

出國報告（出國類別：開會）

出席「IECON 2019」國際研討會

服務機關：核能研究所
姓名職稱：王慎思 研究助理
派赴國家/地區：葡萄牙
出國期間：108年10月12日~108年10月19日
報告日期：108年11月13日

摘要

本次出國行程由核能研究所(以下簡稱本所)核能儀器組研究助理王慎思,赴葡萄牙里斯本參加 IECON 2019(IEEE 45th Annual Conference of the Industrial Electronics Society)國際研討會,並口頭發表一篇論文。本次參與會議,除了發表論文外,同時藉由與專家、學者、各國研發人員的簡報交流,獲取微電網領域未來發展趨勢。藉由參與本次 IECON 2019,達到蒐集國外最新發展資料,同時藉以推廣本所研發成果,激發創意與構想,使未來計畫實施策略更有彈性且具體。

本次 IECON 2019 國際研討會,論文內容包含利用硬體迴圈技術(Hardware In the Loop, HIL)與微電網進行即時模擬;另外,亦有一篇微電網全黑啟動分析之論文,本所亦有進行微電網全黑啟動之研究,已於今年電力研討會發表一篇相關論文,本報告亦進行兩者全黑啟動情境差異比較與分析,相關經驗可作為本所未來繼續研究之方向。

目 次

| | |
|----------------|----|
| 一、目 的..... | 1 |
| 二、過 程..... | 2 |
| 三、心 得..... | 3 |
| 四、建 議 事 項..... | 28 |
| 五、附 錄..... | 29 |

附 圖 目 錄

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 圖 1、會議議程表 (來源： https://iecon2019.org/program/) | 2 |
| 圖 2、Keynote 演說議程表(http://www.grand-re2018.org/english/program_e.html) | 4 |
| 圖 3、傳統電網與微電網之比較圖..... | 7 |
| 圖 4、低頻卸載策略流程圖..... | 8 |
| 圖 5、系統慣量實驗說明圖..... | 8 |
| 圖 6、慣量曲線方程式擬合..... | 9 |
| 圖 7、低頻卸載策略驗證之實驗架構..... | 9 |
| 圖 8、無低頻卸載之微電網轉態波形..... | 10 |
| 圖 9、具低頻卸載之微電網轉態波形..... | 10 |
| 圖 10、王慎思發表論文過程..... | 10 |
| 圖 11、微電網架構圖..... | 11 |
| 圖 12、即時模擬架構圖..... | 12 |
| 圖 13、電池及 PV 模型架構圖..... | 12 |
| 圖 14、電池之模擬與實驗結果..... | 13 |
| 圖 15、MATLAB 微電網模擬架構圖..... | 13 |
| 圖 16、PV 變流器之交流電壓、與負載電流曲線圖..... | 14 |
| 圖 17、PV 變流器之 AC 端 RMS 電壓..... | 14 |
| 圖 18、被負載吸收之交流電流 RMS 值..... | 14 |
| 圖 19、PV 變流器之直流與交流端之總實功曲線..... | 15 |
| 圖 20、直流微電網系統架構..... | 15 |
| 圖 21、傳統的多感應器之儲能系統控制器架構..... | 16 |
| 圖 22、控制器演算法架構 (a)六個感應器之儲能系統控制器算法 (b)三個感應器之儲能系統控制器算法 (c)二個感應器之儲能系統控制器算法 | 17 |
| 圖 23、本文提出之單一感應器之儲能系統控制器架構..... | 18 |
| 圖 24、本文提出之多儲能系統控制器架構..... | 19 |
| 圖 25、本文提出之功率管理策略流程圖..... | 20 |
| 圖 26、Mode I 及 II 模擬結果 (a)PV、負載功率圖 (b)PV 狀態圖 (c)直流饋線電壓曲線..... | 21 |
| 圖 27、儲能系統 SOC 變化之模擬結果 (a) $SOC_{ESS} > SOC_{MAX}$ (b) $SOC_{ESS} < SOC_{MIN}$ | 22 |
| 圖 28、於實驗室實驗本文所提之儲能系統控制器..... | 23 |
| 圖 29、實驗結果 (a)PV 參數變化圖 (b)DC link 電壓及負載電流 (c)儲能系統參數變化..... | 24 |
| 圖 30、全黑啟動微電網組織架構圖..... | 24 |
| 圖 31、分散式能源(DG)功率-頻率關係圖..... | 25 |
| 圖 32、只以儲能系統(ESS)啟動_功率-頻率關係圖..... | 25 |
| 圖 33、只以傳統發電機啟動_功率-頻率關係圖..... | 26 |
| 圖 34、以儲能系統(ESS)及傳統發電機啟動_功率-頻率關係圖..... | 27 |

一、目的

「IECON 2019」國際研討會為電機電子工程師學會(IEEE)發起具影響力之大型國際年會，匯集工業界、學術界知名專家、學者發表最新的再生能源及智慧電網相關技術，其議題包含智慧電網、微電網、分散式能源、電力儲存系統等，顯示該國際會議在微電網領域中具有其影響力。

本所近年來致力於再生能源與微電網相關研究，本次參加此國際會議，除發表本所開發成果、及聽取各國專家之論文發表之外，該主辦單位亦邀請知名專家、學者針對再生能源相關技術，進行主題演講，提供再生能源現今發展現況與未來發展趨勢，作為本所微電網規劃與技術發展之參考。綜合以上，藉由本次參與，達到蒐集國外最新發展資料，推廣本所研發成果，使未來計畫實施策略更有彈性且具體。

二、過 程

(一)、本次公差時間含去程及回程共 8 天，主要行程如下：

| 行程 | | 公差地點 | | 國別 | 地名 | 工作內容 |
|---------------------------|------------|------------|-----|-----|----|------|
| 日期 | 地點 | | | | | |
| | 出發 | 抵達 | | | | |
| 10/12(六) ↓ 10/13(日) | 桃園 | 葡萄牙 里斯本 | 葡萄牙 | 里斯本 | 去程 | |
| 10/14(一) ↓ 10/17(四) | | | | | | |
| 10/18(五) ↓ 10/19(六) | 葡萄牙 里斯本 | 桃園 | 葡萄牙 | 里斯本 | 回程 | |

(二)、會議議程表如下：

| | October 14 | October 15 | October 16 | October 17 |
|---------------|-------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 08:30 - 18:00 | Registration desk | Registration desk | Registration desk | Registration desk |
| 8:45 - 9:00 | | Opening INTEROP | | |
| | Tutorials | Keynote | Parallel sessions TC Meetings INTEROP | Parallel sessions INTEROP |
| 10:35 - 10:45 | | Coffee-break | | |
| | | Parallel sessions TC Meetings INTEROP | | Coffee-break |
| 12:15 - 13:15 | Lunch | Lunch | Keynote | Keynote |
| 14:00 | | Industry Forum | Industry Forum | Industry Forum |
| 14:15 | Tutorials | YP & S Forum Parallel sessions TC Meetings INTEROP | Parallel sessions 2019 Women in IES Forum in Europe TC Meetings INTEROP | Parallel sessions INTEROP |
| 15:55 - 16:20 | | Coffee-break | | |
| 17:15 | | YP & S Forum Parallel sessions TC Meetings INTEROP | Parallel sessions TC Meetings INTEROP | Parallel sessions INTEROP |
| 18:00 | | | | |
| 18:15 - 19:00 | YP & S Party | Welcome Reception | | |
| 19:45 - 20:30 | | Fado | Gala dinner | |
| 22:30 | | | | |

圖 1、會議議程表 (來源：<https://iecon2019.org/program/>)

三、心得

(一)、本次會議內容涵蓋智慧電網、微電網、分散式能源、電力儲存系統等最新控制技術與應用，參與此會人員包含之名專家、學者、及企業研發人員等人參與，顯示該國際會議再微電網領域具有其影響力。於 10 月 14 日，主辦單位舉辦 Tutorials，其議程如下：

Morning tutorials (9:00-12:15)

Title:[Active Thermal Control for More Reliable Power Electronics](#)

Presenters: Giampaolo Buticchi (China), Abraham Marquez (Spain), Jose I. Leon (Spain), Marco Liserre (Germany)

Title:[Advanced Three-Phase SiC/GaN PWM Inverter Topologies for Future VSD Applications](#)

Presenters: Johann Kolar (Switzerland); Mattia Guacci (Switzerland)

Title:[Advanced Motion Control for Vibration Suppression: from Theory to Applications](#)

Presenters: Seiichiro Katsura (Japan); Kiyoshi Ohishi (Japan); Krzysztof Szabat (Poland); Kenta Seki (Japan)

Title:[Digital control of grid-tied converters – A Test-Driven Design Approach](#)

Presenters: Fernanda Carnielutti (Brazil); Rodrigo Padilha (Brazil)

Afternoon tutorials (14:00-17:15)

Title:[Recent Advances on Modulation and Control of Multilevel Converters](#)

Presenters: Leopoldo G. Franquelo (Spain & China); Fujin Deng (China); Sergio Vazquez (Spain); Binbin Li (China)

Title:[Photovoltaic Power Generation Systems: Topologies, Control, Industrial Trends, and Future Challenges](#)

Presenters: Samir Kouro (Chile); Dmitri Vinnikov (Estonia); Yongheng Yang (Denmark); Andrii Chub (Estonia, Chile)

Title:[Modelling and Design of Digital Electronic Systems \(targeting FPGAs\) – Methods, Trends and Application to the Control of Electrical Systems](#)

Presenters: Marcian Cirstea (UK); Eric Monmasson (France)

(1)於上午參加 Digital Control of Grid-Tied Converters – A Test-Driven Design Approach，此演講主要說明如何利用即時模擬的手法來設計、及驗證併網 power converter 的控制器。此一研究成果為巴西研究機構 GEPOC-UFSM 和 Typhoon HIL 公司共同提出，結果包含了電壓源轉換器之控制器設計，並有許多即時模擬結果之呈現。內容包含同步演算法、電流控制器之設計與測試、PWM 調變器之介紹、外部迴圈之設計與測試等。利用即時模擬的手法來展示在不同操作情形(正常情形、以及極端操作情形)下，控制器的效能。

(2)於下午參加 Photovoltaic Power Generation Systems: Topologies, Control, Industrial Trends,

and Future Challenges，此演講介紹併網型 PV 系統之架構、及其應用之電力電子技術，另外，商業化的 PV 系統，例如與建築物整合之 PV，也被該議程討論。設計 PV 系統所最需考慮的幾個因素：效率、可靠度、與電網規範之適用性、SiC（碳化矽）PV 系統之設計、降溫。串聯型 PV 組有可能會因為直流電弧導致火災，MPPT(最大功率點跟蹤)範圍及遮蔽忍受度也是需考量的內容。會議中亦介紹 Optiverter 技術，可大幅提高 PV 系統的能源收集率，而 Optiverter 中，最關鍵的部分為前端直流-直流轉換器，其功用為確保考量遮蔽忍受度的 MPPT。

本次會議除了 Tutorials，亦邀請學者發表 Keynote 演說，圖 2 為三場 Keynote 演說的議程表。

Keynote Speakers



Professor Toshio Fukuda
Nagoya/Meijo University, Waseda University
Beijing Institute of Technology

Date: Tuesday, 15 Oct 2019
Time: 9:15 – 10:15
Title: Multi-Scale Robotics – Robotics and AI –

Abstract And Brief Biography [here](#)



Prof. Dr. Ing Marco Liserre
IEEE Fellow
Head of the Chair of Power Electronics
Kiel University, Germany

Date: Wednesday, 16 Oct 2019
Time: 11:15 – 12:15
Title: The Smart Transformer: providing service to the electric network and addressing the reliability challenges through power routing

Abstract And Brief Biography [here](#)



Professor João A. Peças Lopes
IEEE Fellow
Porto University (FEUP), Portugal
INESC TEC, Portugal

Date: Thursday, 17 Oct 2019
Time: 11:15 – 12:15
Title: Power system with 100% renewable energy: the long wait...

Abstract And Brief Biography [here](#)

圖 2、Keynote 演說議程表(http://www.grand-re2018.org/english/program_e.html)

(1)、Multi-Scale Robotics — Robotics and AI — Nagoya/Meijo University, Waseda University, Beijing Institute of Technology, Professor Toshio Fukuda.

這場演說基於 Cellular 機器人系統，概略地介紹各種規格的機器人技術，包含組織性地、分散式的、生物的、及奈米的機器人技術。而演說的重點著重於智慧機器人，其包含了：分散式自動化機器人系統、多重機器人系統之間的合作與競爭、可以像猴子手臂擺動的機器人、醫學上的機器人及模擬器、微米及奈米機器人系統、賽博系統、仿生系統。Fukuda 教授提到未來的趨勢包含三個：物聯網、人工智慧、以及機器人，並介紹了 AI(人工智慧)、BI(商業智慧)、CI(客戶智慧)三者之間的關係。

Fukuda 教授為了開發猴子手臂擺動的機器人，創出了一共三代的機器人，其研究內容主要在於開發一個機器人系統、與一個可達到多種動作的控制架構。演說中並有影片展示目前開發的結果，其手臂擺動的效果已和真實猴子相差無幾。有關賽博(Cyborg)系統，其為 Cybernetic Organism 的簡寫，賽博系統又稱改造人，即機械化有機體，利用人類所開發的機器(無機體)，裝載在有機體(例如人、及其他動物)身體的一部份，但思考動作均由有機體控制。利用這種技術，可藉由所開發之機器(無機體)，以輔助、或強化有機體的能力。

(2)、The Smart Transformer: Providing Service to the Electric Network and Addressing the Reliability Challenges Through Power Routing — Kiel University, Germany, Professor Ing Marco Liserre.

由於分散式能源大量使用，也帶來許多挑戰。智慧變壓器是一種以電力電子技術為基礎的變壓器，其有控制及通訊的功能，以避免中壓(MV)及低壓(MV)電網系統升級的昂貴成本。智慧變壓器可適用於混合式電網、及多種電壓，這使得它可以和對中壓(MV)及高壓(HV)電網的儲能和供電服務整合。演說中提到於德國 Kiel 大學的實驗室進行硬體迴圈(Hardware In the Loop, HIL)測試，包含一個電網模擬器，及小型的智慧變壓器，以進行變壓器與模擬電網之間的測試。

在智慧變壓器搭配儲能系統的模擬中，利用智慧變壓器來調控電壓，在中壓(MV)電網系統，電壓變動率由 3.38%降至 3.11%；在低壓(LV)電網系統，電壓變動率則由 11.47%降至 4.53%。比較傳統變壓器、固態變壓器、及智慧變壓器：傳統變壓器較不容易故障、維修容易、零件易取得；固態變壓器因為含有較多半導體元件及電容，故較易故障、且維修零件不易取代；

而智慧變壓器具有故障處理的能力。

- (3)、Power System With 100% Renewable Energy: The Long Wait...—Porto University (FEUP), Portugal INESC TEC, Portugal, Professor João A. Peças Lopes.

此演說提到在西元 2050 年前，葡萄牙目標將全國的電網系統達到 100% 再生能源發電，這將是一個巨大的挑戰。從演說提到的規劃再生能源來看，未來再生能源仍以 PV 和風力發電為大宗，另外較少數的再生能源為生質能、水力發電…等。

當電網有大量再生能源，因此穩定度的議題將會變得更重要，例如事故發生時，因整體電網的系統慣量會降低，導致系統頻率下降率變大；而短路電流的下降，使得整體系統的保護策略及設定，皆須重新制定；另外，大量再生能源將導致白天與夜晚之傳統機組需求量差異變大，亦即「鴨子曲線」將會變得更陡峭、更嚴重；系統備轉容量需審慎評估以保證供需平衡；同時，更大量的再生能源亦導致整個系統電壓調控難度提升。Lopes 教授提到，在未來能源轉型的路上，儲能系統將扮演關鍵的腳色，儲能系統可削峰填谷，且具有快速供電之特性；並且提供良好電力品質與可靠度，可避免電力壅塞，並可提供輔助服務。另外，將加速智慧電網的發展，包含佈建智慧電錶、發展控制技術等。另外，亦需要先進的電網規範，供電的安全性也是一個議題，以及需要更精準的預估工具(用以預估再生能源發電量、及用戶用電量)。

演說提到一個橫跨整個歐洲的電網，可整合北歐的風力發電、南歐及北非的太陽能發電、還有來自俄羅斯的生質能發電…等再生能源。為了達成此目標，可利用高壓直流電(HVDC)技術，利用 HVDC 技術，電力傳輸於直流電纜可精準控制、且用 HVDC 作為傳輸骨幹，可改善電網韌性，另外，超過 50 公里的長距離地底或海底電力傳輸，也是需要直流傳輸。

(二)、論文發表簡要說明

本次論文發表共計 1 篇，題目為「Rotational Inertia Analysis and Underfrequency Load Shedding Strategy of a Microgrid System」，發表方式為投影片方式口頭發表。

圖 3 為一個傳統電網，與微電網之比較圖，相較於傳統電網具有許多柴油發電機等傳統發電機組，微電網具有較少之傳統發電機組，取而代之的是再生能源：例如太陽能、風力發

電等，如此一來，使得微電網的系統轉動慣量較傳統電網小。而當使微電網遇到事故時，例如線路跳脫、或是變流器故障，造成供電低於負載時，系統頻率會因為較少的轉動慣量，而下降得較傳統電網快。一個系統運轉於過低的頻率時，將會對發電機組設備造成損害，甚至系統崩潰。為了避免頻率過低，可由供給端增加系統發電量或由負載端卸除負載量，進而重新調整系統的供需容量。若是機組備轉容量不足瞬間造成缺電量過大將會造成系統頻率驟降。為了確保系統頻率穩定運轉，如何訂定一套卸載控制策略即為一個重要的課題。由於微電網因較少的轉動慣量，導致事故時系統頻率下降較傳統電網快，故應用於微電網的低頻卸載策略，需另外制定，將所需卸除的負載，在更短的時間內卸除。

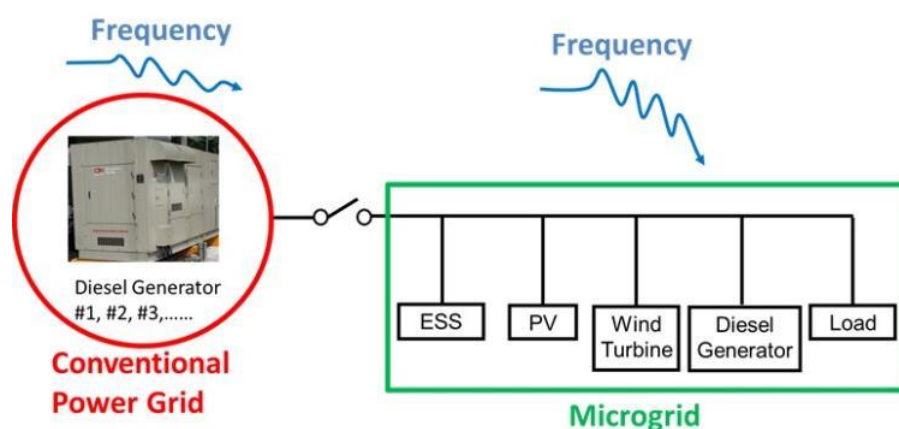


圖 3、傳統電網與微電網之比較圖

本篇論文提出一套應用於微電網的低頻卸載策略，並於本所的微電網示範場域進行該策略之測試。圖 4 為本篇論文提出卸載策略之流程圖，首先，擷取微電網系統轉態之頻率下降率(df/dt)，其次，判斷靜態開關(SS)是否開路，若否，則回到頻率下降率計算的步驟；若是，則再根據擷取到的頻率下降率比對卸載資料表，獲得目前系統之缺電量，最後，依據缺電量，卸除對應之負載量，若系統頻率無法升回基本頻率(60Hz)，則重新計算系統頻率，若系統頻率已回升至基本頻率(60Hz)，則結束。其中，頻率計算的方式是採用「電壓零交越點」的方式計算，利用一開始電壓波形兩次和零的交越點，取得半週波的時間，據以算出第一段頻率 f_1 ，過了 100ms 後，在取樣一次波形兩次和零的交越點，算出第二段頻率 f_2 ，則頻率下降斜率即

$$\text{可求得：} \frac{df}{dt} = \frac{f_2 - f_1}{100ms}。$$

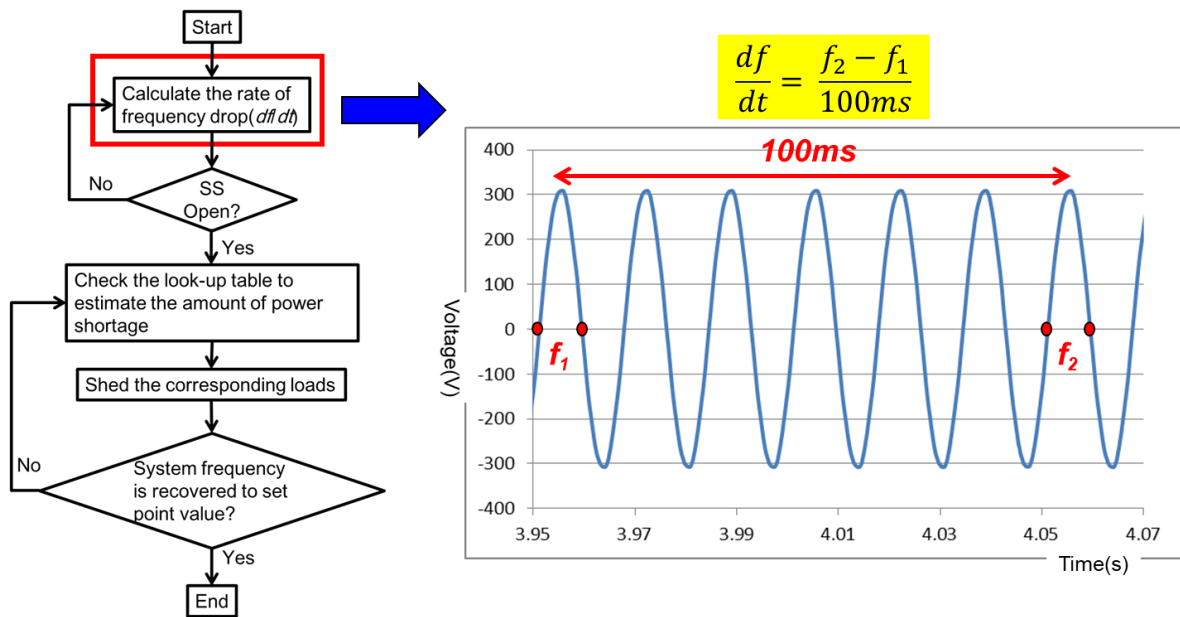


圖 4、低頻卸載策略流程圖

為了建立圖 4 中流程圖的低頻卸載對照表，本篇論文先透過多種不同情境之實驗。圖 5 為實驗情境說明，起初，微電網與市電端併聯，微電網內啟動儲能系統與兩個 30kW 的負載箱，為創造孤島運轉時，負載大於供電的情境，故限制儲能系統輸出上限值，在時間為 0.166 秒時，將靜態開關(SS)切離，使微電網進入孤島模式。此時因負載大於供電，故系統頻率下降，藉由固定負載量、固定缺電量、及固定儲能系統輸出上限等實驗，求得一決定係數為 0.9899 的系統慣量方程式： $y = -2.82271 \times 10^{-6}x^6 + 4.8361 \times 10^{-8}x^5 - 3.08785 \times 10^{-6}x^4 + 0.00009 \times 10^{-5}x^3 - 0.001197x^2 + 0.0070248x + 0.0156742$ ，其擬合曲線如圖 6 所示。

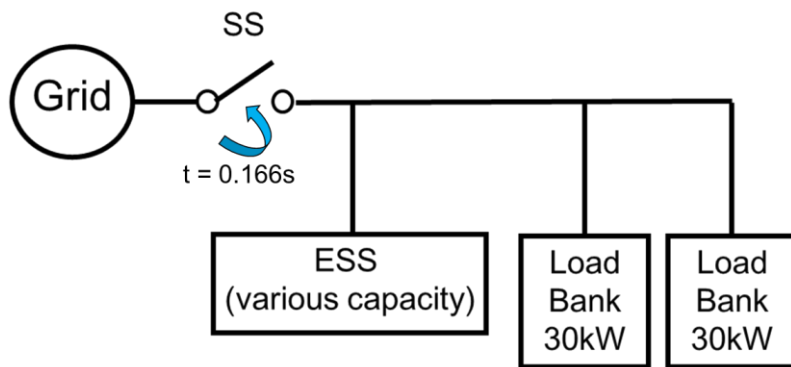


圖 5、系統慣量實驗說明圖

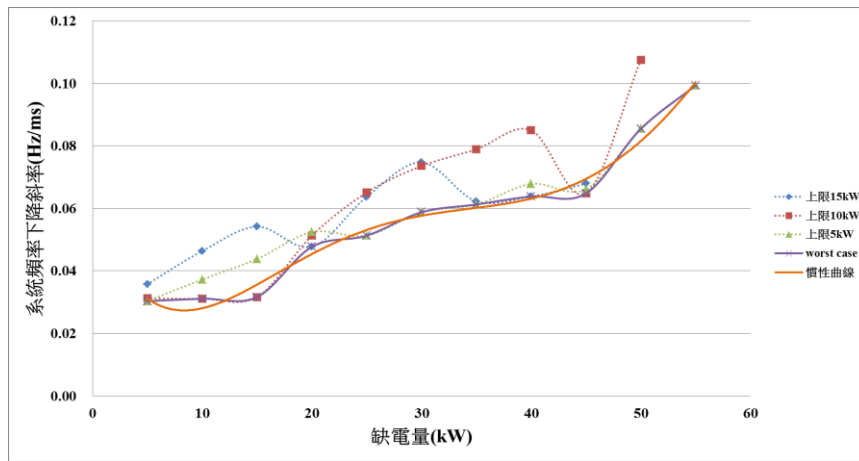


圖 6、慣量曲線方程式擬合

取得系統慣量方程式後，再藉由系統慣量方程式建立系統頻率下降斜率 vs.缺電量之對照表，並將其與前述之低頻卸載策略建置於本所所開發之「高速電力訊號分析及控制平台」。之先前實驗中，微電網系統僅有儲能與負載箱進行測試，本次則納入實際館舍負載(12kW)、PV(輸出 8kW)、負載箱(二台 30kW)、及儲能系統(限制輸出上限為 5kW)進行有無低頻卸載之實驗，如圖 7，一開始為電網與市電併聯，於 T=0.088 秒時，將 SS 斷開，使微電網轉為孤島運轉，以驗證所開發之低頻卸載策略，確實適用於本所微電網場域中。

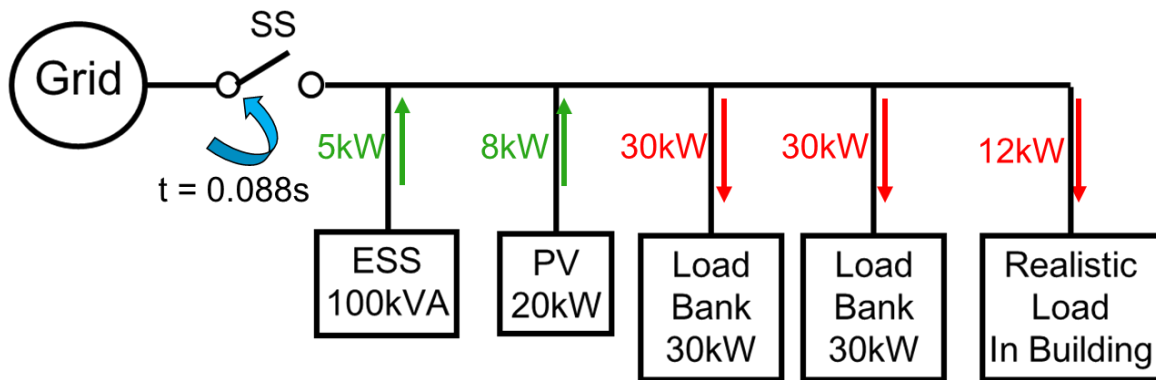


圖 7、低頻卸載策略驗證之實驗架構

圖 8、圖 9 各為分別為具備、及未具備低頻卸載機制之實驗結果。若無具備低頻卸載策略，因此微電網內負載大於供電能力，故系統頻率與電壓一直下降，約經過 230ms 時(約 13.8 週期)，微電網系統進入全黑，包括太陽光電、實際館舍負載、及 60kW 負載箱皆跳脫。而具有低頻卸載機制之實驗，當微電網轉為孤島運轉後，微電網內負載大於供電，故系統頻率與電壓下降，此時由於低頻卸載機制，藉由頻率下降斜率可推估目前缺電量，故卸除 60kW 負載，經過約 800 ms 的暫態擾動後，微電網系統之電壓與頻率分別回穩至 220V 及 60Hz，而儲能系統之輸出功率約 4 kW，期間實際館舍負載與太陽光電皆未跳脫，驗證所提出之低頻卸載

方法可避免微電網系統全黑。圖 10 為王員發表論文之照片。

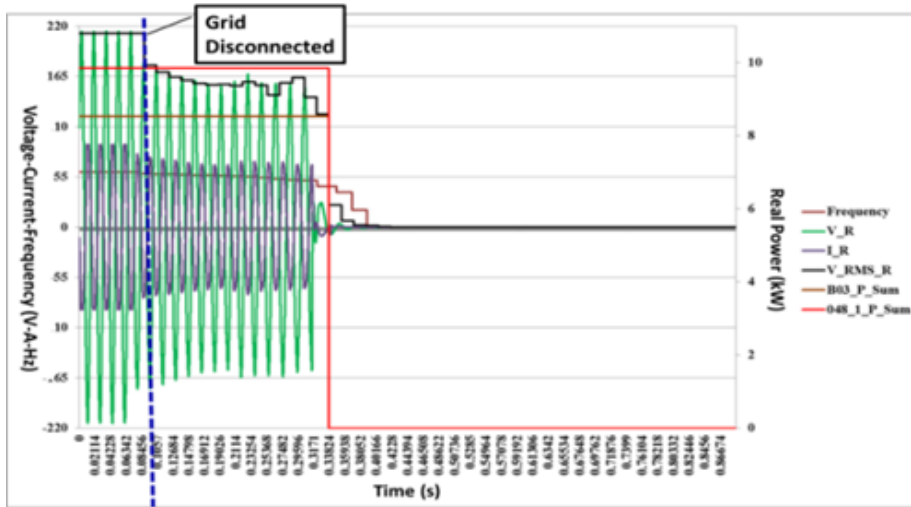


圖 8、無低頻卸載之微電網轉態波形

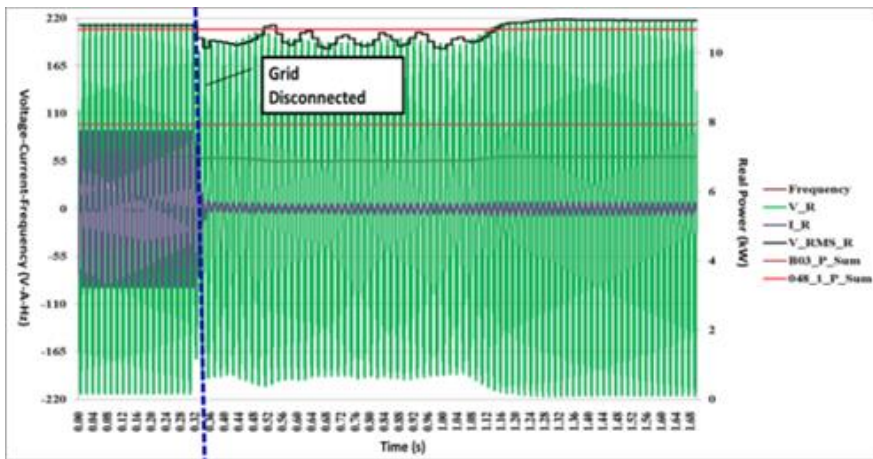


圖 9、具低頻卸載之微電網轉態波形

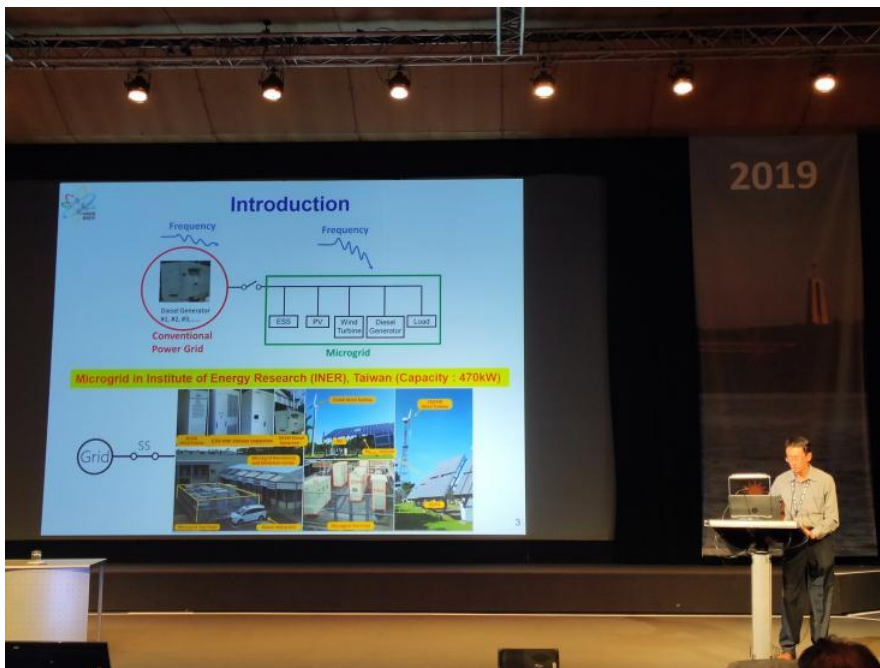


圖 10、王慎思發表論文過程

(三)、其他微電網相關之論文

(1) 「Development of A Power Hardware In the Loop Simulation of An Islanded Microgrid」

此篇論文由法國 Lille 中央理工學院的 Hicham Fakham、Taoufik Qoria、Martin Legry、Frederic Colas、及比利時 Engie 實驗室的 Tolivier Ducarme 提出。此論文先介紹一個由比利時 Engie 實驗室所建置名為「PowerConer」的微電網，此微電網建置於非洲坦尚尼亞北部的一個偏遠地區，其發電量為 16kWp，可供應 120 個家庭使用。圖 11 為該微電網架構圖，包含 PV、儲能系統、及負載。裝設電表來統計用戶使用電量，而用戶再由手機繳交使用電力之費用。

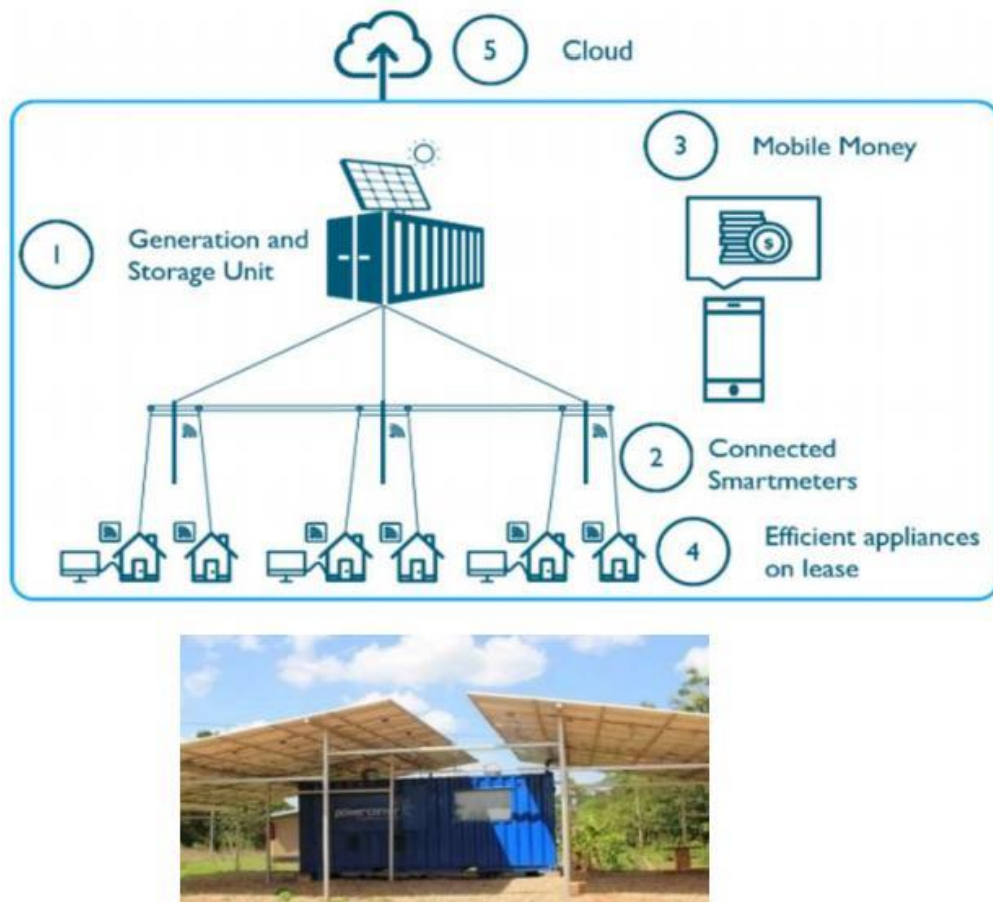


圖 11、微電網架構圖

接下來，該論文利用即時模擬之硬體迴圈技術，來評估與模擬此為電網之效能、可靠度。圖 12 為本文所提出之即時模擬架構圖，主要包含 OP5600 即時模擬器、FPGA I/O 及 FPGA D/A 橋接介面、三台單相 PV 變流器藉由兩台直流放大器與 OP5600 即時模擬器連接，直流放大器產生直流參考電壓(48V)來模擬電池之特性、一台可控之三相交流線性放大器來模擬負載之特性、及一台裝有 RT-LAB 軟體的電腦來進行模擬及呈現模擬結果。

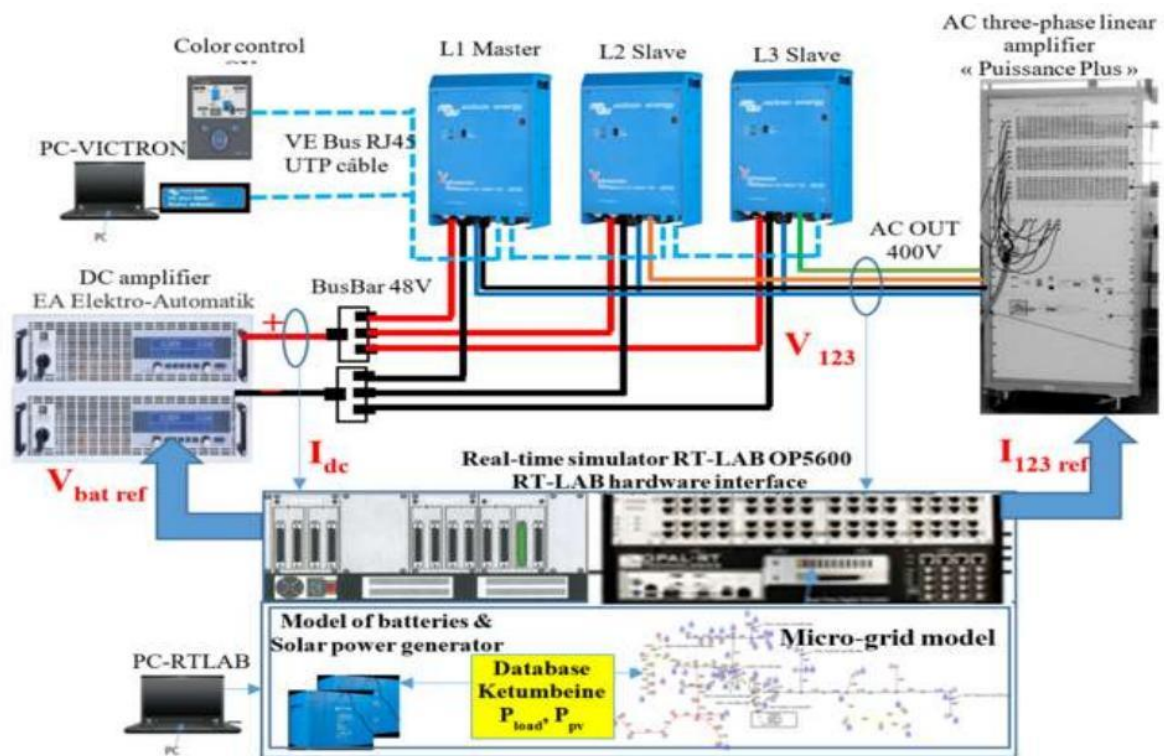


圖 12、即時模擬架構圖

圖 13 為電池及 PV 模型架構圖，電池使用 MATLAB\SimPowerSystem 內建模型。為了實現閉迴路模擬，量測被 PV 變流器吸收之直流電流 I_{dc} ，則電池電流 I_{bat} 可被計算出來： $I_{bat} = I_{pv} - I_{dc}$ ，其中 I_{pv} 為 PV 提供之電流， $I_{pv} = P_{pv}/V_{bat}$ ，此電池模型之模擬結果、整個微電網之 MATLAB 架構圖如圖 14、圖 15 所示。模擬情境分為兩個架構：微電網連接一個線性負載、及微電網連接常態性負載曲線(包含 PV 供電)。

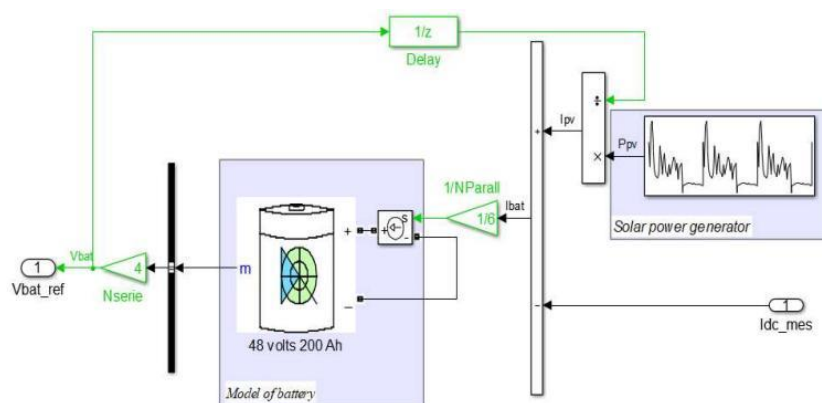


圖 13、電池及 PV 模型架構圖

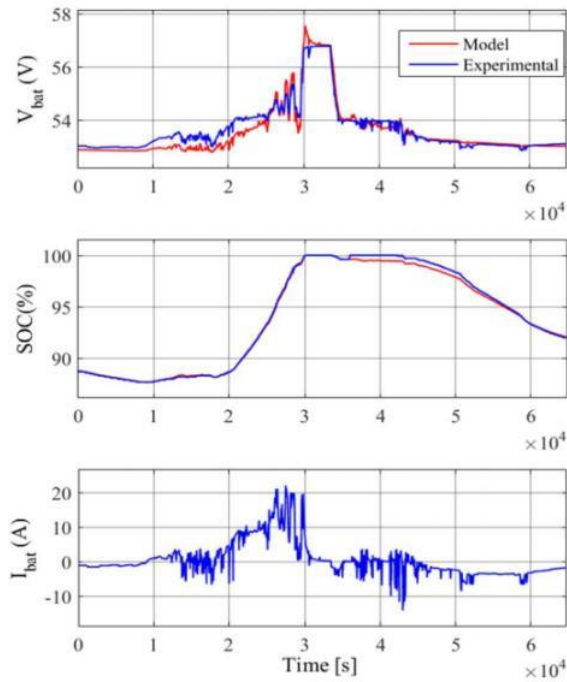


圖 14、電池之模擬與實驗結果

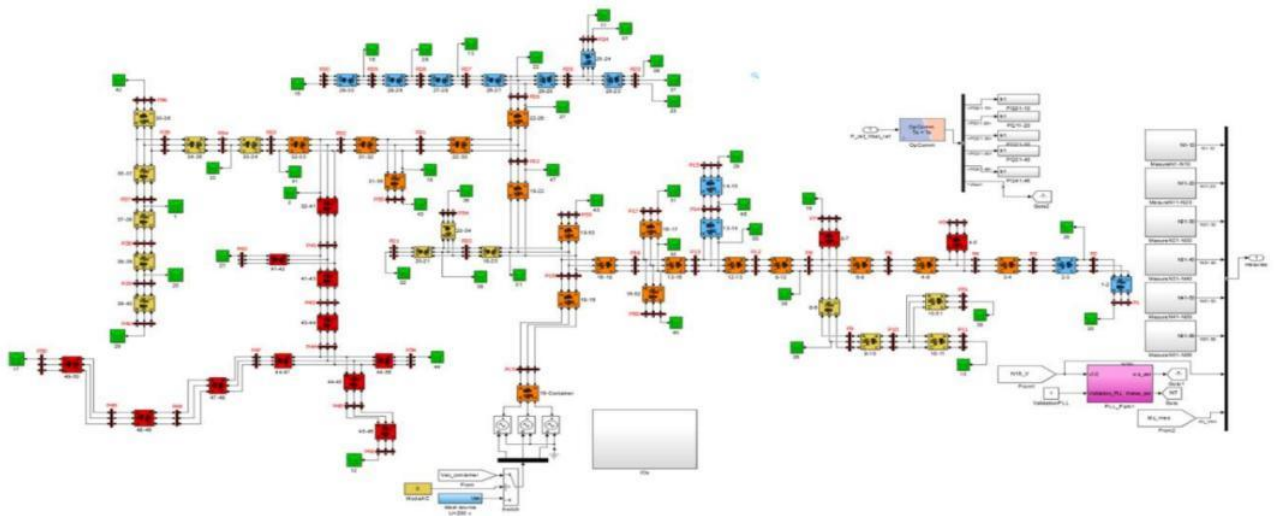


圖 15、MATLAB 微電網模擬架構圖

當微電網連接一個線性負載，其結果如圖 16。當 $t=0.065$ 時，線性負載吸收電流，驗證 PV 變流器工作之正確性。而當微電網連接常態性負載曲線(包含 PV 供電)，PV 變流器之 AC 端 RMS 電壓如圖 17。在圖 18，由被負載吸收之交流電流 RMS 值曲線可看出，交流電流之變動不影響圖 17 中 PV 變流器之 AC 端 RMS 電壓。圖 19 為 PV 變流器之直流與交流端之總實功曲線，可看出兩曲線走勢幾乎一致，兩者之間的微小差異為變流器之損耗。

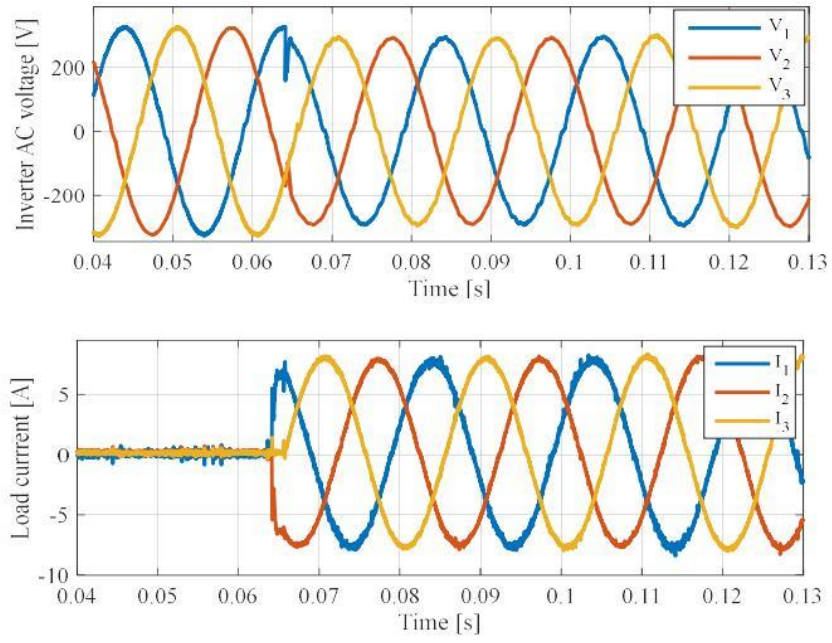


圖 16、PV 變流器之交流電壓、與負載電流曲線圖

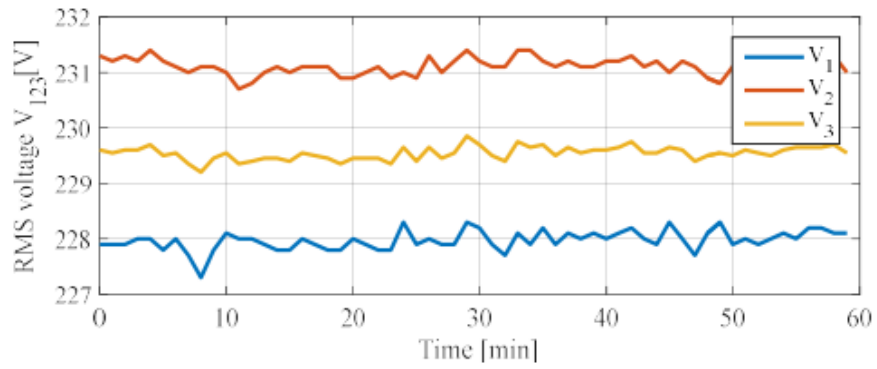


圖 17、PV 變流器之 AC 端 RMS 電壓

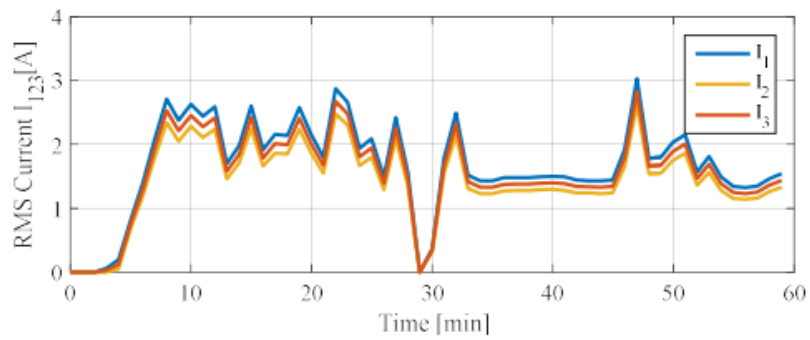


圖 18、被負載吸收之交流電流 RMS 值

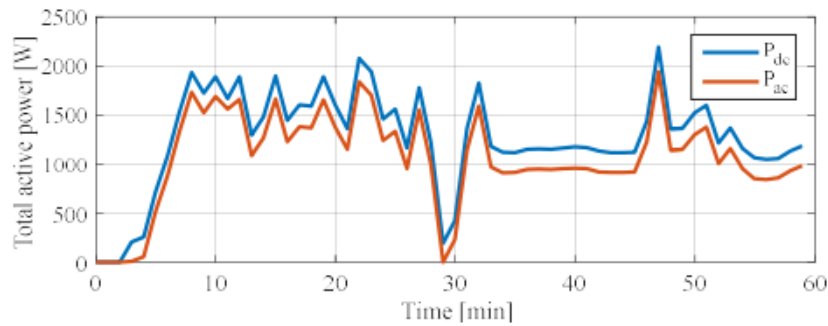


圖 19、PV 變流器之直流與交流端之總實功曲線

(2) 「Single Sensor Based ESS Controller for DC Bus Stabilization in Low Power Isolated Solar PV System」

此篇論文由印度 Motilal Nehru National Institute of Technology 的 Alok Agrawal、及 Rajesh Gupta 發表，提出一個低功率孤島型的直流微電網系統，並提出以電壓感應器為基底的儲能轉換器之控制器，用以穩定直流饋線電壓，及系統電力之管理。上述之控制器可以用以將多台儲能系統做電力交換，且僅使用一個感應器。與傳統的控制器，儲能系統越多，所需要的感應器也需要越多。因為只使用一個感應器，所需的控制電路架構也較為簡單，而系統穩定度也較佳(因為使用較少的 PI 調控器)。同時，也因為較簡單的控制器架構，使得成本較為低廉。最後也進行了模擬與實際測試，以驗證上述所提之儲能系統轉換器之控制方法。

圖 20 為本文所提出之微電網系統架構圖包含了 PV 設備、儲能系統、單向直流-直流 MPPT 轉換器、雙向直流-直流電流轉換器、及直流負載。儲能系統用以進行電力調控，為了判斷所提出的控制器的功效，在 DC link 電壓穩定度必須持續監控。單向直流-直流轉換器運作於電壓控制模式，用以控制 PV 系統之 MPPT；而雙向直流-直流電流轉換器運作於電流控制模式，用以控制儲能系統之電力潮流。

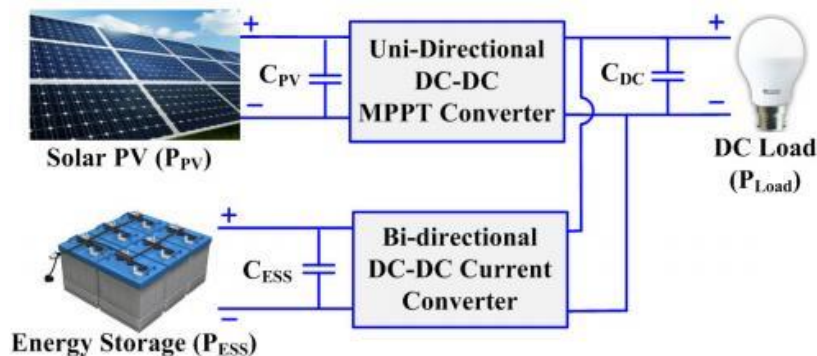


圖 20、直流微電網系統架構

圖 21 為傳統的多感應器之儲能系統控制器架構，而圖 22(a)為六個感應器之儲能系統控制器算法，在此架構中，儲能系統、PV、及負載的電壓、電流皆被量測，雖然此架構用了多個感應器，卻無法提供穩定的直流電壓值，這使得此方法不適用於直流負載之應用。再者，若有多個儲能系統在此微電網系統，則將會使需要的感應器數量大大增加。圖 22(b)為三個感應器之儲能系統控制器算法，在此架構中，負載端的電流感應器被省略，而藉由負載端的電壓感應器所量測之電壓值，來推估系統功率，此架構可提供負載穩定的直流電壓值，在此架構下，使用的 PI 控制器較多，因此系統穩定度可能會下降。圖 22(c)為二個感應器之儲能系統控制器算法，此架構進一步省略儲能系統的電壓感應器，此架構可提供穩定的直流電壓值。

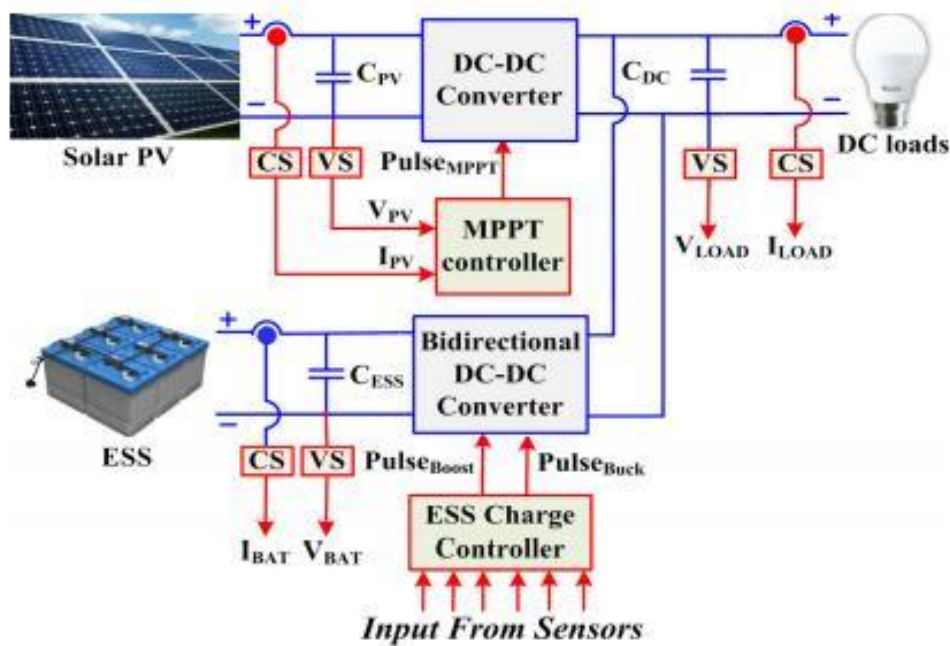


圖 21、傳統的多感應器之儲能系統控制器架構

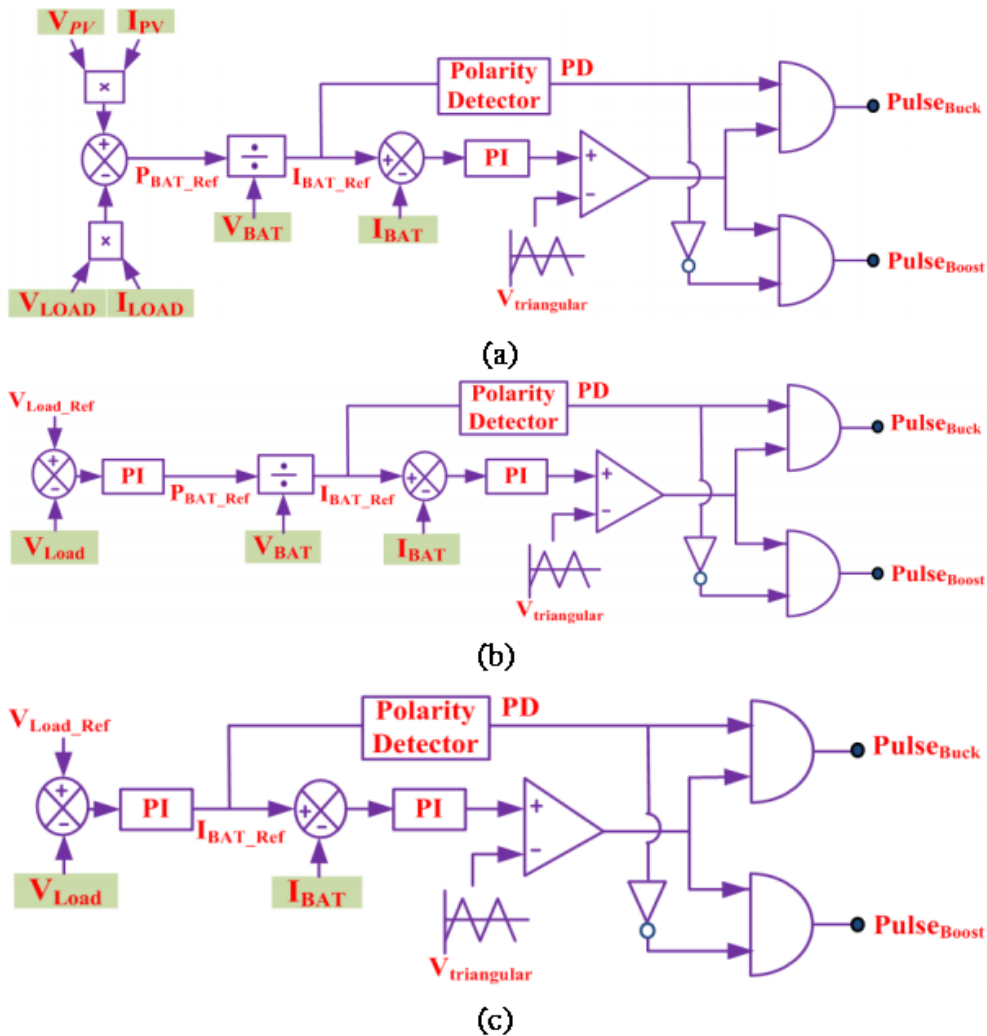


圖 22、控制器演算法架構 (a)六個感應器之儲能系統控制器算法 (b)三個感應器之儲能系統控制器算法 (c)二個感應器之儲能系統控制器算法

圖 23 為本文提出之單一感應器之儲能系統控制器架構，因為此控制器是應用於低功率之使用，感應之雜訊不影響 PI 控制器之功能，故系統穩定度可維持。而在圖 24，本文提出多儲能系統之控制器架構，其特色為只使用一個感應器(負載電壓感應器)，利用此架構可調控電力潮流。在此架構中，使用增益參數，用以決定多儲能系統之功率交換率(Power Exchange Ratio)，每一個儲能系統之轉換器之控制器皆有各自之 PI 調控器，以避免任何儲能系統或轉換器故障時，導致系統不穩定。

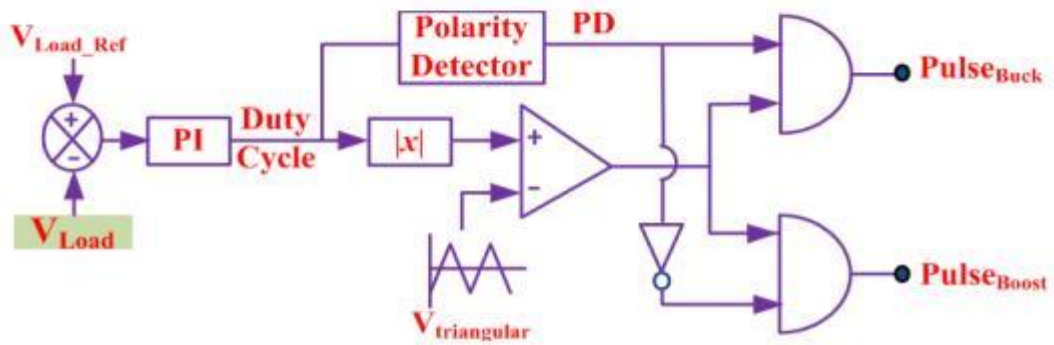
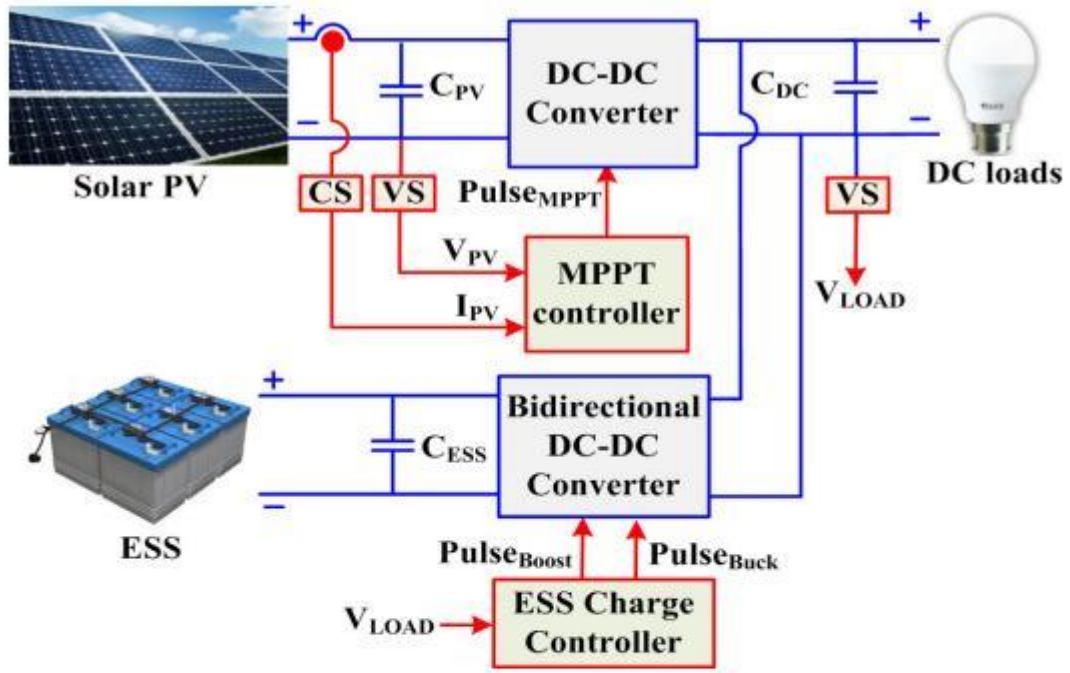


圖 23、本文提出之單一感應器之儲能系統控制器架構

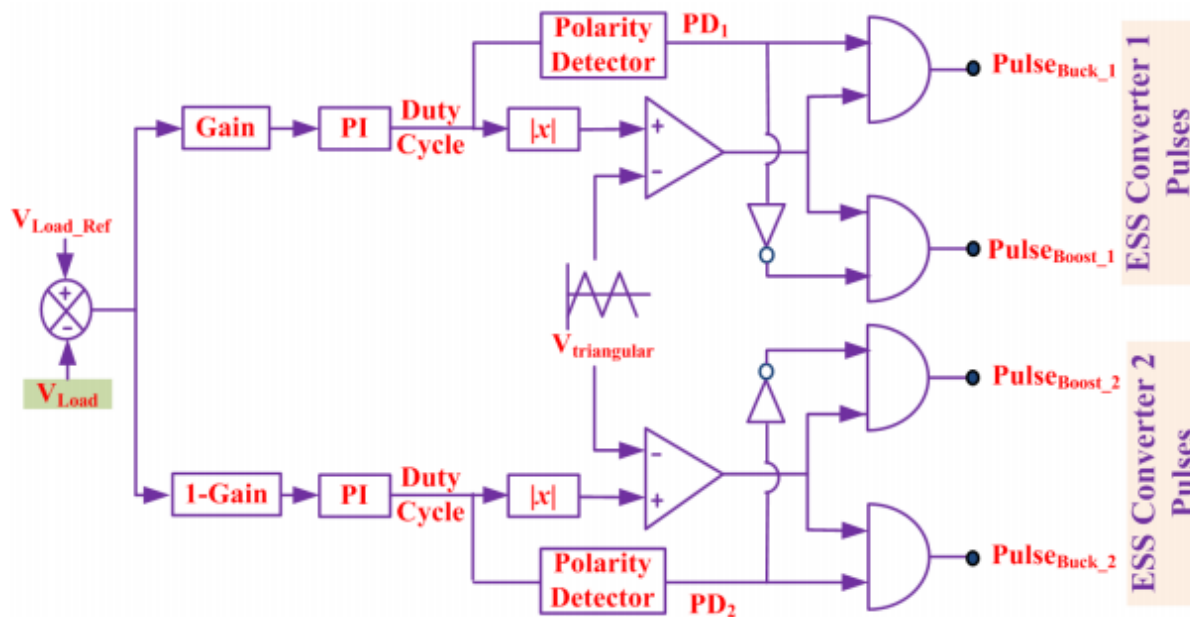


圖 24、本文提出之多儲能系統控制器架構

圖 25 為本文提本文提出之功率管理策略流程圖，此流程圖中分為多種模式，若 PV、負載、及儲能系統，此三個設備任兩個沒有運轉，則終止。反之，則根據發電與負載狀態、及儲能系統電量，分為六種模式。

Mode I : PV Power > Load Power

Mode II : PV Power < Load Power

Mode III : PV < Load Power and $SOC_{ESS} < SOC_{MIN}$

Mode IV: If PV > Load Power and $SOC_{ESS} > SOC_{MAX}$

Mode V : ESS is Isolated

Mode VI : PV Power = 0

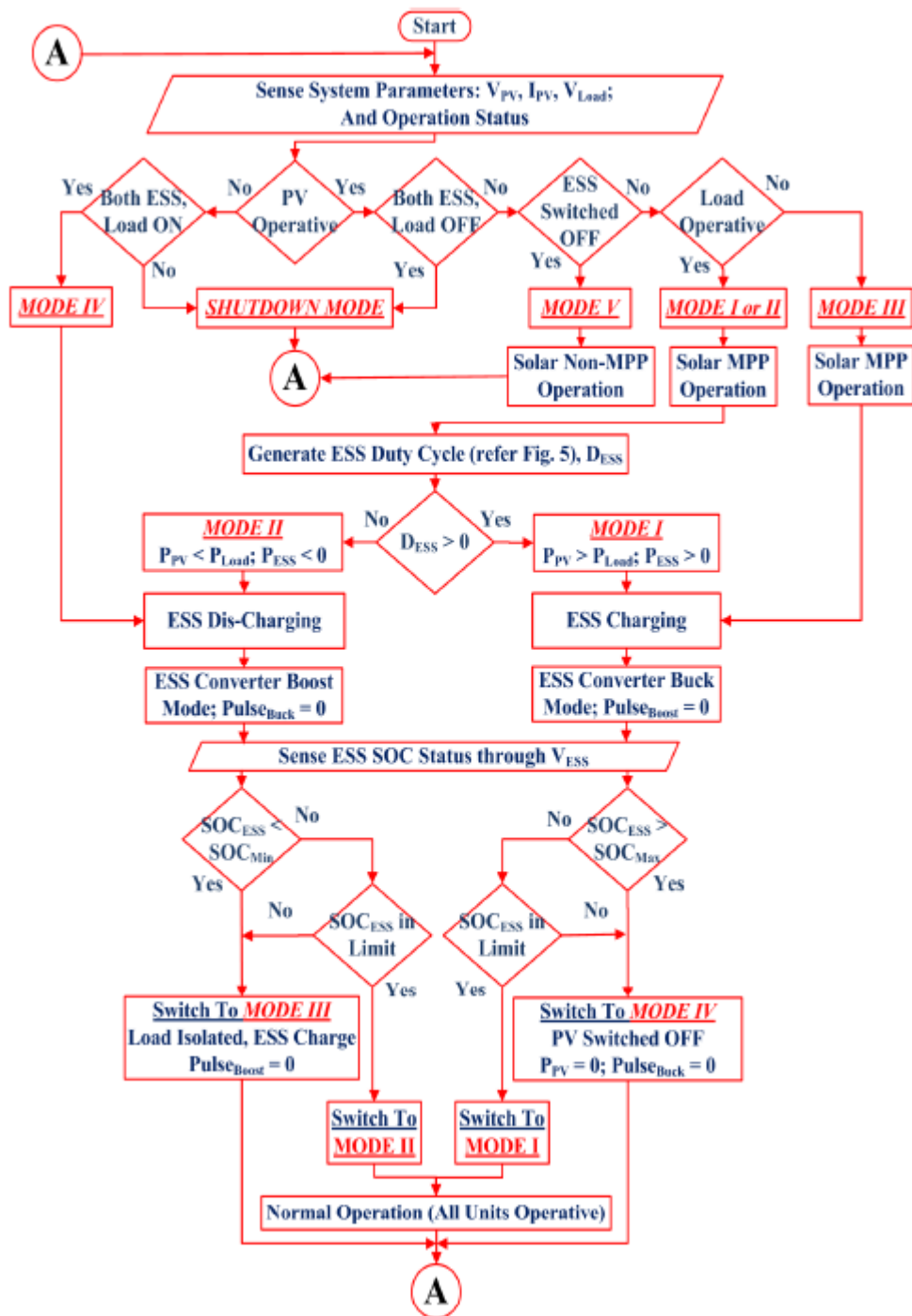
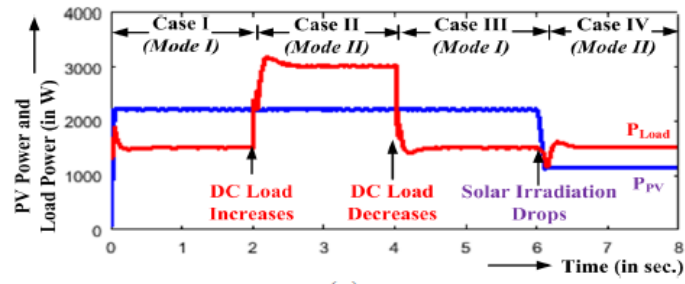
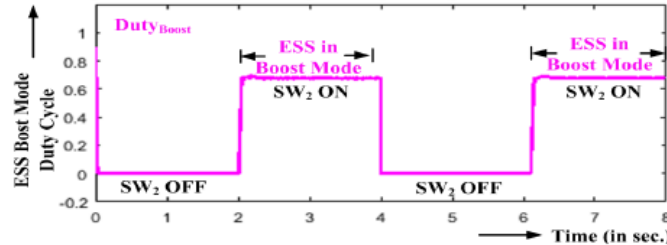
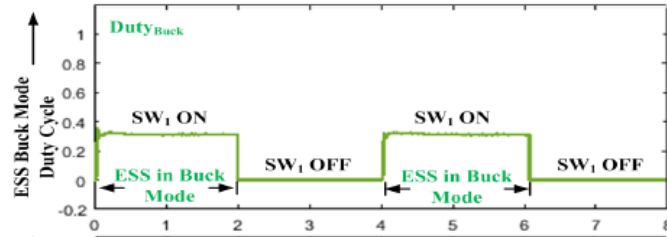
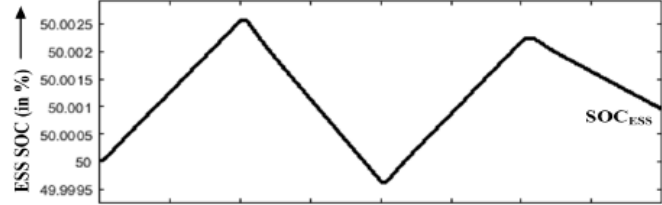
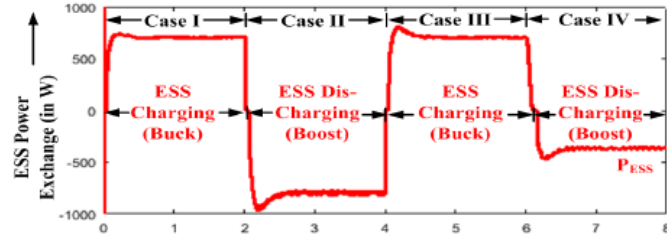


圖 25、本文提出之功率管理策略流程圖

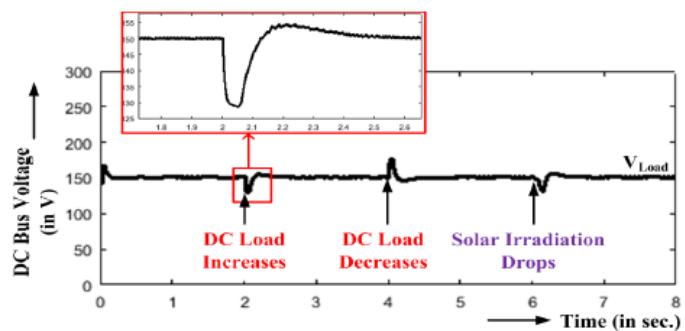
接下來利用 MATLAB 模擬圖 25 之各種模式，圖 26 為 Mode I 及 II 之模擬結果，在 Case I ~III，PV 操作於最大輸出功率(MPP)，負載量設定一開始較小，然後在 Case II 倍增，然後在 Case III 降回 Case I 之值。在 Case IV，PV 照度變為原來一半。可看到經由上述情境，儲能系統充放電、儲能系統 SOC 準位、SW₁ 及 SW₂ 之切換、及饋線電壓之變化。從 Case I 到 CaseIV，饋線電壓維持穩定值，在情境切換時，則有電壓抖動現象。



(a)



(b)



(c)

圖 26、Mode I 及 II 模擬結果 (a)PV、負載功率圖 (b)PV 狀態圖 (c)直流饋線電壓曲線

接下來模擬儲能系統 SOC 準位變化之影響，在圖 27(a)中，設定 PV 發電量大於負載

量，故 PV 對儲能系統充電，於 $t=3$ 秒時， $SOC_{ESS} > SOC_{MAX}$ ，PV 停止運作，並由儲能系統供電給負載，而在在圖 27(b)中，設定 PV 發電量小於負載量，故儲能系統放電，於 $t=3$ 秒時， $SOC_{ESS} < SOC_{MIN}$ ，儲能系統已完全放電，故此時 PV 和儲能系統皆無法滿足負載之供電需求，此時負載卸除、PV 開始對儲能系統充電。

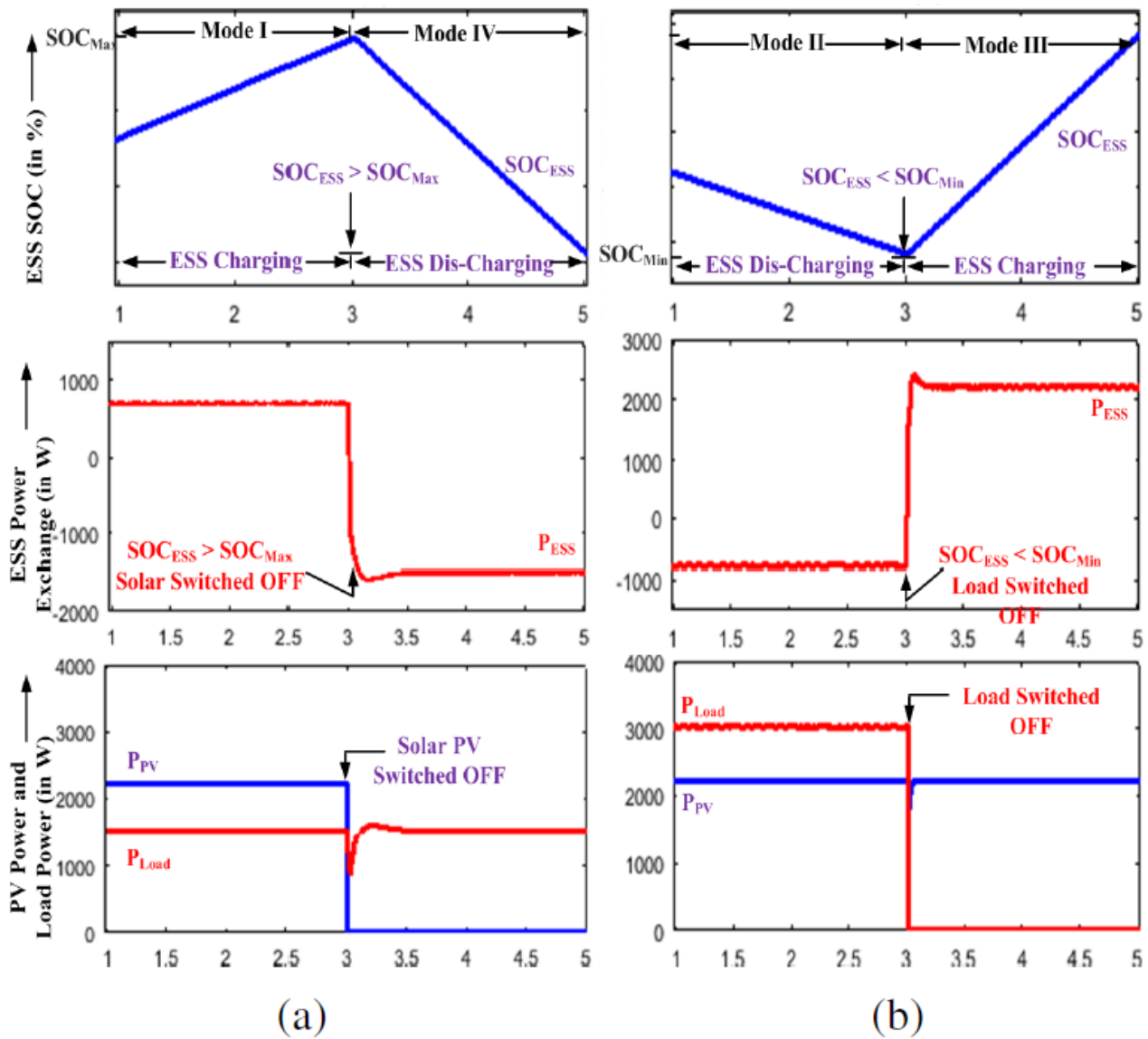


圖 27、儲能系統 SOC 變化之模擬結果 (a) $SOC_{ESS} > SOC_{MAX}$ (b) $SOC_{ESS} < SOC_{MIN}$

圖 28 為進行本文所提之儲能系統控制器之實驗實際接線圖，實驗結果如圖 29，可分為 Case I~ Case IV，在 Case I，PV 操作於 MPP 點，PV 發電大於負載，故 PV 對儲能系統充電，在 Case II，負載上升，此時 PV 發電小於負載，故儲能系統放電，而在 Case III，負載又下降，PV 大於負載，PV 恢復對儲能系統充電，在 Case IV，PV 照度下降，PV 發電小於負載，故儲

能系統放電。

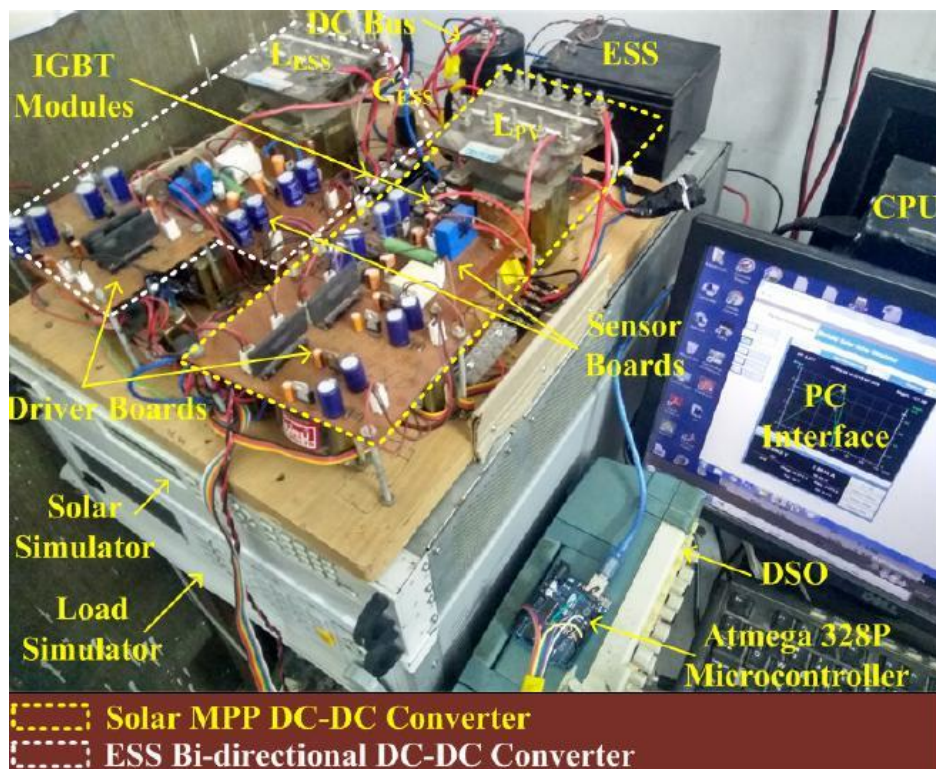
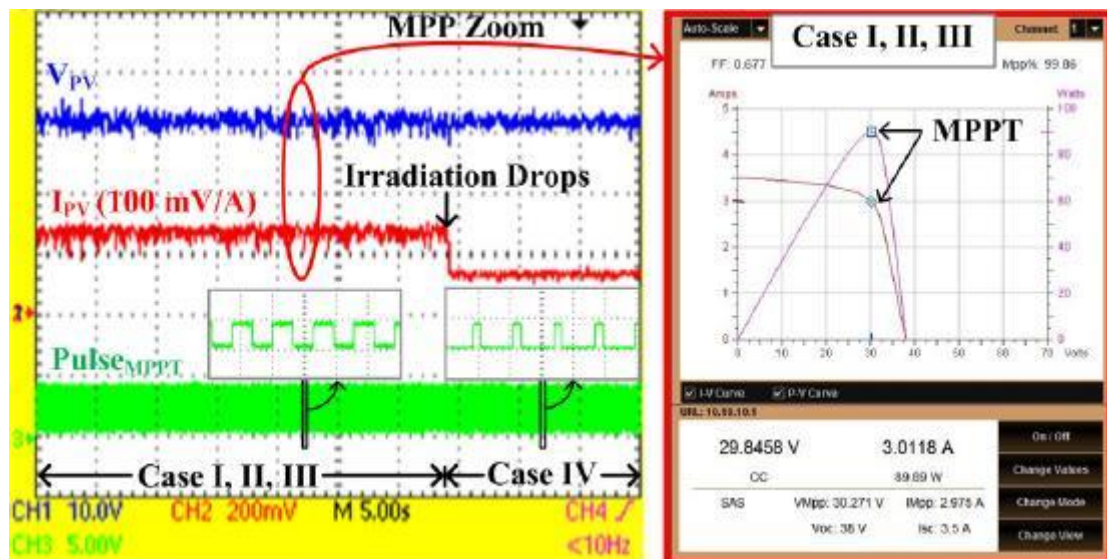
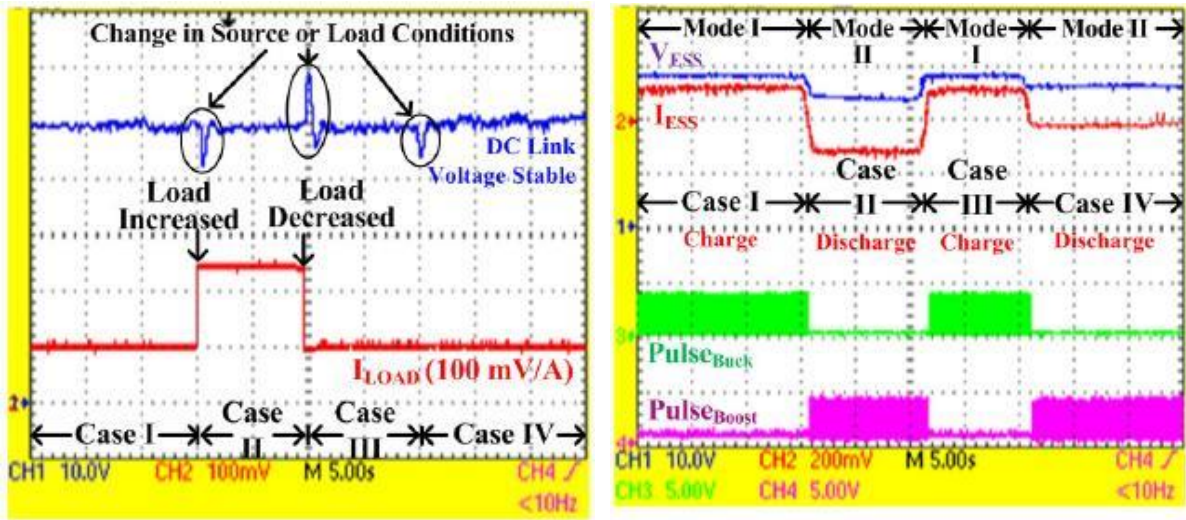


圖 28、於實驗室實驗本文所提之儲能系統控制器



(a)



(b)

(c)

圖 29、實驗結果 (a)PV 參數變化圖 (b)DC link 電壓及負載電流 (c)儲能系統參數變化

(3) 「Analysis of Black Start Strategies for Microgrids with Renewable Distributed Generation」

此篇論文由德國 University of Applied Sciences Kempten 的 Andreas Armstorfer、Helmuth Biechl、及愛沙尼亞 Tallinn University of Technology 的 Argo Rosin 發表，此篇論文利用模擬的方式，分析與比較三種微電網全黑啟動的模式，在孤島的情況下，為電網內部主要架構如圖 30 所示，包含 DG(分散式能源)、ESS(儲能系統)、負載、傳統發電機等設備。

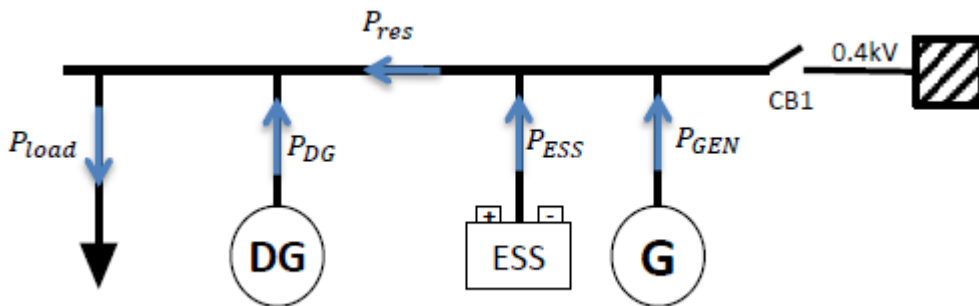


圖 30、全黑啟動微電網組織架構圖

此篇論文中，分散式能源(DG)為 PV，其特性如圖 31 所示，此為德國低電壓併網標準「VDE-AR-N 4105」之規範。當頻率小於 50.2Hz，DG 可維持大功率輸出，當頻率介於 50.2 至 51.5Hz，輸出功率需開始逐漸下降。此外，當 PV 開始併聯於微電網內，必須倒數 60 秒，才會開始輸出功率。此篇提到的全黑啟動方式共分為三種：只以儲能系統(ESS)全黑啟動、只以傳統發電機組全黑啟動、及以儲能系統(ESS)及傳統發電機全黑啟動。

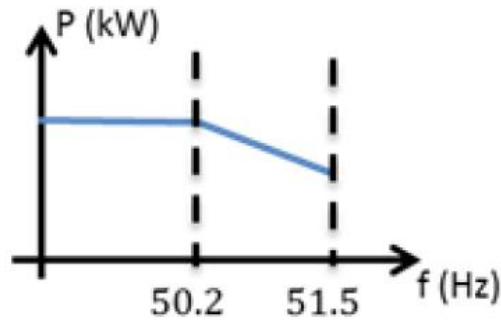


圖 31、分散式能源(DG)功率-頻率關係圖

首先是只以儲能系統(ESS)啟動，其儲能系統之頻率與功率曲線如圖 32。T=0 秒時，儲能系統併聯於微電網並啟動，當 T=10 秒時，DG 併聯於微電網，並於 60 秒後(T=70 秒時)DG 開始發電，當儲能系統的 Droop Factor (K)設定為 600kW/Hz，為了維持 DG 的最大發電量，系統頻率至 50.2Hz 便停止爬升，而此時 DG 輸出功率為 117kW，當 Droop Factor (K)較大時，系統頻率爬升較慢，故 DG 可輸出較多功率。故在此模式，儲能系統的 Droop Factor (K)設定，對於 DG 發電量有絕對影響力。

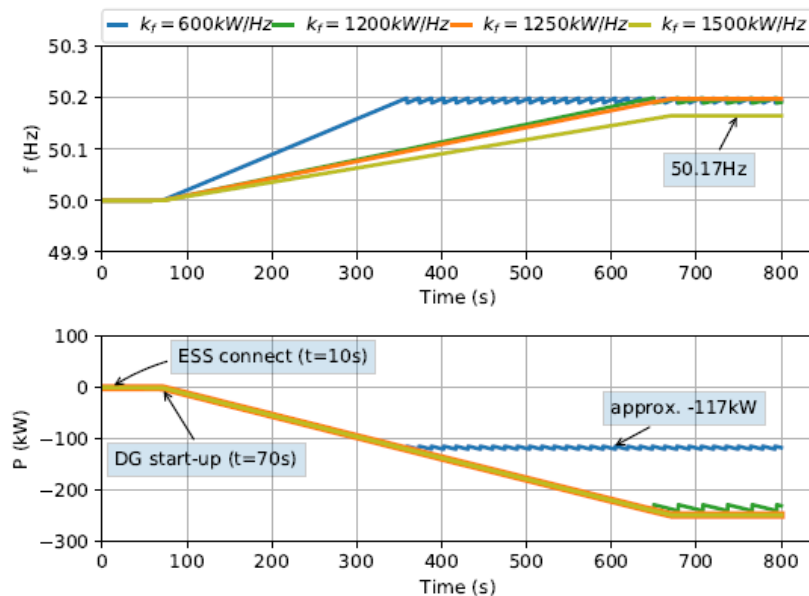


圖 32、只以儲能系統(ESS)啟動_功率-頻率關係圖

第二種模式是只以傳統發電機啟動，其頻率與功率曲線如圖 33。T=0 秒時，傳統發電機啟動，當 T=10 秒時，傳統發電機併聯於微電網。負載分為 40kW、50kW、60kW 三種情境，由曲線可看到，當負載為 60kW，傳統發電機無法承受啟動瞬間之負載，導致加載、甚至全黑

啟動失敗。故在全黑啟動時，必須適當選擇啟動時加載的負載量。

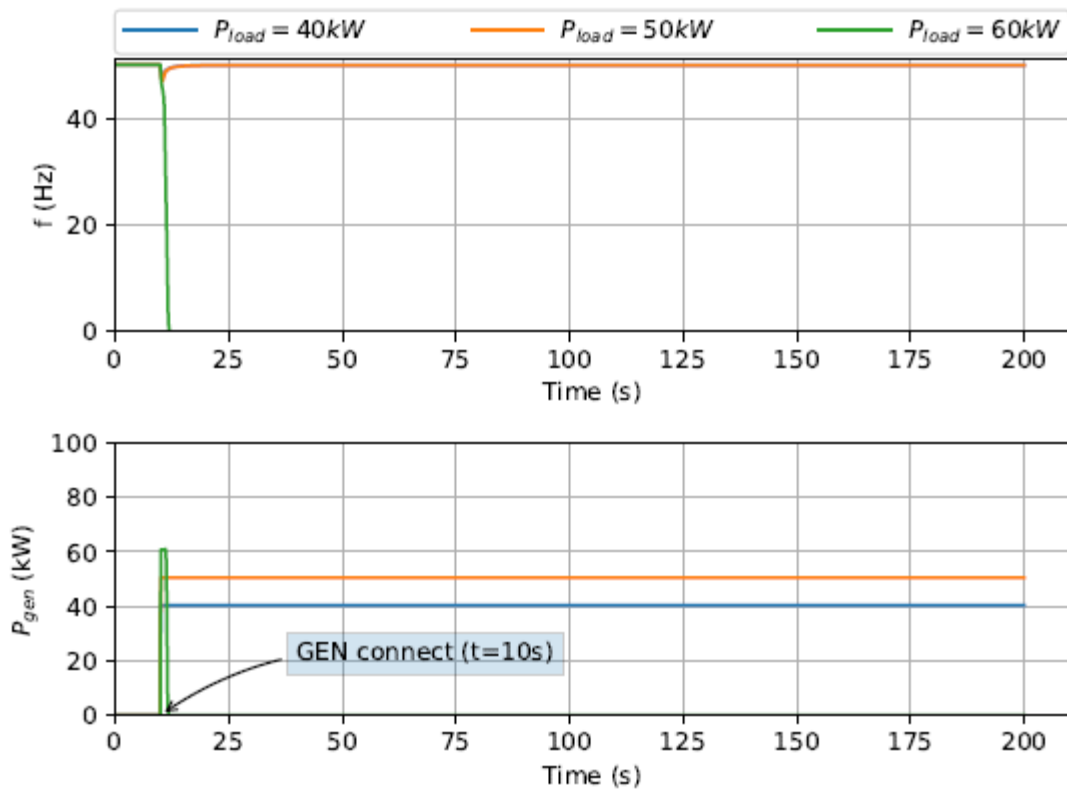


圖 33、只以傳統發電機啟動_功率-頻率關係圖

第三種模式是以儲能系統(ESS)及傳統發電機啟動，其頻率與功率曲線如圖 34。T=0 秒時，儲能系統、與傳統發電機啟動，且併聯於微電網內，當 T=10 秒時，DG 與負載併聯於微電網，因為 PV 的特性，DG 倒數 60 秒後，於 T=70 秒時開始輸出功率。因為儲能系統反應較傳統發電機快，故 T=10 秒，當負載加載時，儲能系統瞬間輸出約 100kW，待傳統發電機開始輸出功率後，儲能系統才逐漸降低輸出功率。當 T=70 秒時，DG 開始輸出功率，故淨負載開始下降，當 T 大約為 300 秒時，淨負載幾乎為 0，此後 DG 發電再上升，DG 供應負載後，多餘的電力對儲能系統充電，到 T 大約為 680 秒時，DG 發電功率達最大值，約為 250kW，其中 100kW 供應負載，剩下 150kW 對儲能系統充電。

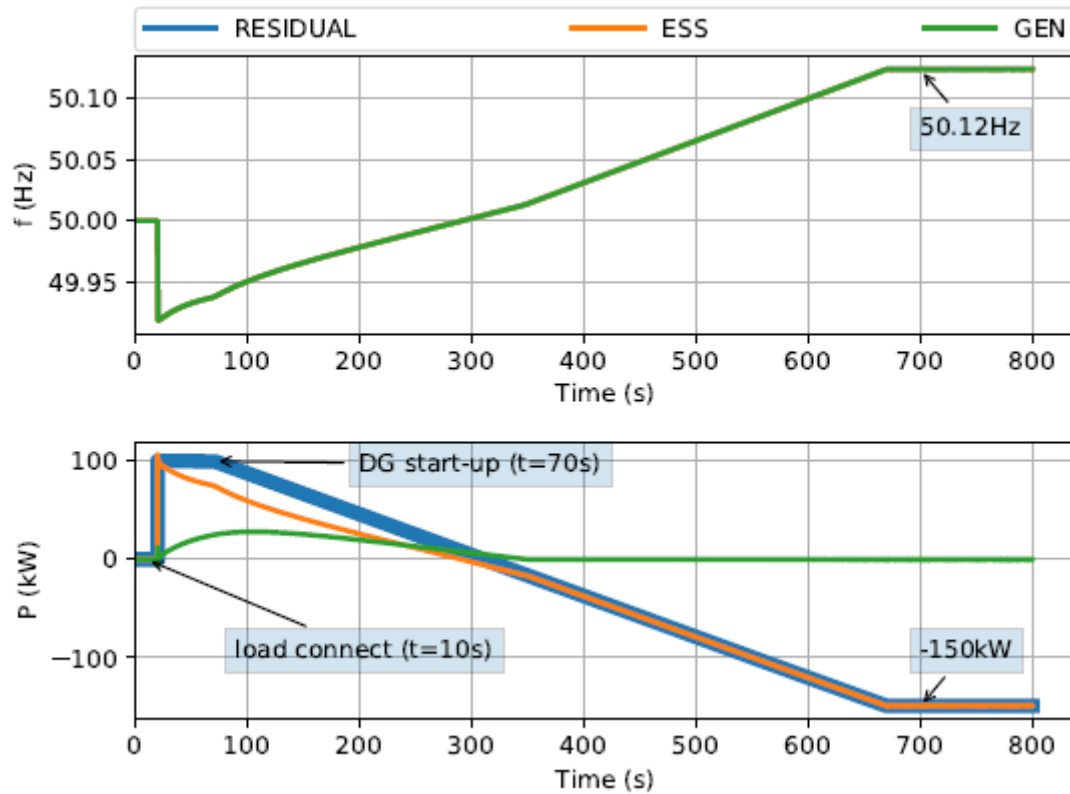


圖 34、以儲能系統(ESS)及傳統發電機啟動_功率-頻率關係圖

本所研究微電網全黑啟動，係使用一台儲能系統供電，儲能系統供電路徑包含一個變壓器，並因變壓器的鐵芯飽和及剩磁等原因，導致全黑啟動瞬間，有極大的湧浪電流(Inrush Current)產生。本所利用 Matlab\Simulink 模擬微電網全黑啟動瞬間之湧浪電流，並配合現場除能系統供電路徑不同，設定不同的線路阻抗值，以比較線路阻抗對湧浪電流大小之影響；另外，亦比較儲能系統電壓投入角度對湧浪電流大小的影響。

四、建議事項

本次王員赴葡萄牙里斯本參加「IECON 2019」國際研討會，與國際先進業界進行電力、儲能系統與微電網技術交流，不僅獲取國際能源系統、再生能源與微電網最新發展趨勢，有助於本所未來在區域型分散力電力技術之研究規劃及相關領域技術開發，更可以與國際先進技術接軌。另外，口頭發表一篇論文，可提升本所在國際上之能見度。針對此次國外公差心得，提出以下幾點建議事項：

1. 配合政府計畫，台灣目標為 2025 年再生能源發電量達到 20%，勢必遇到許多挑戰，未來可注意每年微電網相關議題之研討會，並鼓勵本所同仁參加，以瞭解目前世界微電網之技術水平，與微電網相關應用。
2. 經由今年研討會可發現，已有一些硬體迴圈之技術即時模擬微電網相關論文出現，本所這類技術與論文發表較少，未來可朝此方向努力，以順應世界之潮流。
3. 本次參加研討會，有看到微電網全黑啟動分析之相關論文。本所亦有做微電網全黑啟動之研究，且於今年電力研討會發表一篇微電網全黑啟動分析之相關論文，惟兩者之全黑啟動情境、分析方式有一些不同。其研究內容，可作為本所未來研究微電網全黑啟動之參考。

五、附 錄

(1)王慎思發表論文之簡報資料：



Rotational Inertia Analysis and Underfrequency Load Shedding Strategy of a Microgrid System

Oct.15 2019
**Shen-Szu Wang, Yih-Der Lee,
Jheng-Lun Jiang, Yuan-Hsiang Ho**
Institute of Nuclear Energy Research (INER), Taiwan

1



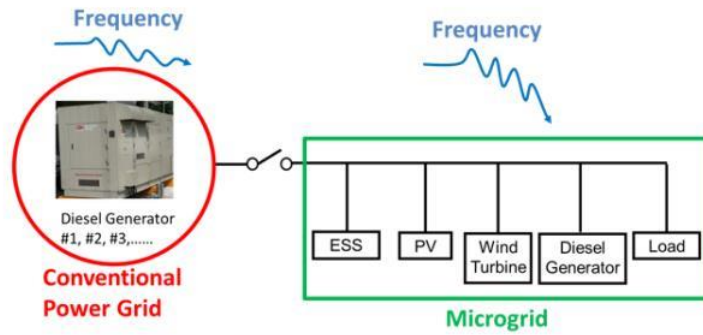
Outline

- ❖ **Introduction**
- ❖ **UFLS for A Microgrid**
- ❖ **Rotational Inertia Analysis**
- ❖ **Verification of The Proposed UFLS**
- ❖ **Conclusion**

2



Introduction



Microgrid in Institute of Energy Research (INER), Taiwan (Capacity : 470kW)

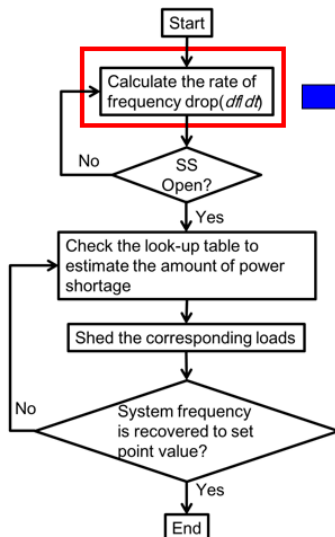


3

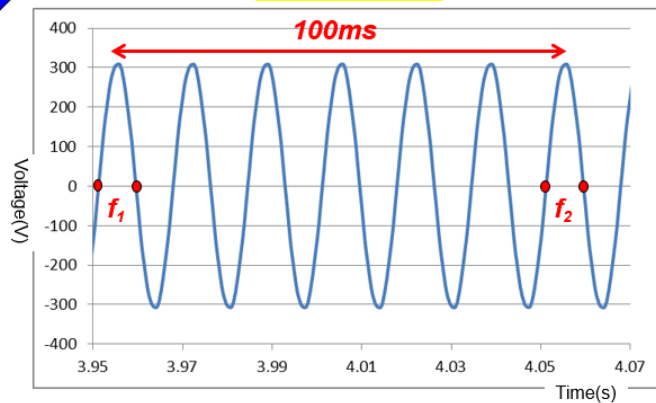


UFLS for A Microgrid

- ❖ Proposed an UFLS Strategy for a microgrid
 - High Speed Signal Analysis and Control Platform
 - Look-up Table of Frequency Drop vs. Power Shortage



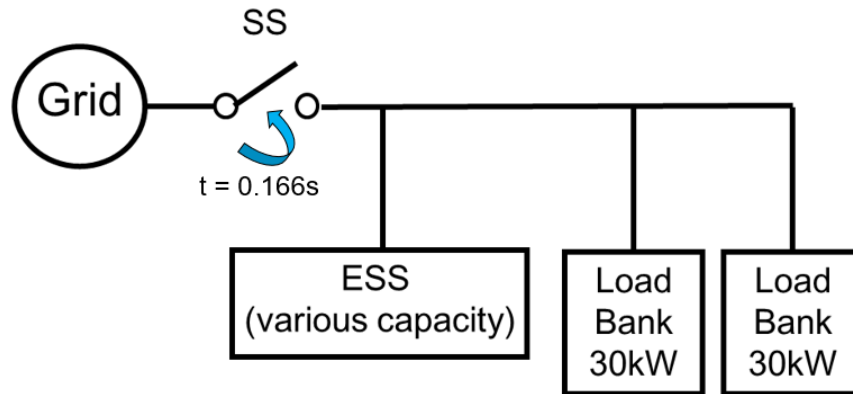
$$\frac{df}{dt} = \frac{f_2 - f_1}{100ms}$$



4



Rotational Inertia Analysis



❖ Experiment Scenarios

- **#1:** Various power shortage with certain load
- **#2:** Various loads with certain power shortage
- **#3:** Various power shortage with certain capacity of ESS

5

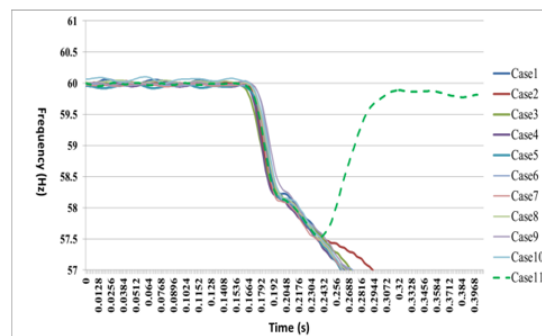


Rotational Inertia Analysis

❖ Experiments of 60kW load

- Capacity of ESS has less effect on the rate of frequency drop.

| Case No. | #1 Load (kW) | ESS Capacity (kW) | Power Shortage (kW) | Rate of Frequency Drop (Hz/ms) |
|----------|------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|
| 1 | 60 | 50 | 10 | 0.082955 |
| 2 | 60 | 45 | 15 | 0.070374 |
| 3 | 60 | 40 | 20 | 0.080180 |
| 4 | 60 | 35 | 25 | 0.081818 |
| 5 | 60 | 30 | 30 | 0.081600 |
| 6 | 60 | 25 | 35 | 0.071366 |
| 7 | 60 | 20 | 40 | 0.075170 |
| 8 | 60 | 15 | 45 | 0.078156 |
| 9 | 60 | 10 | 50 | 0.070637 |
| 10 | 60 | 5 | 55 | 0.075294 |
| 11 | 60 | 100 | None | 0.070536 |



6

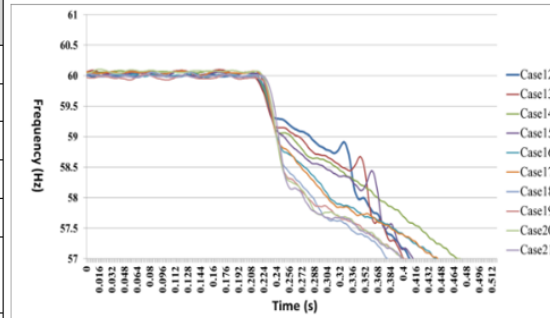


Rotational Inertia Analysis

❖ Experiments of 10kW power shortage

- It is presumed that the amount of the load affects the rate of frequency drop.

| Case No. | Load (kW) | ESS Capacity (kW) | #2 Power Shortage (kW) | Rate of Frequency Drop (Hz/ms) |
|----------|-----------|-------------------|------------------------|--------------------------------|
| 12 | 15 | 5 | 10 | 0.032574 |
| 13 | 20 | 10 | 10 | 0.033926 |
| 14 | 25 | 15 | 10 | 0.040465 |
| 15 | 30 | 20 | 10 | 0.058178 |
| 16 | 35 | 25 | 10 | 0.050153 |
| 17 | 40 | 30 | 10 | 0.061256 |
| 18 | 45 | 35 | 10 | 0.072341 |
| 19 | 50 | 40 | 10 | 0.061426 |
| 20 | 55 | 45 | 10 | 0.076438 |
| 21 | 60 | 50 | 10 | 0.080769 |



7



Rotational Inertia Analysis

❖ Experiments of ESS with 5, 10, 15kW of capacity

- The load affects the rate of frequency drop significantly (positive correlation).

| Case No. | Load (kW) | #3 ESS Capacity (kW) | Power Shortage (kW) | Rate of Frequency Drop (Hz/ms) |
|----------|-----------|----------------------|---------------------|--------------------------------|
| 22 | 10 | 5 | 5 | 0.030322 |
| 23 | 15 | 5 | 10 | 0.037246 |
| 24 | 20 | 5 | 15 | 0.043821 |
| 25 | 25 | 5 | 20 | 0.052414 |
| 26 | 30 | 5 | 25 | 0.05132 |
| 27 | 35 | 5 | 30 | 0.058775 |
| 28 | 40 | 5 | 35 | 0.061256 |
| 29 | 45 | 5 | 40 | 0.067829 |
| 30 | 50 | 5 | 45 | 0.06613 |
| 31 | 55 | 5 | 50 | 0.085436 |
| 32 | 60 | 5 | 55 | 0.099345 |

| Case No. | Load (kW) | #3 ESS Capacity (kW) | Power Shortage (kW) | Rate of Frequency Drop (Hz/ms) |
|----------|-----------|----------------------|---------------------|--------------------------------|
| 33 | 15 | 10 | 5 | 0.031221 |
| 34 | 20 | 10 | 10 | 0.031104 |
| 35 | 25 | 10 | 15 | 0.031635 |
| 36 | 30 | 10 | 20 | 0.051296 |
| 37 | 35 | 10 | 25 | 0.065081 |
| 38 | 40 | 10 | 30 | 0.073559 |
| 39 | 45 | 10 | 35 | 0.078918 |
| 40 | 50 | 10 | 40 | 0.08499 |
| 41 | 55 | 10 | 45 | 0.064774 |
| 42 | 60 | 10 | 50 | 0.107453 |

| Case No. | Load (kW) | #3 ESS Capacity (kW) | Power Shortage (kW) | Rate of Frequency Drop (Hz/ms) |
|----------|-----------|----------------------|---------------------|--------------------------------|
| 43 | 20 | 15 | 15 | 0.035757 |
| 44 | 25 | 15 | 20 | 0.046357 |
| 45 | 30 | 15 | 25 | 0.064152 |
| 46 | 35 | 15 | 30 | 0.047701 |
| 47 | 40 | 15 | 35 | 0.06367 |
| 48 | 45 | 15 | 40 | 0.074714 |
| 49 | 50 | 15 | 45 | 0.062266 |
| 50 | 55 | 15 | 50 | 0.063822 |
| 51 | 60 | 15 | 55 | 0.067924 |

8

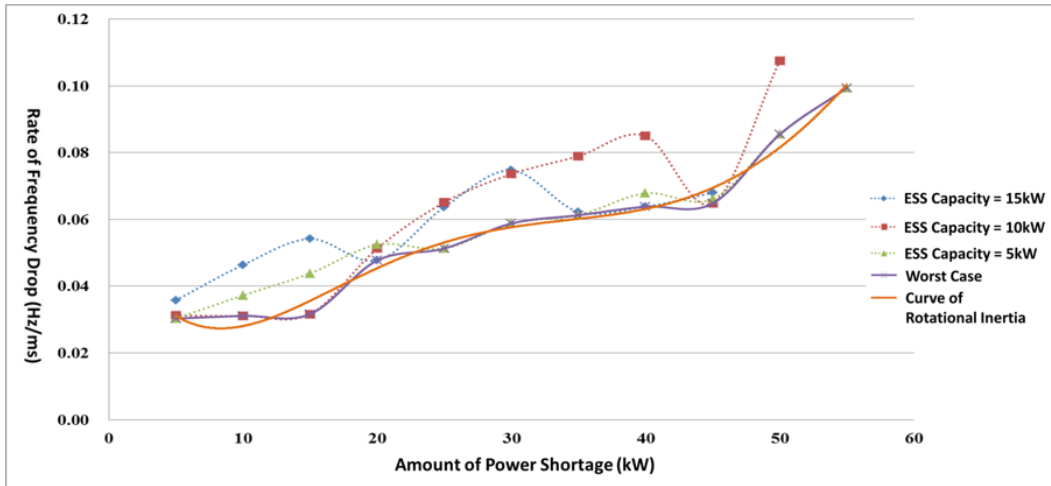


Rotational Inertia Analysis

❖ Equation of Inertia of ESS

$$y = -2.82271 \times 10^{-6}x^6 + 4.8361 \times 10^{-8}x^5 - 3.08785 \times 10^{-6}x^4 + 0.00009 \times 10^{-5}x^3 - 0.001197x^2 + 0.0070248x + 0.0156742$$

→ **Look-up Table of Frequency Drop Rate vs. Power Shortage**
Coefficient of Determination = 0.9899



9



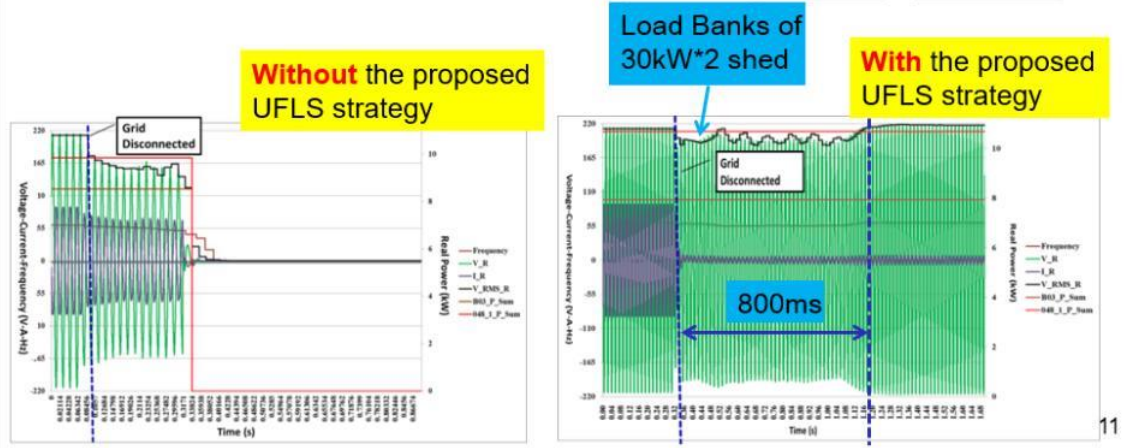
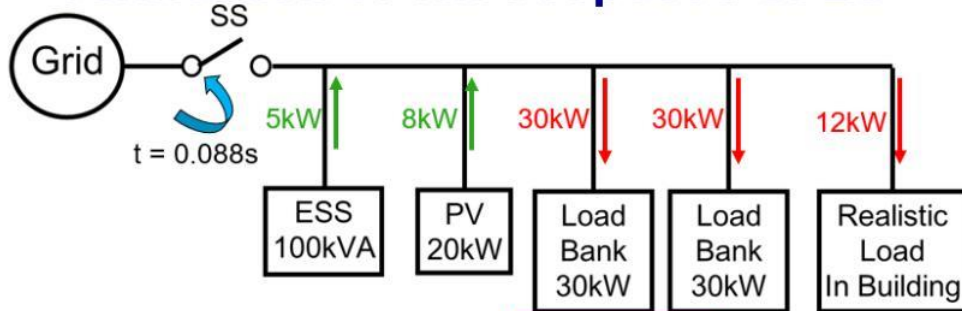
Rotational Inertia Analysis

❖ Look-up Table of Frequency Drop Rate vs. Power Shortage

| Rate of Frequency Drop(Hz/ms) | Amount of Load Shedding(kW) | Rate of Frequency Drop(Hz/ms) | Amount of Load Shedding(kW) | Rate of Frequency Drop(Hz/ms) | Amount of Load Shedding(kW) |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 0.02159 | 1 | 0.035763 | 16 | 0.060104 | 31 |
| 0.025612 | 2 | 0.03753 | 17 | 0.060458 | 32 |
| 0.028181 | 3 | 0.039465 | 18 | 0.060655 | 33 |
| 0.029671 | 4 | 0.04152 | 19 | 0.060731 | 34 |
| 0.0304 | 5 | 0.043647 | 20 | 0.060729 | 35 |
| 0.030635 | 6 | 0.045795 | 21 | 0.060699 | 36 |
| 0.030593 | 7 | 0.047915 | 22 | 0.060692 | 37 |
| 0.030448 | 8 | 0.049962 | 23 | 0.060765 | 38 |
| 0.030337 | 9 | 0.051894 | 24 | 0.060976 | 39 |
| 0.030362 | 10 | 0.053675 | 25 | 0.061382 | 40 |
| 0.030595 | 11 | 0.055276 | 26 | 0.062037 | 41 |
| 0.031082 | 12 | 0.056676 | 27 | 0.062992 | 42 |
| 0.031846 | 13 | 0.057859 | 28 | 0.06429 | 43 |
| 0.032891 | 14 | 0.058821 | 29 | 0.065964 | 44 |
| 0.034205 | 15 | 0.059566 | 30 | 0.068037 | 45 |

10

Verification of The Proposed UFLS



Conclusion

- ❖ **Proposed UFLS Strategy for a microgrid**
 - High Speed Signal Analysis and Control Platform
 - Look-up Table of Frequency Drop Rate vs. Power Shortage
- ❖ **The proposed UFLS strategy was verified in the microgrid in INER, Taiwan.**
 - PV and realistic load in a building are connected continuously.
 - The proposed UFLS strategy can prevent the microgrid from outage when load is larger than power generation.