

出國報告（出國類別：實習）

赴丹麥阿爾堡大學微電網控制實驗室
進行微電網電力品質改善關鍵技術研
習暨短期訓練報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：孫士文 助理研究員

派赴國家：丹麥

出國期間：103年12月4日~103年12月17日

報告日期：104年3月27日

摘要

為因應世界能源短缺及全球暖化的情形，行政院於 2012 年 2 月核定「陽光屋頂百萬座、千架海陸風力機」計畫，預估 2030 年我國再生能源總裝置容量將達到 12,502MW，佔發電總裝置容量的 16.1%。然而，再生能源具有間歇性與不確定性，若其占比逐漸提升，勢必會衝擊到電力系統的穩定性。為提升再生能源滲透率，並兼顧系統運轉安全，有必要發展微電網控制與管理之關鍵技術。

丹麥阿爾堡大學之微電網控制實驗室為微電網電力控制與模擬技術之國際領先團隊，核能研究所已與該實驗室合作進行多區域微電網控制及管理之研究；為研究微電網電力不平衡改善之方法，以增進微電網之電力品質，指派核能儀器組孫士文助理研究員公差至丹麥阿爾堡大學微電網控制實驗室，進行電力品質與不平衡改善關鍵技術研習暨短期訓練，持續與國際先進技術交流，並了解國際最新發展情勢。

此行也與該實驗室之研究人員有諸多互動與討論，主要心得包括阿爾堡大學目前在新能源發電與控制研究趨勢，微電網電力品質與電壓不平衡補償效益，以及未來微電網接受電力調度而成為虛擬電廠之規劃等。建議事項包括提升核能研究所微電網試驗場供電品質，採用多階層控制增加能源管理系統的靈活度，以及積極與國際上重要之研究單位做接觸，一同進行微電網能源管理系統之發展與應用等。

目 錄

摘 要.....	I
一、目的.....	1
二、過程.....	2
三、心得.....	3
四、建議事項.....	22

附圖目錄

圖一、能源研究中心之微電網控制實驗室	3
圖二、微電網控制實驗室之所有成員.....	4
圖三、與 JOSEP 教授及博士後研究員 MEHDI 合照	4
圖四、阿爾堡大學微電網控制實驗室已建置及規劃中的實驗平台... 5	
圖五、詳細的 IMGLAB PROJECT 微電網架構.....	5
圖六、DC-AC 換流器(INVERTER)併聯模組.....	6
圖七、孤島運轉下的多區域微電網電力品質.....	7
圖八、4 個節點網路.....	8
圖九、4 個節點網路的方塊圖.....	9
圖十、4 個節點網路的一致性演算法模擬結果.....	9
圖十一、基因演算法的流程圖.....	10
圖十二、三相電壓相量圖.....	12
圖十三、孤島運轉之微電網負載不平衡導致 PCC 電壓不平衡.....	13
圖十四、未實施三階控制之微電網 CB 的電壓不平衡補償.....	14
圖十五、三階控制示意圖.....	15
圖十六、三階控制方塊圖.....	16
圖十七、第三階控制器的進階流程圖.....	18
圖十八、模擬範例之系統單線圖	19
圖十九、模擬結果之時序圖.....	20
圖二十、CB 補償前與補償後之電壓峰值比較	21

一、目的

近年來核能研究所致力於再生能源領域之研究，目前已於所內建置首座國家級百瓩微型電網試驗場，用以進行微電網關鍵技術之研發。國際知名學者丹麥阿爾堡大學Josep M. Guerrero教授為IEEE的院士，其帶領的微電網控制實驗室已發展諸多微電網核心技術與創新技術，尤其專注在微電網電力系統控制與模擬技術之研發，在微電網的研究方面具有世界領先地位，並可實現符合國際領先水準之電力控制系統。核能研究所核能儀器組孫士文助理研究員赴該單位實地實習訓練，可增進對先進機構在改善電力品質發展現況及規劃方案之瞭解，並建立雙方合作管道，做為引進或技術合作之參考，俾順利推動計畫之執行。

本次實地實習訓練時程為2014年12月4日至2014年12月17日，目標為進行電力品質與諧波改善關鍵技術研習暨短期訓練，對核能研究所在微型電網之分散型電力系統控制研究及相關領域技術開發將有實質助益。

二、過程

本次公差時間含去程及回程 14 天，短期訓練進度為：

日期	工作項目
12/4~12/5	孫員搭機赴丹麥阿爾堡大學微電網控制實驗室
12/6~12/7 第一週	研習相關論文 阿爾堡大學微電網控制實驗室簡介與參觀 安裝模擬軟體：Matlab、Labview
12/8~12/14 第二週	研習微電網電力品質管理與控制技術 研習微電網電壓不平衡與諧波補償技術 於 Matlab 中建置與測試諧波補償模型 研習微電網高階控制與最佳化技術
12/15 第三週	研習多代理人控制應用於電力品質補償技術 研習電壓不平衡分析技術
12/16~12/17	孫員搭機返回台灣

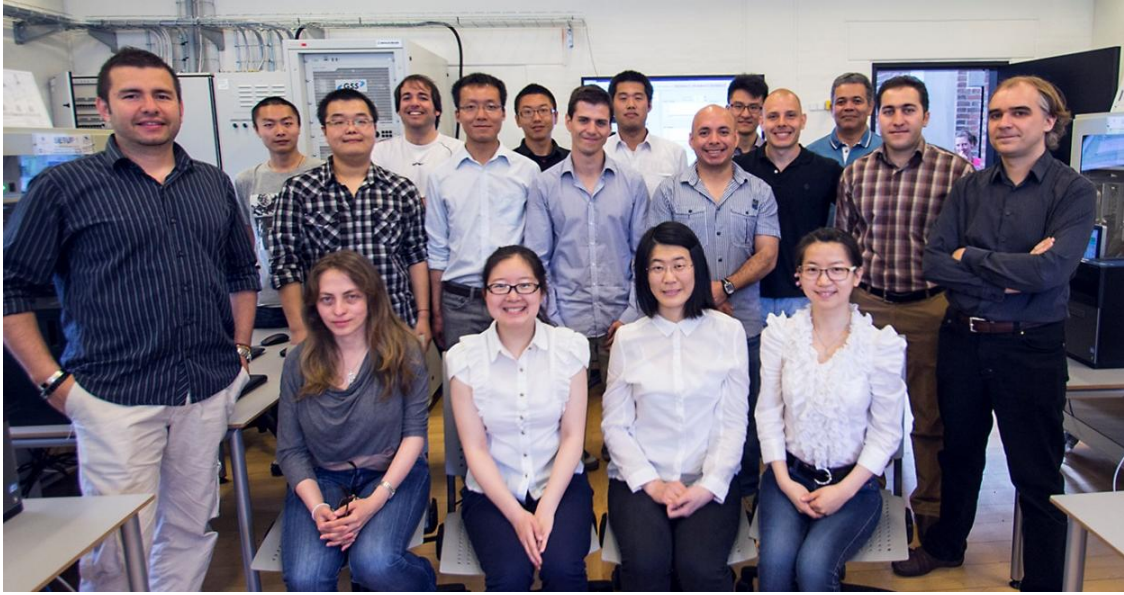
三、心得

(一)丹麥阿爾堡大學微電網控制實驗室介紹

丹麥阿爾堡大學能源研究中心之微電網控制實驗室為發展微電網多階層控制技術與管理技術之國際領先團隊，該實驗室之主持人為 Josep M. Guerrero 教授，2003 年 Josep 教授於西班牙巴塞隆納的加泰羅尼亞理工大學(Technical University of Catalonia)取得博士學位後，進入丹麥阿爾堡大學能源技術學系任職，並於 2011 年成為全職教授，帶領能源研究中心發展微電網電力系統控制與模擬技術，並實現符合國際領先水準之微電網電力控制系統，至今已發表了 190 篇期刊論文。目前該中心成員中有 2 位教授、3 位博士後研究人員和 11 位博士生。微電網控制實驗室研發項目包括：交/直流微電網的數學模型建立、資/通訊控制系統、能源管理系統的最佳化、電力品質改善、保護系統建立、與多代理人系統技術應用。圖一為能源研究中心之微電網控制實驗室照片，圖二為微電網控制實驗室之所有成員合照，圖三為與 Josep 教授及博士後研究員 Mehdi 合照，中間者為 Josep 教授。



圖一、能源研究中心之微電網控制實驗室



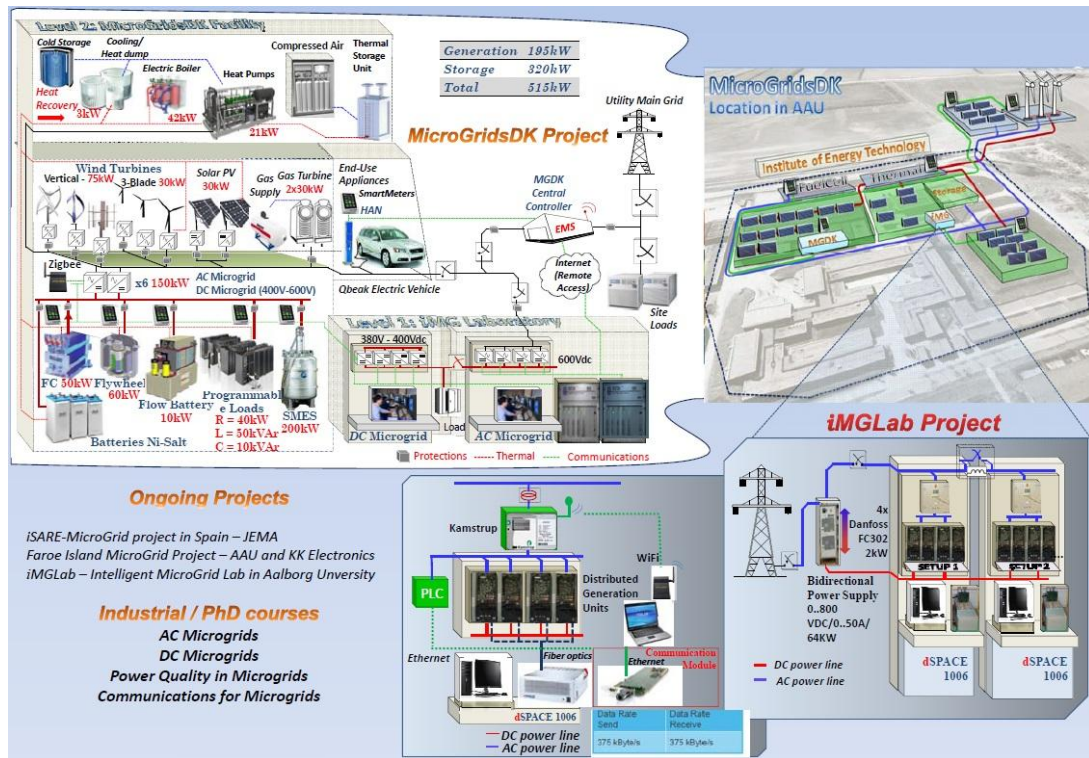
圖二、微電網控制實驗室之所有成員



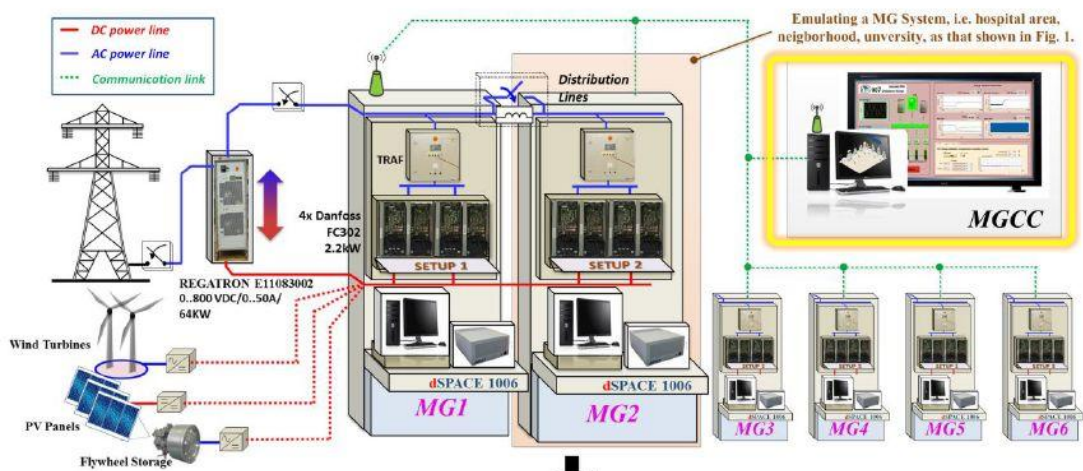
圖三、與 Josep 教授及博士後研究員 Mehdi 合照

該實驗室已建置的微電網實驗平台如圖四中 iMGLab Project 所示，由 ABB、Kamstrup 及 Det Obelske Familiefond 等公司所贊助，提供教學，以及研究微電網的控制、能源管理等用途；另外，MicroGridsDK Project 為規劃新建中的微電網。詳細的 iMGLab Project 微電網架構如圖五所示，是透過 6 組 DC-AC 換流器(inverter)併聯模組來模擬 6 個微電網，進行多區域微電網之控制技術研究；MGCC 為 6 個微電網的控制中心，負責整個 iMGLab Project 的能源管理，以及電力品質、頻率、電壓等的監控與最佳化，稱為三階控制(tertiary control)；電網中的儲能系統是透過一台 REGATRON 的 AC-DC 雙向電

源供應器來模擬，其他的分散式電源則有 PV 及風力發電機。DC-AC 換流器(inverters) 併聯模組如圖六所示，包含 4 台並聯的 Danfoss 三相 2 kW 換流器，透過 dSPACE 即時模擬器中加入一階控制(primary control)與二階控制(secondary control)演算法，用以控制換流器輸出，並調控各換流器間之電力潮流。



圖四、阿爾堡大學微電網控制實驗室已建置及規劃中的實驗平台



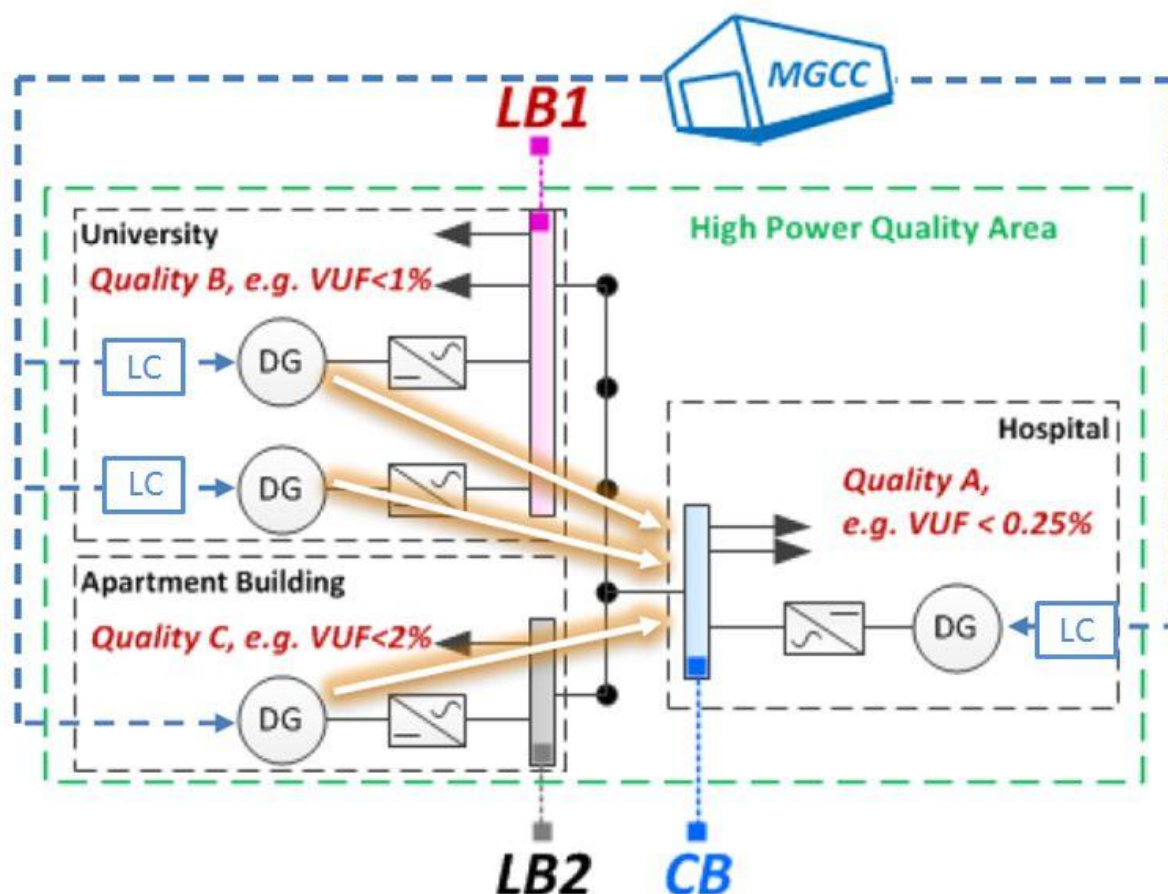
圖五、詳細的 iMGLab Project 微電網架構



圖六、DC-AC 換流器(inverter)併聯模組

(二) 運用多代理人系統改善孤島運轉之微電網電力品質

在孤島運轉下的多區域微電網中，不同區域可能存在著不同需求的電力品質，如圖七中所示，醫院需要較高的電力品質，大學與公寓則不需要高電力品質，而各區域的分散式發電設備(DG, Distributed Generators)則可當成分散式補償器。若能透過多階層控制架構來控制各區內的 DG，達成高電力品質區域(CB, Critical Bus)電力不平衡的補償，並維持其他各區(LB, Local Bus)之電力品質至可接受的範圍，最後，藉由最佳化的運算來分配各區的補償量，則能有效率地改善微電網電力品質。



圖七、孤島運轉下的多區域微電網電力品質

1. 多代理人系統與一致性演算法

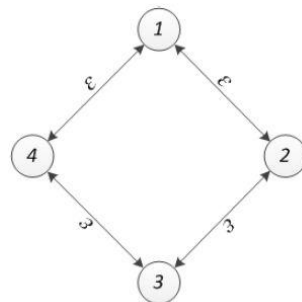
多代理人系統(MAS, Multi-Agent System)是由多個具有互動功能之運算單元所組成的系統，而該運算單元被稱作代理人(Agent)，並具有以下兩個特點：第一、自主

(autonomous)能力，即能自我作決策，以達成設定的目標；第二、社交(social)能力，即多代理人間除了資料的交換以外，亦具有合作、協調與協商等能力。MAS 技術在電力系統方面提供了廣泛的應用，例如電力系統監視、電力交易、電力潮流最佳化、電力平衡控制及負載卸除、電力系統平衡、以及電力系統保護等。

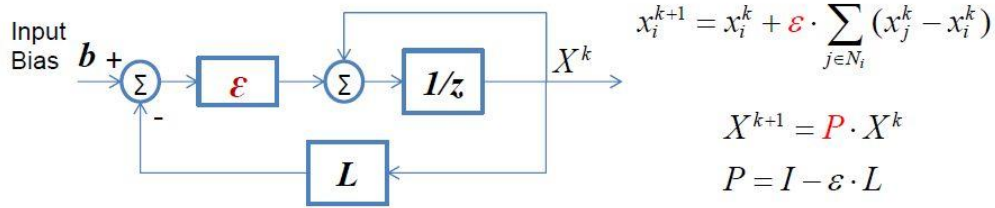
在計算機科學中，一致性演算法(Consensus Algorithm)定義為網路中的單一節點僅與相鄰節點做資料交換，最終整個網路節點均會收斂至相同的數值；其原理來自於物理學的傅立葉熱傳遞定律，當各個物質間的溫度不一致而有熱傳導元件相連時，熱量會由高溫物質傳遞到低溫物質，最終相互連接的物質會達到相同的溫度。由於該演算法不需要中央管理單位來調度網路上的所有節點，僅需憑藉相鄰節點間做資料交換，因此常應用在多代理人系統的最佳化。

如圖八所示為 4 個節點所組成的網路，節點間的資料交換是以其差值乘以邊緣權重(Edge Weight)係數 ε ，則第 $k+1$ 個取樣時間的各節點值可寫成(2-1)式，即矩陣式 $X^{k+1} = (I - \varepsilon L)X^k$ ，繪製成方塊圖則如圖九所示；其中， L 為 Laplacian 矩陣，該矩陣亦可由梯度矩陣求得，即 $L = \nabla^T \cdot \nabla$ 。

$$\begin{aligned}
 x_1^{k+1} &= x_1^k + \varepsilon(x_2^k - x_1^k) + \varepsilon(x_4^k - x_1^k) \\
 x_2^{k+1} &= x_2^k + \varepsilon(x_3^k - x_2^k) + \varepsilon(x_1^k - x_2^k) \\
 x_3^{k+1} &= x_3^k + \varepsilon(x_4^k - x_3^k) + \varepsilon(x_2^k - x_3^k) \\
 x_4^{k+1} &= x_4^k + \varepsilon(x_1^k - x_4^k) + \varepsilon(x_3^k - x_4^k)
 \end{aligned}
 \rightarrow
 \begin{bmatrix}
 x_1^{k+1} \\
 x_2^{k+1} \\
 x_3^{k+1} \\
 x_4^{k+1}
 \end{bmatrix}
 =
 \left(I - \varepsilon \begin{bmatrix}
 2 & -1 & 0 & -1 \\
 -1 & 2 & -1 & 0 \\
 0 & -1 & 2 & -1 \\
 -1 & 0 & -1 & 2
 \end{bmatrix} \right)
 \begin{bmatrix}
 x_1^k \\
 x_2^k \\
 x_3^k \\
 x_4^k
 \end{bmatrix}
 \quad (2-1)$$

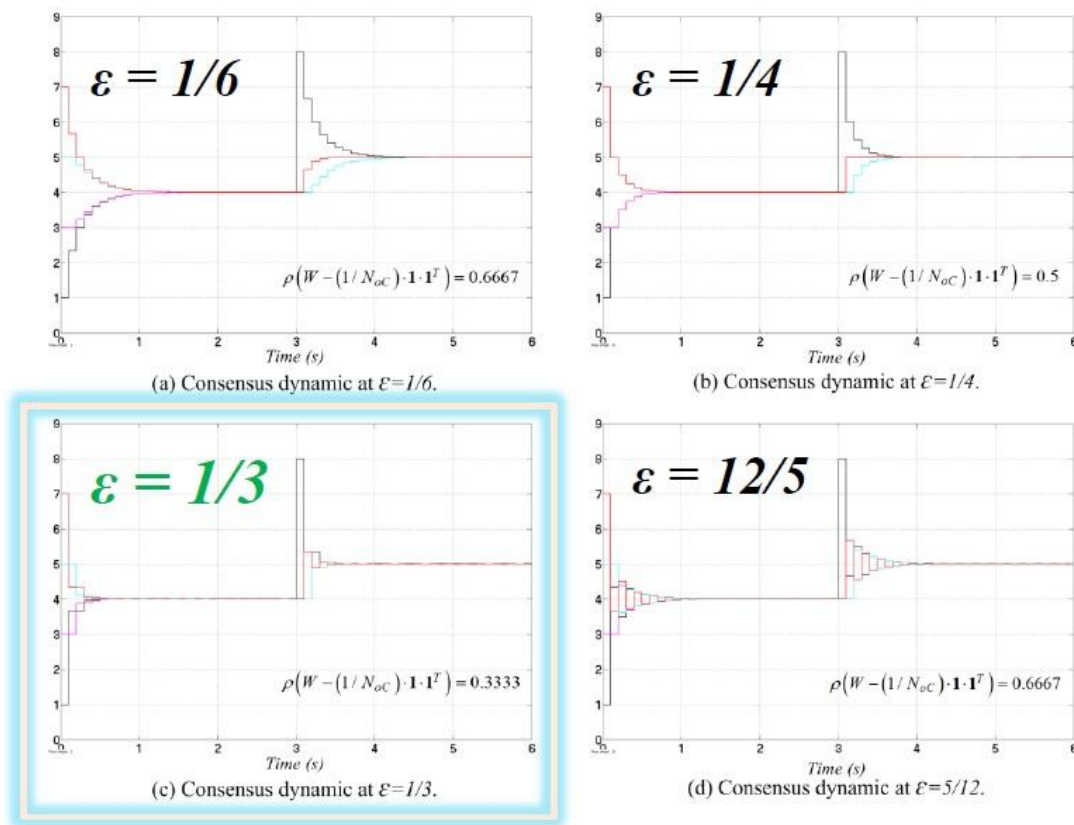


圖八、4 個節點網路



圖九、4 個節點網路的方塊圖

若 x_1, x_2, x_3, x_4 的初始值分別為 1、3、5、7，在第 3 秒時 x_1 變為 8，而每個步驟的時間為 0.1 秒，以 Matlab 模擬不同的 ε 值之結果如圖十所示，可發現最後均會收斂至同一個值，但 $\varepsilon=1/3$ 時的疊代次數最少。



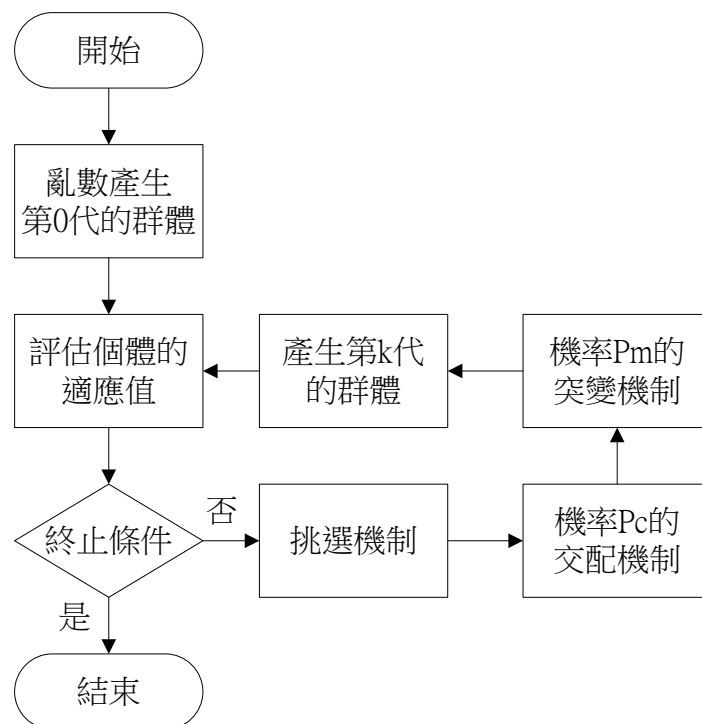
圖十、4 個節點網路的一致性演算法模擬結果

2. 基因演算法

基因演算法(GA, Genetic Algorithm)的基本理論是由 Holland 於 1975 年首先提倡，是以生物學中「適者生存，不適者淘汰」的觀念所發展出來的一種演算法，利用「選

擇、複製」(selection and reproduction)、「交配」(crossover)、「突變」(mutation)等步驟去尋找最適合環境的基因，為解決最佳化問題的工具之一。

應用基因演算法則來解最佳化問題的基本精神為，將所要搜尋的所有參數編碼成稱為染色體 (chromosome) 的離散 (discrete) 或二元 (binary) 字串 (string) 來代表參數的值；最初，隨機產生規模為 N 的群體稱為第 0 代染色體，然後去評估每一個染色體得到適應值 (fitness value)。接著根據既定的挑選機制 (selection mechanism) 來複製個體進行遺傳演化。根據所選定的交配機制 (crossover mechanism) 與交配機率 P_c (probability of crossover) 進行交配以產生子代，產生後的子代再根據突變機率 P_m (probability of mutation) 決定是否要做進一步的突變。交配是主要的遺傳運算，而突變只是次要的動作。產生後的子代或原來的雙親 (沒有進行交配或突變者) 共同組成下一世代 (仍然是 N 個)，如此繼續進行直到滿足終止條件為止，演算法整個流程如圖十一所示。



圖十一、基因演算法的流程圖

假設所處理的函數是 $f(x)=-x^2+30x-123$ ，為了說明方便起見，我們將變數 x 的範圍限制在 0 至 31 之間，希望能找到在限制範圍內的函數最大值，我們選定以五個位元來編碼變數 x ，並將交配機率 P_c 設定為 1.0，突變機率 P_m 設定為 0.1。

步驟一、產生初始群體：我們設定群體數目的大小為 4，隨機地產生如表一所示的 4 個字串，並將其離散成二元碼。

步驟二、評估適應值：將步驟一的群體代入適應函數，得到其相對應的適應值。

步驟三、複製與挑選機制：首先，依每個群體(字串)的適應值的大小來分割輪盤上的位置，適應值越大則在輪盤上佔有的面積也愈大，也就代表其被挑選至交配池的機率愈大；然後，隨機地選取輪盤上的一點，所對應的物種即被選中送至交配池中。如表一中第一、三個字串被複製 2 次至交配池中，第二、四個字串則被淘汰。

表一、隨機產生的第 0 代群體

字串編號	染色體	x	$f(x)$	$f_i/\Sigma f$	複製個數
1	01110	14	101	0.39	2
2	11000	24	21	0.08	0
3	10001	17	98	0.38	2
4	00111	7	38	0.15	0

步驟四、交配過程：隨機排列被選中的字串應如何配對，交配池中的第一個字串與第二個字串交配，第三個字串與第四個字串交配；而交配點及交配長度的選擇也是以隨機選取來作決定，結果如表二所示。

表二、交配的結果

交配池	交配點	交配長度	下一代	x	$f(x)$
10001	4	1	10011	19	86
01110	4	1	01100	12	93
01110	2	3	00000	0	-123
10001	2	3	11111	31	-154

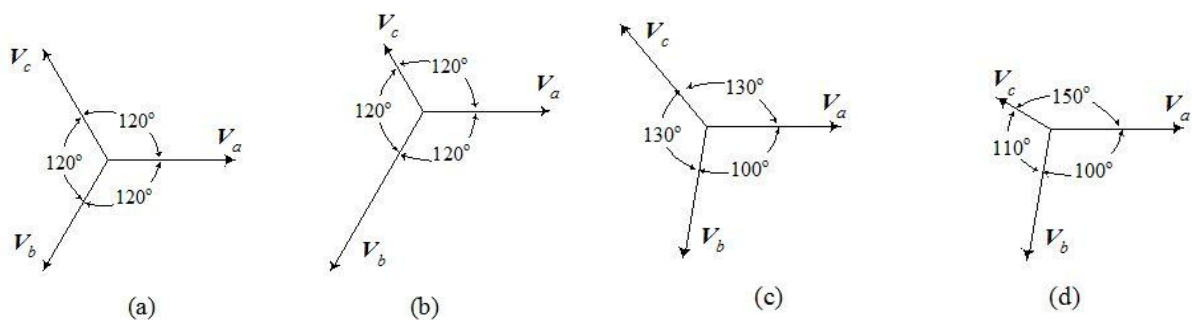
步驟五、突變過程：突變過程的作法是將字串中的基因隨機地由 0 變 1 或由 1 變 0，由於我們設定的突變機率為 0.1，而群體中的基因總數為群體大小乘上每個字串的編碼位元數，也就是 $4*5=20$ ，因此，族群中將被突變的基因總數為 $20*0.1=2$ ，亦即，有兩

個基因將被突變。隨機選取這 20 個基因中的 2 個做突變，舉例來說，選取的結果為第 5 個基因及第 17 個基因，則第一個字串突變前為 10011，突變後為 10010，第四個字串突變前為 11111，突變後為 10111。

步驟六、終止搜尋：判斷目前的最佳適應函數值是否已達所需要的標準，若是，則終止搜尋；若否，則回到步驟二，以進行下一代的演化。

3. 電壓不平衡因數

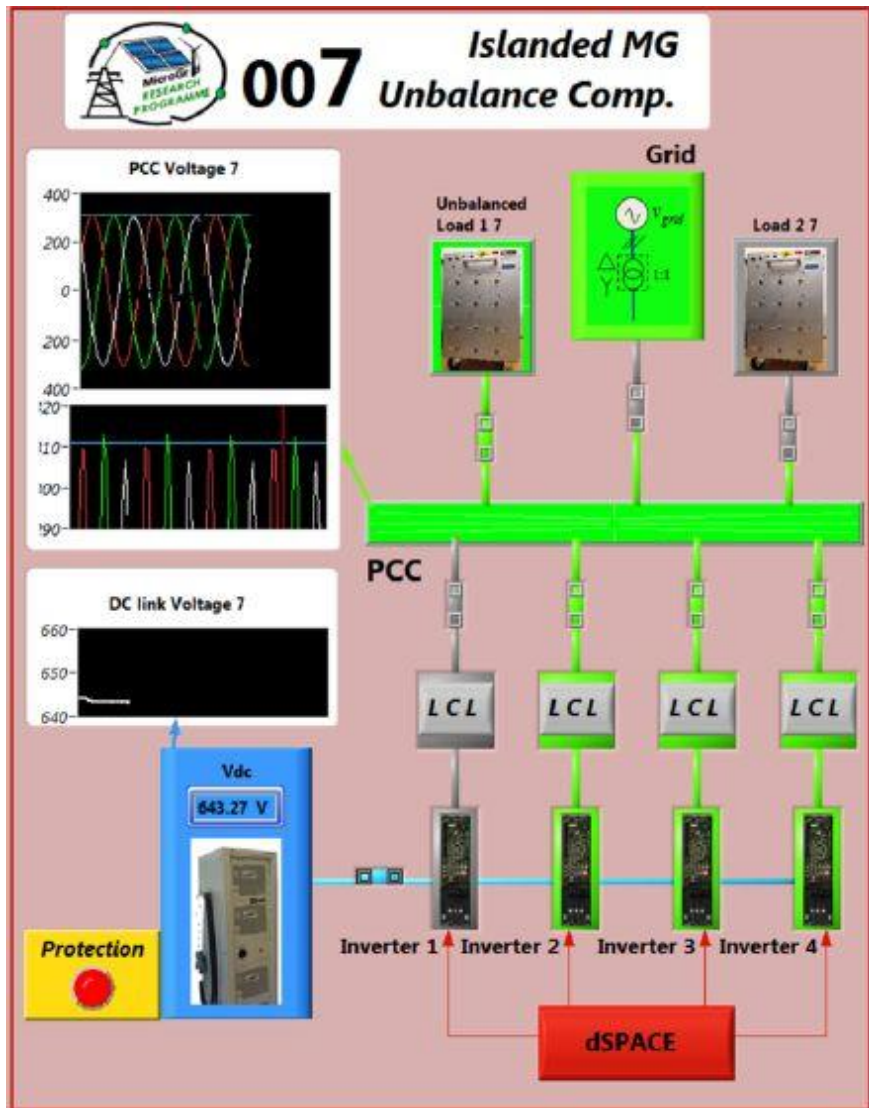
理想的三相電壓是三相電壓的大小相等，任兩相之間的相位相差 120° ，如果三相電源偏離了這兩個條件，我們就稱為三相電壓不平衡。圖十二中，僅有(a)為三相電壓平衡，其餘均為三相電壓不平衡，其中(b)為相位平衡、大小不相等，(c)為相位不平衡、大小相等，(d)為相位不平衡、大小不相等。



圖十二、三相電壓相量圖

電力公司不論在發電、輸電或配電的階段，均致力於維持三相電壓的平衡；一般來說，造成三相電壓不平衡的原因可能為：(1)輸配電線路阻抗的非對稱，(2)變壓器的連接所造成的阻抗不平衡，(3)負載的不平衡，(4)單相設備過載、短路、接地故障等。

有關負載不平衡的部分，一般的住宅及商業用戶，不可避免的會有許多單相設備。電力公司在分配單相負載時，雖然儘量將負載均勻的分配在各相上，但是即使負載的分配是三相完全相等，也無法保證所有的單相負載都在同一時間消耗相等的功率。圖十三即模擬負載不平衡，造成 PCC 匯流排上電壓不平衡，並以 LabVIEW 圖控程式展示波形。



圖十三、孤島運轉之微電網負載不平衡導致 PCC 電壓不平衡

當電壓不平衡問題產生時，可視為正相序電壓受到負相序電壓及零相序電壓的干擾。對於三相電壓不平衡的問題，最常採用的分析方法為對稱分量法，將三相電壓轉為正相序電壓(V^P)、負相序電壓(V^N)及零相序電壓(V^Z)以利分析，其轉換如(2-2)式。其中 $a = 1 \angle 120^\circ = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ$

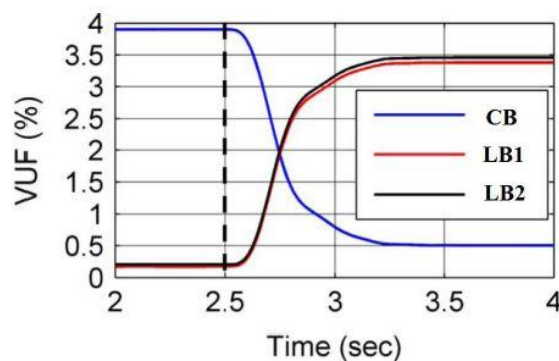
$$\begin{bmatrix} V^Z \\ V^P \\ V^N \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

美國電機電子工程師學會(IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers)、美國電氣製造商協會(NEMA, National Electrical Manufacturers Association)、歐洲國際電工委員會(IEC, International Electrotechnical Commission)等組織,都各自訂出度量電壓不平衡的標準。而目前世界各國則趨向使用 IEC 所定義的電壓不平衡因數(VUF, Voltage Unbalance Factor)來衡量電壓不平衡,因此本文也採用 IEC 的定義,即(2-3)式。雖然,不平衡的三相電壓含有額外的零相序及負相序電壓,但對於三相無中性線之負載而言,零相序阻抗為無限大,因此零相序電壓對這類負載沒有明顯的影響。

$$VUF(\%) = \frac{|V^N|}{|V^P|} \times 100\% \quad (2-3)$$

4. 以三階層控制來實現孤島運轉微電網的電力品質最佳化

在一般的多區域電網中,爲了要維持 Critical Bus 的高品質電力,通常是犧牲掉其他 Local Bus 的電力品質。圖七中,其他區域的 DGs 來補償 Critical Bus 的電壓不平衡,若微電網控制中心(MGCC, MicroGrid Control Center)沒有對所有區域的電力品質做控制及最佳化,則會造成其他 Local Bus 的電壓不平衡變差,如圖十四所示。



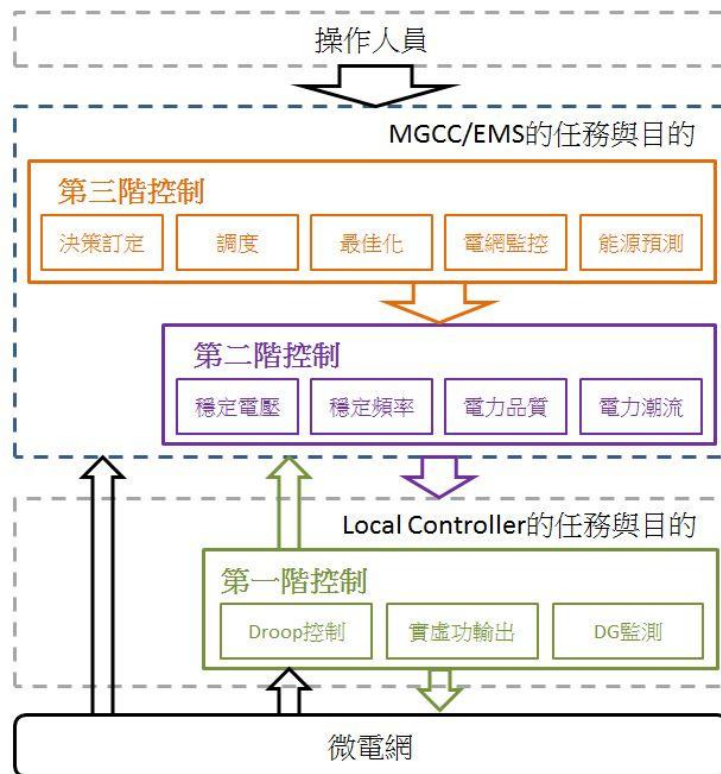
圖十四、未實施三階控制之微電網 CB 的電壓不平衡補償

爲了要維持 Critical Bus 的電力品質,又能兼顧其他 Local Bus 的電力品質,丹麥阿爾堡大學微電網控制實驗室提出了三階控制的架構,其示意圖如圖十五所示,控制方塊圖如圖十六所示,而各階層的控制內容說明如下:

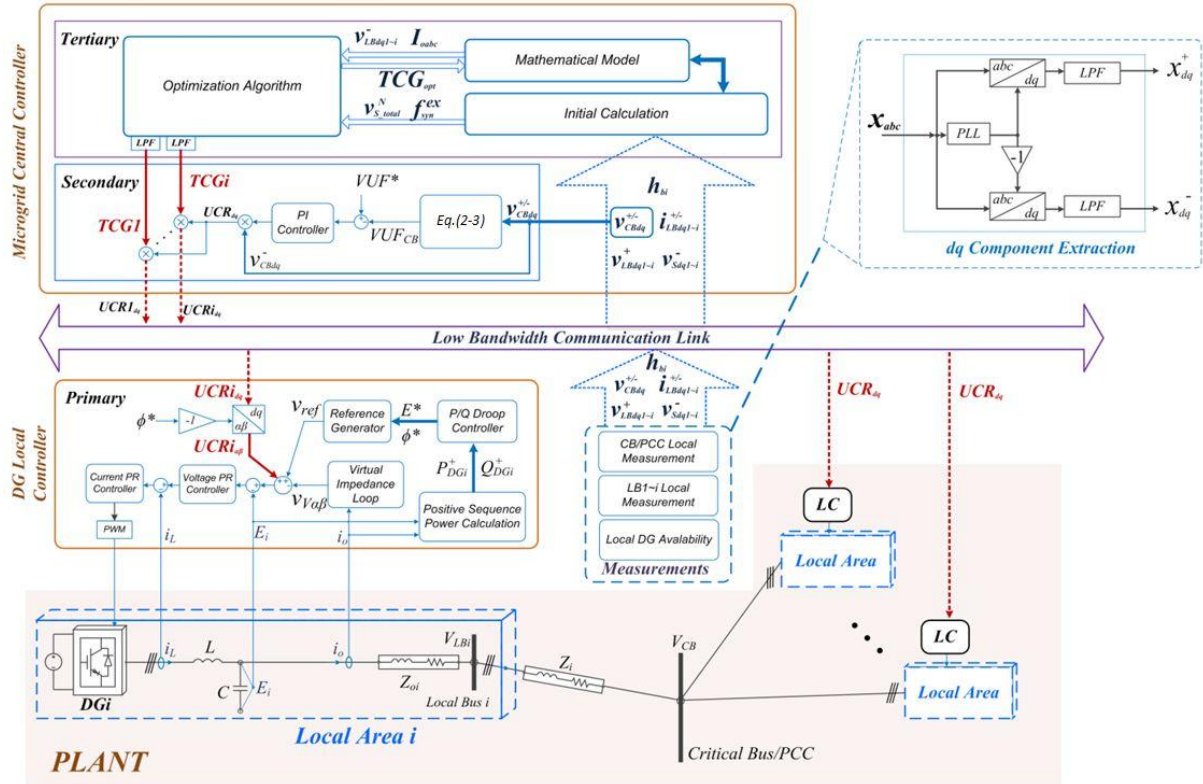
第一階控制：由各個 DG 控制器來執行，即圖七中的 LC(Local Controller)，以傳統的 Droop Control 來控制輸出的實、虛功，以及輸出的電壓與電流之大小。

第二階控制：由各區的 Bus 控制器來執行，用來穩定 DGs 因 Droop Control 所造成 Bus 的電壓與頻率偏差，以及電力品質的維繫；另外，也可控制 Bus 的電力潮流。

第三階控制：由 MGCC 來執行，通常是處理能源管理與經濟調度(Economic Dispatch)方面的控制，例如電力調度或電力品質最佳化等；另外，也可監控整個微電網。



圖十五、三階控制示意圖



圖十六、三階控制方塊圖

圖十六中，DG Local Controller 的控制方塊圖即為第一階控制器，最主要的能在控制 DG 的輸出電流，其中包含控制電壓與電流的比例-共振控制器(Proportional- Resonant Controller)，正相序實功與虛功的 Droop Control，以及虛擬阻抗迴路(Virtual Impedance Loop)等，轉移方程式如(2-4)、(2-5)及(2-6)式。

$$\begin{cases} G_V(s) = k_{pV} + \frac{2k_{rV} \cdot \omega_{cV} \cdot s}{s^2 + 2\omega_{cV} \cdot s + \omega_0^2} \\ G_I(s) = k_{pI} + \frac{2k_{rI} \cdot \omega_{cI} \cdot s}{s^2 + 2\omega_{cI} \cdot s + \omega_0^2} \end{cases} \quad (2-4)$$

$$\begin{cases} \phi^* = \frac{\omega^*}{s} = \frac{1}{s} [\omega_0 - (m_P + m_D \cdot s)P^+] \\ E^* = E_0 - n_P \cdot Q^+ \end{cases} \quad (2-5)$$

$$\begin{cases} v_{V\alpha} = R_V \cdot i_{0\alpha}^+ - \omega L_V \cdot i_{0\beta}^+ \\ v_{V\beta} = R_V \cdot i_{0\beta}^+ + \omega L_V \cdot i_{0\alpha}^+ \end{cases} \quad (2-6)$$

圖十六中，Secondary 即為第二階控制器，位於 MGCC 內，最主要的目的在計算出 CB 的負相序電壓之偏差值，並藉由 PI 控制器之補償後，當作不平衡補償之參考(UCR_{dq}，

Unbalance Compensator Reference)，整個過程的轉移函數如(2-7)式所示；最後，將分配好的 UCR_{dq} ，透過通訊網路(Low Bandwidth Communication Link)傳送至所有 DG Local Controller，再將 UCR 由 dq 軸轉至 $\alpha\beta$ 軸，以調整 DG 的電壓與電流之輸出，作為 CB 的電壓不平衡因數之補償。

$$UCR_{dq} = v_{CBdq}^- \cdot \left[\left(\frac{k_i}{s} + k_p \right) \cdot (VUF^* - VUF_{CB}) \right] \quad (2-7)$$

圖十六中，Tertiary 即為第三階控制器，也位於 MGCC 內，最主要的目的在透過基因演算法決定最佳化的 UCR_{dq} 分配比例 TCG(Tertiary Compensation Gain)；TCG 相當於圖八中的邊緣權重係數，而 UCG 相當於圖八中的節點間所傳遞的資訊。若希望能依照 Bus 的重要程度及每個 Bus 的 VUF 限制來求解最佳化問題時，則可將目標函數訂為(2-8)式；其中， m 為 LB 的數量， k 為 Bus 的重要程度係數， h_{bi} 為 0 或 1 的整數，當 Bus 無法再提供補償，或其 DG 輸出的 P/Q 達到極限時， $h_{bi}=0$ 。

$$\min f_{obj} = \sum_{i=1}^m h_{bi} (k_{CB} \cdot VUF_{CB} - k_{LBi} \cdot VUF_{LB})^2 \quad (2-8)$$

考量每個 Bus 的 VUF 限制，每台 DG 的 VUF 限制，以及 DG 每相電流的輸出限制時，則其限制條件方程式可寫成(2-9)至(2-11)式，其中 r 為懲罰係數，則整個系統的目標函數可寫成(2-12)式。

$$g_{LB} = \sum_{i=1}^n r_{LBi} \cdot \max(0, VUF_{LBi} - VUF_{LBi}^{\max}) \quad (2-9)$$

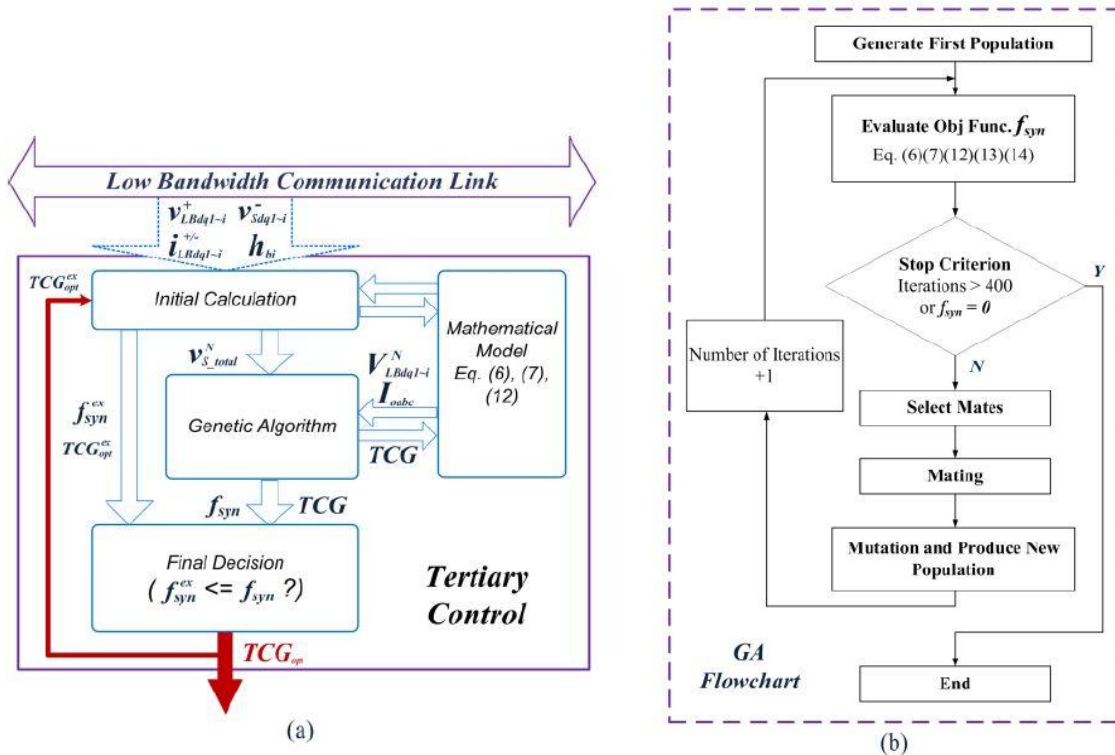
$$g_{DG} = \sum_{i=1}^n r_{DGi} \cdot \max(0, VUF_{DGi} - VUF_{DGi}^{\max}) \quad (2-10)$$

$$g_{PHC} = \sum_{i=1}^n r_{Ci} \cdot \max(0, \max\{I_{oa}, I_{ob}, I_{oc}\}_{DGi} - I_{PHi}^{\max}) \quad (2-11)$$

$$\min f_{syn} = f_{obj} + g_{LB} + g_{DG} + g_{PHC} \quad (2-12)$$

第三階控制器的進階流程如圖十七(a)所示，其中 Initial Calculation 方塊是在將所量測到的資料轉到 dq 軸，以獲取其負相序電壓，並依據上一次疊代所計算得的 TCG_{opt}^{ex} ，來產生本次疊代所需的目標函數值(f_{syn}^{ex})；然後，再進入 Genetic Aalgorithm 方塊，依據圖十七(b)的步驟執行 GA，以獲得新的一組 TCG；最後，則進入 Final Decision 方塊，

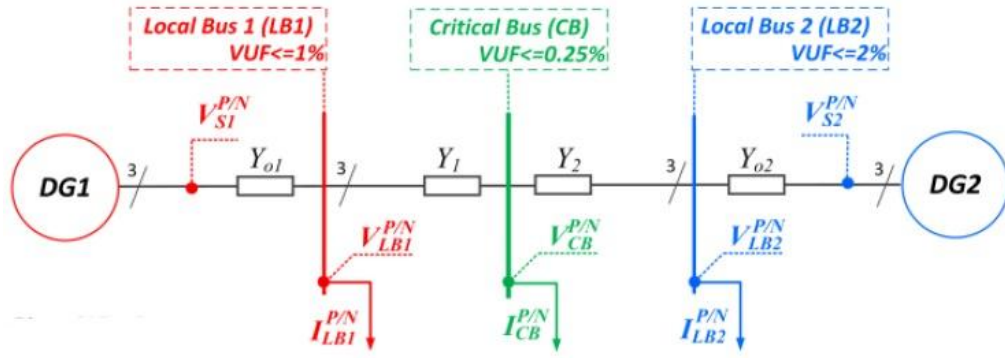
檢查此次所得的 f_{syn} 是否優於目標函數值，確認是否達成最佳化。Mathematic Model 則根據微電網的數學模型來檢查所獲得的 TCG。



圖十七、第三階控制器的進階流程圖

5. 以三個區域並聯之孤島運轉微電網驗證電力品質最佳化

本模擬範例(MG Plant)之系統單線圖如圖十八所示，CB、LB1、LB2 所要求的 VUF 分別小於 0.25%、1%、2%；相關系統之參數整理於表三中，模擬期間各個時段的程序內容整理於表四中，而最後的模擬結果如圖十九。其中，0~T1 期間為初始狀況，三個 Bus 均存在相同的三相平衡負載；T1~T2 期間，CB 增加一組三相不平衡負載；T2~T3 期間，第二階控制器啟動，可於圖二十中發現補償前後的 CB 三相電壓幅值之改變；T3~T4 期間，第三階控制器啟動，系統執行 VUF 的最佳化調適；T4~T5 期間，CB 再增加一組三相不平衡負載；T5~T6 期間，於 LB2 再增加一組三相平衡負載，讓 DG2 的 A 相電流超過 14A 的限制值，最後仍會收斂至限制值以下。



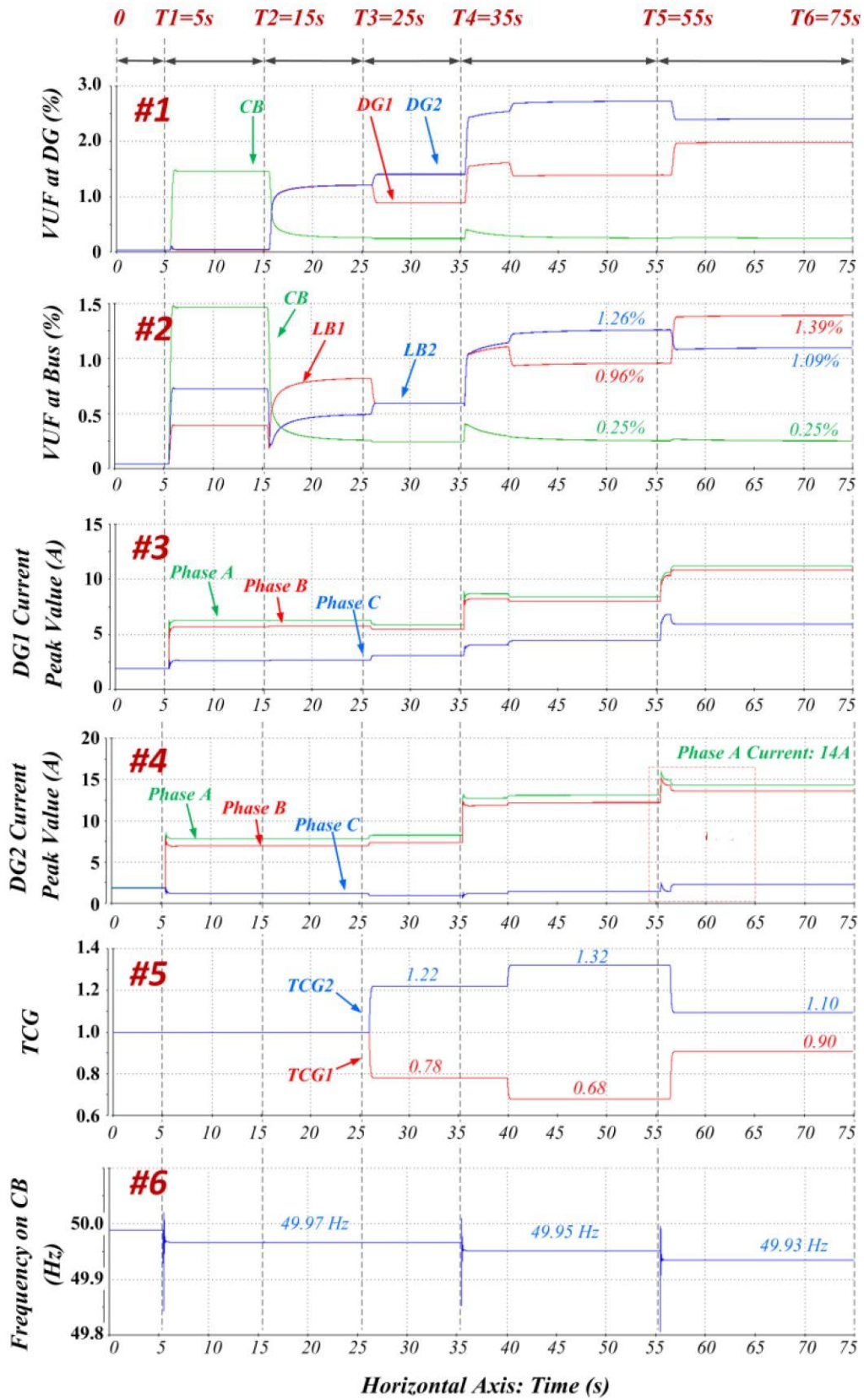
圖十八、模擬範例之系統單線圖

表三、模擬範例之相關系統參數

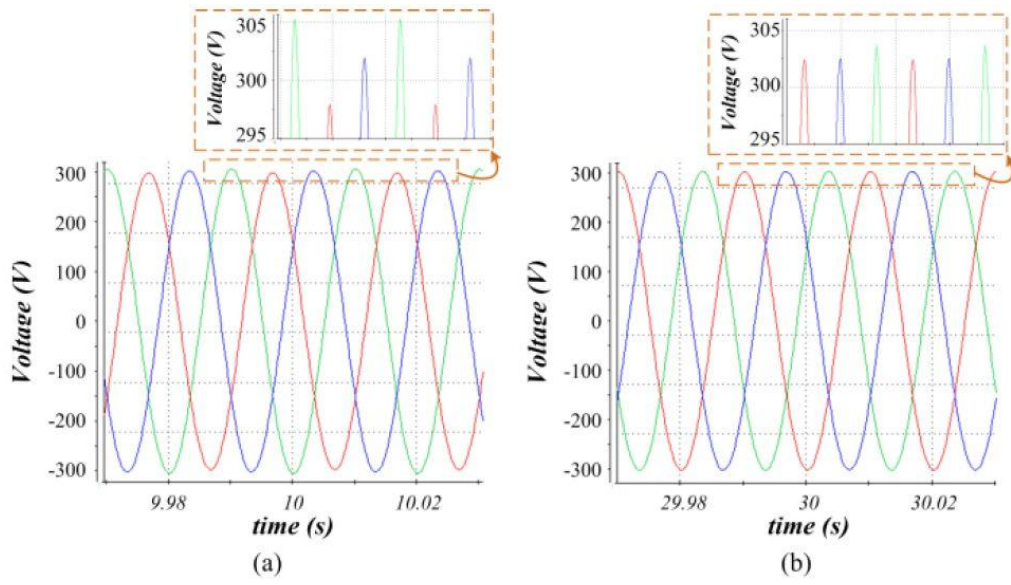
POWER STAGE AND MG PLANT PARAMETERS													
DG Inverter Ratings				Inverter Output Filter									
Power Rating (kVA)		Maximum Current per Phase (peak value/A)		L (mH)		C (μ F)							
6.5		14		1.8		25							
MG Plant Transmission Lines													
Voltage (V)	Frequency (Hz)		Y_{o1} (S)	Y_{o2} (S)	Y_1 (S)	Y_2 (S)							
220	50	Positive Sequence	$0 - j1.7693$	$0 - j1.7693$	$0.1282 - j0.6410$	$0.3035 - j1.7156$							
		Negative Sequence	$0 + j1.7693$	$0 + j1.7693$	$0.1282 + j0.6410$	$0.3035 + j1.7156$							
LOCAL CONTROL SYSTEM PARAMETERS													
Droop Controller					Virtual Impedance		Voltage Controller			Current Controller			
m_D	m_P	n_P	E_0 (V)	ω_0 (rad/s)	R_v (Ω)	L_v (mH)	k_{pV}	k_{rV}	ω_{cV}	k_{pI}	k_{rI}	ω_{cI}	
0.00001	0.0001	0.02	$220\sqrt{2}$	$2\pi*50$	1	4	0.12	30	2	22	300	2	
CENTRAL CONTROL SYSTEM PARAMETERS													
Secondary Controller		Tertiary Controller											
k_p	k_i	k_F	k_{GLB}	k_{GDG}	k_{GC}	k_{LB1} k_{LB2}	r_{LB1} r_{LB2}	r_{DG1} r_{DG2}	r_{C1} r_{C2}	VUF_{LB1}^{max}	VUF_{LB2}^{max}	$VUF_{DG1}^{max}, VUF_{DG2}^{max}$	$I_{PH1}^{max}, I_{PH2}^{max}$ (A)
0.5	7	1	2	2	5	1	1	1	1	1%	2%	3%	14
VUF^* (%)	GA population size		GA max number of iterations			GA mutation rate		GA fraction of population kept		GA Step			
0.25	40		400			20%		0.8		0.5 s			

表四、模擬期間各個時段的程序內容整及負載施加量

時間	LB1	LB2	CB
T0	$Y = 0.005 - j0.0032$ S	$Y = 0.005 - j0.0032$ S	$Y = 0.005 - j0.0032$ S
T1			$Y_u = 0.02$ S
T2	啟動第二階控制器		
T3	啟動第三階控制器		
T4			$Y_u = 0.0143$ S
T5		$Y = 0.0167$ S	



圖十九、模擬結果之時序圖



圖二十、CB 補償前與補償後之電壓峰值比較

四、建議事項

全球暖化及能源短缺問題日漸嚴重，世界各國紛紛投入太陽能和風能等具經濟效益之再生能源發電研究；一旦再生能源發電在電網中占比過高，便會衝擊區域電網的電壓與頻率之穩定性，甚至造成再生能源無法併網發電。核能研究所發展自主式控制之微電網系統技術，已可解決區域電網中分散式再生能源占比提升所帶來的電力不穩定問題，除了與台電現有之饋線併接外，並接受台電之調度命令。

此次前往丹麥阿爾堡大學微電網控制實驗室所學習之分散式控制及電壓不平衡補償技術，能夠充分應用於核能研究所微型電網試驗場。因此，建議：(1)透過所學習之技術，改善 048 館電壓不平衡的問題，提升微電網供電品質；(2)導入具多代理人系統的分散式控制，並採用多階層控制架構，以增加微電網能源管理系統的靈活度；(3)另外，每年均可指派同仁前往國際上重要之研究、學術單位做進一步接觸，或參與大型的國際電力相關會議，了解各國學者於會議論文中提出的最新技術發展現況，將相關技術應用於國內微電網的建置。