

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

智慧型控制微型電網電能調控系統研析  
Development and Analysis of Energy Management System  
for Smart Micro-Grid

計畫編號：1042001INER025

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：朱家齊

聯絡電話：0988658209

E-mail address：[ccchu@ee.nthu.edu.tw](mailto:ccchu@ee.nthu.edu.tw)

計畫參與人員：呂臨佑、張育誠

核研所聯絡人員：施旻甫

報告日期：2015年 11月 30日

## 目 錄

中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
一、背景.....	5
(一) 數學背景.....	5
(二) 結構保留模型.....	7
(三) 能量函數下的垂降控制.....	8
貳、研究方法與過程.....	10
一、架構保留模型下的微電網垂降控制.....	10
(一) 模型敘述.....	11
(二) 平衡點分析.....	12
(三) 傳統垂降控制.....	13
二、近期之垂降控制方法.....	16
(一) $P-f$ 和 $Q-\dot{V}$ 垂降控制：.....	16
(二) 穩定度分析.....	19
(三) 具 $f$ 和 $\dot{V}$ 回復的垂降.....	23
三、具共識機制之垂降控制.....	25
(一) 圖形理論及共識機制演算法.....	25
(二) 運轉原則.....	26
(三) 能量函數穩定度分析.....	29
四、核能研究所微型電網試驗場.....	30
(一) 簡介.....	30
(二) 模型化.....	32
1. 分散式電源.....	32
2. 傳輸線與變壓器.....	33
3. 負載.....	34
(三) 使用 PowerWorld.....	35

(四) 使用 Simulink.....	36
1.全區模擬圖.....	36
2.發電機模型.....	36
五、微電網穩態分析 .....	<b>39</b>
(一) 穩態潮流分析 .....	39
(二) 穩態諧波分析 .....	41
(三) 穩態實虛功分配情形 .....	43
六、微電網暫態模擬 .....	<b>44</b>
(一) 負載變化.....	44
(二) 三相短路.....	47
七、啟動共識控制 .....	<b>51</b>
(一) 分散式電源間的通訊建立方式.....	51
(二) 共識通訊下的實虛功配情形 .....	52
1.完整的通訊.....	52
2.僅區域一與區域二間有通訊.....	53
3.僅區域二與區域三有通訊.....	53
4.區域間無通訊.....	544
參、主要發現與結論 .....	<b>56</b>
肆、參考文獻 .....	<b>57</b>

## 中文摘要

人類對於全球溫室效應的警覺，促使綠色能源的開發，風力、太陽能、燃料電池等分散式電源將大量併入電網，形成小型分散式電源接近負載端，於配電網路中建構不同於傳統電力網路的微型電網。透過分散式能源系統之控制與管理操作，可提高供電可靠度及區域能源使用之最佳化。

傳統孤立之微電網因無中央控制器，通常是透過分散式垂降控制，以達成電源轉換器間的自主式實功與虛功分配；但此方式易受傳輸線輸出阻抗的影響，特別是當各傳輸線阻抗為非均勻分布時，輸出之虛功分配即會產生誤差。由於微電網系統本質上的分散性和異質性，符合多重代理人之系統特性，為應用多重代理人共識控制演算法的理想平台。

本計畫應用多重代理人共識控制演算法，提出基於共識型垂降控制法則，完成電源轉換器間的自主式實功與虛功分配；僅需利用各電源轉換器間之稀疏通信網絡，即可克服現有的垂降控制方法之缺點；特別是當電網的線路阻抗為有損與均勻  $R/X$  比率時，或甚至純電阻性時，共識垂降控制仍舊能有效達成自主實/虛功分配。此外，本方法的閉迴路穩定性，可透過非線性系統理論的能量函數來推導驗證。最後以核能研究所現有建置及規畫建置之分散式電源為藍圖，建立軟體模擬微型電網架構，探討電網動態響應與控制器規畫，開發 OPAL\_RT 即時模擬平台之模擬程式，驗證共識垂降控制之可行性。並探討相關電能管理策略，改善微型電網之運轉可靠度與品質。

## Abstract

The task of autonomous power sharing in a micro-grid is usually achieved by decentralized droop control on individual interface power converters, which may suffer from the dependence on output line impedances. Inaccurate reactive power sharing will occur under strongly non-uniform line impedances. Due to inherently distributed and heterogeneous nature of the micro-grid, it becomes an ideal platform for applications of consensus control algorithms.

In this project, the consensus-based droop control with sparse communication network is proposed to overcome the drawback of existing droop control methods. In addition, closed-loop system stability of the proposed consensus-based droop control method can be ensured by the energy function approach under certain conditions. Real-time simulations of the INER micro-grid system are studied to validate the feasibility of the proposed consensus-based droop control method.

- Dynamical models of micro grid systems,
- Interconnection issues of micro grid,
- Control structure of micro grid,
- Consensus  $P-f$  and  $Q-\dot{V}$  droop control
- Micro-grid system stability analysis.

## 壹、計畫緣起與目的

因智慧電網領域大力倡議分散式之再生能源，微電網已視為一種可以有效將分散式可再生能源應用上現有電網之架構 [1]。傳統上，實功-頻率( $P-f$ )垂降控制和虛功-電壓( $Q-V$ )垂降控制被應用於分散式可再生能源轉換器之間的功率分配[2]、[3]，其運作模式模仿傳統之同步發電機垂降控制[4]。然而， $Q-V$ 垂降控制之虛功分配準確度會因受輸出線的阻抗影響而降低[5] - [7]。文獻[7]提出一電壓平方垂降控制理論，用以改善微電網電壓控制的穩定性。為了提供更準確的虛功分配，敝研究團隊過去提出 $Q-\dot{V}$ 垂降控制方法[8]，虛功之垂降分配改以依據電壓之微分達成，如此可使虛功分配獨立於轉換器輸出線阻抗。其中，電壓相量幅值之時間微分與負載的相依性源自於文獻[9]中之動態負載模型。將 $\dot{V}$ 應用於虛功控制則可參考文獻[10] - [13]，這些控制策略基本上都是基於控制 Lyapunov 函數，可透過僅測量局部的參數即實現系統阻尼之提升及保證穩定運轉。儘管如此， $P-f/Q-\dot{V}$ 控制目前只有小信號穩定性分析已被研究[8]，而在自主微電網 $P-f$ 和 $Q-\dot{V}$ 垂降控制之非線性特性則尚未被透徹地研究。為了瞭解微電網的非線性動態行為， $Q-\dot{V}$ 垂降控制之小信號分析將被延伸至非線性系統框架[14]。在本計畫中，微電網的能量函數將被作為分析工具，以確保即使在極度非均勻損耗傳輸線情況下，多個轉換器間的功率潮流依舊可均勻分配。不過，在大負載擾動時， $P-f/Q-\dot{V}$ 垂降控制仍會存在不精確功率共配，這是由於閉迴系統可能存在非隔離的平衡點。要克服這個問題，額外的控制器是必要的。

近年來，基於共識的多代理控制理論在各領域已被廣泛地研究 [15] - [18]。這個共識控制的主要目標是在考慮到整個網絡的某些理想的狀態下，實現網絡中所有代理的協定。一個多代理的網絡通信基礎設施往往僅限於局部信息傳輸；平均值定理[15]可確保整體信息間之傳輸。由於共識算法只需要考慮鄰近間相互作用，強健性得以實現。以共識為基礎應用在智慧電網的控制算法，包括以下應用：(1) 配電饋線電壓支持[19]、[20]；(2) 智慧經濟調度[21]，[22]；(3) 智慧卸載[23]；(4) 同步發電機基於微電網[24]；(5) 電力轉換器為基礎的能量分配[25] - [27]。共識比率[24]演算法則確保為電網中的各轉換器其輸出功率達到欲限制值。輸電線路的功率限制是基於[25]的測量線路潮流的共識方式。然而，在虛功和匯流排電壓的控制是沒有加以討論的。最近，一個控制機制在[26]中被提出，該研究指出垂降控制電力轉換器在通過無線通信網絡時，是能穩定的。然而，穩定性分析只侷限於小信號的範圍。在文獻[28]中，用完全分散式共識演算法為基礎，來實現自主微電網內電力供需平衡。為了實現實功分配於多個雙饋感應發電機，平均共識定理也被採用[29]。基於共識的垂降控制，一微電網自主功率分配的研究在[27]、[30]和[31]中已被討論。共識  $P-f$  垂降控制的閉迴路系統非線性穩定性分析已有相關研究；兩個分散式可再生能源轉換器接上單一的負載實驗，驗證所提出的基於共識  $P-f$  垂降控制。雖然已提供基於共識的垂降控制的基礎，但虛功分配以及其相對於電壓控制的關係尚未被考慮。在本計畫中，我們將以共識為基礎的  $P-f$  垂降控制，並以推廣到以共識為基礎的  $P-f / Q-\dot{V}$  垂降控制。特別是如果一微電網的動態模型其傳輸線為均勻線路阻抗比時，則共識  $P-f / Q-\dot{V}$  垂降控制之閉迴

路系統是類梯度的，且其能量函數[32]是有界的。因此，在共識  $P-f/Q-\dot{V}$  垂降控制是一種有效的方式，即使在有大擾動發生時。此外，上述的方法還可以擴展到低壓配電網。

## 一、背景

首先將列出由文獻[35]、[36]、[37]裡，所提出的一般非線性系統和能量函數(Energy Functions, 簡稱 EFs)穩定區域概念，再來檢視微電網的動態模型。最後探討能量函數應用在孤島微電網垂降控制系統。

### (一)數學背景

考慮以下非線性系統：

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) \quad (1)$$

其中  $x(t)$  屬於  $\mathbf{R}^n$ 、當(1)式  $f(\hat{x})=0$  狀態向量  $\hat{x}$  為平衡點(EP)。如果函數  $f(\square)$  在平衡點  $\hat{x}$  的 Jacobian 矩陣， $J_f(\hat{x})$ ，沒有實部在零的特徵值，我們稱此平衡點為雙曲平衡點(hyperbolic equilibrium point)。對於一個雙曲平衡點而言，當它的 Jacobian 矩陣之所有特徵值，實部皆落於左半平面，它就是個穩定平衡點(SEP)；反之則為不穩定平衡點(UEP)。

另  $\hat{x}$  為雙曲平衡點，它的穩定與不穩定的流形(manifold)，我們定義  $W^s(\hat{x})$  和  $W^u(\hat{x})$  為下：

$$\begin{aligned} W^s(\hat{x}) &= \{x \in \mathbf{R}^n : \Phi(x, t) \rightarrow \hat{x} \text{ as } t \rightarrow \infty\} \\ W^u(\hat{x}) &= \{x \in \mathbf{R}^n : \Phi(x, t) \rightarrow \hat{x} \text{ as } t \rightarrow -\infty\} \end{aligned}$$

其中  $\Phi(x, t)$  為  $x$  當  $t=0$  時開始的系統軌跡。當時間趨近正無窮大時，每個軌跡在穩定的流形  $W^s(\hat{x})$  將會收斂至  $\hat{x}$ ；然而時間趨近負無窮大



時，每個軌跡在不穩定的流形  $W^u(\hat{x})$  將會收斂至  $\hat{x}$ 。對於一個穩定平衡點  $x_s$ ，它的穩定流形  $W^s(x_s)$  也可另稱作穩定區域(stability region)，並可以定義為：

$$A(x_s) = W^s(x_s) = \{ x \in \mathbf{R}^n : \lim_{t \rightarrow \infty} \Phi(x, t) = x_s \}$$

穩定區域  $A(x_s)$  的邊界稱作  $x_s$  的穩定邊界並以  $\partial A(x_s)$  表示之。描述穩定邊界的特性非常複雜且困難，如果可以將一系統以能量函數示之，將可簡化其複雜度。當以下三個條件符合，我們能以能量函數(EF)  $U: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$  表示(1)式之系統：

- (a) 沿著任何系統軌跡  $x(t)$  之能量函數  $U(x)$  的導數為非正數，例如  $\dot{U}(x(t)) \leq 0$ 。
- (b) 如果  $x(t)$  為一非顯然軌跡，例如  $x(t)$  不是個平衡點，然後沿著非顯然軌跡  $x(t)$ ，集合  $\{t \in \mathbf{R} : \dot{U}(x(t)) = 0\}$  有零測度(measure zero)。
- (c) 當  $t \in \mathbf{R} > 0$ ，軌跡  $x(t)$  有  $U(x(t))$  的邊界值，意旨軌跡  $x(t)$  為也有界的。

特別注意，因為此三條件必於全域中，能量函數非唯一且可能不是個 Lyapunov 函數。一能量函數的重要特性是每個軌跡不是收斂至一平衡點，就是變成無界的。如此以來，能以以下兩定理描述穩定邊界的特性：

- ◆ 定理 2.1：軌跡的全域行為(Global Behavior of Trajectories)，在(1)式系統的能量函數中，如果滿足上述條件(a)、(b)，每條有界軌跡將收斂到其一平衡點。
- ◆ 定理 2.2：能量函數與穩定邊界(Energy Function and Stability Boundary)，在(1)式系統中，假使此能量函數有漸進穩定平衡點  $x_s$ ，穩定邊界  $\partial A(x_s)$  將被包含在一集合，其集合為在穩定邊界

$\partial A(x_s)$  中，所有不穩定平衡點之穩定流形的聯集。

值得參考的是類梯度系統(*quasi-gradient system*)[32]、[38]：

$$\frac{dx}{dt} = -\text{grad}_{\mathbf{R}}U(x) = -\mathbf{R}(x)^{-1} \frac{\partial}{\partial x} U(x), \quad (2)$$

其  $\mathbf{R}(x)$  是一正定矩陣、 $U(x)$  則是一有下界的函數、以及全部平衡點皆是雙曲平衡點。我們可以清楚地發現，能量函數的條件(a)、(b)自動滿足於[32]、[38]。從定理 2.2 得知，(1)系統之每個邊界軌跡將收斂到其一的穩定平衡點。此外，由於  $U(x)$  有下界的，使得每個軌跡有界的並滿足條件(c)。 $U(x)$  的確是能量函數[32, Proposition 1]。這意指每個軌跡為有界的且收斂到其一平衡點。換句話說，系統(2)為完全穩定(*completely stable*)、且整個狀態空間由系統每個穩定平衡點之閉合穩定區域構成[32]。然後。我們將用此性質去探討微電網閉迴路垂降控制之穩定度。

## (二) 結構保留模型

微電網估測的準確度高度仰賴電網模型精確度。雖然微電網廣泛的動態模型在[39]、[40]、[41]已被提出，從我們更深的數值探討，它可被推斷為：微電網相量變數之相位或/和振幅中的變動，相較於電力電子快速的暫態時間，慢了許多。類穩態分析(*pseudo steady-state analysis*)足夠去建模以及分析微電網垂降控制問題。為了保持與電網構件的一致性，包括分散式電源介面電源轉換器(Distributed Interface Converters，簡稱 DICs)、負載、與線路，並在當中提供更多物理詮釋，我們將使用結構保留模型去描述電網各構件的動態交互行為[42]。

結構保留模型通常被以下的微分和代數方程式(DAE)式之[43]、[44]、[45]、[46]：

$$\dot{x} = f(x, y), \quad (3a)$$

$$0 = g(x, y). \quad (3b)$$

這裡  $x$  是狀態變數、 $y$  是代數變數。微分方程式描述了 DICs 或/和負載動態；代數方程式則是表示每個匯流排的潮流方程式。上述 DAE

表示法的其一缺點是，當軌跡進入奇異曲面：

$$S(x, y) = \{ (x, y) \in L : \det \frac{\partial g}{\partial y}(x, y) = 0 \}$$

將產生非平滑的跳越行為(Jump Behavior)。這些跳越行為是由於不完整 DAE 表示的數學模型所造成的。

相較於明確解代數限制分析法，另一方法為迴避 DAE 系統奇異曲面，奇異擾動法(singular perturbation approach)[47]。此方法視代數方程(3b)為以下快速動態的限制條件：

$$\varepsilon \dot{y} = g(x, y), \quad (4)$$

其中  $\varepsilon$  趨近  $0^+$ 。如此一來，對於 DAE 系統(3)，我們將定義邊界層方程(boundary-layer equation, BLE)：

$$\dot{x} = f(x, y), \quad (5a)$$

$$\varepsilon \dot{y} = g(x, y). \quad (5b)$$

因為(5)式向量場(vector field)是全域的明確定義，BLE 的使用將簡化結構保留模型 DAE 組成的複雜度。

### (三) 能量函數下的垂降控制

對於隔離型微電網下之垂降控制的動態行為描述有下述幾個階段：

- ◆ 初始階段：起初假設微電網操作在一個可接受的穩定平衡點上，而此點可由電力潮流解所得，它也為垂降控制階段的初始點。
- ◆ 垂降控制階段：在時間為初始潮流收斂點時，由於發電/負載模

式的改變，其電力潮流將無法匹配。此刻微電網將切換至垂降控制階段。而系統的趨勢將由垂降控制動作下的閉迴路系統所決定。

就非線性系統理論而言，需要決定垂降控制的初始點，是否位於在適當垂降控制下可接受穩定平衡點之穩定區域內。而為了把能量函數理論應用在上述所示的情況，經驗上假設初始階段和垂降控制階段的穩定平衡點是相當接近的。因此，垂降控制的目的為擴大垂降控制階段下穩定平衡點的穩定區域。如此，初始階段的穩定平衡點將落在垂降控制階段的穩定區域內。基於這直觀的想法，更廣泛的垂降控制方法將在本計畫探討。

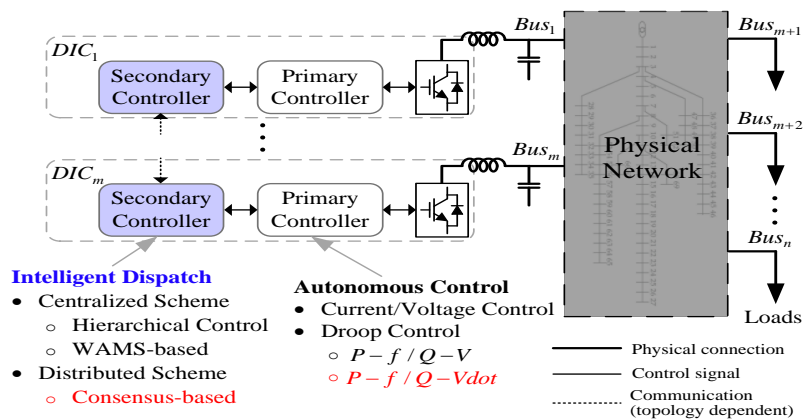
## 貳、研究方法與過程

### 一、架構保留模型下的微電網垂降控制

我們考慮微電網控制系統，包含有 $n$ 個匯流排的網路如圖一所示。匯流排 $1, \dots, m$ 是結合分散式可再生能源轉換器DIC的電源系統，並採用垂降控制器。匯流排 $m+1, \dots, n$ 是負載匯流排，沒有使用垂降控制器。匯流排電壓及匯流排電角分別以 $V_i$ 以及 $\delta_i$ 表示。涵蓋所有匯流排電壓振幅以及匯流排電角的欄向量定義為 $\mathbf{V} = \text{col}(V_i)$ 和 $\boldsymbol{\delta} = \text{col}(\delta_i)$ 。 $P_i$ 和 $Q_i$ 分別代表注入結合分散式可再生能源轉換器匯流排之實功及虛功。 $P_i^*$ 和 $Q_i^*$ 分別代表額定實功及額定虛功。 $P_{L,i}$ 和 $Q_{L,i}$ 是各負載所需的負載功率。微電網中的自主功率分配主要是使 $m$ 個分散式可再生能源轉換器可以依各自的額定容量分配功率給負載：

$$P_1 / P_1^* = P_2 / P_2^* = \dots = P_m / P_m^* \quad (6a)$$

$$Q_1 / Q_1^* = Q_2 / Q_2^* = \dots = Q_m / Q_m^* \quad (6b)$$



圖一、獨立微電網之功率分配控制

## (一) 模型敘述

關於微電網架構保留模型敘述如下：

(1) 各匯流排注入之實功與虛功：讓所有的線導納以  $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$  形式表示。  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分別是匯流排  $i$  和  $j$  間的電導以及電納。每個匯流排注入的實功及虛功可以表示成：

$$P_{line,i} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), \quad (7a)$$

$$Q_{line,i} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (7b)$$

其中  $\delta_{ij} = (\delta_i - \delta_j)$  是匯流排  $i$  和  $j$  間的電角差。

(2) 功率轉換器：因為轉換器內之電流控制及PWM之快速動態響應省略[8]，各分散式可再生能源轉換器可視為由垂降控制調定之交流電源。在穩態下，實功輸出  $P_i$  和虛功輸出  $Q_i$  滿足以下之潮流方程式，  
 $i = 1, \dots, m$

$$P_i = P_{line,i} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), \quad (8a)$$

$$Q_i = Q_{line,i} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}). \quad (8b)$$

(3) 負載：因為採用架構保存模型，更加接近實際情況微電網的負載行為可以被考慮[40]，在微分代數方程式，代數方程式(3b)與各匯流排實虛功潮流方程式一致。即  $i = m+1, \dots, n$

$$P_{Li} + P_{line,i} = 0, \quad (9a)$$

$$Q_{Li} + Q_{line,i} = 0. \quad (9b)$$

在近期的研究中已發現，實功對於電壓振幅的變化並不敏感；而虛功對於電角變化也不敏感[44]~[46]。因此，負載實功需求可視為一個常數加上一個倍數正比於及時頻率；同樣的，負載虛功需求可視為一個常數加上一個倍數正比於匯流排電壓導數。這些結果促使我們在架構簡化模型中使用邊界層方程式來簡化微分代數方程式。在此架構下，負載被表示為下列邊界層方程式[44]，[48]，[49]：

for  $i = m+1, \dots, n$

$$D_{Lp,i} \dot{\delta}_i = -P_{Li} - P_{line,i}, \quad (10a)$$

$$D_{Lq,i} \dot{V}_i = -Q_{Li} - Q_{line,i}. \quad (10b)$$

$D_{Lp,i}$  及  $D_{Lq,i}$  是足夠小的正數，代表著實功受匯流排頻率影響；虛功受到電壓振幅微分影響。

## (二) 平衡點分析

微電網的靜態行為可由(8)及(10)解得解析解得知。根據網路架構及負載條件，(12)的穩定平衡點不一定存在或是唯一[34]，[50]，[51]。分散式可再生能源轉換器額定也限制了垂降控制應用的程度。為了簡化，在此假設全部的分散式可再生能源轉換器都運作在他們各自的額定內。

因為這些平衡點在角度變數上有平移對稱性質，所以量測相對

於無限匯流排的所有角度變數是很常見的方法。因此，如果我們令匯流排1為無線匯流排，依平移對稱性質，(8)及(10)中的所有平衡點都獨立於 $\delta_1$ 。藉由捨去第一條方程式，潮流方程式可寫成降階形式。為了簡化分析，提出以下假設：

**假設3.1**：潮流方程式(8)及(10)中的穩定平衡點存在且全部的穩定平衡點的降階形式都是雙曲線的。對實際上的電網，這些假設並不會太嚴苛，因為[42]，[52]已驗證充足的條件驗證(8)及(10)穩定平衡點存在。

### (三) 傳統垂降控制

受到電網線路阻抗影響，傳統垂降控制法可以應用在下列三種微電網：

1. **電感性線路下的 $P-f$ 和 $Q-V$ 垂降控制**：如果所有線路阻抗主要是電感性，即 $Y_{ij} = jB_{ij}$ ，在角度變化很小的情況下，線性化式子(8)，可得 $\sin(\delta_{ij}) \approx \delta_{ij}$ 及 $\cos(\delta_{ij}) \approx 1$ 。以下的方程式可得：

$$P_i \approx \sum_{j \neq i}^n V_i V_j B_{ij} \delta_{ij}, \quad Q_i \approx \sum_{j \neq i}^n V_i (V_i - V_j) B_{ij}. \quad (11)$$

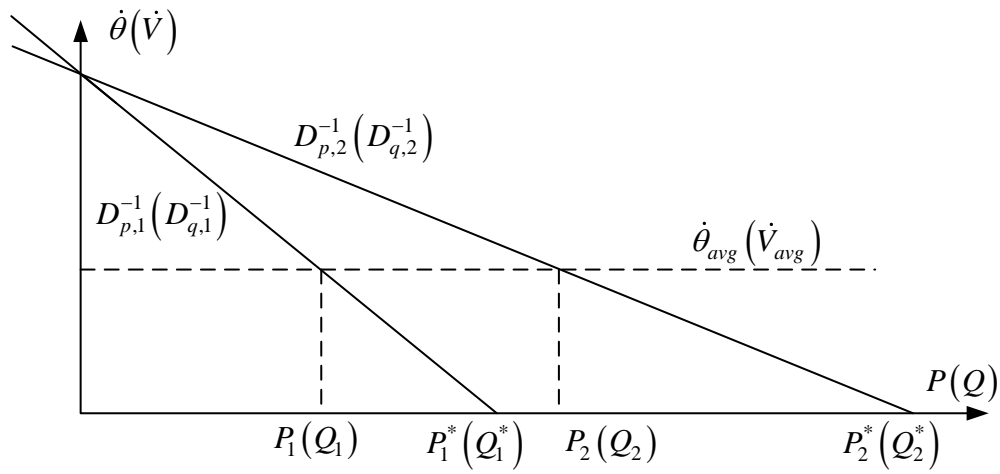
因此，可從(11)得知實功 $P_i$ 受角度差 $\delta_{ij}$ 影響，得知虛功 $Q_i$ 受角度電壓差 $(V_i - V_j)$ 影響。由以上關係，可得傳統 $P-f$ 和 $Q-V$ 垂降控制如以下所示：

$$D_{p,i}(\omega_i - \omega_b) = D_{p,i} \dot{\delta}_i = P_i^* - P_i, \quad (12a)$$



$$D_{q,i}(V_i - V_{i,0}) = D_{q,i}\Delta V_i = Q_i^* - Q_i \quad (12b)$$

$w_i$  和  $w_b$  分別是第  $i$  個分散式可再生能源轉換器的頻率及孤島電網下之  $P-f$  垂降控制之頻率額定值。 $\delta_i = d\delta_i / dt = (w_i - w_b)$  是第  $i$  個分散式可再生能源轉換器之頻率變化率。 $D_{p,i}$  和  $D_{q,i}$  是垂降控制參數。垂降之關係可參見圖二。



圖二、傳統  $P-f$  和  $Q-V$  垂降控制

2. 電阻性線路下的  $P-f$  和  $Q-V$  垂降控制：如果所有線路阻抗主要是電阻性，潮流方程式(8)將會變成：

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j G_{ij} \cos \delta_{ij}, \quad (13a)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j G_{ij} \sin \delta_{ij}. \quad (13b)$$

將以上的方程式線性化，可得到以下的方程式：

$$P_i \approx \sum_{j \neq i}^n V_i (V_i - V_j) G_{ij}, \quad Q_i \approx \sum_{j \neq i}^n V_i V_j G_{ij} \delta_{ij}. \quad (14)$$

因此， $P_i/(V_i-V_j)$  和  $Q_i/\delta_{ij}$  間的相依性是顯而易見的。垂降控制可依此關係改寫為：

$$D_{p,i}(V_i - V_{nom}) = D_{p,i}\Delta V_i = P_i^* - P_i, \quad (15a)$$

$$D_{q,i}(\omega_i - \omega_{nom}) = D_{q,i}\dot{\delta}_i = Q_i^* - Q_i. \quad (15b)$$

3. 線路均勻  $R/X$  比例下的垂降控制：為了能結合以上兩種垂降控制  
在同一框架下，所以假設了一種微電網架構，其所有傳輸線都滿足  
以下架設：

假設3.2 所有傳輸線阻抗  $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$  都符合  $R/X$  比例

$$R_{ij}/X_{ij} = K, \quad G_{ij}/B_{ij} = -K \quad (16)$$

$R_{ij}$  和  $X_{ij}$  分別是匯流排  $i$  和  $j$  間傳輸線之電阻及電抗。

如[53]，[54]所討論的，藉由適當的代數技巧，(7)中的實功及虛  
功方程式可以改寫成：

$$P_{line,i} - KQ_{line,i} = (1 + K^2) \sum_{j=1}^n V_i V_j B_{ij} \sin \delta_{ij}, \quad (17a)$$

$$Q_{line,i} + KP_{line,i} = -(1 + K^2) \sum_{j=1}^n V_i V_j B_{ij} \cos \delta_{ij}. \quad (17b)$$

以上方程式有一個很重要的意涵，藉由導入一個等效純電阻模型網  
路，(17a) 以及 (17b) 可以視為等效注入  $(P(V, \delta) - KQ)$  及  
 $(Q(V, \delta) - KP(V, \delta))$  之等效潮流方程式。現在(8)及(10)之邊界層方程式  
可以改寫成： $i = 1, \dots, n$

$$P_i - KQ_i = (1 + K^2) \sum_{j=1}^n V_i V_j B_{ij} \sin \delta_{ij} + (P_{L,i} - KQ_{L,i}) + D_{Lp,i}\dot{\delta}_i - KD_{Lq,i}\dot{V}_i, \quad (18)$$

$$Q_i + KP_i = -(1 + K^2) \sum_{j=1}^n V_i V_j B_{ij} \cos \delta_{ij} + (Q_{L,i} + KP_{L,i}) + D_{Lq,i} \dot{V}_i + KD_{Lp,i} \dot{\delta}_i. \quad (18)$$

如此一來，傳統之  $P-f$  和  $Q-V$  垂降控制可改寫成：

$$D_{p,i} \dot{\delta}_i - KD_{q,i} V_i = (P_i^* - KQ_i^*) - (P_i - KQ_i), \quad (19a)$$

$$D_{q,i} V_i + KD_{p,i} \dot{\delta}_i = (Q_i^* + KP_i^*) - (Q_i + KP_i). \quad (19b)$$

目前相似的方法已經被採用在兩架分散式可再生能源轉換器間[6]，而本研究會推廣到多重分散式可再生能源轉換器以及多重負載，加以討論及分析。

## 二、近期之垂降控制方法

雖然傳統  $P-f$  垂降控制可以提供令人滿意的結果，但  $Q-V$  垂降控制上存在一些缺點。第一，當傳輸線的線路阻抗不是均勻時，併接之分散式可再生能源轉換器間的虛功傳輸會受到影響[5]，[6]，[8]。第二，在有損耗的網路中， $P-f/Q-V$  垂降關係將不再適用。我們提出了一個新的垂降控制方法可以使功率分配更加準確。此外，藉由能量函數之非線性閉迴路穩定度分析也會討論。

(一)  $P-f$  和  $Q-\dot{V}$  垂降控制：

$Q-\dot{V}$  垂降控制主要是用在改善容易受到傳輸線阻抗影響之虛功傳輸。此方法是採用電壓導數  $\dot{V}$  為了有更好的虛功傳輸，而不是用  $V$ 。同時， $\dot{V}$  回復機制(穩態時  $\dot{V}=0$ )可以被實現藉由附加的恢復參數  $q_i$ 。多重分散式可再生能源轉換器之自主功率分配的  $P-f$  和  $Q-\dot{V}$  垂

降控制可以以下式表示：

$$D_{p,i}(\omega_i - \omega_b) = D_{p,i} \dot{\delta}_i = P_i^* - P_i, \quad (20a)$$

$$D_{q,i}(\dot{V}_i - \dot{V}_{i,0}) = D_{q,i} \dot{V}_i = (Q_i^* - q_i) - Q_i, \quad (20b)$$

$$\dot{q}_i = -k_{res}(\dot{V}_{i,0} - \dot{V}_i) = k_{res} \dot{V}_i \quad (20c)$$

其中  $\dot{V}_i = dV_i / dt = (\dot{V}_i - \dot{V}_{i,0})$  是第  $i$  個分散式可再生能源轉換器之電壓振幅導數。 $\dot{V}_{i,0}$  是電壓振幅導數的額定值，所以是零。方程式(20c)是敘述可以讓電壓振幅額  $\dot{V}$  維持額定值之電壓振幅回復項。回復比例是由回復常數  $k_{res}$  決定。相比於傳統  $P-f$  和  $Q-V$  垂降控制， $P-f$  和  $Q-V$  垂降控制引入額外的變數  $q_i$  到(20b)中，以提升虛功傳輸。詳細之小訊號模型穩定度分析已被[8]分析。

當達到穩態時，(20)閉迴路軌跡將會收斂到一個潮流穩態解。為了簡化，先假設潮流解是存在。讓  $(\delta^s, I_n w^s, V^s)$  表示相對應的穩定平衡點，其中  $\delta^s = col(\delta_i^s) \in [0, 2\pi)^n$ ， $V^s = col(V_i^s) \in \mathbf{R}_{>0}^n$ ， $I_n \in \mathbf{R}^n$ 。  $I_n$  代表全部元素都為1之欄向量， $w^s$  是網路之同步頻率。 $i=1, \dots, n$

$$D_{p,i}(\omega^s - \omega_b) = D_{p,i} \dot{\delta}_i^s = P_i^* - P_i(\delta^s, V^s) \quad (21a)$$

$$D_{q,i} \dot{V}_i^s = (Q_i^* - q_i(\delta^s, V^s)) - Q_i(\delta^s, V^s) \quad (21b)$$

$$\dot{q}_i = k_{res} \dot{V}_i^s \quad (21c)$$

藉由各匯流排之(21a)及(21b)分別加總，並定義  $D_{pt} = \sum_{j=1}^n D_{p,j}$  及

$D_{qt} = \sum_{j=1}^n D_{q,j}$ ，我們可得：

$$D_{pt}\dot{\delta}_0 = \sum_{j=1}^n (P_j^* - P_j) \quad (22a)$$

$$D_{qt}\dot{V}_0 = \sum_{j=1}^n (Q_j^* - Q_j) - \sum_{j=1}^n q_j \quad (22b)$$

$\delta_0$  代表平均角度變數，定義為

$$\delta_0 = D_{pt}^{-1} \sum_{j=1}^n D_{p,j} \delta_j \quad (23)$$

集中角度變數跟電力系統中的電角中心(center-of-angle，簡稱COA)

相似[52]，[42]。 $\dot{\delta}_0 = \sum_{j=1}^n D_{p,j} \dot{\delta}_j / D_{pt}$  及  $\dot{V}_0 = \sum_{j=1}^n D_{q,j} \dot{V}_j / D_{qt}$  代表全匯流排

之平均頻率及平均電壓幅值導數。如果我們將(20a)導入COA座標

軸，經由定義之轉換：

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0, \quad i=1, \dots, n \quad (24)$$

考慮只有  $(n-1)$  角度變數是獨立，因為

$$\sum_{j=1}^n D_{p,j} \theta_j = 0 \Rightarrow \theta_1 = -D_{p,1}^{-1} \sum_{j=2}^n D_{p,j} \theta_j \quad (25)$$

(25)指出狀態  $\theta_1$  是其他  $(n-1)$  角度變數之線性組合。 $P-f$  垂降控制動

態特性因此變成

$$D_{p,i} \dot{\theta}_i = P_i^* - P_i - \frac{D_{p,i}}{D_{pt}} P_{COA}, \quad i=2, \dots, n, \quad (26a)$$

$$D_{pt} \dot{\delta}_0 = P_{COA} \quad (26b)$$

其中  $P_{COA} = \sum_{j=1}^n (P_j^* - P_j)$ 。注意  $P_{COA}$  是零在穩態時。如果  $D_{pt}$  大於任何之

$D_{p,i}$ ，則  $\delta_0$  之動態行為可以加以省略。這也表示相依的不穩定性質將

不會被考慮[55]。因此做下列的假設：

假設4.1：在  $D_{pt} \gg D_{p,i}$  之情況下，對任何  $i$ ， $\delta_0$  之動態行為可以加以省略。

以上的假設可以將相依之不穩定性質預先排除。然而，類似這種情況在實際電網中很少見，所以此假設是有效的。

## (二) 穩定度分析

由於匯流排電壓振幅  $V_i(t) > 0$ ，且參考對網路保持電力系統模型 [44]、[48] 的能量函數架構，可定義一新變數為：

$$v_i(t) = \ln V_i(t), \text{ and } \dot{v}_i(t) = \dot{V}_i(t) \cdot (V_i(t))^{-1} \quad (27)$$

將式(27)代入(20b)、(20c)，描述  $P-f/Q-\dot{V}$  垂降控制之閉迴路動態的新方程式，可以重寫為下：

(1) 對於 DIC 匯流排， $i=1, \dots, m$ ：

$$D_{p,i} \dot{\theta}_i - e^{v_i} K D_{q,i} \dot{v}_i = (P_i^* - K Q_i^*) - \frac{D_{p,i}}{D_{pt}} P_{COA} - (P_i - K Q_i) + K q_i \quad (28a)$$

$$e^{v_i} D_{q,i} \dot{v}_i + K D_{p,i} \dot{\theta}_i = (Q_i^* + K P_i^*) - \frac{K D_{p,i}}{D_{pt}} P_{COA} - (Q_i + K P_i) - q_i \quad (28b)$$

$$\dot{q}_i = e^{v_i} k_{q,i}^{-1} D_{q,i} \dot{v}_i \quad (28c)$$

其中  $k_{q,i}^{-1} = k_{res} D_{q,i}^{-1}$ 。

(2) 對於負載匯流排， $i=m+1, \dots, n$ ：

$$D_{Lp,i} \dot{\theta}_i - e^{v_i} D_{Lq,i} \dot{v}_i = -(P_{L,i} - K Q_{L,i}) - \frac{D_{Lp,i}}{D_{pt}} P_{COA} - (P_{line,i} - K Q_{line,i}) \quad (29a)$$

$$e^{\nu_i} D_{Lq,i} \dot{\nu}_i + KD_{Lp,i} \dot{\theta}_i = -(Q_{L,i} + KP_{L,i}) - \frac{KD_{Lp,i}}{D_{pt}} P_{COA} - (Q_{line,i} + KP_{line,i}) \quad (29b)$$

每個匯流排的狀態變數可以表示為  $\tilde{\mathbf{x}}_1 = [\nu_1, q_1]^T$ 、 $\tilde{\mathbf{x}}_i = [\theta_i, \nu_i, q_i]^T$ ， $i=2, \dots, m$ 、以及  $\tilde{\mathbf{x}}_i = [\theta_i, \nu_i]^T$ ， $i=1+m, \dots, n$ 。整體系統的狀態變數為  $\tilde{\mathbf{x}}^T = [\tilde{\mathbf{x}}_1^T, \tilde{\mathbf{x}}_2^T, \dots, \tilde{\mathbf{x}}_n^T]$ ，其建議之全部狀態數目為  $(2n+m-1)$ 。

此階段我們找出對應能量函數的分析表示法，此能量函數有兩個成分：(1)  $U_1(\tilde{\mathbf{x}})$  為不考慮電壓恢復器原有的電網架構、(2) 從電壓恢復器導出的  $W_4(\tilde{\mathbf{x}})$ 。 $U_1(\tilde{\mathbf{x}})$  項可以由每個匯流排之能量守恆定理導出 [53]、[54]，它可在任何受擾動軌跡下保持常數。特別地，與電網相互影響的複數能量，可用匯流排電流注入及分支電流的複數線積分定義之，其初始值從電流穩定平衡點  $\vec{V}(0)$  沿著路徑  $\vec{V}(t)$  移動，可得：

$$U_{net}(\tilde{\mathbf{x}}) = \int_{\vec{V}(0)}^{\vec{V}(t)} \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n Y_{ij} \vec{V}_j - \vec{I}_{Gi} + \vec{I}_{Li} \right) d\vec{V}_i = C \quad (30)$$

其中  $\vec{I}_{Gi}$ 、 $\vec{I}_{Li}$  分別為在發電機與負載匯流排的注入電流、 $C$  為與積分路徑獨立的複數常數。如果所有線路阻抗滿足假設 3.2，電力潮流方程式將會描述成式 (18a)、(18b)。處理  $U_{net}(\tilde{\mathbf{x}})$ 、 $U_1(\tilde{\mathbf{x}})$  的實虛部，可構成以下 [56]：

$$U_1(\tilde{\mathbf{x}}) = K \cdot \text{Re}(U_{net}(\tilde{\mathbf{x}})) + \text{Im}(U_{net}(\tilde{\mathbf{x}})) = K \cdot \text{Re}(C) + \text{Im}(C) \quad (31)$$

雖然沿著任意路徑  $U_1(\tilde{\mathbf{x}})$  包持著實數常數，就狀態變數  $\mathbf{x}$  而言，它可被表示為三個函數的總和：

$$U_1(\tilde{\mathbf{x}}) = W_1(\tilde{\mathbf{x}}) + W_2(\tilde{\mathbf{x}}) + W_3(\tilde{\mathbf{x}}) \quad (32)$$

其中

$$W_1(\tilde{\mathbf{x}}) = -\frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (1+K^2) V_i V_j B_{ij} \cos \theta_{ij} \right) \quad (33a)$$

$$W_2(\tilde{\mathbf{x}}) = - \sum_{j=1}^m (P_j^* - KQ_j^*) \theta_j + \sum_{j=m+1}^n (P_{Lj} - KQ_{Lj}) \theta_j \quad (33b)$$

$$W_3(\tilde{\mathbf{x}}) = - \sum_{j=1}^m (Q_j^* + KP_j^*) \cdot \ln V_j + \sum_{j=m+1}^n (Q_{Lj} + KP_{Lj}) \cdot \ln V_j \quad (33c)$$

每項  $U_1(\tilde{\mathbf{x}})$  有以下的物理解釋：

- (1)  $W_1(\tilde{\mathbf{x}})$  為儲存在傳輸線上的總位能。
- (2)  $W_2(\tilde{\mathbf{x}})$  為發電機、負載匯流排分別注入和吸收的等效總實部位能。
- (3)  $W_3(\tilde{\mathbf{x}})$  為發電機、負載匯流排分別注入和吸收的等效總虛部位能。

第二個成分  $W_4(\tilde{\mathbf{x}})$ ，來自於電壓恢復器，被定義為：

$$W_4(\tilde{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m q_j^2 \quad (34)$$

如此一來，上述閉迴路系統的合成能量函數可描述為：

$$U_2(\tilde{\mathbf{x}}) = U_1(\tilde{\mathbf{x}}) + W_4(\tilde{\mathbf{x}}) \quad (35)$$

就  $U_2(\tilde{\mathbf{x}})$  的偏微分而言，閉迴路系統(28)式可以簡潔的表示為：

- (1) 對於 DIC 匯流排  $i = 2, \dots, m$

$$\tilde{D}_i(\tilde{\mathbf{x}}_i) \frac{d}{dt} \tilde{\mathbf{x}}_i = -\tilde{A}_i \frac{\partial U_2(\tilde{\mathbf{x}})}{\partial \tilde{\mathbf{x}}_i} \quad (36)$$

其中

$$\tilde{D}_i(\tilde{\mathbf{x}}_i) = \begin{bmatrix} D_{p,i} & -e^{\nu_i} K D_{q,i} & 0 \\ K D_{p,i} & e^{\nu_i} D_{q,i} & 0 \\ K D_{p,i} & 0 & k_{q,i} \end{bmatrix}, \tilde{A}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -K \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$



(2) 對於負載匯流排  $i = m+1, \dots, n$

$$\tilde{D}_L(\tilde{\mathbf{x}}) \frac{d\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = -\tilde{A} \frac{\partial U_2(\tilde{\mathbf{x}})}{\partial \tilde{\mathbf{x}}_i} \quad (38)$$

其中

$$D_{L,i}(\tilde{\mathbf{x}}_i) = \begin{bmatrix} D_{Lp,i} & -e^{\nu_i} K D_{Lq,i} \\ K D_{Lp,i} & e^{\nu_i} D_{Lq,i} \end{bmatrix}, A_{L,i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

如果整體系統可以用階數  $\tilde{\mathbf{x}}$  來表示，則(36)式和(38)式可以簡潔寫為：

$$\tilde{D}(\tilde{\mathbf{x}}) \frac{d\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = -\tilde{A} \frac{\partial U_2(\tilde{\mathbf{x}})}{\partial \tilde{\mathbf{x}}} \quad (40)$$

其中

$$\tilde{D}(\tilde{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} \tilde{D}_1 & \tilde{M}_{c1} & \tilde{M}_{c2} \\ 0 & \tilde{M}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{M}_4 \end{bmatrix}, \tilde{A}(\tilde{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} \tilde{A}_1 & \tilde{N}_{c1} & \tilde{N}_{c2} \\ 0 & \tilde{N}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{N}_4 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{D}_1(\tilde{\mathbf{x}}_1) = \begin{bmatrix} e^{\nu_i} D_{q,i} & 0 \\ 0 & k_{q,i} \end{bmatrix}, \tilde{A}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{M}_1 = \text{diag}[\tilde{D}_i], \quad \tilde{N}_1 = \text{diag}[\tilde{A}_i], \quad i = 2, \dots, m,$$

$$\tilde{M}_4 = \text{diag}[\tilde{D}_{L,i}], \quad \tilde{N}_4 = \text{diag}[\tilde{A}_{L,i}], \quad i = m+1, \dots, n.$$

這裡有價值地提出， $\tilde{M}_{c1}$ ， $\tilde{M}_{c2}$ ， $\tilde{N}_{c1}$  和  $\tilde{N}_{c2}$  描述一個由  $\theta_1$  所引出的  $(\theta_2, \dots, \theta_n)$  線性組合式，且它不會影響  $\tilde{D}$  和  $\tilde{A}$  的對角線特性。很明顯地，矩陣  $D_{L,i}^{-1} A_{L,i}$  為一正定矩陣，而  $\tilde{D}_i^{-1} \tilde{A}_i$  為具一個零特徵值之半正定矩陣。值得注意的是，此零特徵值並不會產生無義解的特徵向量。然而， $\tilde{D}_i^{-1} \tilde{A}_i$  的半正定特性意味著(40)式有多個穩定平衡點的可能性。(40)式不是一個標準的類梯度系統，且因為能量函數之條件 2 沒有滿足，所以對於(40)式來說， $U_2(\tilde{\mathbf{x}})$  不是合適的能量函數。

這個缺點可利用具共識機制之垂降控制所修正。而在具共識機制之垂降控制下，閉迴路系統可以描述為類梯度系統，且能量函數中的條件 2 也可以滿足。

### (三) 具 $f$ 和 $\dot{V}$ 回復的垂降

上述的  $P-f/Q-\dot{V}$  垂降控制器有一個缺點，即缺乏頻率回復的機制。微電網中若有負載變動的情形，上面所提的情況將會降低電力品質。且在有損耗的電力網絡中，其負載為重載時，也會導致實功分配不準確。類似於先前提到的電壓回復機制，將有一個與頻率相關的  $p_i$  項加到(20)式中的實功控制裡。而  $p_i$  的動態特性由頻率變動所決定。現在(20)式可以修改為：

$$D_{p,i}\dot{\theta}_i = P_i^* - P_i - p_i - \frac{D_{p,i}}{D_{pt}} P_{COA}, \quad \dot{p}_i = k_{p,i}^{-1} D_{p,i} \dot{\theta}_i, \quad (41a)$$

$$e^{v_i} D_{q,i} \dot{v}_i = Q_i^* - Q_i - q_i, \quad \dot{q}_i = e^{v_i} k_{q,i}^{-1} D_{q,i} \dot{v}_i \quad (41b)$$

在這個情況中，有一個額外的項需要定義

$$W_5(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m p_j^2 \quad (42)$$

它包含在整個能量函數裡。在這個框架中，一個複合式的能量函數可以定義為

$$U_3(\hat{\mathbf{x}}) = U_2(\hat{\mathbf{x}}) + W_5(\hat{\mathbf{x}}) \quad (43)$$

其

中

$$x_1 = [p_1, v_1, q_1]^T, \quad x_i = [\theta_i, p_i, v_i, q_i]^T, \quad i = 2, \dots, m, \quad \hat{\mathbf{x}}^T = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_m^T, \tilde{x}_{m+1}^T, \dots, \tilde{x}_n^T].$$

而  $\hat{x}$  的維度為  $(2n+2m-1)$ 。我們可以容易地證實(41)式可以整理成更簡單的形式。對於  $i=2, \dots, m$ ：

$$D_i(\mathbf{x}_i)\dot{\mathbf{x}}_i = -A_i(\partial U_3(\hat{\mathbf{x}})/\partial \mathbf{x}_i) \quad (44)$$

$$D_i(\mathbf{x}_i) = \begin{bmatrix} D_{p,i} & 0 & -e^{\nu_i} K D_{q,i} & 0 \\ 0 & k_{p,i} & -e^{\nu_i} K D_{q,i} & 0 \\ K D_{p,i} & 0 & e^{\nu_i} D_{q,i} & 0 \\ K D_{p,i} & 0 & 0 & k_{q,i} \end{bmatrix}, A_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & -K \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (45)$$

詳細解析可知  $D_i^{-1}A_i$  為一半正定矩陣，而它的零特徵向量不是無義解。如果可以把整體閉迴路系統用  $\hat{x}$  階數表示，它可以表示為

$$\begin{aligned} \hat{D}(\hat{\mathbf{x}})\dot{\hat{\mathbf{x}}} &= -\hat{A}(\partial U_3(\hat{\mathbf{x}})/\partial \hat{\mathbf{x}}), \\ \hat{D}(\hat{\mathbf{x}}) &= \begin{bmatrix} D_1 & M_{c1} & M_{c2} \\ \mathbf{0} & M_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{M}_4 \end{bmatrix}, \hat{A}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} A_1 & N_{c1} & N_{c2} \\ \mathbf{0} & N_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{N}_4 \end{bmatrix}, \\ D_1(\mathbf{x}_1) &= \begin{bmatrix} k_{p,i} & -e^{\nu_i} K D_{q,1} & 0 \\ 0 & e^{\nu_i} D_{q,1} & 0 \\ 0 & 0 & k_{p,i} \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -K \\ -K & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ M_1 &= \text{diag}[D_i], N_1 = \text{diag}[A_i], i = 2, \dots, m \end{aligned} \quad (46)$$

再次， $M_{c1}$ ,  $M_{c2}$ ,  $N_{c1}$  和  $N_{c2}$  為  $(\theta_2, \dots, \theta_n)$  的線性組合，它不會影響到  $\hat{D}$  和  $\hat{A}$  的對角線特性。因為  $\hat{D}^{-1}\hat{A}$  為一半正定矩陣，它將產生多個穩定平衡點，(46)式不是一個標準的類梯度系統且  $U_3(\tilde{x})$  也不是能量函數。類似先前的例子，此缺點可以被具共識機制之垂降控制所修正。

如同先前提到，如果線路阻抗為純電阻，則垂降的關係變為  $P - \dot{V}/Q - f$ ，垂降控制器如(41)式所示，它將相對應地被修改。

### 三、具共識機制之垂降控制

雖然(40)、(46)描述之系統為穩定的，然而在非勻稱之線路阻抗中，並聯 DICs 間的虛功匹配將會在文獻[8]裡發現落差。此不準確原因來自於 $\tilde{A}_i$ 和 $A_i$ 存在零特徵值，意旨多個潮流解的可能性。由於純粹的 $P-f$ (實功-頻率)及 $Q-\dot{V}$ (虛功-電壓微分)垂降控制無法再支持此系統，準確的功率匹配在有損網路上將無法進行。

具共識機制之垂降控制旨在克服此困難。此共識 $P-f$ 垂降控制的構想由[27]提出。在本計畫，我們將另外同時考慮 $P-f$ 及 $Q-\dot{V}$ 垂降控制。

#### (一) 圖形理論及共識機制演算法

一圖形 $G=(V_G, E_G)$ 是名為頂點(vertices)元素的有限非空集合 $V_G$ ，沿著名為邊(edges)， $V_G$ 的兩個子集合之集合 $E_G$ 。一圖形被稱作簡易的(*simple*)無論它是：(a)未加權的(*unweighted*)；(b)有無向邊(*undirected edges*)；(c)沒有圖形迴圈(*graph loop*)；(d)沒有多邊(*multi-edge*)[57]。由於電力網路的特性，考慮它為簡易圖形是當充分的。簡易圖形 $G$ 的相鄰矩陣(*adjacency matrix*) $A$ ，令 $A_G$ ，是一個列與行以 $V_G$ 階數為指標之對稱矩陣，其元素為：

$$A_G[u, v] = \begin{cases} 1, & \text{if } E_G(u, v) = 1 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (47)$$

圖形 $G$ 的分支度(*degree matrix*)矩陣 $D$ ，令為 $D_G$ ，為對角矩陣沿著對

角有頂點分支度，其中頂點的分支度代表 incident 邊的數量。圖形的 Laplacian  $L$  定義為：

$$L = D_G - A_G \Rightarrow \begin{cases} l_{ij} = -a_{ij}, & i \neq j \\ l_{ij} = \sum_{i=1}^n a_{ij}, & i = j \end{cases} \quad (48)$$

其中  $a_{ij}$  為  $A_G$  的  $[i, j]$  元。

擴散 *diffusion*，通常在密度分布與氣體移動時行進的描述，也可以還描繪網絡上資訊的擴散。假設潮流在任兩頂點  $x_i$  與  $x_j$  間受  $C(x_j - x_i)$  控制，其中  $C$  為擴散常數。 $x_i$  的變化速率為：

$$\dot{x}_i = C \sum_{j \neq i}^n a_{ij} (x_j - x_i) \quad (49)$$

以上動態可以更簡潔表示：

$$\dot{\mathbf{x}} = -C(D_G - A_G)\mathbf{x} = -CL\mathbf{x} \quad (50)$$

全部圖形的頂點將會全域漸進地到達一個平均共識值：

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} x_i(t) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x_j(t) = \text{Avg}(\mathbf{x}(0))$$

其被稱作平均共識理論(average-consensus theorem)[15]。

方程式  $\text{Avg}(\cdot)$  代表輸入向量的平均值。注意到收斂速率可以藉由改變擴散常數  $C$  來調整。

## (二) 運轉原則

此章我們將闡述推演具共識機制之  $P-f$  及  $Q-\dot{V}$  垂降控制。藉由引進所有 DICs 中溝通網路的 Laplacian 矩陣，閉迴路共識  $P-f$  及  $Q-\dot{V}$  垂降控制可由下式組成：

$$D_{p,i}\dot{\theta}_i = P_i^* - P_i - p_i - D_{pt}^{-1}D_{p,i}P_{COA} \quad (51a)$$

$$k_{p,i}\dot{p}_i = D_{p,i}\dot{\theta}_i + \sum_{j=1}^m l_{ij} \left( \frac{p_i}{D_{p,i}} - \frac{p_j}{D_{p,j}} \right) \quad (51b)$$

$$D_{q,i}\dot{V}_i = Q_i^* - Q_i - q_i \quad (51c)$$

$$k_{q,i}\dot{q}_i = D_{q,i}\dot{V}_i + \sum_{j=1}^m l_{ij} \left( \frac{q_i}{D_{q,i}} - \frac{q_j}{D_{q,j}} \right) \quad (51d)$$

其中(51a)  $i = 2, \dots, m$ 、(51b)和(51b)  $i = 1, \dots, m$ 。上述公式中， $l_{ij}$ 為在互聯 DICs 之圖形 Laplacian  $L_{comm}$  的  $[i, j]$  元。因為  $L_{comm}$  的非對角元代表網絡頂點間的連接度，因此需建立每個相鄰 DIC 間的通訊協定。值得注意的是在  $P-f$  及  $Q-V$  垂降控制裡，式(41a)和(41b)額外的控制項  $p_i$ 、 $q_j$  為只含區域  $f_i$ 、 $V_i$  的回授訊號。然而共識垂降控制中，鄰近匯流排的  $f_i$ 、 $V_i$  將貢獻在回授訊號上並逐漸逼近到平均值。由於  $l_{ij}$  值會影響收斂速率，我們可調整  $l_{ij}$  到符合狀態變數  $p_i$  與  $q_j$  的數值位階。在最近的研究裡，[28]建議  $l_{ij}$  可利用全域資訊探測演算法(global information discovery algorithm)來設定[15]。

共識垂降控制需要通信介面，因此通信技術的實際應用也應被考量。不同位階的通信技術性能已在[58]被檢驗出，並建議在功率匹配準確度以及需要的通信頻寬中做取捨，其中衍生出更為經濟性的分散式發電機之微電網。[59]提出幾個功率分配中工業通信技術的準則，如一個增進系統可靠度與運轉準確度的無線通信控制法，並可

檢驗消除微電網間的不同擾動。因為在互聯 DICs 間，共識垂降控制只需要低頻寬的通信，無線或有線通信也適用，此將增強二次控制的可靠性以及確保 DICs 是否可隨裝即用。

值得關注的是，如果在所有  $i, j$  裡設  $l_{ij} = 0$ ，共識垂降控制將會退化成  $P-f$  及  $Q-\dot{V}$  垂降控制，所有軌跡仍會收斂到其一平衡點。如此一來，共識垂降控制可已被視作從相鄰 DICs 間的附加控制行為，這意味整體共識垂降控制由兩個面向組成：主要的區域  $P-f$  及  $Q-\dot{V}$  垂降控制和輔助的共識垂降控制。區域  $P-f$  及  $Q-\dot{V}$  垂降控制主要支配著初階段閉迴路的動態行為，因此在(51a)、(51b)控制之頻率恢復以及同步機制會迅速地到達穩態，然後系統將進入共識垂降控制之狀態。於此控制框架裡，(51a)穩態下的共識垂降控制初始狀態可大約表示為：

$$\dot{\delta}_o(t^*) = \sum_{j=1}^m (P_j^* - P_j(t^*)) / D_{pt} - \sum_{j=1}^m P_j(t^*) / D_{pt}$$

其中  $t^*$  被定義為快速頻率恢復與同步機制的完整時間。因為  $\dot{\delta}_o(t^*)$  明顯地靠近零，(51b)的動態可藉由(49)一階共識機制演算法概略描述：

$$k_{p,i} \dot{p}_i = \sum_{j=1}^m l_{ij} \left( \frac{p_i}{D_{p,i}} - \frac{p_j}{D_{p,j}} \right) \quad (52)$$

遵循(51)、(52)的平均共識理論(average-consensus theorem)可導出所有  $p_i / D_{p,i}$  為：

$$\frac{p_i}{D_{p,i}} = \sum_{j=1}^m P_j(t^*) / D_{pt} = \sum_{j=1}^m (P_j^* - P_j(t^*)) / D_{pt}$$

此為在 DICs 中之精確平均頻率偏差。代入(51a)，可得：

$$\frac{p_i}{p_i^*} = 1 - \frac{D_{p,i}}{P_i^*} \cdot \frac{\sum_{j=1}^m (P_j^* - P_j(t^*))}{D_{pt}} \quad (53)$$

因為對各個受垂降控制之 DIC， $D_{p,1}/P_1^* = D_{p,2}/P_2^* = \dots = D_{p,m}/P_m^*$  是一常見的設定，附加此共識機制使 DIC 依各自額定值並成比例地供應實功至負載。類似地，虛功可由(51c)、(51d)來得知，如此一來虛功分配值可以達到式(6b)。

### (三) 能量函數穩定度分析

以上之討論提供了一些此兩面向之共識垂降控制演算法的解讀。在數學上，此控制法的閉迴路動態之穩定度可利用能量函數法來證明。確實，(51)也可以簡化成下列形式：

$$D_{con}(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}} = -A_{con}(\partial U_3(\mathbf{x})/\partial \mathbf{x}) \quad (54)$$

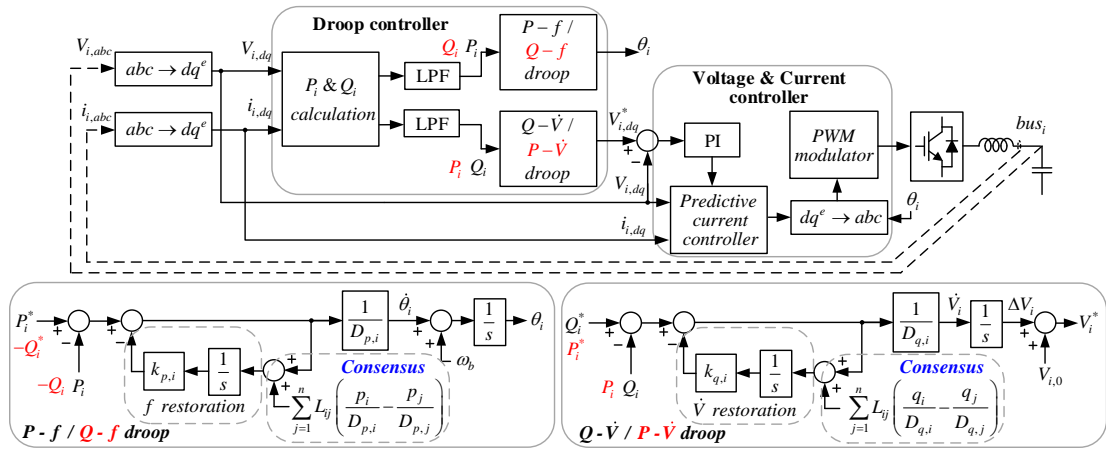
$\mathbf{x}^T = [\boldsymbol{\theta}^T, \mathbf{p}^T, \mathbf{v}^T, \mathbf{q}^T]$ 。從  $\hat{\mathbf{x}}$  到  $\mathbf{x}$  地重新排序來自於 DIC 網路 Laplacian  $L_{comm}$ 。另外  $\hat{D}$  和  $\hat{A}$  也修改為  $D$  和  $A$ ，並容易地導出  $D_{con} = D$  以及  $D_{con}$  為滿秩。 $A_{con} = (A + \tilde{A}_{con})$ ，其  $\tilde{A}_{con} = \text{diag}[0, -L_{comm}D_p^{-1}, 0, -L_{comm}D_q^{-1}]$ ，一般來說，於  $\tilde{A}_{con}$  衍生之半正定  $A$  下之小擾動，會導致非奇異  $A_{con}$ 。此外，受共識垂降控制下的閉迴路系統阻尼會增加，因為每個  $L_{comm}$  的正數項會出現在  $A_{con}$  的對角上；額外的負數項則出現在分析  $dU_3(\mathbf{x})/dt$  上。如此一來，受此控制下之閉迴路系統會有額外的阻尼量。最後



總結此小節為：

定理 5.1：如果假設(A3.1)、(A3.2)、和(A4.1)式皆滿足，受此共識之  $P-f/Q-\dot{V}$  垂降控制 DICs 之微電網為穩定。

如果微電網幾乎皆為純電阻，共識之垂降控制結合  $P-\dot{V}/Q-f$  可以取代原有的  $P-f/Q-\dot{V}$ ，且也可利用此章穩定度法分析之。



圖三、每個獨立DIC之共識垂降控制圖

#### 四、核能研究所微型電網試驗場

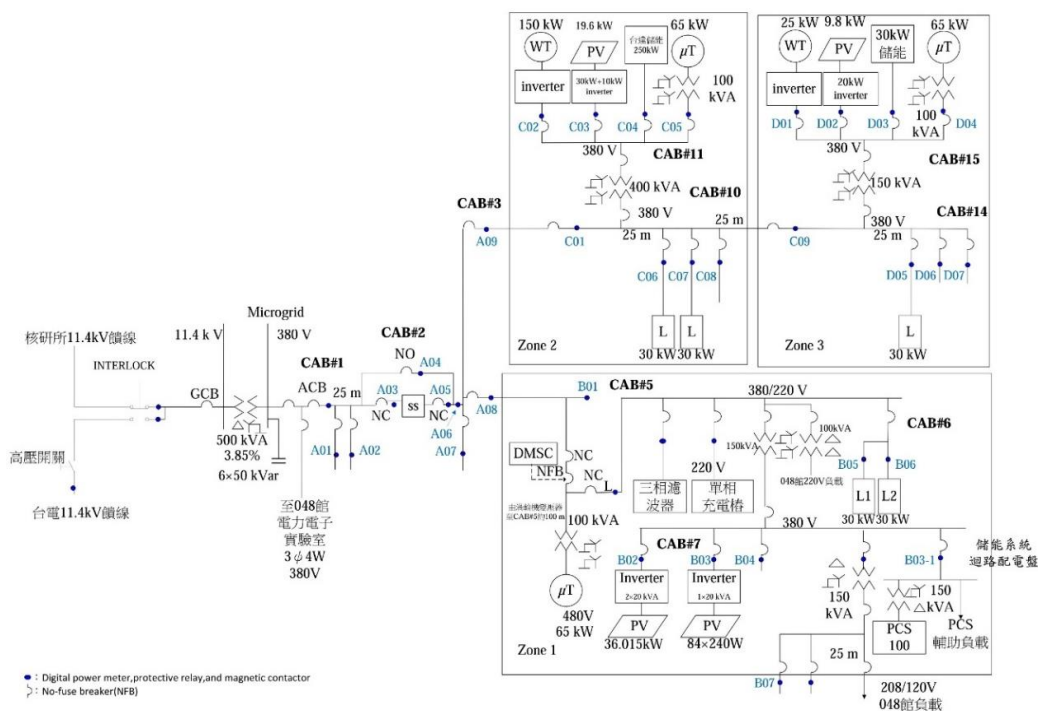
##### (一)簡介

核研所於 2010 年完成國家首座百瓩級三相四線式低壓 380V/220V 微電網 Zone 1~Zone 3 試驗場測試平台及其資通訊控制系統建置，其單線圖如圖四所示，此微電網即為本文所提控制方法之極佳測試平台。

微電網內的再生能源包括，多座太陽能發電模組，一台 25 kW 水平式永磁同步風力發電系統與一台 150 kW 水平感應式風力發電

系統，另外在每一區裝設 65kW 微渦輪機和儲能系統，確保孤島運轉之穩定度；透過靜態開關(Static Switch, SS)經由升壓變壓器與所內 11.4kV 市電併聯，並且設置六座電容器組，用來調整微電網內負載功率因數。

微電網系統架構包含三個供電區域 Zone 1, Zone 2 及 Zone 3；其中 Zone 1 與 Zone 2 並接，並接連接至微電網與市電系統連接之責任分界點；Zone 2 另一端則與 Zone 3 串接以等效實際配電系統之放射形供電方式；這三區域未來分別將供電給所內能源園區 048 館、039 館及 072 館舍負載，目前僅透過負載箱及其電能管理系統進行測試，用以模擬三個區域系統負載量。



圖四、核研所微電網單線圖

## (二)模型化

為了方便分析，我們收集實際參數，並且分類為分散式電源、傳輸線與變壓器、負載。

### 1.分散式電源

首先，假設每台發電機為 DC-AC Converter，各台機的額定和濾波用的串並聯阻抗，以及定義所在發電機匯流排位置，如表一，其中串聯電感( $L_s$ )與並聯電容( $C_f$ )的公式為，

$$\omega L_s = 0.08 \frac{\text{line to line } v_o^2}{\text{rated power}}$$

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_s \times C_f}} = \text{corner frequency} = 1125$$

表一、分散式電源

發電來源	額定 (kW)	串聯電感 ( $\mu$ H)	並聯電容 ( $\mu$ F)	匯流排 編號
Zone 1				
微氣渦輪機	65	282.072	70.9538	6
太陽能板	36.015	319.061	62.728	8
太陽能板	20.16	569.989	35.113	8
Zone 2				
微氣渦輪機	65	282.072	70.9538	14
太陽能板	19.6	586.275	34.1377	12
風力發電	150	76.6066	261.258	12
Zone 3				
微氣渦輪機	65	282.072	70.9538	19
太陽能板	9.8	1172.55	17.0688	17
風力發電	25	459.639	43.543	17

## 2. 傳輸線與變壓器

傳輸線部分如表二，額定皆為 500kVA；阻抗的算法為利用相關傳輸線製造廠商資料，找到對應線的種類，根據線的長度，得到對應之等效阻抗。

表二、傳輸線

從匯流排	至匯流排	等效串聯電阻 (mΩ)	等效串聯電抗 (mΩ)
2	3	0.9025	1.281769803
3	4	1.1986	1.455562708
3	9	1.239	1.140021142
4	5	17.22	4.618141201
5	7	49.2	13.19468915
9	10	1.475	1.357168026
9	11	1.475	1.357168026
9	15	0.885	0.814300816
12	13	29.52	7.916813487
15	16	5.725	2.978229836
17	18	29.52	7.916813487

變壓器部分如表三，其中

$$\text{電阻} = \frac{\text{銅損}}{(\text{額定}/380)^2},$$

$$\text{電抗} = \text{一次測電抗} + \text{二次測電抗} \times \text{電壓比}^2。$$

表三、變壓器

從匯流排	至匯流排	額定(kVA)	380V 側等效 串聯電阻 (mΩ)	380V 側等效 串聯電抗 (mΩ)
1	2	500	3.7508064	7.617666667
5	6	100	24.69852	40.51152778
7	8	150	18.90181333	45
9	12	400	5.1990675	9.815
13	14	100	21.62028	35.23869792
15	17	150	15.12016	28.775
18	19	100	21.7074	35.27123264

### 3. 負載

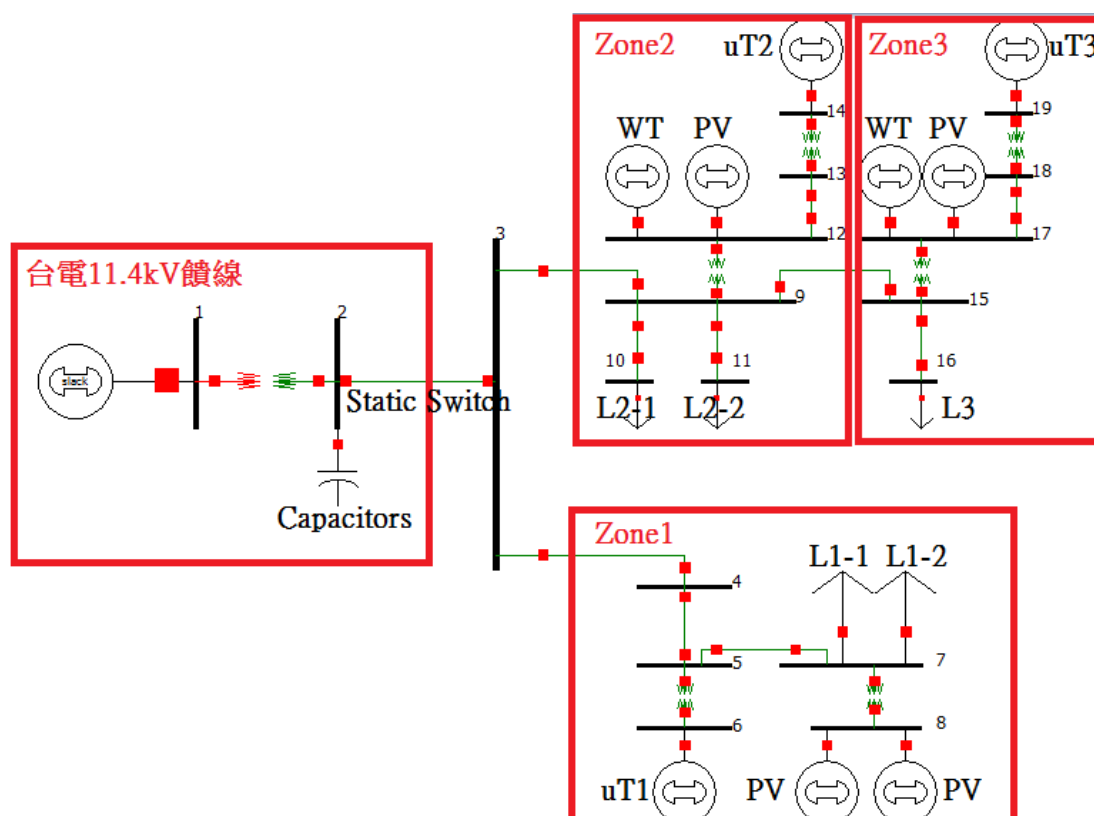
使用可調控電子式負載箱及其電能管理控制系統進行測試，用來模擬各館的實際用電情形，包括電阻性、電感性、整流性、大型馬達負載，以及三相平衡馬達性負載，總共五台負載箱，其資料如表四。

表四、負載

負載箱名稱	實功(kW)	虛功(kvar)	功因	匯流排編號
L1-1	32.5	14.8	0.910079	7
L1-2	33.8	18.6	0.876106	7
L2-1	32.5	14.8	0.910079	10
L2-2	33.8	18.6	0.876106	11
L3	32.5	14.8	0.910079	16

### (三)使用 PowerWorld

圖五為簡化後的模型，假設忽略儲能系統，以求得系統穩態之工作點。首先定義匯流排編號，並且選定  $S_{base}=500kVA$ 、 $V_{base}=380V$ ，不過此模擬軟體固定  $S_{base}=100MVA$ ，為了避免單位過大，進而導致顯示數據過小不易判讀，我們將原系統額定放大 200 倍，電壓則放大  $\sqrt{200}$  倍。

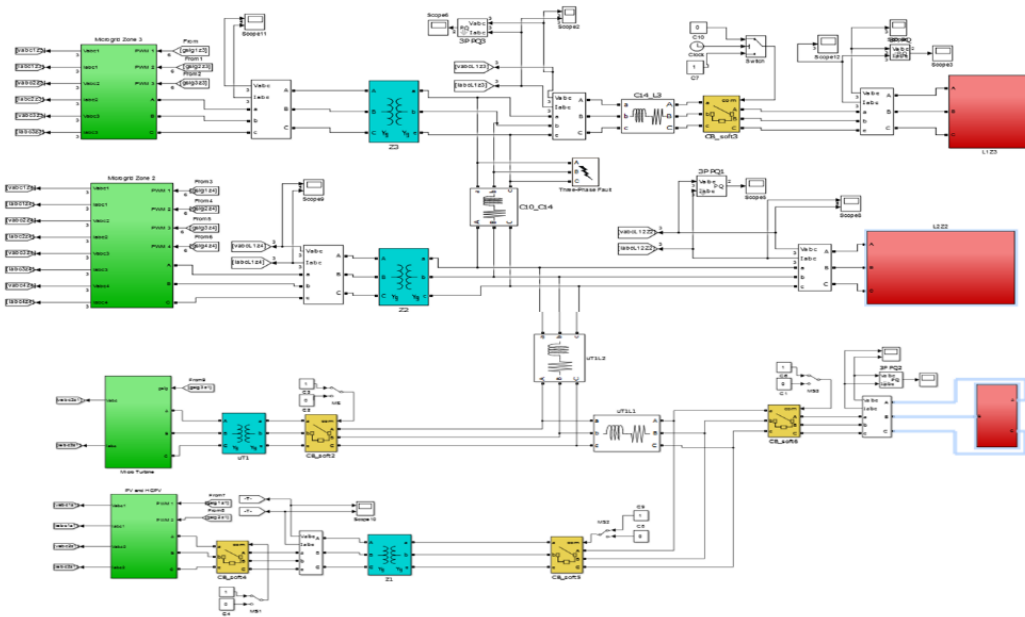


圖五、PowerWorld 模擬圖

#### (四)使用 Simulink

##### 1.全區模擬圖

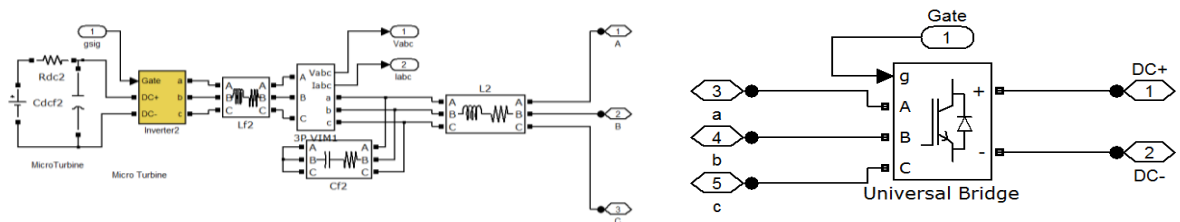
微電網中總共十台機，採用 MATLAB/Simulink 建模如圖六，綠色部分為發電機，藍色部分為變壓器，黃色部分為斷路器(circuit breaker)，紅色部分為負載，由上而下依序 Zone3、Zone2、Zone1。



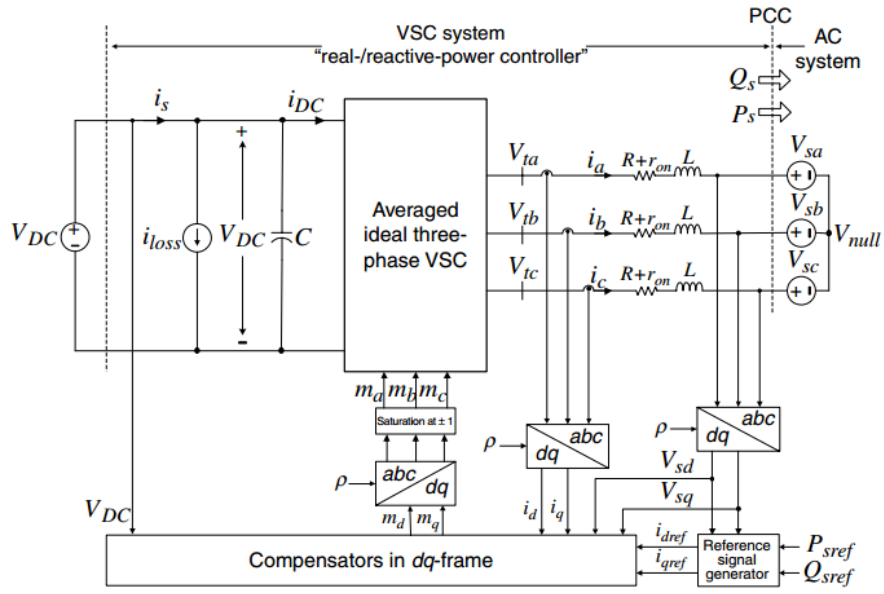
圖六、Simulink 環境下之微電網模擬系統

##### 2.發電機模型

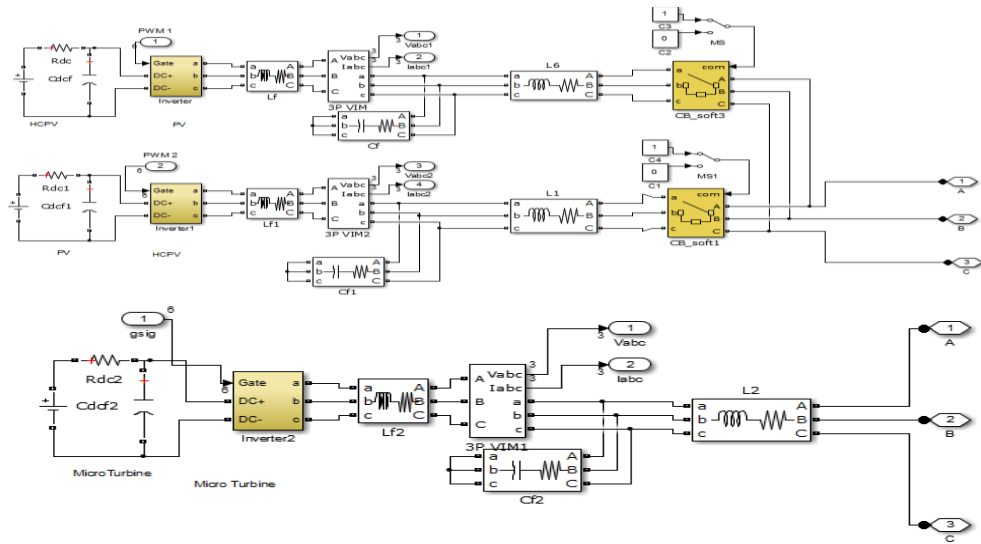
每一台發電機都視為 two-level power inverter，圖七為一台機的模型，圖八為系統方塊圖，圖九至圖十一為各區發電機的连接方式。



圖七、Inverter 模型

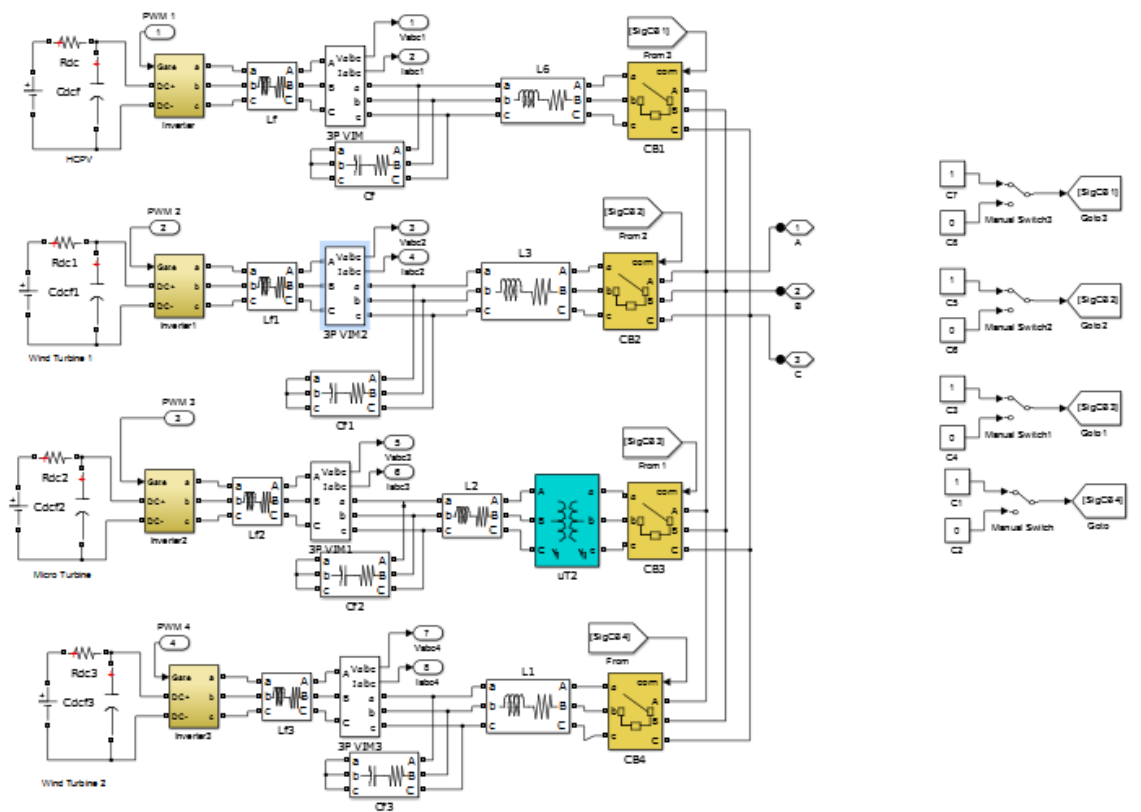


圖八、Inverter 方塊圖

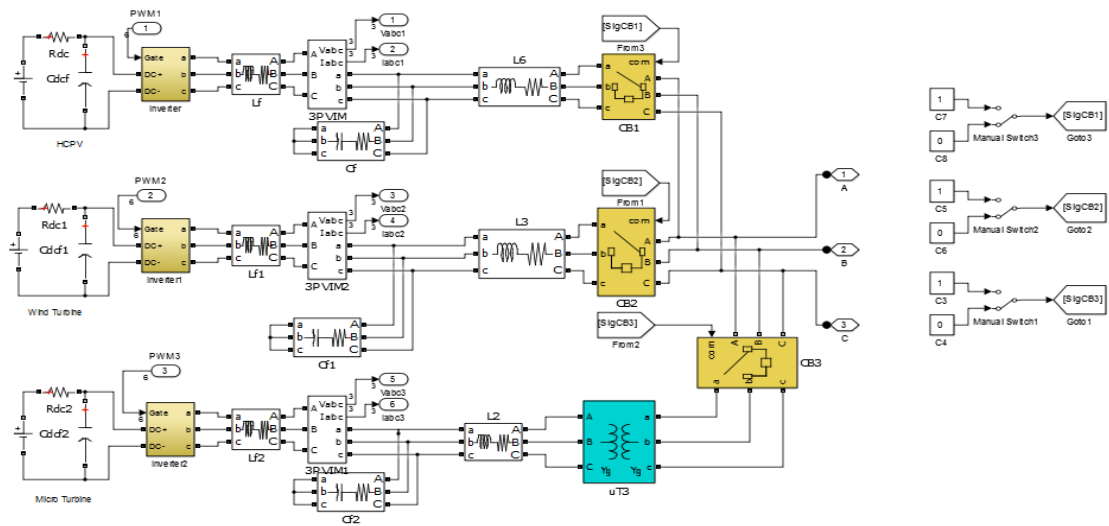


圖九、區域一





圖十、區域二



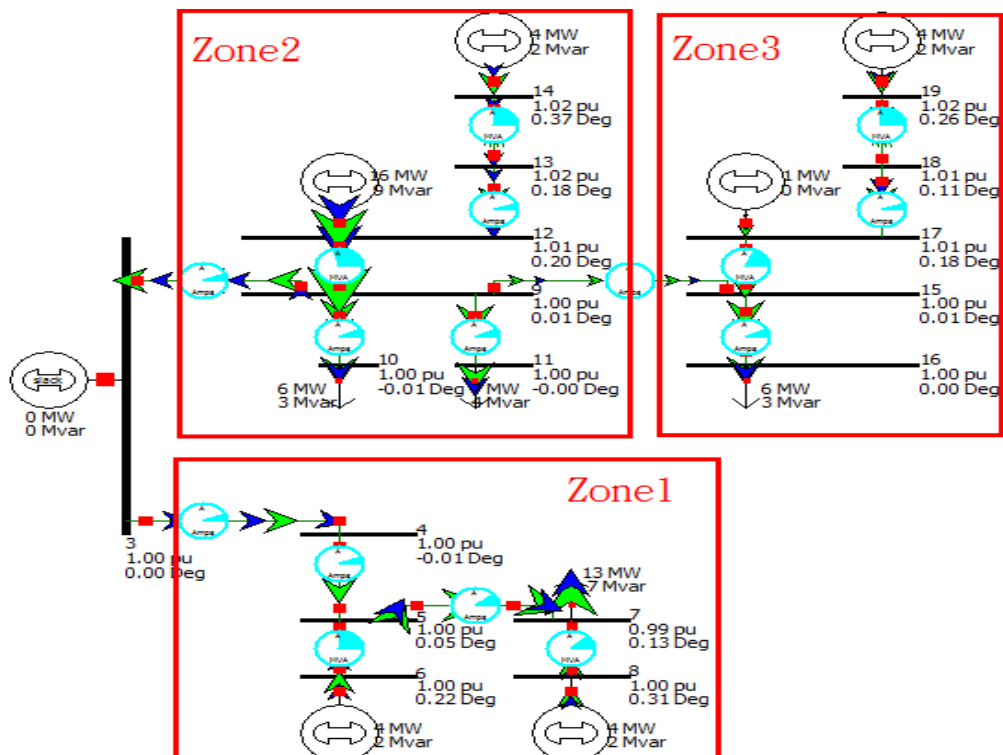
圖十一、區域三

## 五、微電網穩態分析

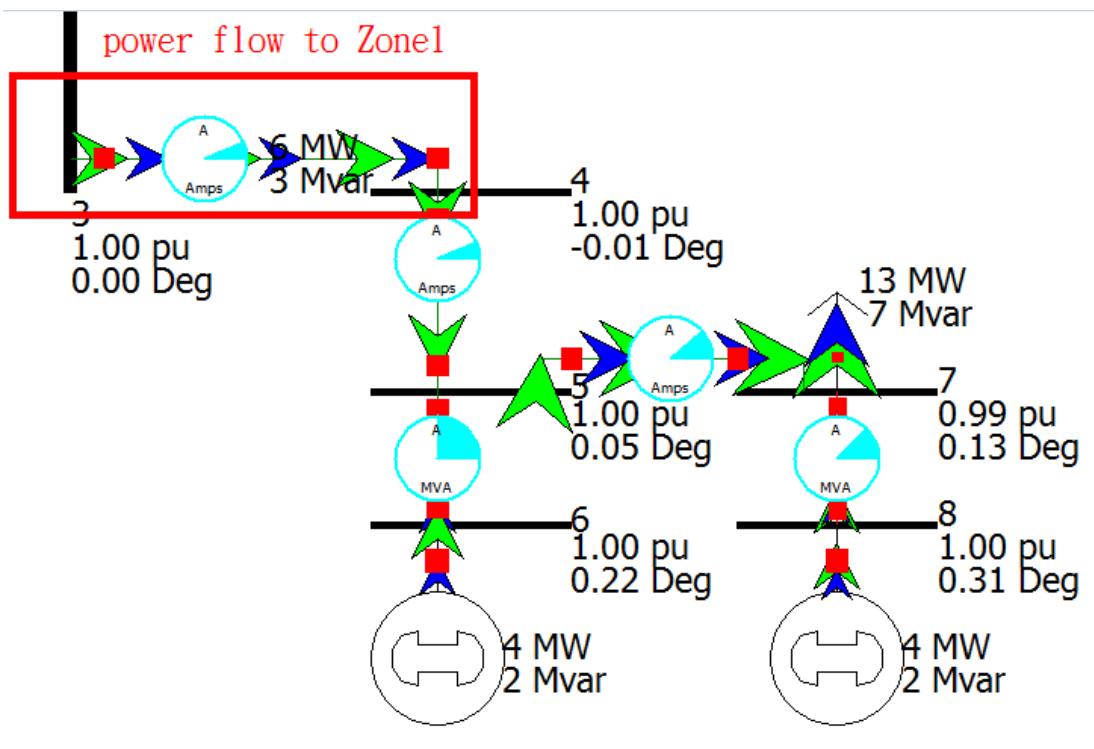
### (一)穩態潮流分析

為分析核研所微電網之穩態潮流分配以及進行暫態模擬所需之穩態初始工作點，我們先將 PV buses 當做 PQ buses，PQ 值設為：單一裝置容量  $\times$  (總負載容量/總裝置容量)，並將併網端匯流排設為 Slack bus，借助 Matpower 解出穩態潮流工作點。其間盡量將 Slack bus 之潮流注入量調整為零，以模擬微電網系統孤島狀態。

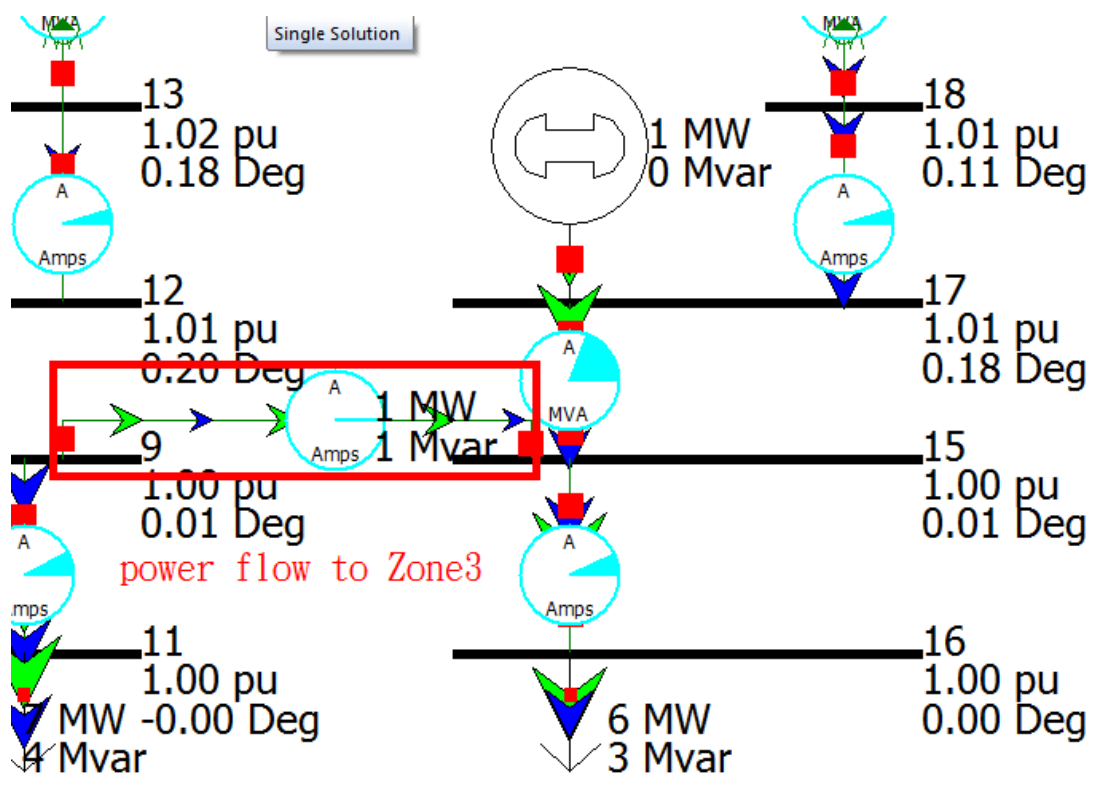
得到 PV buses 工作點之後，接著採用電力系統模擬軟體 PowerWorld 進行微電網之潮流計算。所得之實虛功潮流分布如圖十二所示，圖中綠色箭頭為實功潮流，藍色箭頭為虛功潮流，區域間的潮流如圖十三和圖十四。透過持續調整各分散式發電源之輸出，直至左方代表併聯市電之無限大匯流排潮流輸出/輸入皆為零，及代表整個微電網系統可在此潮流分配下孤島穩定運轉。



圖十二、微電網穩態潮流分布



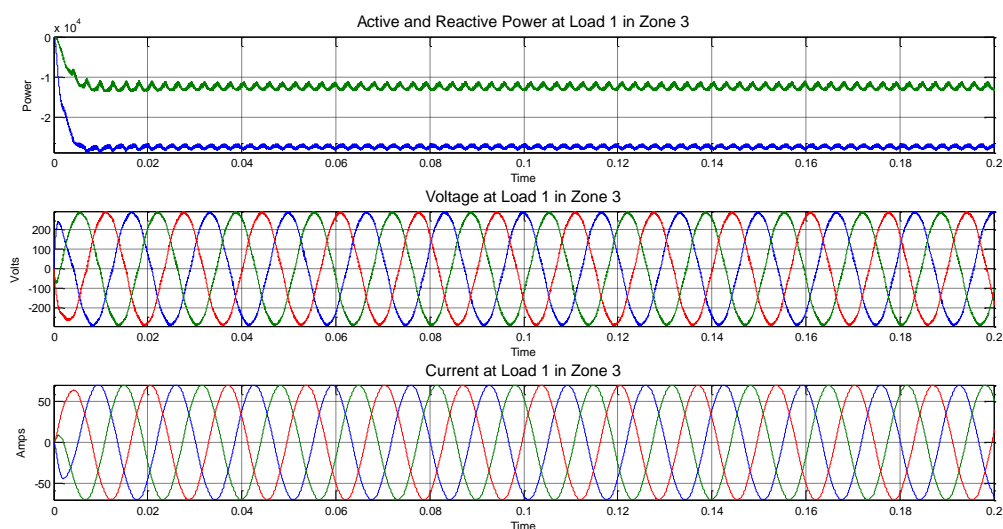
圖十三、Power flow to Zone1 (P=27.5kW , Q=15kvar)



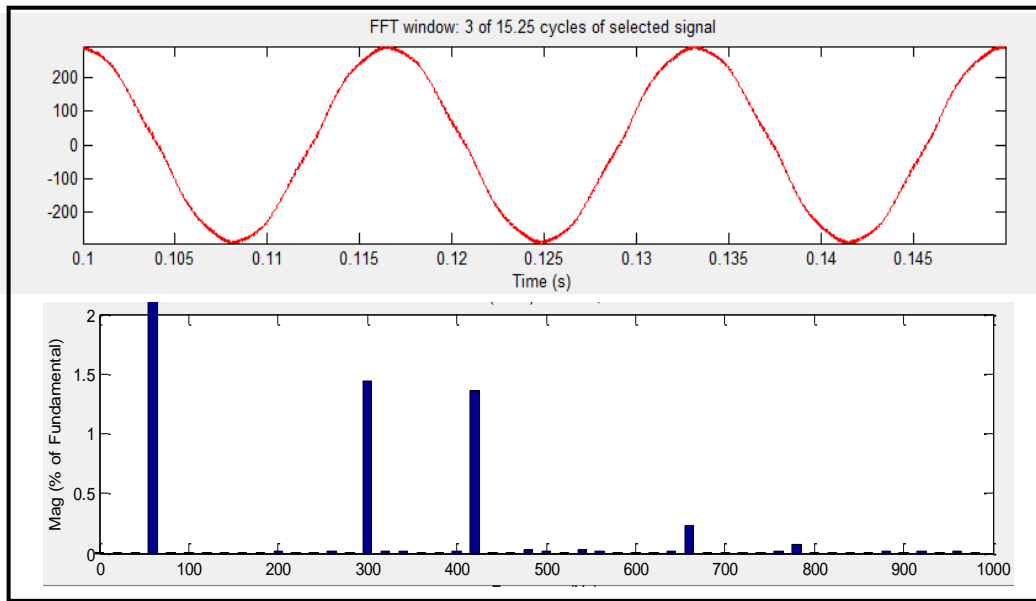
圖十四、Power flow to Zone3 (P=6.5kW , Q=3.5kvar)

## (二)穩態諧波分析

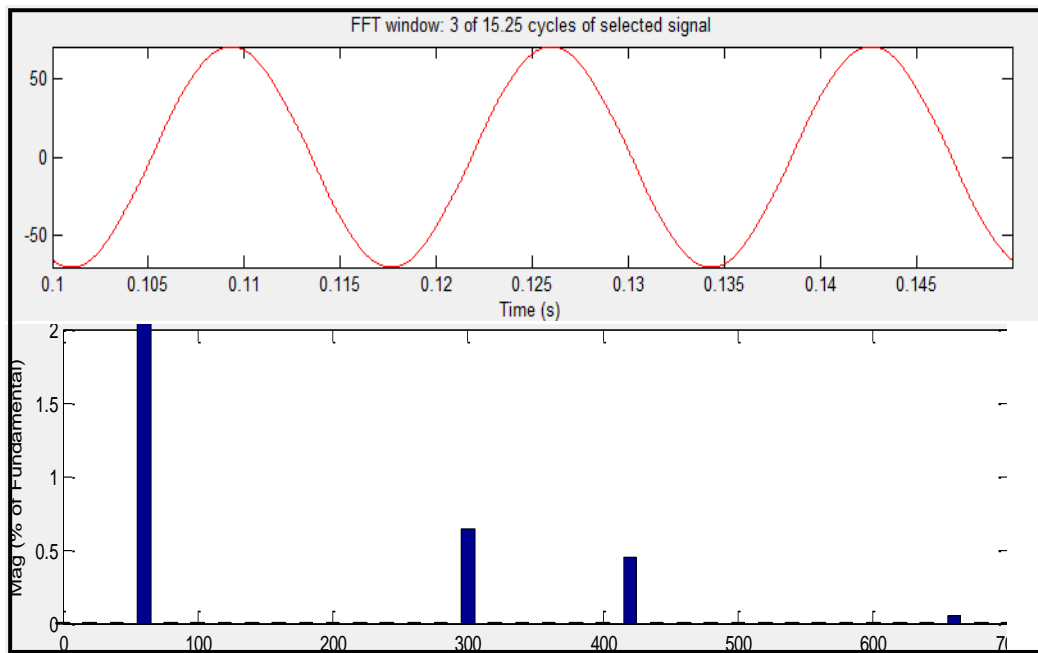
以區域三的負載 L3 為例，其電壓電流和潮流實虛功如圖十五，相電壓、相電流與實功波形各別之諧波分析則列於圖十六、十七及十八。由結果可觀察到，電壓之五、七次諧波成份皆在 1.5% 以下，電流之五、七次諧波則在 1% 以下，足見此微電網之設計符合電力設備及負載之併接要求。



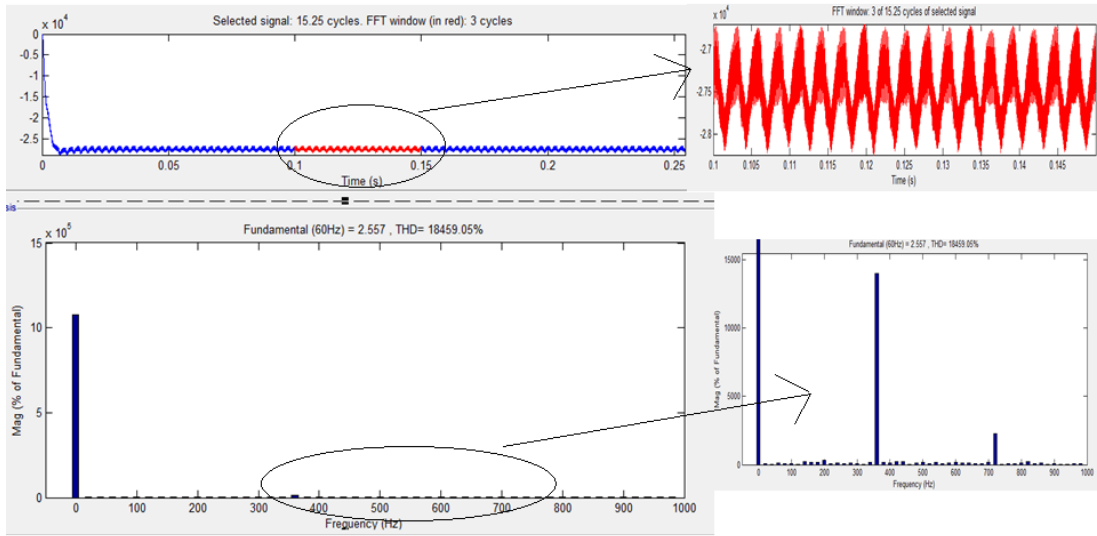
圖十五、負載 L3 之電壓電流和實(藍)虛(綠)功



圖十六、負載相電壓及諧波分析



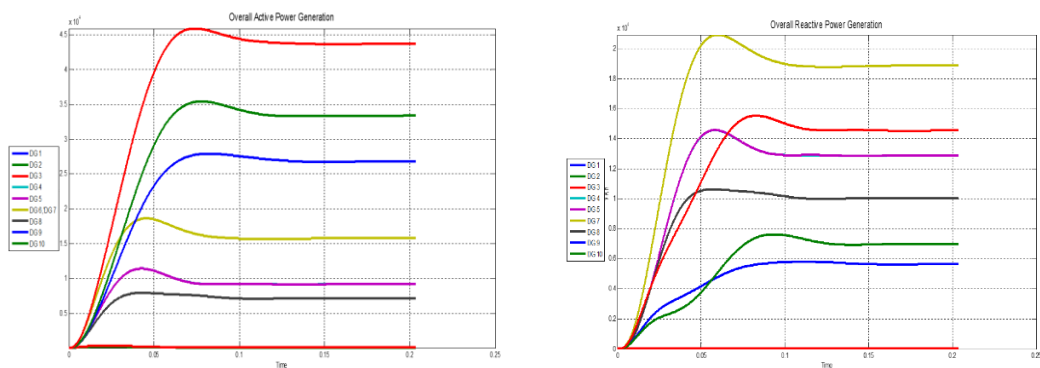
圖十七、負載相電流及諧波分析



圖十八、負載實功波形及對應諧波分析

### (三)穩態實虛功分配情形

各分散式發電源於微電網啟動後之實虛功輸出呈現如圖十九。各發電源僅具 $P-f$ 和 $Q-V$ 垂降控制，故可如模擬結果觀察到，微電網確實可達成穩定運轉，但各分散式發電源無法按照額定分攤負載潮流，僅根據距離負載遠近達到較近之穩定平衡點。



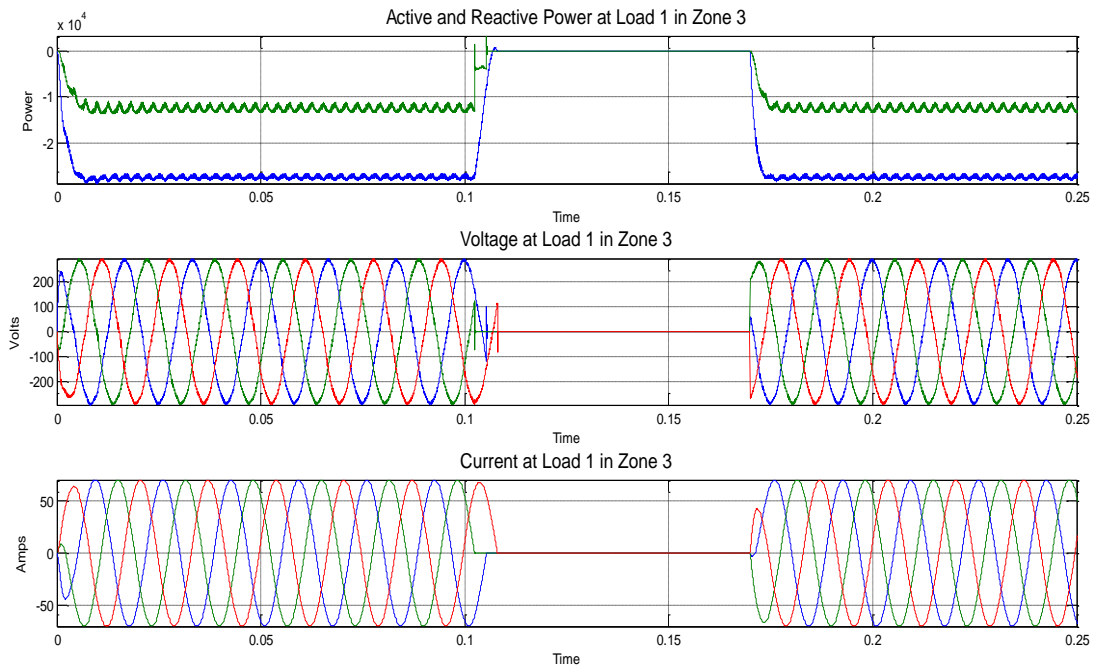
圖十九、微電網啟動後之實虛功輸出

## 六、微電網暫態模擬

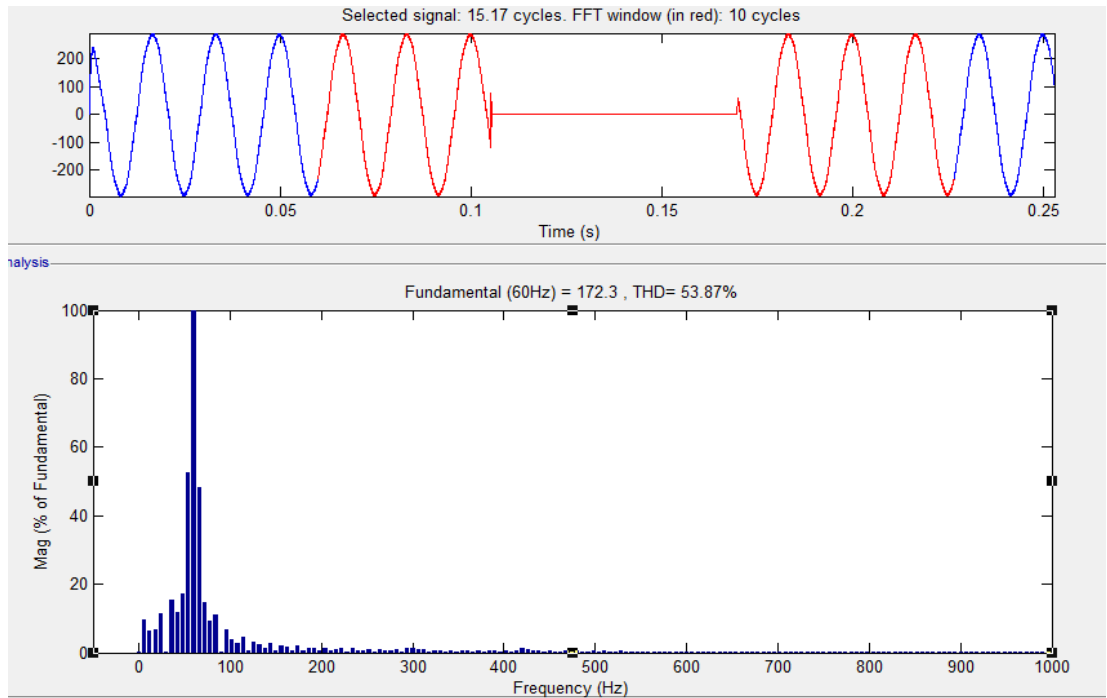
解析得微電網穩態工作點後，進行系統之負載變化以及三相短路暫態模擬。

### (一)負載變化

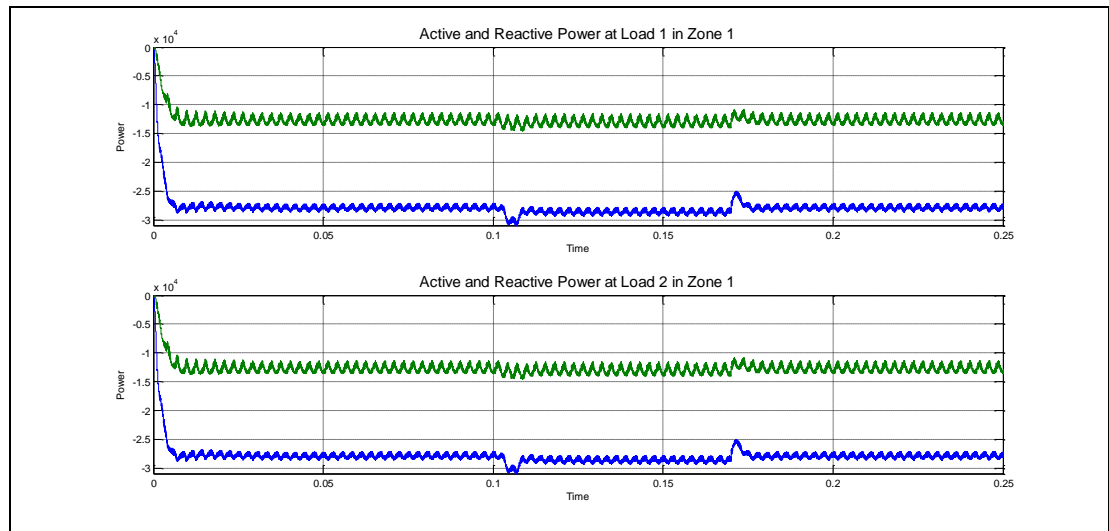
以區域三為例，當負載 L3 斷開於 0.1 秒，重新連接於 0.17 秒，各區域負載端的實虛功與電壓電流，如圖二十至圖二十四所示；發電源實虛功輸出呈現如圖二十五。由模擬可見，所建微電網模擬系統於暫態負載變化下可穩定運轉。



圖二十、L3 之實虛功與電壓電流

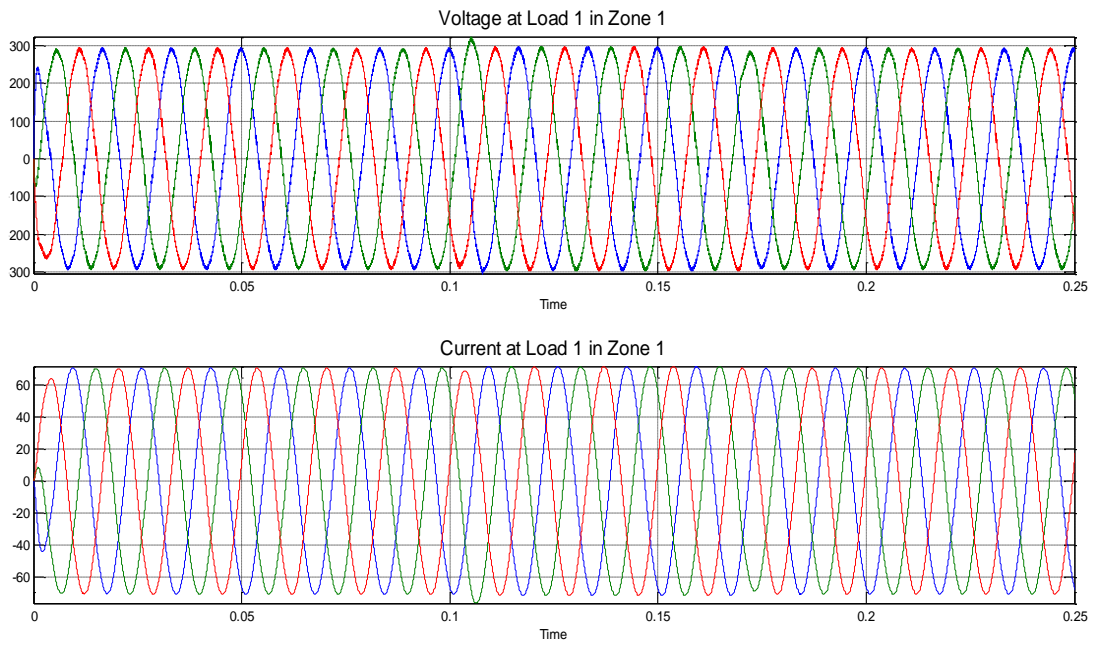


圖二十一、L3 之電壓諧波分析

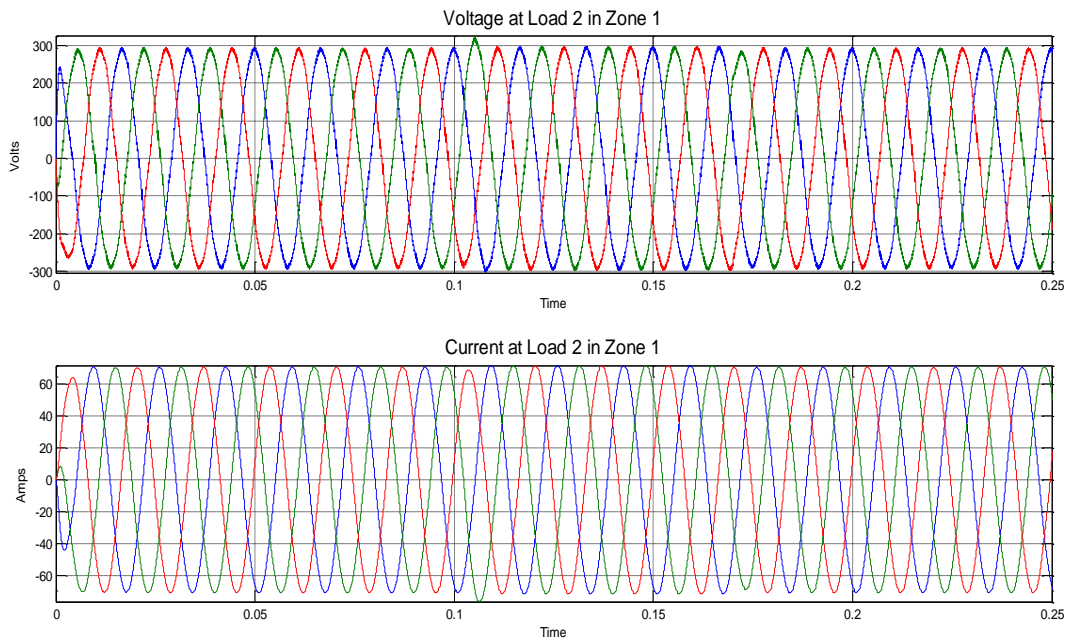


圖二十二、區域一 L1-1 和 L1-2 之實虛功

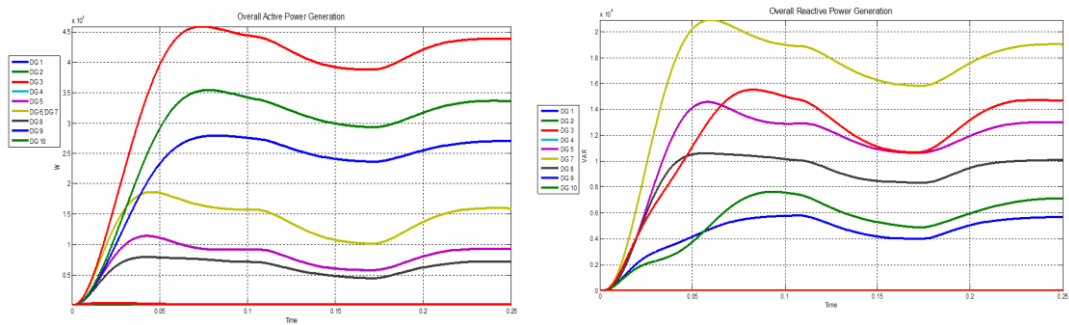




圖二十三、L1-1 之電壓電流



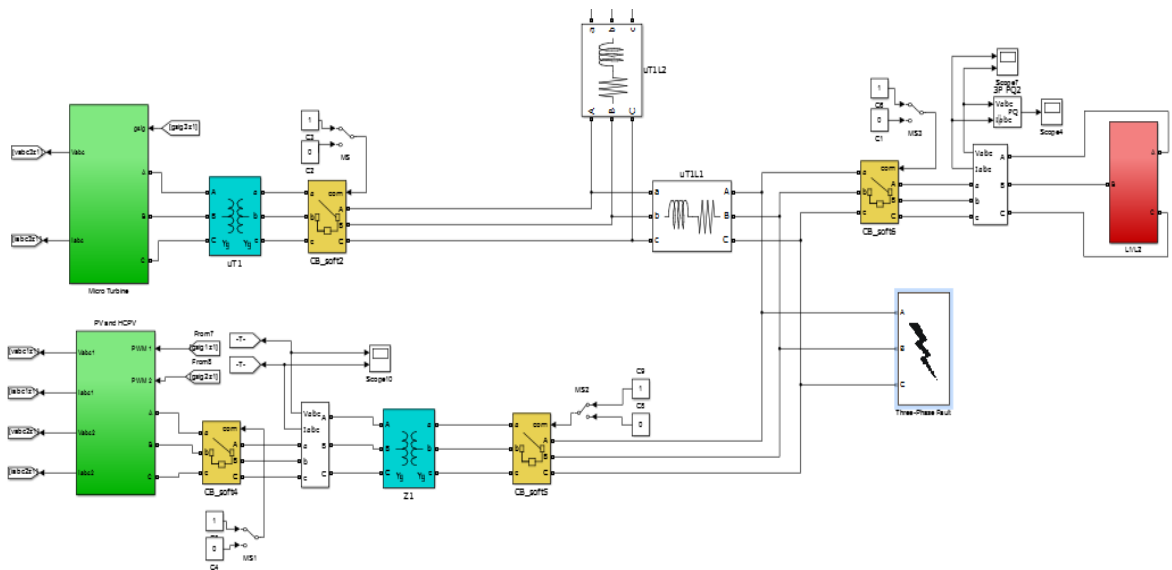
圖二十四、L1-2 之電壓電流



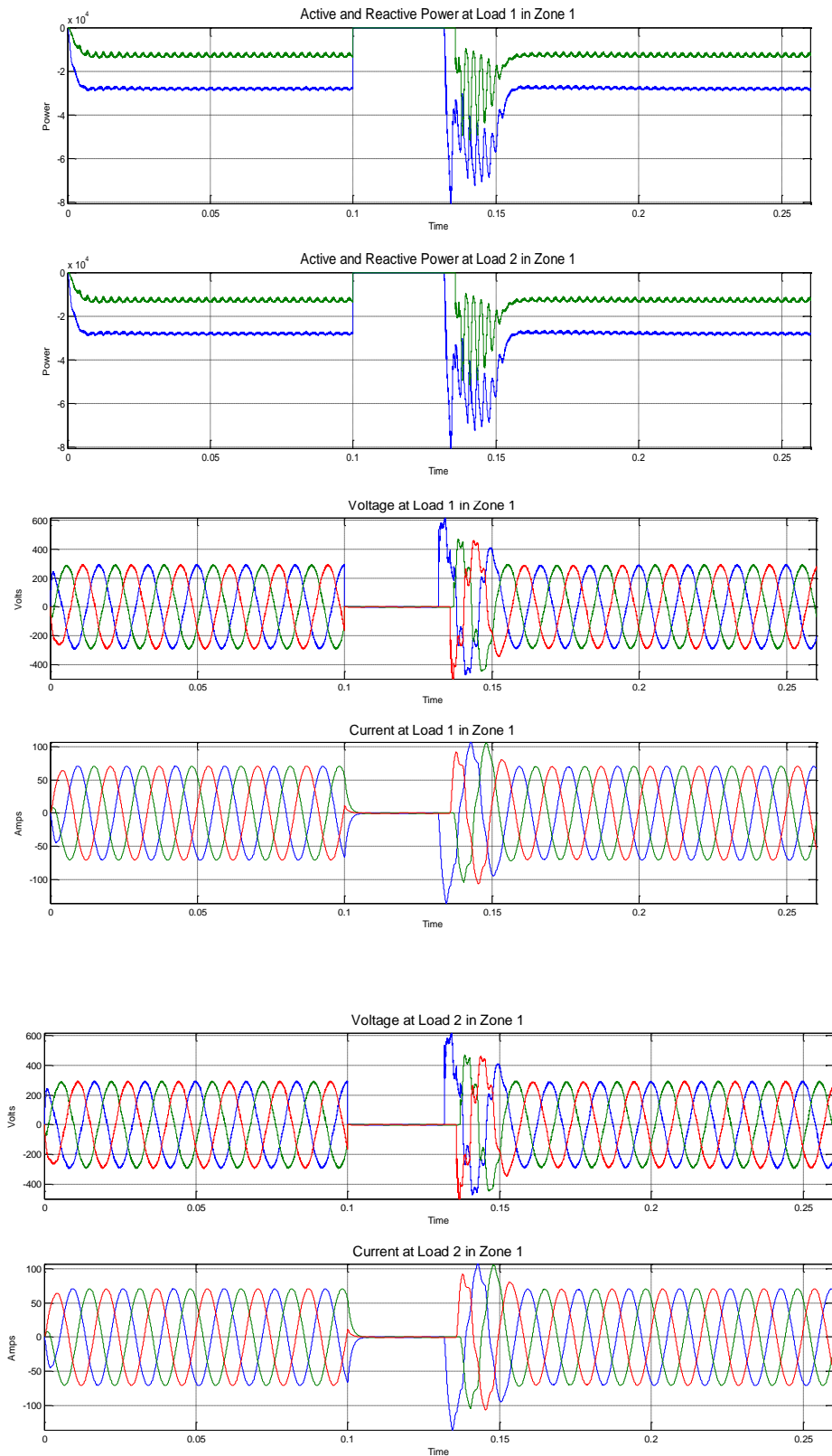
圖二十五、第三供電區域負載變化下之實虛功輸出

(二)三相短路

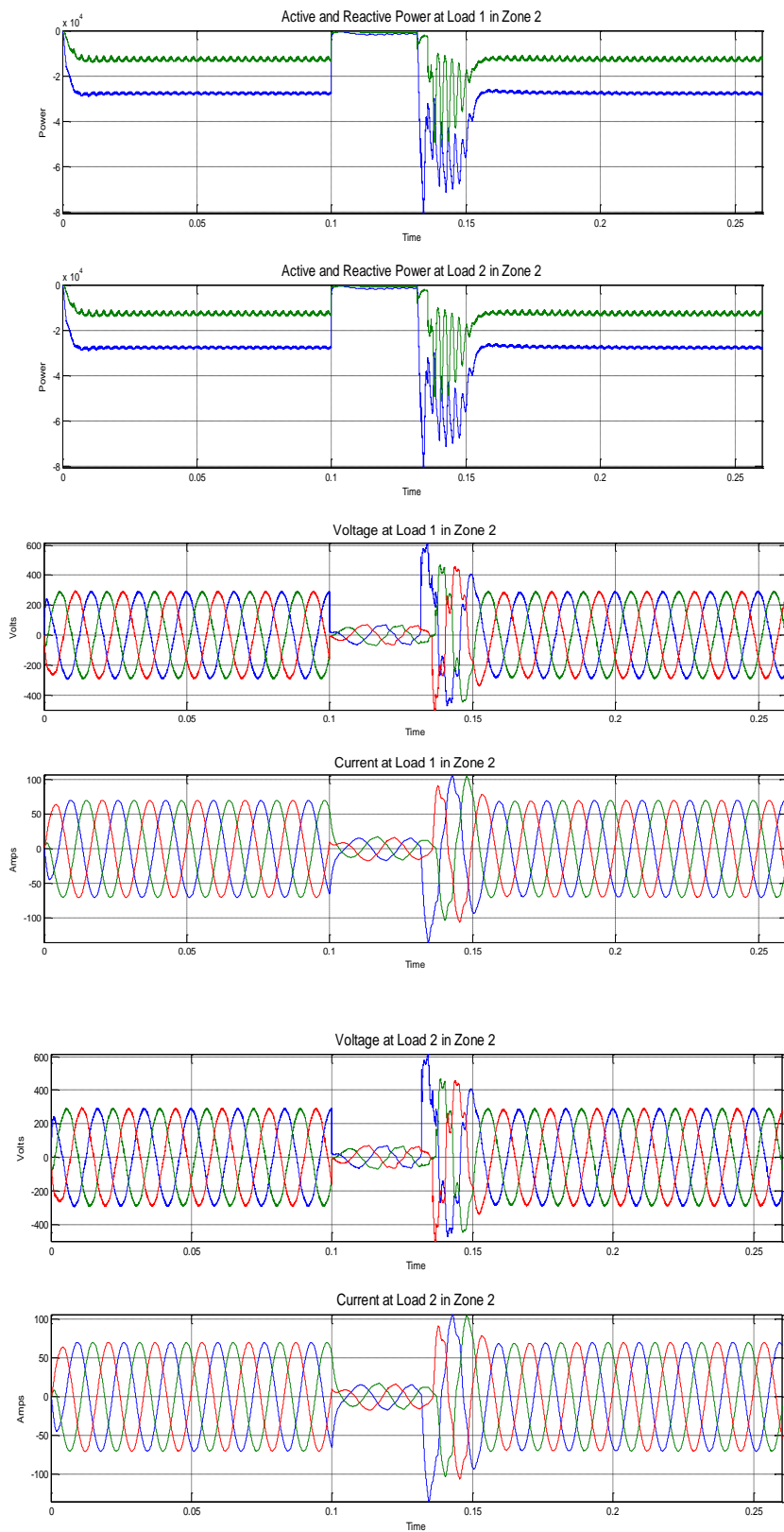
假設故障點發生於區域一，如圖二十六所示，並且於 0.135 秒內清除，觀察各區域負載端實虛功和電壓電流變化，如圖二十七至圖二十九所示，並且觀察各分散式電源故障前、故障中和故障後的實虛功分配情形，如圖三十，可以發現在故障清除之後，系統會恢復至原本的穩態平衡點。



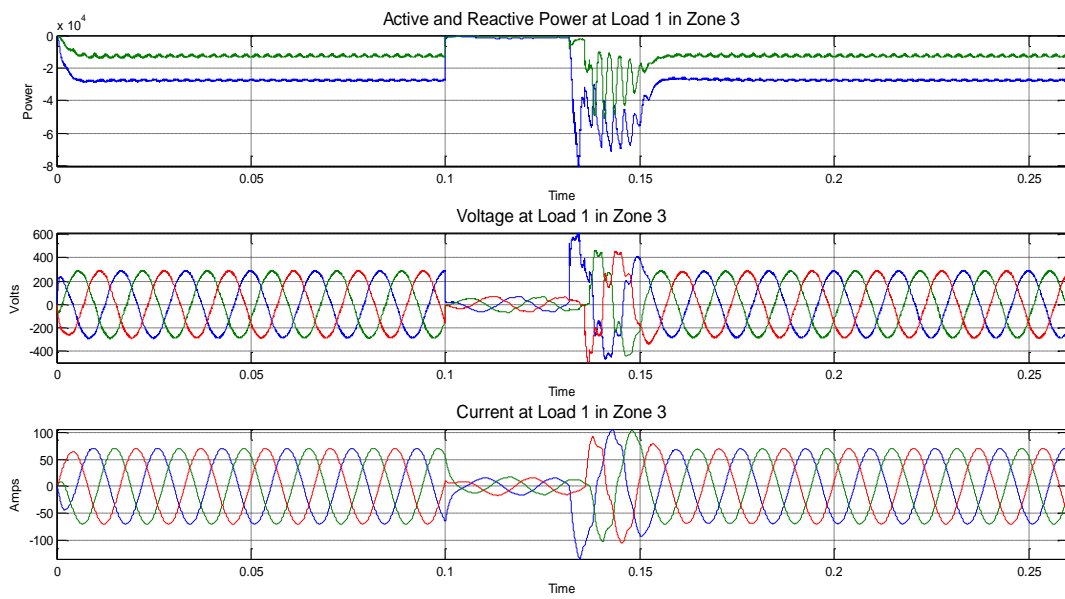
圖二十六、故障發生點



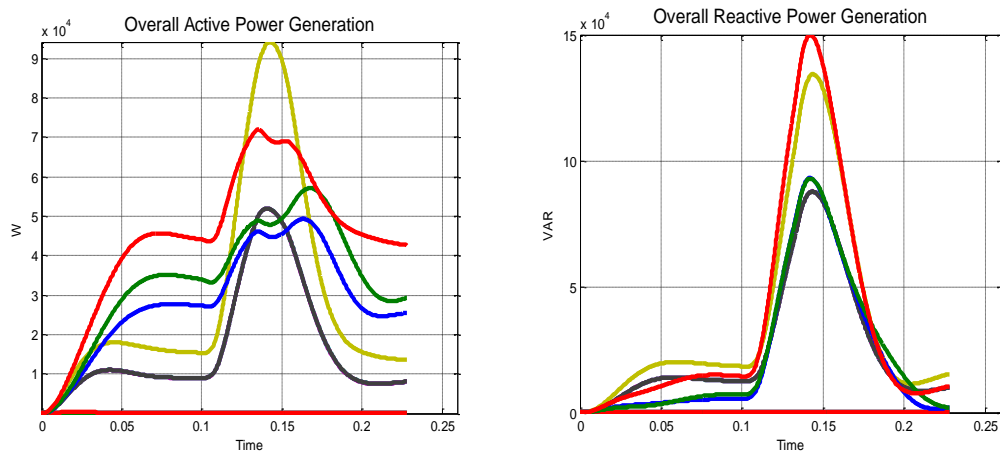
圖二十七、區域一 L1-1、L1-2 之實虛功和電壓電流



圖二十八、區域二 L2-1、L2-2 之實虛功和電壓電流



圖二十九、區域三 L3 之實虛功和電壓電流

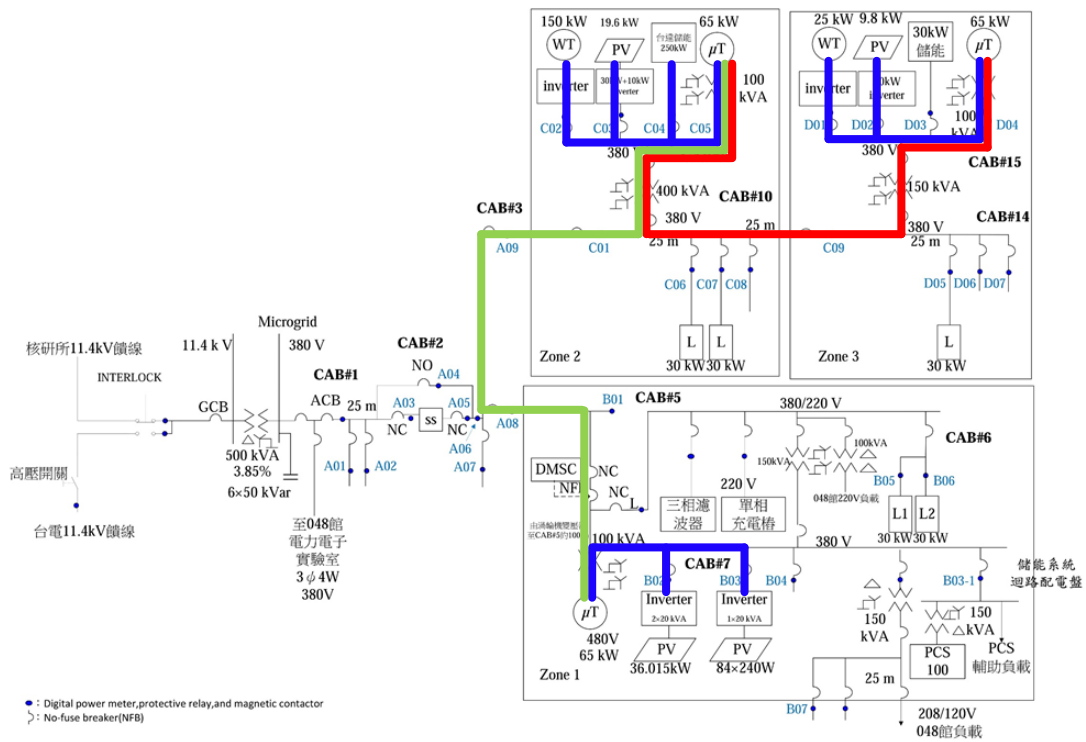


圖三十、分散式電源的實虛功分配

## 七、啟動共識控制

### (一)分散式電源間的通訊建立方式

所建微電網通訊架構如圖三十一所示，由於每區都有微渦輪發電機，假設每區中的其它電源皆與微渦輪發電機建立通訊，並在區域一微渦輪機及區域二微渦輪機之間建立通訊，同時在區域二微渦輪機與區域三微渦輪機之間建立通訊。值得注意的是，由於具共識機制控制之驗證需要較長之系統模擬時間以觀察潮流收斂結果，本節同時完成開發 OPAL\_RT 即時模擬平台之模擬程式。透過即時模擬平台之協助，即可有效於即時框架下完成複雜微電網之未簡化模型動態模擬。

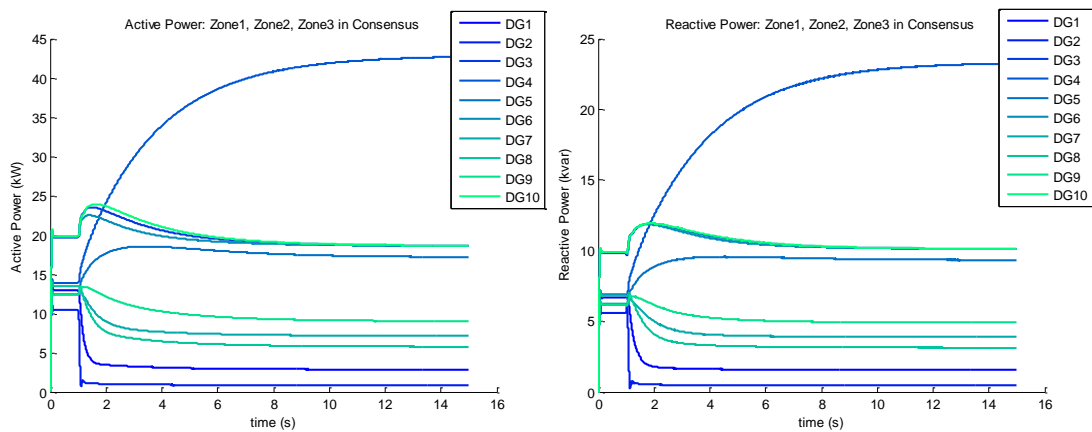


圖三十一、微電網中之共識通訊架構

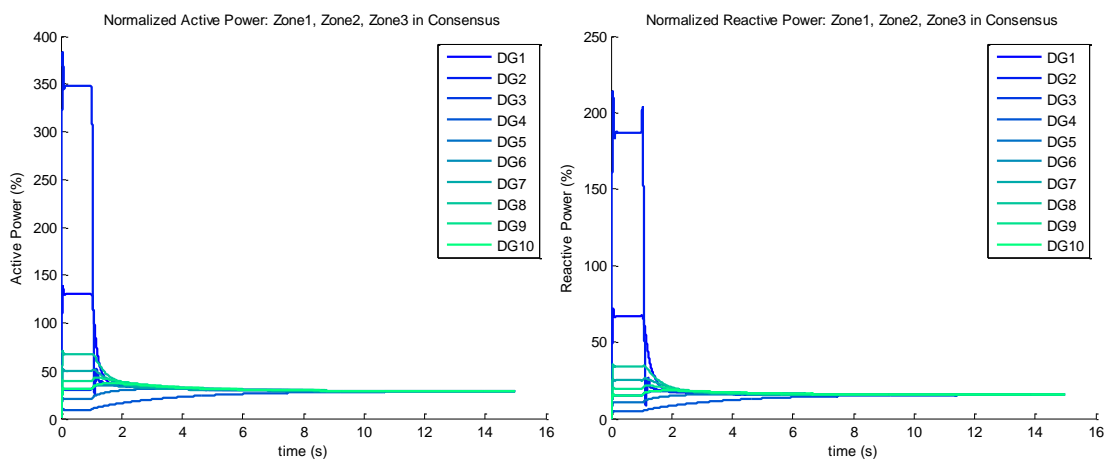
## (二)共識通訊下的實虛功配情形

### 1.完整的通訊

微渦輪機一、二間及二、三間建有共識通訊，於一秒時啟動共識控制，模擬結果如圖三十二所示。其中 DG1~3 屬於區域三，DG4~7 屬於區域二，DG8~10 則屬於區域一。可見各分散式發電源之實、虛功輸出即按照其額定分擔負載潮流。為更直接觀察所提控制之有效性，若將各分散式發電源之實、虛功輸出分別除以該機額定如圖三十三所示。可見共識控制啟動前部分發電源實際上大幅度過載，而控制啟動後各發電源輸出於其額定之占比即收斂至同一值，故可知所提控制可有效使所有分散式發電源按照其額定分擔負載潮流。



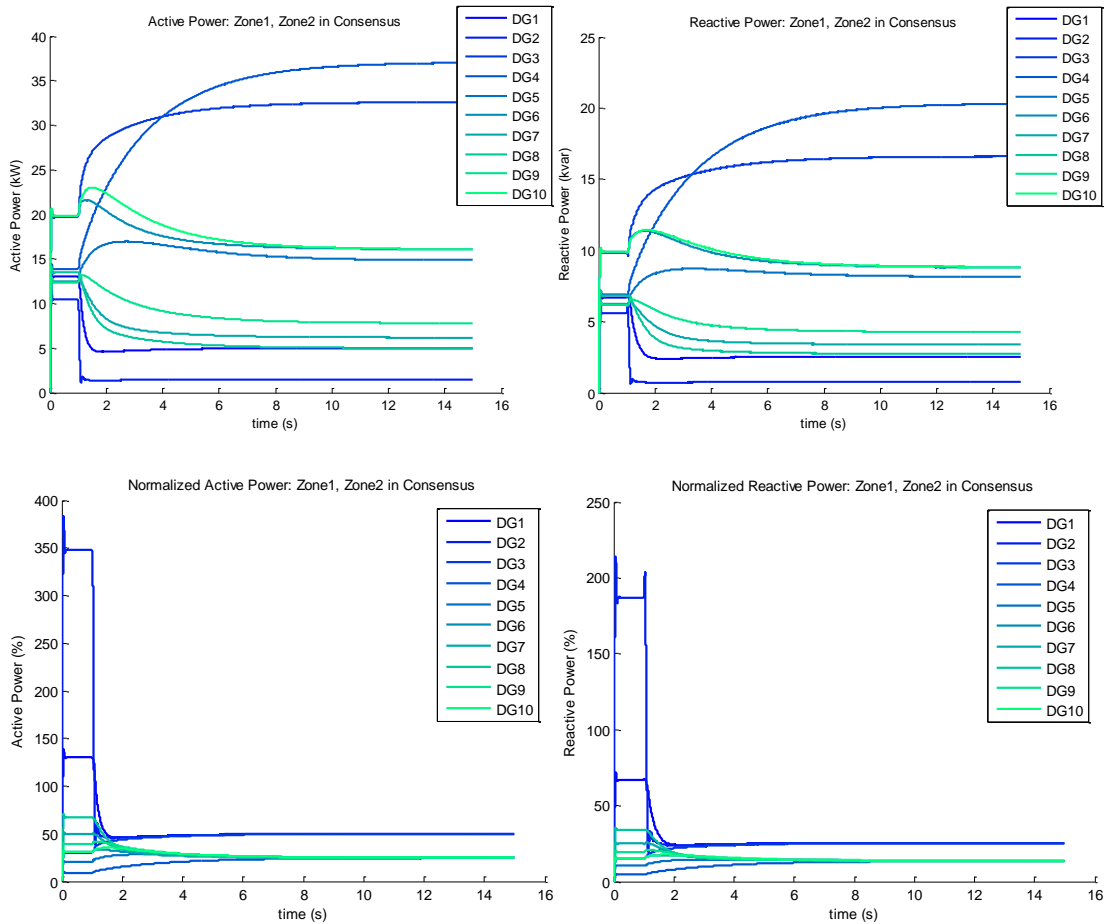
圖三十二、區域一、二及三間皆啟動通訊下之實虛功輸出



圖三十三、區域一、二及三間皆啟動通訊下發電源輸出/額定占比

## 2. 僅區域一與區域二間有通訊

關閉區域二與區域三間之共識通訊，如圖三十四可見各發電源之占比最終分為兩群，區域一、二收斂至同一占比，區域三則獨自達成區域內之共識。

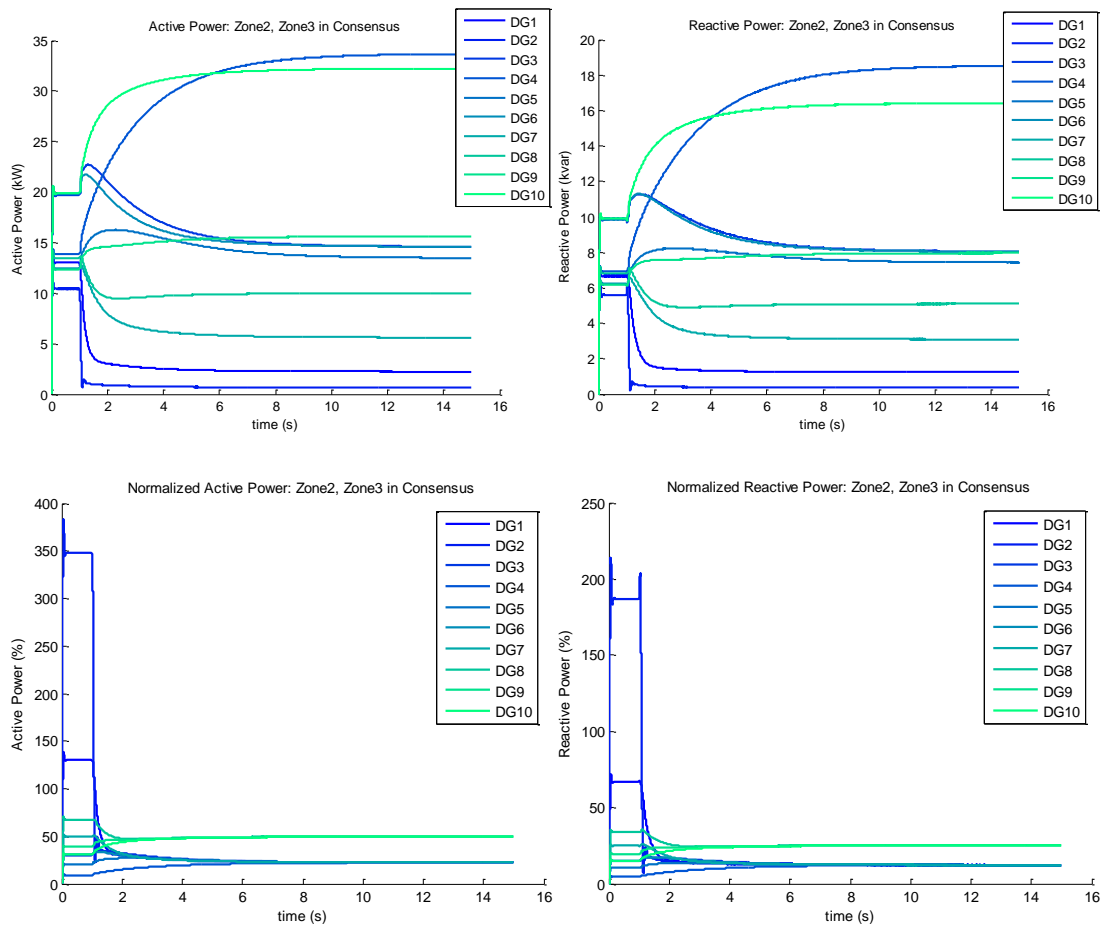


圖三十四、僅區域一及區域二間有通訊下之實虛功輸出及占比

## 3. 僅區域二與區域三有通訊

關閉區域一與區域二間之共識通訊，如圖三十五所示各分散式發電源占比再度分為兩群，區域一內獨自達成共識，區域二、三則達到同一占比。

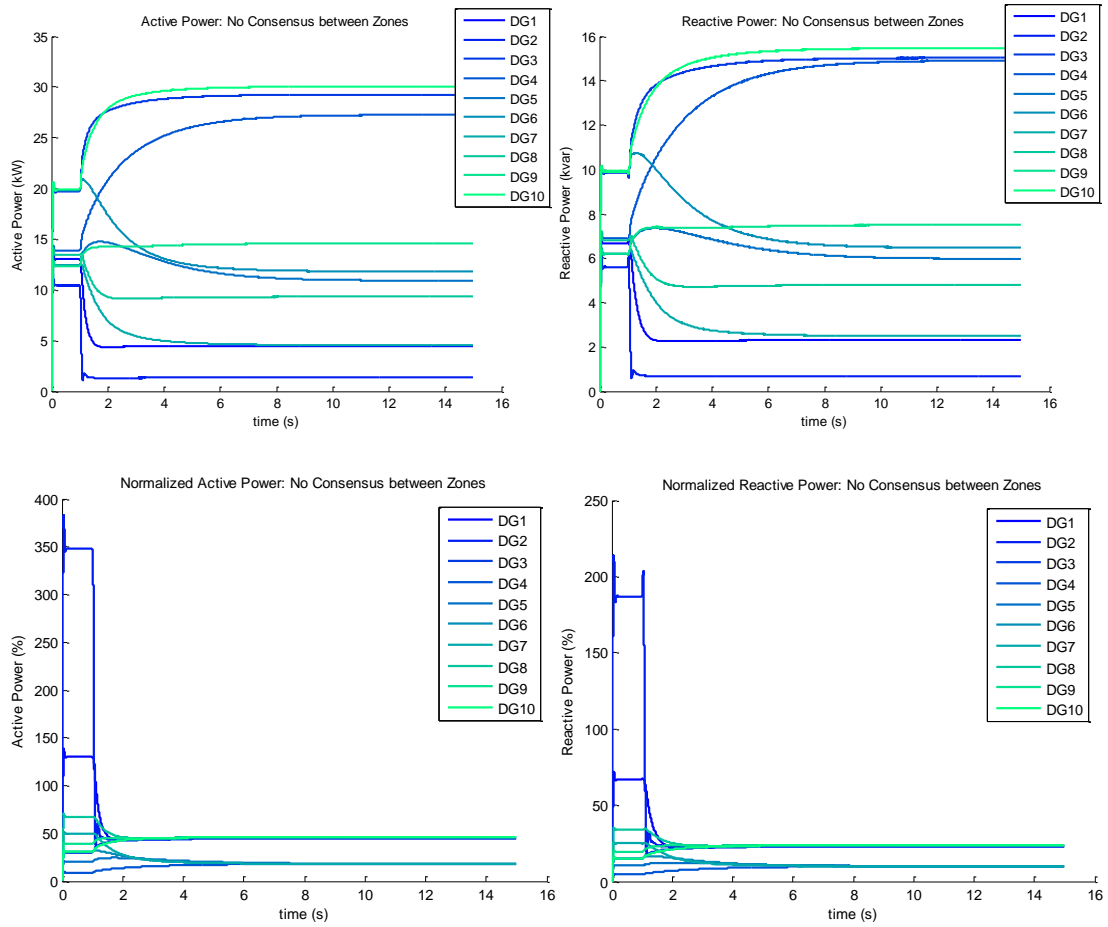




圖三十五、僅區域二、三間有通訊下之實虛功輸出及占比

#### 4. 區域間無通訊

僅區域內啟動共識控制，區域間僅維持傳輸線連接而不啟動共識通訊。如圖三十六所示，各分散式發電源輸出於其額定之占比最終收斂為三群，即分別代表區域一、二及三內之所有發電源。



圖三十六、各區域間無通訊下之實虛功輸出及占比

### 參、主要發現與結論

本計畫利用核研所提供之實際微電網參數，建立微電網動態模擬平台，透過穩態潮流分析軟體確認，系統可在預期之潮流平均分配目標下穩定孤島運轉。本計畫應用多重代理人共識控制演算法，提出共識型垂降控制法則，完成電源轉換器間的自主式實功與虛功分配；利用各電源轉換器間之稀疏通信網絡，克服現有的垂降控制方法之缺點；特別是當電網的線路阻抗為有損與均勻 R/X 比率，或甚至純電阻性時，共識垂降控制仍舊有效於自主實際和功率分配。此外，本控制方法之閉迴路穩定性，可透過非線性系統理論的能量函數來推導驗證。首先進行 MATLAB/Simulink 環境下之系統暫態模擬，確認微電網全黑啟動、負載劇烈變化下皆可穩定運轉。此外亦完成微電網各關鍵聯接處發生故障事件之暫態模擬，即確認  $P-f/Q-\dot{V}$  垂降控制可有效運用於核研所微電網系統，改善微型電網之運轉可靠度與供電品質。惟因所提之具共識機制控制尚未啟動，由報告章節五之微電網穩態潮流分析可見，各分散式發電源僅穩定運轉而未達成期望之精確潮流分配。其後開發 OPAL\_RT 即時模擬平台之模擬程式，同時啟動各供電區域內及區域間之具共識機制控制。由報告章節七之微電網動態模擬即可見，所提控制可達成完整微電網系統之精確潮流分配。此外，亦可依據共識通訊之建立方式將潮流分配目標分群達成。

## 肆、参考文献

- [1] R. H. Lasseter, J. H. Eto, B. Schenkman, J. Stevens, H. Vollkommer, D. Klapp, E. Linton, H. Hurtado, and J. Roy, "CERTS microgrid laboratory test bed," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, pp. 325–332, Jan. 2011.
- [2] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, and B. Banerjee, "Control of distributed UPS systems," in Proc. *IEEE PESC.*, 1994, pp. 197–204.
- [3] A. Engler and N. Sultanis, "Droop control in LV-grids," in Proc. *IEEE FPS*, 2005, pp. 1–6.
- [4] Q. C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, pp. 1259–1267, Apr. 2011.
- [5] C. K. Sao and P. W. Lehn, "Autonomous load sharing of voltage source converters," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, pp. 1009–1016, Apr. 2005.
- [6] K. D. Brabandere, B. Bolsens, J. V. d. Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, "A voltage and frequency droop control method for parallel inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, pp. 1107–1115, Jul. 2007.
- [7] J. W. Simpson-Porco, F. Dorfler, and F. Bullo, "Voltage stabilization in microgrid using quadratic droop control," in Proc. *IEEE CDC*, 2013, pp. 7582–7589.
- [8] C. T. Lee, C. C. Chu, and P. T. Cheng, "A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, pp. 1980–1993, Apr. 2013.
- [9] K. Walve, "Modeling of power system components at severe disturbance," *CIGRE Report*, 38-18, 1986.
- [10] J. F. Gronquist, W. A. Sethares, F. L. Alvarado, and R. H. Lasseter, "Power oscillation damping control strategies for FACTS devices using locally measurable quantities," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, pp. 1598–1605, Aug. 1995.
- [11] M. Ghandhari, G. Andersson, and I. A. Hiskens, "Control Lyapunov functions for controllable series devices," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, pp. 689–694, Nov. 2001.
- [12] R. Mihalic and U. Gabrijel, "A structure-preserving energy function for a static series synchronous compensator," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, pp. 1501–1507, Aug. 2004.
- [13] S. Y. Ruan, G. J. Li, B. T. Ooi, and Y. Z. Sun, "Power system damping from energy function analysis implemented by voltage-source-converter stations," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1353–1360, Aug. 2008.
- [14] L. Y. Lu and C. C. Chu, "Decentralized P-f and Q-Vdot droop and tie-line flow control in autonomous micro-grids," *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, submitted 2014.
- [15] R. Olfati-Saber, J. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," *Proc. IEEE*, vol. 95, pp. 215–233, Jan. 2007.
- [16] W. Ren, R. W. Beard, and E. M. Atkins, "Information consensus in multivehicle cooperative control," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 27, pp. 71–82, Apr. 2007.
- [17] A. E. Bryson, *Dynamic Optimization*. Addison Wesley Longman, Massachusetts, U.S.A., 1999.
- [18] A. Arenas, A. Diaz-Guilera, J. Kurths, Y. Moreno, and C. Zhou, "Synchronization in complex networks," Arxiv preprint arXiv: 0805.2976v3,

- 2008.
- [19] M. E. Baran and I. M. El-Markabi, "A multiagent-based dispatching scheme for distributed generators for voltage support on distribution feeders," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, pp. 52–59, Feb. 2007.
  - [20] B. A. Robbins, C. N. Hadjicostis, and A. D. Dominguez-Garcia, "A two-stage distributed architecture for voltage control in power distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp. 1470–1482, May 2013.
  - [21] S. Yang, S. Tan, and J.-X. Xu, "Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp.4416–4426, Nov. 2013.
  - [22] Z. Zhang and M. Y. Chow, "Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, pp. 1761–1768, Nov.2012.
  - [23] Y. Xu, W. Liu, and J. Gong, "Stable multi-agent-based load shedding algorithm for power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, pp.2006–2014, Nov. 2011.
  - [24] S. T. Cady and A. D. Dominguez-Garcia, "Distributed generation control of small-footprint power systems," in Proc. *IEEE NAPS.*, 2012, pp. 1–6.
  - [25] N. Ainsworth and S. Grijalva, "A line weighted frequency droop controller for decentralized enforcement of transmission line power flow constraints in inverter-based networks," in Proc. *IEEE PES GM*, 2013, pp. 1–5.
  - [26] H. Liang, B. J. Choi, W. Zhuang, and X. Shen, "Stability enhancement of decentralized inverter control through wireless communications in microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, pp. 321–331, Mar. 2013.
  - [27] J. W. Simpson-Porco, F. Dorfler, and F. Bullo, "Synchronization and power sharing for droop-controlled inverters in islanded microgrids,"*Automatica*, vol. 49, pp. 2603–2611, Sept. 2013.
  - [28] Y. Xu, W. Zhang, W. Liu, X. Wang, F. Ferrese, C. Zang, and H. Yu, "Distributed subgradient-based coordination of multiple renewable generators in a microgrid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, pp. 23–33, Jan. 2014.
  - [29] W. Zhang, Y. Xu, W. Liu, F. Ferrese, and L. Liu, "Fully distributed coordination of multiple DFIGs in a microgrid for load sharing," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, pp. 806–815, Jun. 2013.
  - [30] J. W. Simpson-Porco, F. Dorfler, F. Bullo, Q. Shafiee, and J. M. Guerrero, "Stability, power sharing, & distributed secondary control in droop-controlled microgrids," in Proc. *IEEE Smart Grid Comm*, 2013, pp. 672–677.
  - [31] F. Dorfler, M. Chertkov, and F. Bullo, "Synchronization in complex oscillator networks and smart grids," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, pp. 2005–2010, Feb. 2013.
  - [32] H. D. Chiang and C. C. Chu, "A systematic search method for obtaining multiple local optimal solutions of nonlinear programming problems," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 43, pp. 99–109, Feb. 1996.
  - [33] H. D. Chiang and R. Jean-Jumeau, "Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2: solution algorithms and numerical results," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, pp. 1568–1574, Jul. 1990.
  - [34] G. Diaz and C. Gonzalez-Moran, "Fischer-Burmeister-based method for calculating equilibrium points of droop-regulated microgrids," *IEEE Trans.*

- Power Syst.*, vol. 27, pp. 959–967, May 2012.
- [35] H. D. Chiang, Y. Tada, and H. Li, *Power System On-Line Transient Stability Assessment*. John Wiley & Sons, Inc., 2001. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/047134608X.W6220.pub2>
- [36] C. C. Chu and H. D. Chiang, “Constructing analytical energy functions for lossless network-reduction power system models: Framework and new developments,” *Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 1–16, 1999.
- [37] H. G. Kwatny, A. K. Pasrija, and L. Y. Bahar, “Static bifurcations in electric power networks: loss of steady-state stability and voltage collapse,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-33, pp. 981–991, Oct. 1986.
- [38] J. Lee and H. D. Chiang, “A dynamical trajectory-based methodology for systematically computing multiple optimal solutions of general nonlinear programming problems,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, pp. 888–899, Jun. 2004.
- [39] G. Diaz, C. Gonzalez-Moran, J. Gomez-Aleixandre, and A. Diez, “Complex-valued state matrices for simple representation of large autonomous microgrids supplied by PQ and Vf generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, pp. 1720–1730, Nov. 2009.
- [40] G. Diaz, C. Gonzalez-Moran, J. Gomez-Aleixandre, and A. Diez, “Composite loads in stand-alone inverter-based microgrids-modeling procedure and effects on load margin,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, pp. 894–905, May 2010.
- [41] C. C. Chang, D. Gorinevsky, and S. Lall, “Dynamical and voltage profile stability of inverter-connected distributed power generation,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, pp. 2093–2105, Jul. 2014.
- [42] N. Ainsworth and S. Grijalva, “A structure-preserving model and sufficient condition for frequency synchronization of lossless droop inverter-based AC networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp. 4310–4319, Nov. 2013.
- [43] H. D. Chiang, *Direct Methods for Stability Analysis of Electric Power Systems: Theoretical Foundation, BCU Methodologies, and Applications*. John Wiley & Sons, U.S.A., 2011.
- [44] H. D. Chiang, C. C. Chu, and G. Cauley, “Direct stability analysis of electric power systems using energy functions: theory, applications, and perspective,” *Proc. IEEE*, vol. 83, pp. 1497–1529, Nov. 1995.
- [45] N. A. Tsolas, A. Arapostathis, and P. P. Varaiya, “A structure preserving energy function for power system transient stability analysis,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-32, pp. 1041–1049, Oct. 1985.
- [46] P. Varaiya, F. Wu, and R. L. Chen, “Direct methods for transient stability analysis of power systems: Recent results,” *Proc. IEEE*, vol. 73, pp. 1703–1715, Dec. 1985.
- [47] Y. Zou, M. H. Yin, and H. D. Chiang, “Theoretical foundation of the controlling UEP method for direct transient-stability analysis of network-preserving power system models,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 50, pp. 1324–1336, Oct. 2003.
- [48] A. R. Bergen and D. J. Hill, “A structure preserving model for power system stability analysis,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-100, pp. 25–35, Jan. 1981.
- [49] A. Bergen, D. Hill, and C. L. D. MARCO, “Lyapunov function for multimachine

- power systems with generator flux decay and voltage dependent loads,” *Int. J. Elec. Power & Energy Syst.*, vol. 8, pp. 2–10, 1986.
- [50] G. Diaz, C. Gonzalez-Moran, J. Gomez-Aleixandre, and A. Diez, “Scheduling of droop coefficients for frequency and voltage regulation in isolated microgrids,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, pp. 489–496, Feb. 2010.
- [51] G. Diaz, “Complementarity constraint approach for determining equilibria in microgrids with scarce power reserves,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, pp. 2579–2580, Nov. 2011.
- [52] V. Vittal and A. N. Michel, “Stability and security assessment of a class of systems governed by LaGrange’s equation with application to multimachine power systems,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-33, pp.623–635, Jun. 1982.
- [53] Y. H. Moon, E. H. Lee, and T. H. Roh, “Development of an energy function reflecting the transfer conductances for direct stability analysis in power systems,” *IEE Proc.-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 5, pp. 503–509, 1997.
- [54] Y. H. Moon, B. H. Choi, T. H. Rho, and B. K. Choi, “The development of equivalent system technique for deriving an energy function reflecting transfer conductances,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, pp. 1335–1341, Nov. 1999.
- [55] Y. Susuki and I. Mezic, “Nonlinear Koopman modes and precursor to power system swing instabilities,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, pp.1182–1191, Aug. 2012.
- [56] Y. H. Moon, H. S. Ryu, B. H. Cho, and B. Kim, “Second-kind energy function of power system and its applications,” in Proc. *IEEE PESS*, 2001, pp. 1542–1547.
- [57] D. B. West, *Introduction to Graph Theory*, 2nd ed. Pearson, 2000.
- [58] R. Majumder, G. Ledwich, A. Ghosh, S. Chakrabarti, and F. Zare, “Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, pp. 2768–2778, Oct. 2010.
- [59] R. Majumder, G. Bag, and K.-H. Kim, “Power sharing and control in distributed generation with wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, pp. 618–634, Jun. 2012.
- [60] C. Dufour and J. Belanger, “A PC-based real-time parallel simulator of electric systems and drives,” in Proc. *IEEE PCEE*, 2004, pp. 105–113.