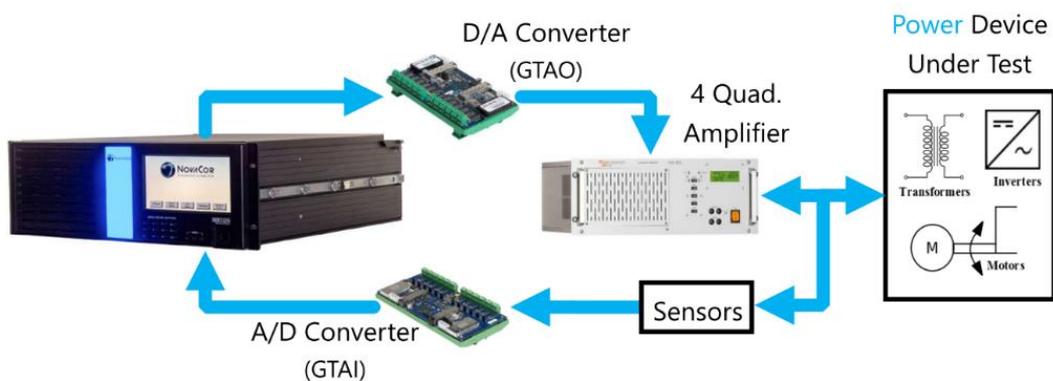


圖 17 功率級硬體閉迴路架構圖



圖 18 功率級硬體閉迴路通信介面架構圖

功率級硬體閉迴路另一需要注意的問題，就是整體系統之頻寬是否足夠，以及系統組成後是否可以穩定運作，有許多文章提出驗證系統是否能夠穩定之方法，在放大器容量提升至 MVA 等級下，任何不穩定狀態恐將造成危險的高電壓或電流，對設備及操作人員安全都將造成危害，這是非常危險的問題，因此必須特別小心規劃與處理。

以下針對本次參訪 RTDS 公司，展示 PHIL 功能說明及演示進行介紹：本此展示由 255W 之太陽光電板及變頻器(Inverter)作為被測物，如圖 19 所示，其中太陽能發電後透過四象限放大器，將發電情形回授至即時模擬系統中，而模擬系統所建置之分析模型如圖 20 所示。由圖中可見模擬系統中建置一電網 (AC Grid)，將太陽能等效為一電流源與阻抗，太陽能及電網連接至負載(Load)，並於太陽能出口側建置一接地故障模型(Fault)。透過模型中之太陽能輸出至負載端電壓 V_{ac} 輸出至放大器中，使實體太陽能光電系統調控出力大小，另太陽光電輸出之電流，透過放大器回送至電源，並將信號透過 Aurora 介面回授輸入模擬系統中，由此達成閉迴路架構。

由於 PHIL 設備與電網電源相互連接，於模擬啟動前必須確認設備接地完善，並且帶電接點已鎖牢固定未裸露，以確保操作人員之安全。模擬啟動時須先確認模擬中與真實設備輸出情形是否一致，故先以開迴路方式(Open-Loop)進行確認，待開迴路確認無誤後，啟動模擬系統中閉迴路開關，開始進行閉迴路之測試。

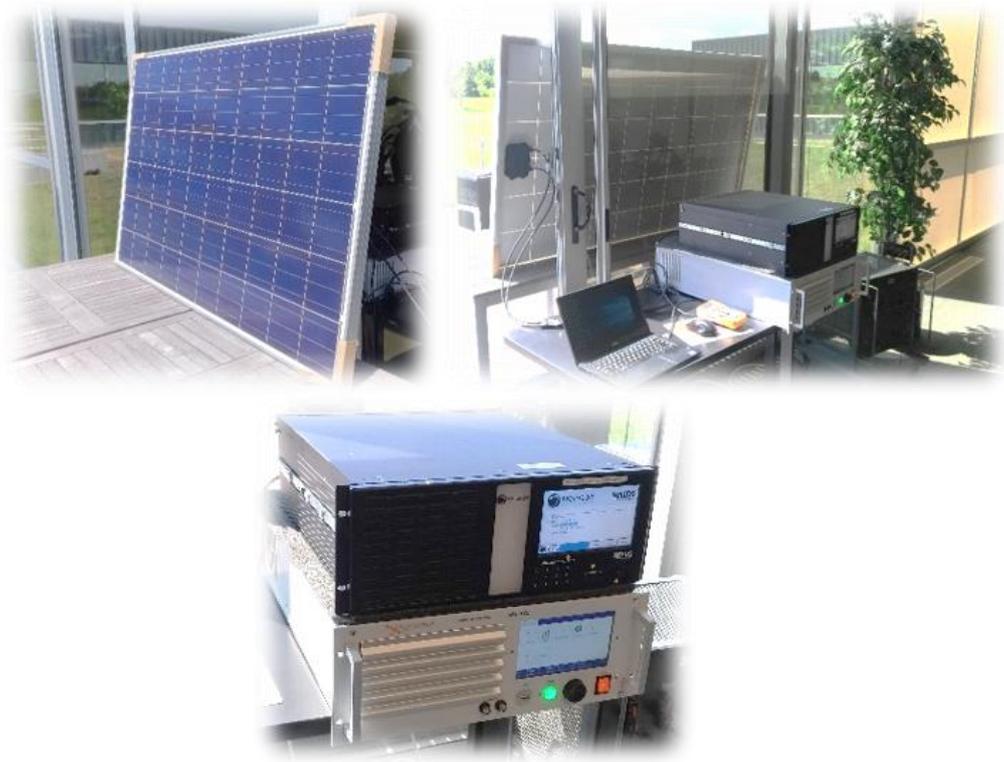


圖 19 PHIL 展示實體設備照

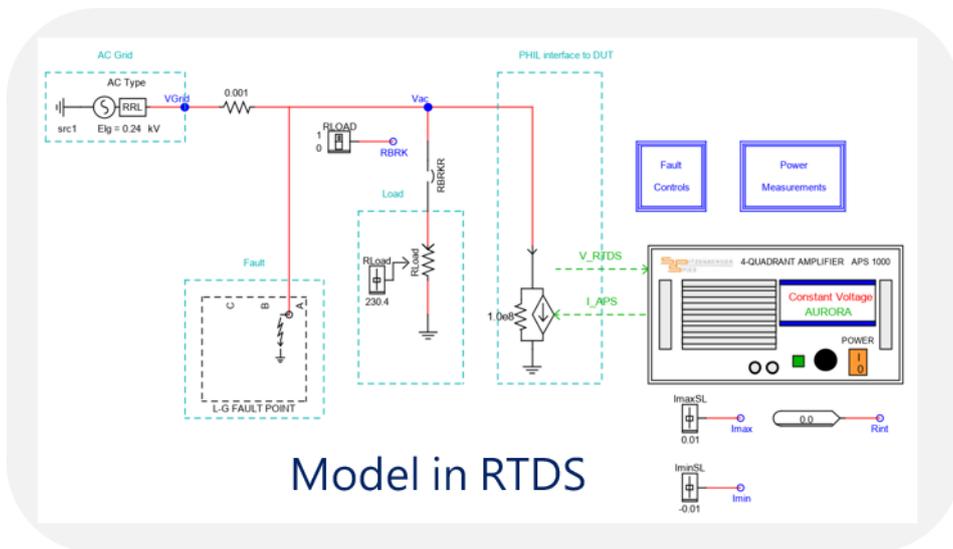


圖 20 PHIL 展示所建置模型

依據太陽光電變頻器說明書，基於設備安全考量，當變頻器接收到電網 AC 電源後，需持續 5 分鐘後變頻器才將太陽能發電輸出至電網中。由圖 21 可見左方為模擬系統之各節點電壓與電流波形，其中右側有 3 具電表，由上而下依序為模擬電網提供功率、模擬負載功率，以及實際太陽光電輸出功率，其數

據分別為電網提供 44.64W、負載為 249.7W，太陽光電發電 205.1W。由於功率流向設備顯示為正值，太陽光電為輸出功率流向電網，故數值顯示為負值。除此之外，太陽光電遭遇故障之反應，亦為研究再生能源設備重點，圖 22 顯示當太陽光電出口端發生 10 週波接地故障時，由波形圖中可見最上方第 1 個信號-電網電壓產生壓降，以及第 2 個信號-電網電流產生 10 週波高電流；另外，亦可由倒數第 2 個信號-變頻器電流可見太陽光電保護設備動作，已與電網解連。

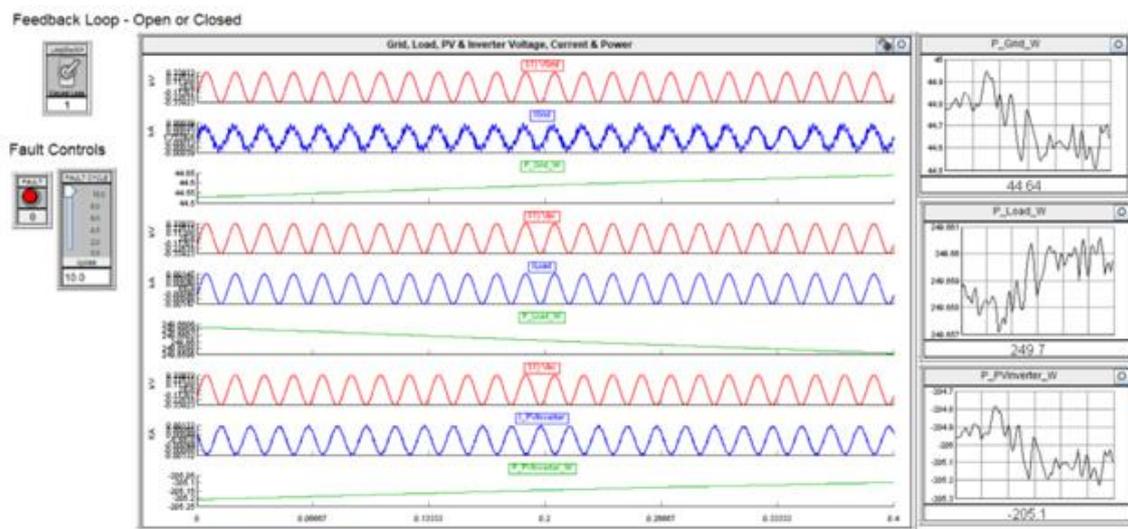


圖 21 太陽能系統發電輸入至模擬系統中

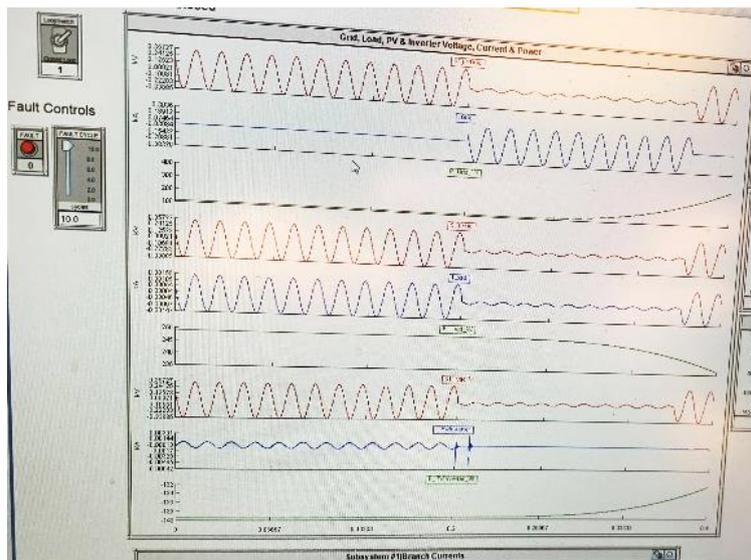


圖 22 模擬太陽能出口端發生接地故障

藉由此模型與設備展示，提供完整 PHIL 架構及動作原理，並完整演示太陽能發電併網及故障時解連之過程，對於再生能源設備動態試驗平台提供明確建置方向。

2.5. 電力電子設備應用

隨著電子技術進步，電力電子應用於電力領域越來越廣泛，例如高壓直流傳輸(HVDC)、整合再生能源將直流電(DC)轉為交流電(AC)進入電網、直流-直流轉換器、直流斷路器、彈性交流傳輸系統(Flexible AC Transmission System, FACTS，設備如 STATCOM、SVC、UPFC)...等。其時間步長更是由 25~50 μ sec 可模擬 LCC、SVC 等模型，進步至 <1 μ sec 可模擬特定控制法或架構，其應用領域如圖 23 所示。

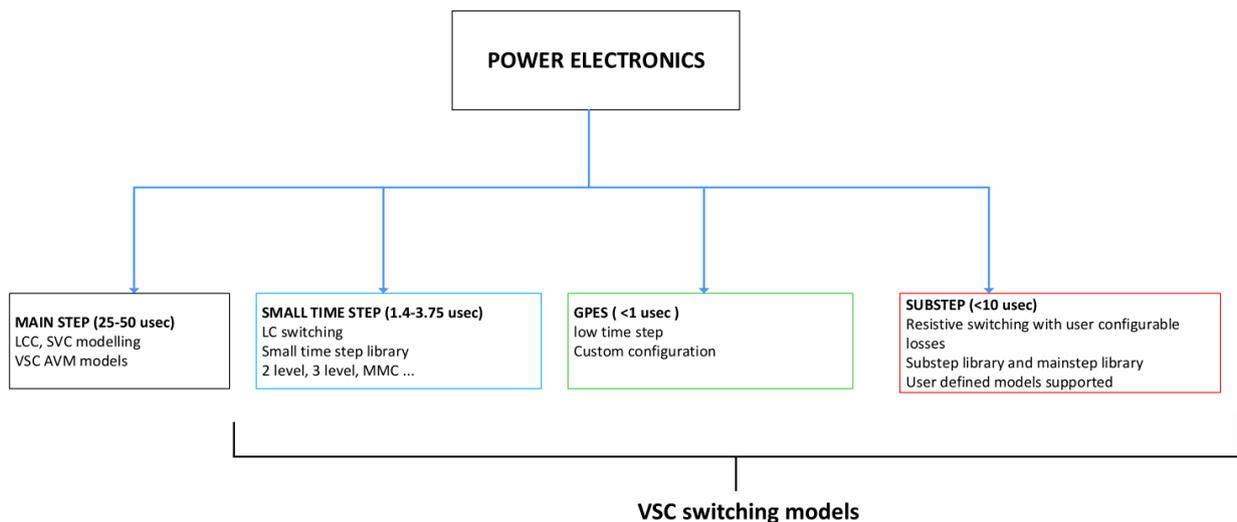


圖 23 電力電子應用領域分類

圖 24 為進行電力電子模擬時，以小步階(Small Time Step)方式進行計算求解，模擬原理係將電感、電容等元件等效為電流源併聯一電導。以此方式求解電路之反矩陣運算量較大。由圖 25 可見此模擬頻寬受限於開短路阻抗比，模擬步階需小於 3.75 μ sec 才不至於失真。另外一種模擬方式是於電力電子設備與電力系統之間增加一介面傳輸線模型(Interface T-line)，因傳輸線由發送端傳輸至接收端會有時間延遲，藉由介面傳輸線可將小步階模擬與電網系統之結果

以 1 個步階傳輸時間進行交換，以達成模擬電力電子設備動作效果。

上述做法可藉由安排適當線路架構及設置參數減少模擬誤差，小步階模擬廣泛應用於 HVDC、FACTS、再生能源、微電網...等領域，而利用 RTDS 公司新開發之硬體-NovaCor 更能提升小步階-模擬能力。

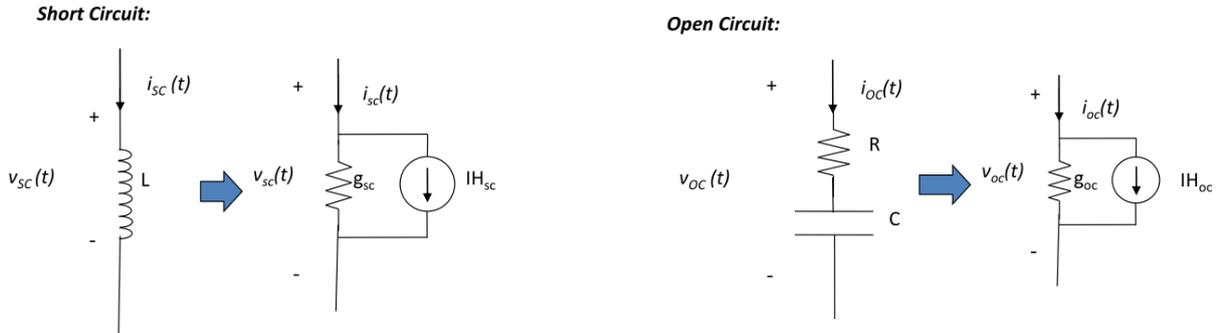


圖 24 小步階模擬 LC 表示法

Side effect: Operational bandwidth

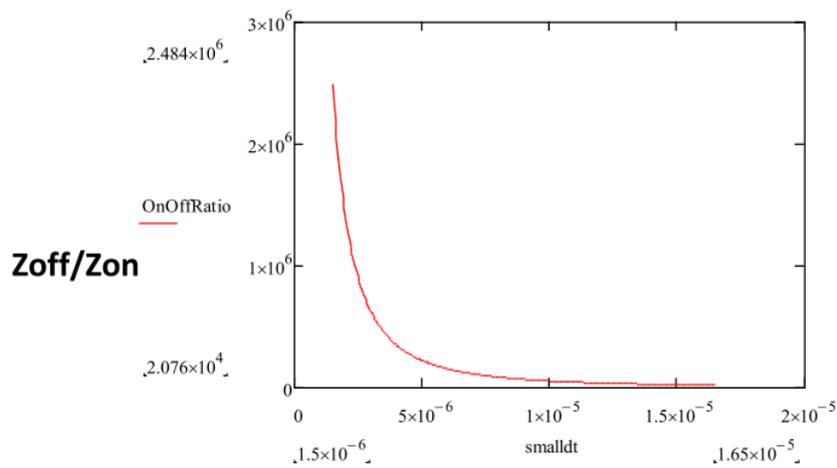


圖 25 LC 表示法頻寬圖

Resistive Switching with Interface t-line

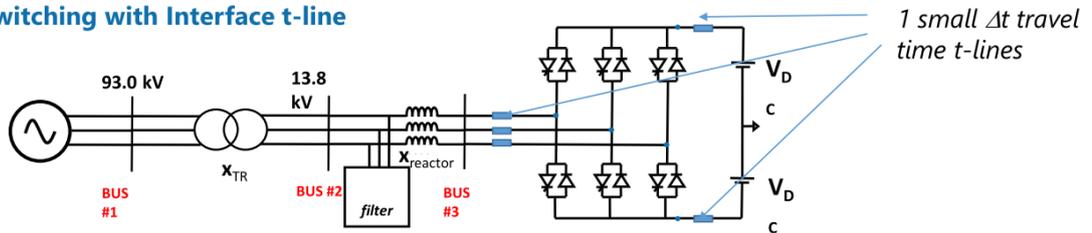


圖 26 小步階模擬介面 T-line 表示法

圖 27 為 RTDS 公司新開發功能 GPES(Generic Power Electronics Solver)與既有系統連結之架構圖。此功能利用 FPGA(Field Programmable Gate Array)強

大平行運算功能，可模擬更大型之網路(128 節點及 256 分支)以及更小步階(400nsec)，例如直流斷路器需要 110 個節點及 200 個開關。此功能模擬電力電子設備較傳統更為有效，以模擬 2 階變頻電路為例如圖 28 所示，在相同模擬步階(small dt)下、同樣的開關切換頻率(SWF)，GPES 之損失率明顯比小步階少，模擬結果更為準確；另由圖 29 亦可看出改善觸發條件，可有效改善觸發抖動(Jitter)所造成之波形振幅變化。

隨著未來電力電子設備逐漸增加，例如利用直流傳輸可有線路無須虛功補償、系統併聯同步問題、線路提升傳輸容量...等優點，電力電子設備模擬為不可或缺之重要工具。

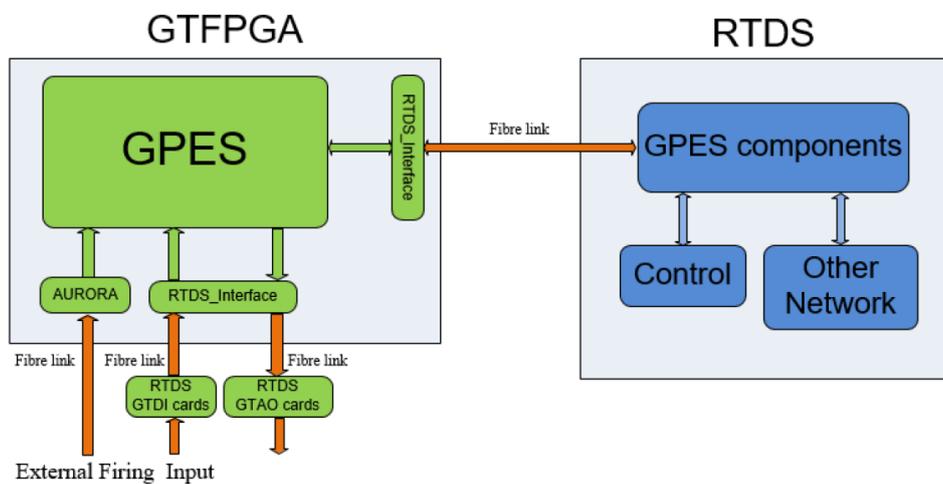
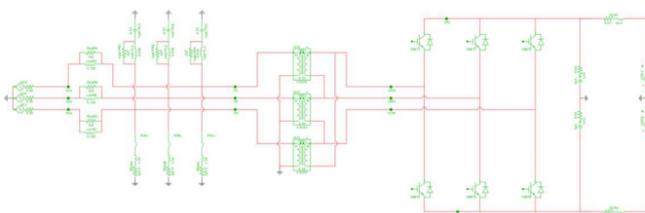
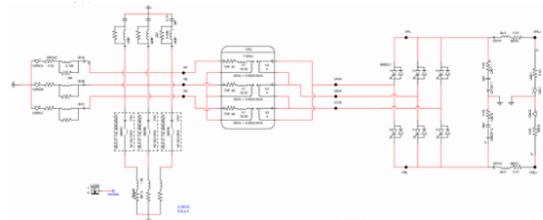


圖 27 GPES 與既有設備連接架構圖

2 level inverter on GPES



2 level inverter in Small dt with LC model



small dt (μ sec)	GPES dt (μ sec)	SWF	losses (%)
1.486486	0.495495	10000 Hz	6.3
1.486486	0.495495	5000 Hz	3.4
1.486486	0.495495	3000 Hz	2.2
1.486486	0.495495	2000 Hz	1.6
1.486486	0.495495	1500 Hz	1.3
1.486486	0.495495	1000 Hz	0.9
1.486486	0.495495	500 Hz	0.3

Small dt (μ sec)	SWF	losses (%)
1.486486	10000 Hz	23.2
1.486486	5000 Hz	11.8
1.486486	3000 Hz	7.4
1.486486	2000 Hz	5.1
1.486486	1500 Hz	4
1.486486	1000 Hz	2.9
1.486486	500 Hz	2.3

圖 28 GPES 與小步階模擬結果比較

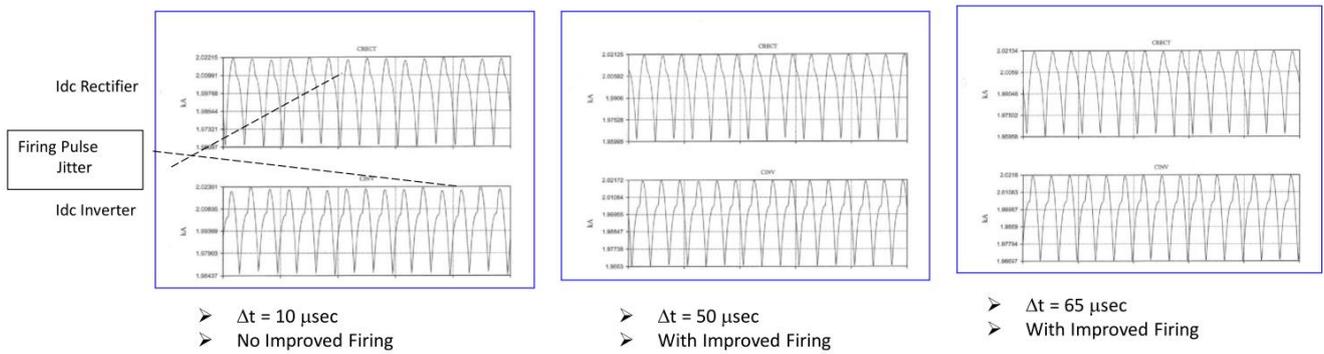


圖 29 改善觸發角度模擬波形圖

2.6. 參訪曼尼托巴大學

曼尼托巴大學 (University of Manitoba, 以下簡稱曼大) 成立於 1877 年, 位於加拿大曼尼托巴省省會溫尼伯市, 是曼尼托巴省最大的大學, 圖 30 為曼大校園一景。本次參訪單位為電機系名譽教授 Aniruddha Gole 實驗室, Gole 教授為加拿大自然科學與工程研究委員會主席, 擔任多個研究機構及電力公司顧問, 主要研究領域電力系統模擬, 為 PSCAD/EMTDC 模擬程式提供重要貢獻, 同時, 教授也身為 CIGRE 和 IEEE 數個工作小組規範修訂委員, 並且於 2010 年被選為 IEEE Fellow, 學術成就卓著。



圖 30 曼大校園一景

圖 31 為筆者與 Gole 教授合照，教授幽默且親切，喜好與人聊天並好奇台灣的事物，其指導學生除加拿大外，來自世界各地如中國大陸、印度、歐洲、南美洲等，本次參訪介紹目前研究主題，包含電磁暫態模擬程式電力元件模型建立、數學模型推導、非線性元件演算法、高壓直流傳輸技術研究、電力電子應用...等；其中以高壓直流傳輸(HVDC)為例，HVDC 於世界各地應用範圍有海底電纜連結、非同步電網相互連結(如日本 50/60Hz 轉換、歐洲法國-英國、斯堪地伐尼亞-中歐地區)、離岸風場...等。與交流(AC)傳輸相比最大差異計有傳輸相同容量使用更少電纜、無虛功率產生、無須維持同步頻率、電力潮流可完全掌控...等。然直流遭遇故障時，因其故障電流無零交越點(zero crossing)、高上升率、高穩態電流值等特性，將使得保護設計需要比傳統交流電網更快速隔離故障。

以教授研究成果之一為例^[3]，如圖 32 所示架構圖，圖中可見包含 LCC(Line-commutated converters)整流器與 VSC(Voltage-source converters)轉換器兩種不同類型 AC/DC 轉換器，混合式 VSC-LCC 多端 HVDC 輸電系統遭遇故障時，調查故障穿越能力。圖 33 為模擬 DC 端 N 相接地故障電壓與電流波形，在 LCC 鏈健全極點(P 相)處觀察到電流產生持續小於 0.1ms 瞬時振盪。除此之外，圖 34 為曼大研究平臺設備，為其他實驗室所進行研究，包含保護電驛硬體閉迴路研究，以及 IEC 61850 自動化設備研究。



圖 31 筆者與 Gole 教授合照

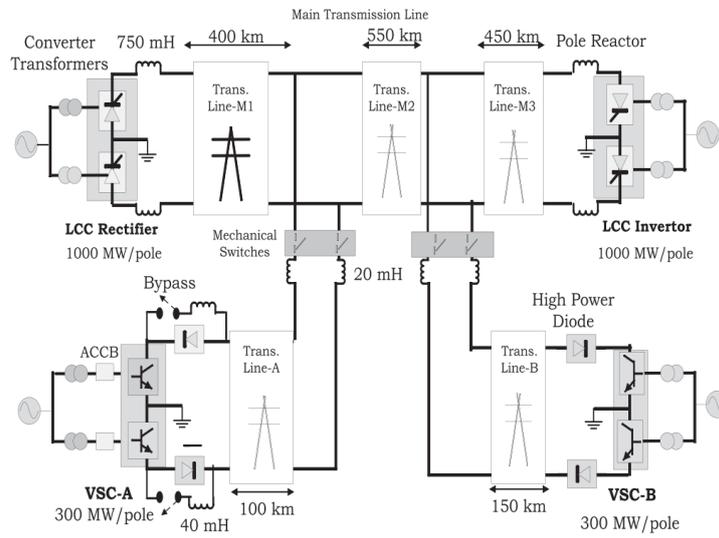


圖 32 混合式 VSC-LCC 多端 HVDC 傳輸系統架構

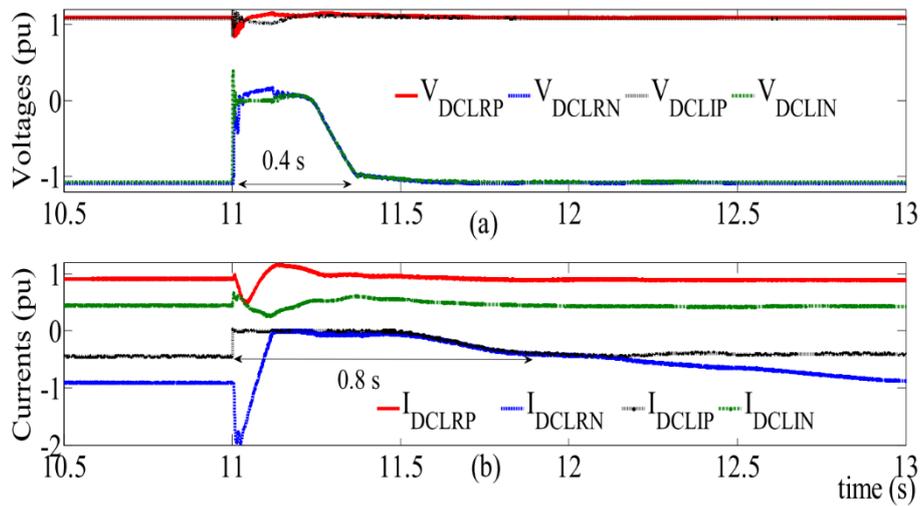


圖 33 模擬 DC 端 N 相接地故障之波形



圖 34 曼大研究設備

此研究與國內學術研究主題不同，國內研究主題集中於模擬系統應用，例如硬體閉迴路、保護電驛測試、再生能源併網、馬達控制、車輛控制、微電網模擬...等，較少針對模型開發及 EMT 軟體演算法等主題。

參訪完實驗室後，教授介紹他於 30 年前讀博士班時之研究主題設備-MG set 如圖 35，對比過往類比與現今數位時代，類比時期進行模擬是件不容易的工作，不僅設備體積龐大、須占地面積廣、接線複雜，而且模型可變動度小，所能進行研究範圍極為有限。進步至現今數位時代，不須複雜接線、模型可做變化大，大大提升研究成效。曼大研究成效卓著，參訪過程了解 RTDS 公司設備之發源地，該校研究團隊投入 EMT 模擬軟體已有數十年歷史，發表之理論成功應用至北美甚至於世界各地，皆有實際且成功之案例，且應用隨著計算機技術進步，範圍逐漸廣泛，EMT 模擬逐漸能夠解決許多以往無法模擬之問題，亦希望未來國內能夠培養相關人才，提升本國技術水準。



圖 35 曼大 MG-set

2.7.跨平台共通模擬應用

在 2.1 節中提及電力系統模擬求解可分為向量方式(或稱電機機械)及電磁暫態方式，其中電機機械模擬時間步階為 1~10msec，典型運用在大型電網模擬，可做為系統規劃或電網調度用；另外，電磁暫態軟體模擬時間步階小於 50

μsec ，模擬電力電子設備時更是縮短為 $1.5\sim 2\mu\text{sec}$ ，故其應用於 HVDC 及 FACTS 設備能夠真實模擬設備反應。在同一個模擬環境下如整合使用多種模擬工具來進行模擬(此方式又稱之為共通模擬 Co-Simulation)，如圖 36 所示為不同型態模擬示意圖，由於各模擬工具可能具備著不同時間步階大小，因此採用共通模擬對於維持模擬工具間的同步程序以及數據傳輸可能會是一項挑戰。在 Multi-Domain 的模擬系統中，模型的不同部位會以不同的時間步階進行設定，例如熱交換機須採用低速動態設定，而其電氣系統須採用快速動態設定，因此在不是使用唯一時間步階設定之情況下，這類 Multi-Domain 的模擬方式對模擬結果的準確性與穩定性亦會有所影響

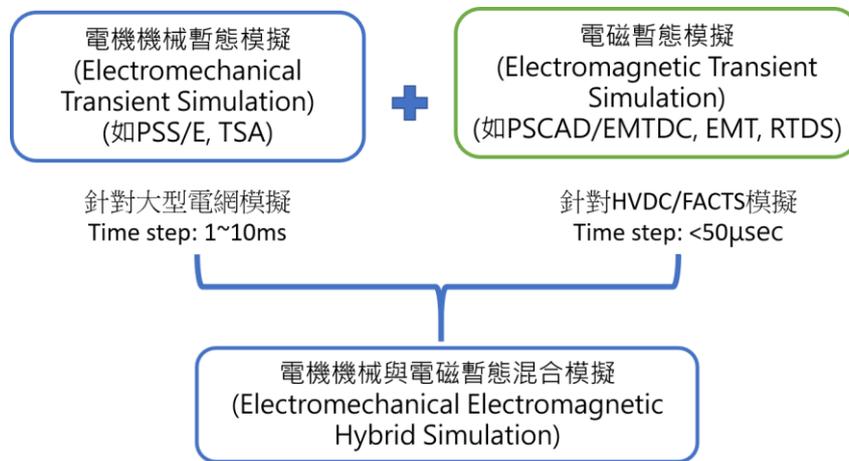


圖 36 共通模擬示意圖

針對跨平台共通模擬應用，加拿大 Powertech Labs Inc.(以下稱 PLI 公司) 開發一共通模擬平台 TRI(TSAT-RTDS Interface，以下簡稱 TRI)。PLI 公司為 BC 省水力電力公司(BC Hydro)全資子公司獨立營運，董事由 BC Hydro 指派，主要負責電力產業之研究與試驗工作，其研究與試驗領域工作在國內如同台電綜合研究所(Taiwan Power Research Institute, TPRI)之於台灣電力公司。其服務領域廣泛計有氫能燃料應用、電動車輛、智慧電網、環化領域、電力設備檢測、廣域向量量測、再生能源併網整合、電力系統動態安全評估、小信號分析...等。

本次參訪交流為電力系統部門，圖 37 為筆者與部門主管-林曦博士合影，該部門開發產品之一為電力系統分析軟體套件-DSATools^[5]，圖 38 為軟體套件

組成內容，包含有電力潮流與故障分析 PSAT(Powerflow & Short-circuit Analysis Tool)、電壓安全評估 VSAT (Voltage Security Assessment Tool)、暫態穩定度分析 TSAT (Transient Security Assessment Tool)，以及小信號穩定度分析 SSAT(Small Signal Analysis Tool)。依照應用模式可劃分為離線式(off-line)與線上式(On-line)，離線式應用計有系統規劃、發電整合、電力可靠度分析...等；線上式應用計有即時模擬、電力市場、調度預測、線上訓練...等。

此軟體已開發並應用多年，成功應用於美加電網及全球世界各地，約有 220 個以上客戶使用此軟體，客戶包含 Regulator、Independent System Operators (ISO)、電力市場操作者(Power market operators)、電力公司(包含發、輸、配電公司)、電力設備製造商、顧問公司，以及研究機構與學術單位，使用成效獲得各界肯定。而此次應用於共通模擬程式即為 DSATools 套件中之 TSAT 程式。



圖 37 筆者與 PLI 主管合影



圖 38 DSATools 軟體套件示意圖

TRI 模組為 TSAT 軟體之附加(add-on)功能，能夠與 RTDS 進行共通模擬。應用 TRI 執行即為即時性模擬，使得兩種不同平台之模擬程式得以同步，由於 RTDS 模擬時間步階較 TSAT 來得小，故模擬將於 TSAT 時間步階結束時進行模擬結果交換如圖 39 所示。如欲建立共通模擬平台，基於此兩種平台特點，首先，共通模擬將電力系統模型分為內部及外部系統，內部系統規模須足夠小，可以 EMT 模擬之時間步階置於 RTDS 中模擬，例如 50 μ sec。接著，外部系統相對於內部則為大型系統(一般 BUS 數大於 90 以上)，可以 TSAT 進行模擬，時間步階以典型系統規劃應用，例如 1/4 或 1/2 週期。最後，利用安裝於電腦上 PCI/E 插槽之介面卡片，則能夠開始進行共通模擬測試。

利用 TRI 模擬之優點計有

- 即時性、可利用 TSAT 與 RTDS 進行同步模擬
- 基於兩種軟體平台，此工具已經發展成熟，內建許多重要應用資訊，並已經許多專家多年測試。
- 降低 RTDS rack 運算能力之硬體需求。
- 兩平台皆具有豐富模型資料庫，包含 HVDC、分散式能源、FACTS，以及同步機...等。

- 能夠即時模擬超過 5,000 個 BUS 之系統。
- 友善使用者介面，可大幅降低安裝共通模擬平台所費心力，並簡化分析結果。
- 自動偵測兩平台模擬邊界(boundaries)，可量化標示內部與外部系統之邊界。

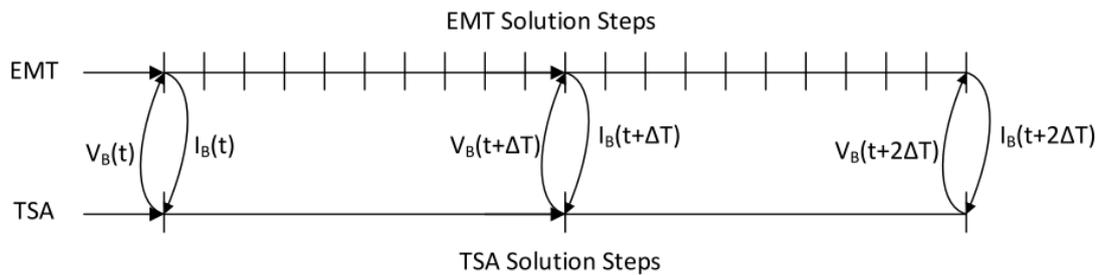


圖 39 共通模擬資料交換示意圖

圖 40 為 PLI 工程師演示共通模擬平台，由圖可見模擬設備並不需要佔太大空間，設備安裝硬體接線圖如圖 41 所示，於 TSAT 模擬電腦之 PCI/E 插槽安裝 TRI 介面卡片，利用光纖連接至 RTDS 其中之一處理器卡片，再重新執行 RTDS 硬體掃描，確認介面卡片新增至 RTDS 硬體配置中即完成安裝。共通模擬演示一以 TSAT 模擬 5,500 BUS 系統，搭配 RTDS 模擬發電廠以及 STATCOM_[6]，模型示意圖如圖 42 所示，模擬程序如下所述：

- (1) 選定兩平台之邊界：在 RTDS 中模擬發電廠，RTDS 與 TSAT 共計有 10 個邊界。STATCOM 之模型為圖 42 中黃色網底部分，先進行小區域模擬確認模型正確後，再與 RTDS 其他元件共同測試確認模型運行無誤。STATCOM 模型控制係以 Average Value Model (AVM) 控制。
- (2) 模擬由 RTDS 優先進行，TSAT 程式進行負載潮流分析後，運行進入待命模式，於此時由 TSAT 模擬監視視窗可見資料交換不匹配 (Mismatch)。
- (3) 接著啟動 TSAT 模擬，模擬後由監視視窗可見不匹配情況逐漸減少，待減少至設定容許誤差範圍內後，即可進行共通模擬。



圖 40 PLI 工程師共通模擬演示



圖 41 共通模擬設置安裝照片

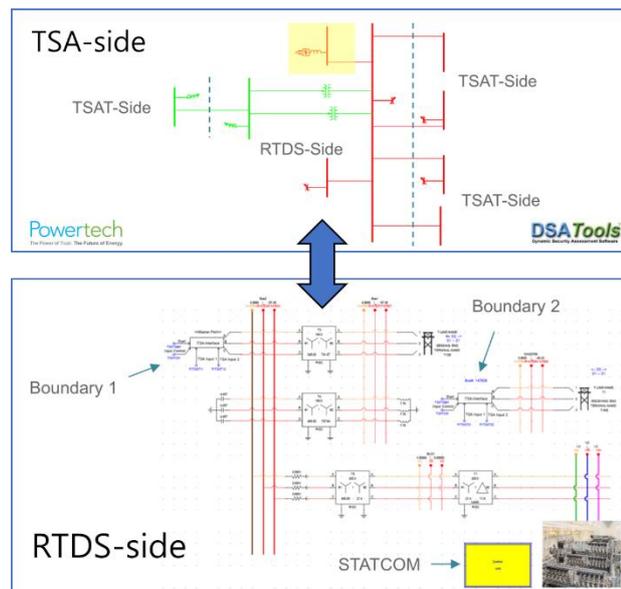


圖 42 共通模擬所建置之模型

- (4) 圖 43 為模擬結果畫面，左視窗為 RTDS 模擬結果，右視窗為 TSAT 模擬結果，RTDS 可觀察 STATCOM 設備加入 BUS 之電壓、電流，以及系統之頻率；TSAT 可觀察主要 BUS 之電壓，並監測功率變化情形。由圖可見在 RTDS 中操作電力設備時，設備加入對系統所造成之擾動，而此時 TSAT 僅鄰近 RTDS 邊界 BUS 電壓產生輕微擾動，其餘區域 BUS 電壓維持穩定，並未有任何改變。

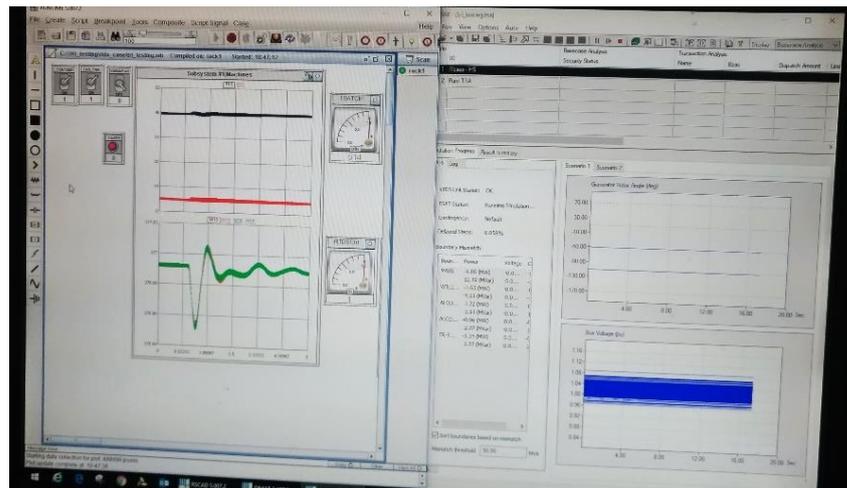


圖 43 模擬運行設備加入系統波形

- (5) 接著於 TSAT 電網中，擇一 BUS 模擬接地故障如圖 44 所示，由圖可見 RTDS 模擬產生高頻震盪現象，事故後系統仍然能夠恢復穩定；於 TSAT 視窗可見事故點附近電壓降明顯，影響範圍顯著。

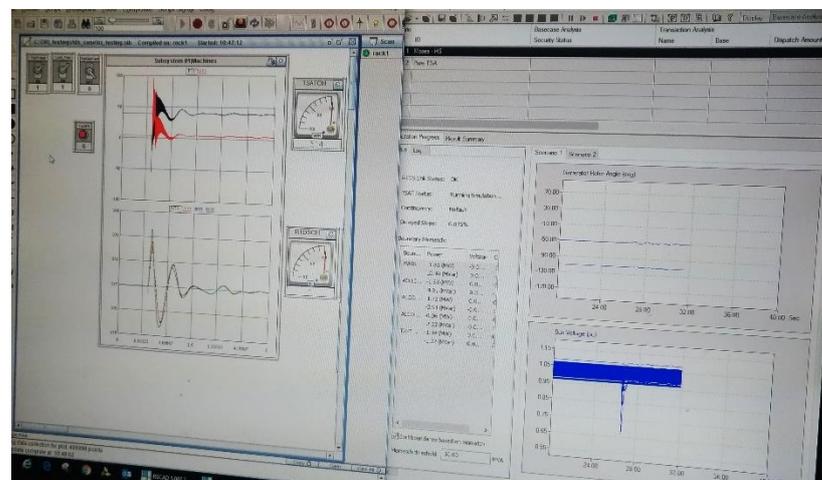


圖 44 模擬運行發生故障波形

由演示結果可見共通模擬執行結果良好，兩種平台互補充分利用軟體特點。RTDS 以 EMT 方式進行模擬，模型建置完整，若要模擬大型系統須耗費偌大心力建置；TSAT 利於建置大型系統，然電力電子設備模擬無法如 EMT 模擬方式詳細。在共通模擬應用，使系統規劃人員與電力設備試驗人員能夠得到一良好分析工具，模擬 HVDC 及 FACTS 等元件，因設備特性以 EMT 模擬方式始能得到真實模擬結果，搭配電網分析程式，可分析設備加入系統後對鄰近 BUS、輸電線路之影響，甚至於可擴大分析於不同區域加入如 STATCOM 元件，對整體區域之綜合影響，可提供寶貴運轉及研究資訊，對系統安全大有助益。

除電力系統模擬外，PLI 公司於特高壓試驗領域，亦是聞名於國際，其高壓實驗室為北美西岸規模最大之實驗室，測試設備包含變壓器、絕緣礙子、開關設備、套管、電纜，以及相關配件...等，其試驗能力如表 3 所示。提供試驗服務包含依據國際標準(如 ANSI, ASTM, CSA, IEC, ICEA, IEEE, UL... 等)進行設備形式認證試驗、事故診斷分析試驗、乾式及濕式與 AC 及 DC 耐電壓試驗、雷擊衝擊波試驗、開關突波試驗、射頻干擾電壓、部分放電、鹽霧害影響...等，試驗能力充足，試驗範圍完整。

藉由此次參訪交流經驗，特別請林博士協助聯繫參訪特高壓試驗部門，碰巧該部門進行絕緣礙子試驗，參觀試驗過程外，亦有機會參訪特高壓試驗設備，以及濕式試驗室，分別如圖 45 與圖 46 所示，其中濕式試驗室外圍須圍起一條水溝，供試驗用水流出收集。圖 47 為筆者與特高壓試驗工程師於控制室合影，高壓試驗具有一定危險性，現場安全標示及防護措施完善，確保操作人員安全後才能進行試驗。

表 3 PLI 特高壓試驗能力

試驗形式 (TEST TYPE)	標稱電壓 (NORMINAL VOLTAGE)	
High Voltage AC	1600 kV	
High Voltage DC	1000 kV	
Impulse Testing	3200 kV	
3 Phase AC feeder	12 kV	
3 Phase Generator	60 Hz, 5 MVA	300 Hz, 1 MVA



圖 45 PLI 特高壓試驗設備



圖 46 PLI 高壓濕式試驗室



圖 47 筆者與 PLI 特高壓試驗工程師合影

三、 結論

4.1.心得與建議

電力系統模擬技術發展迄今已有數十年歷史，市場亦有許多成熟完善之軟、硬體工具，提供電力領域專家運用，從早期離線式模擬程式，進步至類比式模擬器，逐漸演進至現今即時動態數位式模擬器，不僅設備體積逐步減小，模擬能力日趨增加，如前所述可見即時動態模擬技術擁有許多優勢，不僅能夠處理傳統電力頻率模擬、系統動態及小信號模擬，亦能夠實現高頻域之模擬，如電力電子設備、電力設備開關暫態，甚至能夠與實體設備相互連結，進行硬體設備閉迴路模擬。應用範圍十分全面且廣泛，成效顯著成功地解決世界各地電力領域所面臨之難題，未來對此技術需求越趨增加，勢必需要深入研究並提高使用數量，值得國內投入人力與資源加強研發之能量。

台灣電力系統環境正面臨重大改變，電力設備使用情形與以往不同，目前已有問題如電力電子設備使用數量增加，再生能源佔系統比例逐年持續成長，智慧電網相關裝置需要能夠驗證試驗之環境平台...等問題，皆可利用即時動態模擬技術得到良好解決辦法。藉由本次實習計畫，學習並與原廠專家交流建置模型經驗，有助於系統化、更有效率、更大規模建置模型，以及訪查國際上應用實例，確實有許多值得台灣借鏡之處，例如再生能源利用 EMT 模擬所建模型，能夠提供傳統模擬無法察覺之現象，設備商能夠以此技術研發並提升產品品質，而電力公司能夠藉由模擬結果進行系統規劃與調度，預測未來即將發生問題，及早因應預擬對策。此外，功率閉迴路測試技術已經成長為各研究機構及學術單位投入大量心力之議題，近年相關研究論文及技術報告數量明顯增加，建立此技術不僅提升國內技術水平，提供電力公司運轉調度參考，有助於增加整體電力系統可靠度。共通模擬技術互補不同種類模擬程式之優缺點，考量全域與區域之間現象，避免模擬結果產生見樹不見林之情形，或是僅能觀察趨勢而無法與實際情形相符之缺憾。

台電綜合研究所應用即時動態模擬系統已有十年經驗，主要應用領域為電力系統事故分析、電力設備相關分析與試驗、新購設備形式認證...等，除公司內部應用外，亦與學校研究單位進行交流研討。以國內而言，電力領域人才不易培訓，而同時具備模擬及試驗之工程師更是難以培訓，為求擴大技術應用綜效，綜研所未來持續投注心力增加此技術研究應用，在設備方面，增加設備設置數量，提升模擬與試驗整體能力；在軟體方面，規劃培訓課程，提供容易操控介面，建立國際交流管道。未來依照國家能源政策方向，持續提升再生能源發電容量，本所須與台電公司各單位專家持續技術交流，協調產業界合力開發產品驗證平台，並與學校合作不同主題之研究，結合產、官、學界之優勢，完整即時動態模擬技術之開發與推展。

4.2. 出國期間所遭遇之困難與特殊事項

本次計畫去程由台灣飛至溫哥華，再由溫哥華轉國內線班機至溫尼伯，轉機時間依照航空公司網站建議前後航班取間隔 2 小時，但因為 6 月開始為加拿大旅遊旺季，溫哥華機場因遊客過多導致入境時非常擁塞，待通過海關取完行李時已超過原訂飛機班次之起飛時間！必須至航空公司櫃台重新登記劃位搭乘下一班次，所幸當日尚有班次從溫哥華飛往溫尼伯仍可繼續完成行程。因此，建議如有轉機行程，特別是國際線轉國內線，必須考慮機場擁擠問題，轉機時間應安排至少 3 個小時以上，才能避免錯過班機，否則必須重新安排行程，將花更多時間並影響到原定行程。

四、參考資料

- [1] OPAL-RT Technologies, “The Power System Simulator of Tomorrow,” 2019. [Online]. Available: <https://www.opal-rt.com/systems-hypersim/>.
- [2] RTDS Technologies, “RSCAD MODULES,” 2019. [Online]. Available: <https://www.rtds.com/the-simulator/our-software/rscad-modules/>.
- [3] N.M. Haleem, A.D. Rajapakse, A.M. Gole, I.T. Fernando, “Investigation of Fault Ride-Through Capability of Hybrid VSC-LCC Multi-Terminal HVDC Transmission Systems”, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 34, no.1, 241-250, pp Feb.2019.
- [4] Powertech Labs Inc. 2019. [Online]. Available: <https://www.powertechlabs.com/>
- [5] 江榮城，廖清榮，「赴加拿大參加電力系統分析軟體 DSATools 訓練課程」，公務人員出國報告，民國 95 年 12 月。
- [6] X. Lin, “Practical Application of Co-Simulation Studies”, *RTDS ATC*, Denver, CO, May 14-16, 2019.