

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

核設施互依性分析要項方法研究

(Development of Research Methods for Interdependency Analysis of
Nuclear Energy Facilities)

計畫編號：1002001INER028

受委託機關(構)：國立政治大學

計畫主持人：李蔡彥

聯絡電話：02-29387537

E-mail address：li@nccu.edu.tw

核研所聯絡人員：林家德

報告日期：100 年 12 月 10 日

中文摘要	1
英文摘要	2
壹、計畫緣起與目的	3
貳、相關研究	4
參、研究方法與過程	5
一、系統動力學模擬	5
(一)、複雜網路	6
1. 平均群聚係數(<i>average cluster coefficient</i>)	6
2. 平均最短路徑(<i>average shortest path</i>)	6
(二)、小世界網路	6
(三)、無尺度網路	8
(四)、脆弱性分析	8
二、代理人模擬	9
(一)、問題描述	9
(二)、電力系統特性	9
(三)、設計構想	10
(四)、系統實做：	13
1. 使用者介面	13
2. 代理人模型行為	15
2.1. 消費者代理人	15
2.2. 配電代理人	15
2.3. 調度代理人	16
2.4. 電廠代理人	17
2.5. 發電機代理人	17
2.6. 災害代理人	18
參、主要發現與結論	19
一、BA 網路拓撲性質與脆弱性分析	19
二、代理人模擬	25
肆、結論	29
伍、參考文獻	29

中文摘要

一般民生重要基礎建設常被視為典型的複雜系統，而近年來以資訊科技輔助分析這類重點基礎建設的研究也越來越多。綜觀文獻中所提出之重要基礎建設弱點分析的架構，基本上多包含兩個步驟：(1) 過濾分析重要基礎建設中的弱點 (2) 以電腦模擬方式了解基礎建設之弱點的成因。其中，又以系統動力學及代理人模擬為較為常用的方式。在本計畫中，我們將嘗試以電力供應網路為例，建立基礎建設相依性的模型，藉由拓樸連結與可靠度的網路分析，系統動力學及虛擬代理人模擬的方式，進行過濾、實驗、及分析的工作。目前我們已完成網路的脆弱性分析與網路的可靠性效率之演算法，另外，為瞭解電力網路與小世界網路的差異處，我們也已成功建構 BA 網路與隨機網路，並將以 BA 網路與隨機網路作為假想電力網路，模擬當網路受到攻擊時的斷電狀況。再者，我們在 Repast 模擬器的基礎之上，建立以代理人為基的台灣電網模擬平台，完成初步的電網相依性模型，並進行假想狀況的實驗，以驗證系統的正確性。本計畫希望能透過科學計算的技術，建立國家重要基礎建設的分析模型與研究方法，以做為後續研發及重要決策的參考。

英文摘要

Important national infrastructures are usually considered as a typical complex adaptive system. In recent years, it is becoming a trend to use the technologies developed in Computer Science to assist the analysis of the vulnerability of critical infrastructures. Typical stages in the framework of such an approach include: a screening analysis for identifying its vulnerability of the critical infrastructure and a detailed modeling of the operational dynamics of the identified parts for gaining insights about the vulnerability. In this project, we attempt to use the network of electric power supply as an example to build the interdependency model for infrastructure and use network analysis as well as object-oriented modeling to discover the vulnerability embedded in critical infrastructures. We have derived the algorithm for analyzing vulnerability and reliability of complex network. We have also succeeded in constructing Barabási and Albert (BA) networks and random network as examples of power network to analyze their vulnerability under attacks. In addition, we have adopted the Repast simulation platform to build an agent-based simulation testbed for power network interdependency in Taiwan. Test scenarios and visualization tools have been built to verify the simulation model. In summary, we have built a good analytical model and a new research method for the study of national infrastructure. And as a result, the conclusions drawn in this study can be used as an important reference for decision making by the government.

壹、計畫緣起與目的

國家許多重要的基礎建設都是建立在互相依賴的基礎服務上，如：水、電、天然氣等。這些服務設施都有著相當高的複雜依賴關係。隨著這些設施服務的設計更加複雜且數目日趨增加，仰賴資訊系統控管亦是無可避免。也因為這樣的依賴性，原本看似毫無關聯的服務，都有可能因為局部天災人禍的影響，產生不可預期的連鎖效應，進而影響民眾的日常生活或者產業運作，對國家的發展產生威脅。

目前歐美各國都相當重視基礎設施的防護，而美國的國土安全局更是針對基礎設施安全和漏洞預防提出重點報告。代理人基在電力系統模擬的最主要的兩個挑戰是大型網路架構和能夠即時反應效能。Tolbert 提出了混和式多種代理人架構。Amin 提出了能自我復原電力系統的代理人基架構。Panzieri 則提出 CISIA，是一個使用 Fuzzy Logic 能方便分析基礎設施中錯誤傳遞過程的系統。Schule 則是提出了結合地理資訊系統進行基礎設施模擬的架構。Casalicchio 則將代理人基模擬與 Federated 模擬結合加速模擬的過程。Mihailescu 則是提出了階層架構的電廠合作模式，以額外的代理人進行分散式的協同決策。Saleem 認為分散式控制是未來的趨勢，因此在同年也提出分散式的代理人基模擬的決策系統。其他尚有適用於一般模擬的代理人基工具如 SWARM、MASON 和 Recursive Porous Agent Simulation Toolkit (Repast)。其中又以 Repast 最為有名，亦是我們會使用的模擬工具。而以電力網路的拓樸性質做為基礎，探討網路的脆弱性與可靠性效率有米蘭科技大學核子工程系的 Zio 教授與義大利 Rosato 教授等人，然而實際電力網路與熟知的小世界網路的差異性卻鮮少探討，利用廣為接受的 BA 網路與隨機網路作為研究範本是有其必要性。

透過系統動力學及代理人為基礎的模擬方式，找尋基礎建設中弱點的可行性。代理人為基礎的模擬，我們可以專注於設計每一個代理人的策略，並專注於個體的行為上；在模擬的過程，我們亦可以動態的改變代理人的屬性，使整個模擬過程是一個動態的結果；另一個好處是我們可以重新建立各式各樣的狀況，來模擬同樣的狀況下，對於不同的決策會有什麼不同的結果。對系統動力學而言，以網路的拓樸性質做為網路特性的基礎，探討網路的脆弱性與可靠性效率，有助於理解當電力網路受到攻擊時的斷電狀況。

本計畫的目的是以物件導向建模的方式建立一個基礎建設網路模擬和弱點分析的方法。透過系統動力學及代理人為基礎的模擬方式，找尋基礎建設中弱點的可行性。對系統動力學而言，以網路的拓樸性質做為網路特性的基礎，探討網路的脆弱性與可靠性效率，有助於理解當電力網路受到攻擊時的斷電狀況。對代理人為基礎的模擬而言，我們可以專注於設計每一個代理人的策略，並專注於個體的行為上；在模擬的過程，我們亦可以動態的改變代理人的屬性，使整個模擬過程是一個動態的結果；另一個好處是我們可以重新建立各式各樣的狀況，來模擬同樣的狀況下，對於不同的決策會有什麼不同的結果。

貳、相關研究

分析基礎設施的研究主要分為分析類和模擬類兩大類，這兩類方法是非常不同的。此章節將簡介這兩類過去的相關研究，並簡介目前較有名的基礎設施模擬系統。

一、分析類模型

由於基礎設施的網路高複雜度的特性，每個分析類的模型都會對其數學模型或者是輸入的參數進行一定程度的簡化。而簡化會影響其模型的結果，或者是分析的細節，而實作的過程則可能因為效率的問題又再度加以簡化，這些問題都是研究這類模型需要注意的。

傳統網路分析多以分析圖的拓樸架構和節點的 Centrality 為主。如 Crucitti 提出了 Model 基礎設施的連鎖反應後[6]，即以拓樸分析的方式對義大利的電力網路進行分析[7]，之後更比較不同網路的拓樸架構，並分析找出弱點線段[8]。Cadini 使用 Centrality 來衡量基礎設施網路上節點的重要性[5]。Eusgeld 更是探討如何以物件導向的方式建立分析模型[9]。Zio 在基礎設施網路分析也有許多貢獻，在[22]中他以 IEEE 14 BUS 為例，從拓樸的角度和可靠性的角度進行分析，並使用 Monte Carlo 的方法進行驗證了 IEEE 14 BUS 的網路結構符合小世界網路，意即其擁有良好的 Global 和 Local 的連接性。傳統的 Centrality 分析是建立在兩節點間之最短路徑之上，Zio 認為這樣的方式與真實世界的情況不符，因此他也提出了 Randomized flow 的概念去計算 Centrality[23]。

除了拓樸方式分析網路外，Rocco S 亦提出了以 Cellular Automata 為基礎並搭配 Monte Carlo Sampling 演算法計算網路的可靠性[21]。而 Zio 亦以 Cellular Automata 和 Monte Carlo 進行複雜網路的可用性分析[24]，此分析還考慮了失敗與回復的系統動力進行分析。

傳統網路分析類的方法最大的問題都是效率差，複雜度隨著節點上升而增加。若要分析節點的影響力，除了計算 Centrality 外，也可輪流將某個節點或者是某個邊移除，再對整張圖分析，這類計算都是相當費時的。此外進行分析的網路節點只能是靜態的，分析的結果能指出潛在是弱點的節點，但無法看出一個網路發生問題的動態變化。亦無法動態模擬如災害發生時，面對整個網路的連鎖反應進行不同的應變而產生不同的結果。

而以電力網路的拓樸性質做為基礎，探討網路的脆弱性與可靠性效率有米蘭科技大學核子工程系的 Zio 教授[25][26]與義大利 Rosato 教授[16]等人，然而實際電力網路與熟知的小世界網路的差異性卻鮮少探討，利用廣為接受的 BA 網路與隨機網路作為研究範本是有其必要性。

二、模擬類模型

模擬類模型主要是解決分析類模型無法解決的問題，模擬的方式相當多種，如常見的系統動力學和代理人基的模擬。無論使用何種方法，最終都希望能產生該模型具代表性的例子。傳統的 Monte Carlo 模擬或者是隨機模擬，都讓模擬的過程相當沒效率，而代理人基的模擬則相當適合應用在大型的複雜網路上，因此在接下來的文獻回顧我們會偏重在代理人基模擬的文獻上。

近年來使用代理人基模擬在電力網路上的主題多以電力市場的供應鏈為主，由於歐美各國的電力交易十分頻繁且面積廣大，因此許多模擬的對象都以歐洲市場為主，最早使用代理人基方式模擬電力市場的是 SEPIA[10]。目前歐美各國都相當重視基礎設施的防護，而美國的國土安全局更是針對基礎設施安全和漏洞預防提出重點報告。多代理人基的架構在控制分散各處的資源，能產生高可靠性，高品質電力和更有效率的發電及配電。代理人基在電力系統模擬的最主要的兩個挑戰是大型網路架構和能夠即時反應效能。因此 Tolbert[19]提出了混和式多種代理人架構，在階層式的樹狀結構中，同一層的代理人可以互相溝通，而這些代理人可以選擇他們的父節點，即代表與前一層進行連結。Amin 提出了能自我復原電力系統的代理人基架構[1]。Panzieri 則提出 CISIA，是一個使用 Fuzzy Logic 能方便分析基礎設施中錯誤傳遞過程的系統[14]。Schule 則是提出了結合地理資訊系統進行基礎設施模擬的架構[18]。Casalicchio 則將代理人基模擬與 Federated 模擬結合加速模擬的過程[3][4]。Mihailescu 則是提出了階層架構的電廠合作模式，以額外的代理人進行分散式的協同決策，進而發揮潛在發電機組的價值[13]。Saleem 認為分散式控制是未來的趨勢，因此在同年也提出分散式的代理人基模擬的決策系統，用來控制和保護電力網路[17]。

其他尚有適用於一般模擬的代理人基工具如 SWARM、MASON 和 Recursive Porous Agent Simulation Toolkit (Repast)。其中又以 Repast 最為有名，亦是我們會使用的模擬工具。

參、研究方法與過程

一、系統動力學模擬

系統動力學(System Dynamics)是為了瞭解複雜系統運作架構隨時間變化的行為，其理論基礎根植於非線性動力與回饋控制並廣泛用於環境模型、經濟學、與基礎設施互依性分析與模擬。重要基礎建設是由獨立的、大尺度的、人造的系統所組成的網路。這些系統共同提供了維持日常生活不可或缺的服務，同時對於經濟發展以及社會福祉來說，更是不可缺少的元素。在這一期的計畫裡，已建立計算大型網路之演算法，並應用於網路拓樸性質與脆弱性分析。而在實務分析方面，因為台灣電力網路資料暫時無法取得，我們以小世界 BA 網路作為假想電力網路，理解當電力網路受到攻擊時其弱點所在，並說明以 BA 網路作為電力網路的設計範本是相當合宜。除此之外，為了驗證我們具有計算大型網路的能力，從 2004 年到 2011 年的台灣業餘桌球選手的對戰資料將是我們的計算對象。

(一)、複雜網路

複雜網路是由節點(node)與連接(edge)構成的結構，節點間透過連結相連。連結可以分為有方向性或是無方向性。且連結本身具有長短的不同，也就是權重(weight)。目前我們著重在探討網路的拓撲結構，所有的連結都視為無方向性。而這樣的一個網路結構，我們可以用鄰接矩陣 $\{a_{ij}\}$ 描述，即當節點*i*與節點*j*間有連結存在時，此矩陣元素值即為一。若無連結時，此值為零，藉由這個矩陣我們可以描述整個圖(graph)的連結情況，而我們透過這個矩陣可以計算出我們希望在網路結構上觀察的數值，以下列舉兩個在本文的分析中最常用到的兩種數值定義。

1. 平均群聚係數(average cluster coefficient)

平均群聚係數的定義如下：如果節點*i*有 k_i 個相鄰節點，則理論上這 k_i 個節點間的最大可能連結數為 $\frac{k_i(k_i-1)}{2}$ ，將這些節點間(不包含*i*)實際存在的連結數除以最大可能連結數即為該點的群聚係數 C_i ，而將圖上所有的節點的群聚係數加總做平均，即為此圖的平均群聚係數。而一般來說此種定義下的群聚係數具有局部性質的平均意涵。所以有時也被稱為局域群聚係數。當我們在觀察網路的群聚現象時還可以使用另外一種類似的概念，我們稱為全域性的群聚係數[2]，定義如下：圖上三個節點連結而成的封閉三角形的個數乘以三倍，除以圖形上只要三個節點中的任意兩點有連結存在的個數。而以上這兩種定義，我們都可以在編寫的程式中透過對於矩陣的操作獲得。

2. 平均最短路徑(average shortest path)

平均最短路徑的定義為圖上任意兩點*i*與*j*間的最短路徑 L_{ij} 的平均，而最短路徑矩陣可以由鄰接矩陣透過某些演算法轉換而成。在這篇文章裡，我們探討的網路結構是沒有權重、沒有方向性的，所以我們使用廣度優先搜索演算法(Breadth-First-Search)。

(二)、小世界網路

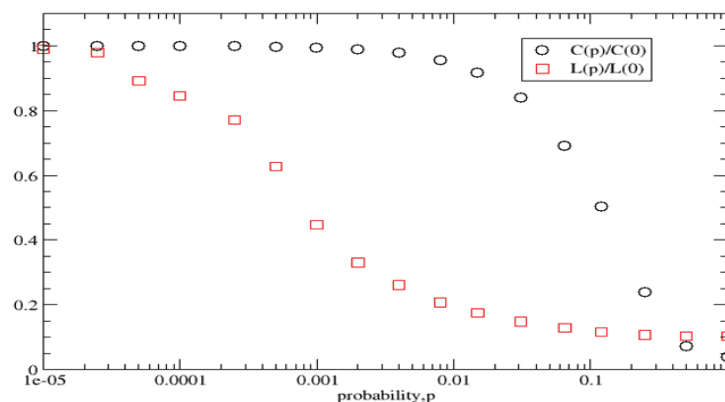
在1967年，社會心理學家Stanley Milgram設計了一個社會學實驗。藉由告訴受試者寄信目的人，來統計在一個社會網路裡，一封信平均要經由幾個中間人可以到達目的收件人手上。實驗結果發現平均來說，每封信只要透過五個人左右就可以寄到目的人手上[3]。這在後來被稱為六度分離現象。這是對於社會網路小世界性值觀察的濫觴。藉由計算社會網路的兩個特徵值；平均最短路徑以及群聚常數，前人得到一個結論是：大部分的社會網路都具有相對隨機網路來說，類似大小的平均最短路徑，以及相對較高的群聚係數。一開始社會學家、物理學家、數學家，各個領域的學者們對這樣的現

象還沒辦法提出好的解釋。而第一個可以藉由調整參數形成小世界網路的模型是由 Duncan J. Watts, Steven H. Strogatz 提出[4]。在此模型中，兩位學者假設一開始的圖形是由一個規則連結的環狀晶格出發，且每個節點(node)所具有的度數(degree)相同。每個時間間隔裡，順時鐘的次序，以某個固定機率 p ，重新連結某一個節點的第 n 條連結。繞完一圈之後，重複第二圈。直到所有的連結被考慮過為止。我們以程式語言重覆實作此模型生成機制。在表一中，我們列出了對於不同的隨機連結機率 p 所形成的新的網路時的群聚係數與規則網路時的群聚係數的比值 $C(p)/C(0)$ ，以及不同的隨機連結機率 p 所形成的新的網路的對短路徑與規則網路的最短路徑的比值 $L(p)/L(0)$ 。

表一、不同的隨機連結機率下群聚係數與平均最短路徑的相對改變。

probability	$C(p)/C(0)$	標準差	$L(p)/L(0)$	標準差
0	1	0	1	0
0.00001	0.99996	1.16E-05	0.989025	0.206346
0.000025	0.999862	1.64E-05	0.979526	0.287577
0.00005	0.999463	1.23E-05	0.891487	0.42783
0.0001	0.999292	2.74E-05	0.844538	0.657582
0.00025	0.998831	4.03E-05	0.770313	0.530634
0.0005	0.997607	8.14E-05	0.626716	0.358481
0.001	0.994688	0.000103	0.447354	0.407677
0.002	0.988139	0.000147	0.330021	0.085284
0.004	0.977921	0.000246	0.260871	0.089098
0.008	0.956338	0.000341	0.206934	0.02851
0.015	0.916989	0.0004	0.174368	0.018993
0.031	0.839536	0.000319	0.147955	0.00837
0.063	0.691126	0.000441	0.128459	0.003301
0.12	0.50447	0.000662	0.11663	0.002638
0.25	0.238191	0.000351	0.107077	0.00087
0.5	0.072369	0.000212	0.102779	0.000336

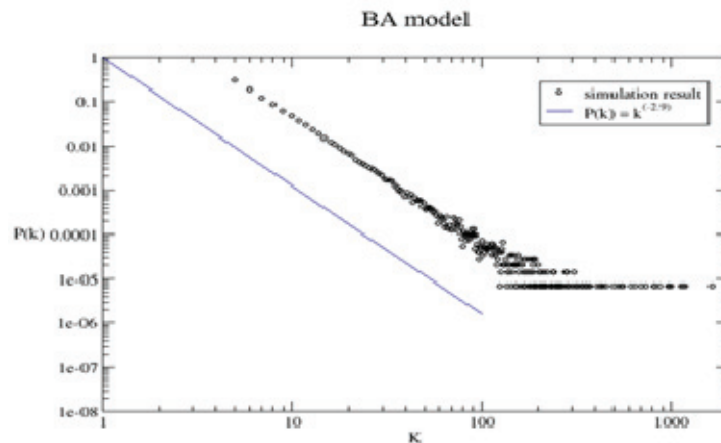
在圖一中，我們將這個連續的變化放在 XY 座標圖中，得到了與前人一致的結果，也就是在方法論中所提到過的，觀察到了在圖一的中間區域，存在一類網路具有和隨機網路相當大小的平均最短路徑，但平均群聚係數卻依然維持在相對隨機網路較高的比值上。此類網路即為小世界網路。



圖一、對於不同機率，群聚係數與平均最短路徑的連續變化示意圖

(三)、無尺度網路

過去二十幾年以來，複雜網路研究中，前人發現許多的網路結構遵循無尺度幕次分布。第一個做出解釋此種產生機制並提出模型的為 Price[5]，而後由 Barabási 等人再度獨立提出類似的模型[6]。此模型的產生機制如下所述：擴張中的網路一開始有 m_0 個節點，每個固定的時間間隔(TIME STEP)裡，會有一個新加入的節點加入這個網路，即是說網路中的節點數是隨時間增加，每個新加入的節點，會和 m 個已存在節點有連結，而連到某一特定節點 P 的機率和此一特地節點 P 的度(DEGREE)成正比。圖二是我們以程式語言對此模型實作的結果，而幕次指數約為 3。



圖二、度數與度數的出現機率分布圖，在這裡 $m_0 = m = 5$ ，time steps=150 到這個網路的度分布呈現一個幕次分布。

(四)、脆弱性分析

在參考文件[7]中，若我們將電力傳輸的變電站、供電站視為節點，電力傳輸線視為連結，則我們可以將電力傳輸設施視為一個網路結構，進而我們可以討論此網路的脆弱性。數學上來講，這樣我們就定義了一個圖(graph) $G(N,K)$ ，圖上的連結可以用 $N \times N$ 個相鄰矩陣(adjacency matrix) a_{ij} 來表示。舉例來說當節點 i 與節點 j 之間有連結時就給訂一個值為 1，沒有連結則為 0。而一開始我們將網路的連結視為沒有權重的，即兩節點間距離僅由經過幾個節點來決定。我們將這樣的一個鄰接矩陣經由廣度優先遍歷演算法即可轉化為最短路徑矩陣(the shortest path matrix)。這樣的矩陣維表示任意兩點間的距離。電力傳輸的可靠性效率(reliability efficiency)和兩變電站 i 、 j 最短(可靠性最高)路徑距離成反比。所以我們也可以用效率矩陣 efficiency matrix $\{\varepsilon_{ij}\}$ [11]來描述這個網路，而這個矩陣的元素就代表著在變電所 i 、 j 間的電力傳輸效率：

$\varepsilon_{ij} = 1$ 假如 $i、j$ 間至少有一條連結

$= 0$ $i、j$ 間沒有連結

電力傳輸網路 G 的平均可靠性效率(average reliability efficiency)可以定義如下：

$$E_{glob}(G) = \frac{\sum_{i \neq j \in G} \varepsilon_{ij}}{N(N-1)} = \frac{\sum_{i \neq j \in G} 1/d_{ij}}{N(N-1)}$$

當圖中兩節點 $i、j$ 間存在至少一條完美路徑 γ_{ij} 時 $\varepsilon_{ij} = 1$ ，則當一個不存在故障完美連結的網路中， $E_{glob}(G) = 1$ 。而當我們在探討電力傳輸網的個別線路對整體網路的傳輸重要性的影響時，即可使用此種指標。即我們可以定義連結的重要性如下：

$$V^* = \frac{E_{glob}(G) - E_{glob}(G^*)}{E_{glob}(G)}$$

G^* 是因為某些連結的中斷形成的新的網路結構， V^* 如果越高即代表斷掉的連結對整個網路結構的傳輸效率影響越大。

二、代理人模擬

這一章我們將詳細介紹本計畫的問題定義，以及電力系統網路的特性，最後我們會定義我們設計的階層式代理人的基本輸入和輸出，還有這些代理人角色的特性。

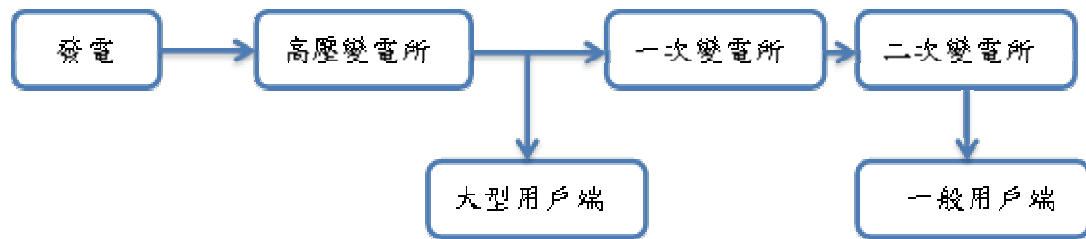
(一)、問題描述

本計畫目的是以代理人基的模擬方式，設計一個模擬介面，讓使用者能夠對電力系統網路進行模擬。在這個模擬環境中，使用者能夠隨時暫停模擬的過程並對代理人進行互動，像是修改其狀態、屬性、甚至是改變代理人的決策等。我們的模擬工具也必須要能記錄模擬的結果，以便重現過去模擬的狀態，亦能比較同樣狀態下的不同決策對結果造成的影響。藉由觀察不同狀況下的模擬結果，我們可以量測在這樣的情境下，採用這樣的決策是否適當。

(二)、電力系統特性

電力的特性是其無法儲存在電力網路系統上，因此整個電力網路系統上的供給與需求需要維持在大致平衡的狀態。概觀來說，用戶手上的電主要是經過各式發電廠所產生的電能，經過超高壓變電所升壓後，將高壓電經由輸電線傳

輸至大型用戶，如：捷運、高鐵或者是工廠等大型用戶。或者是將電力送至一次或二次變電所降壓，最後送至一般用戶端。在電力傳輸的過程中需將電力升壓，主因乃是高壓電在傳遞的過程中產生的熱能較少，較為適合傳遞長距離，所以在送抵用戶端之前仍須將其降壓。台灣電力系統發輸配電流程圖如圖三所示。



圖三、台灣電力系統發輸配電流程圖

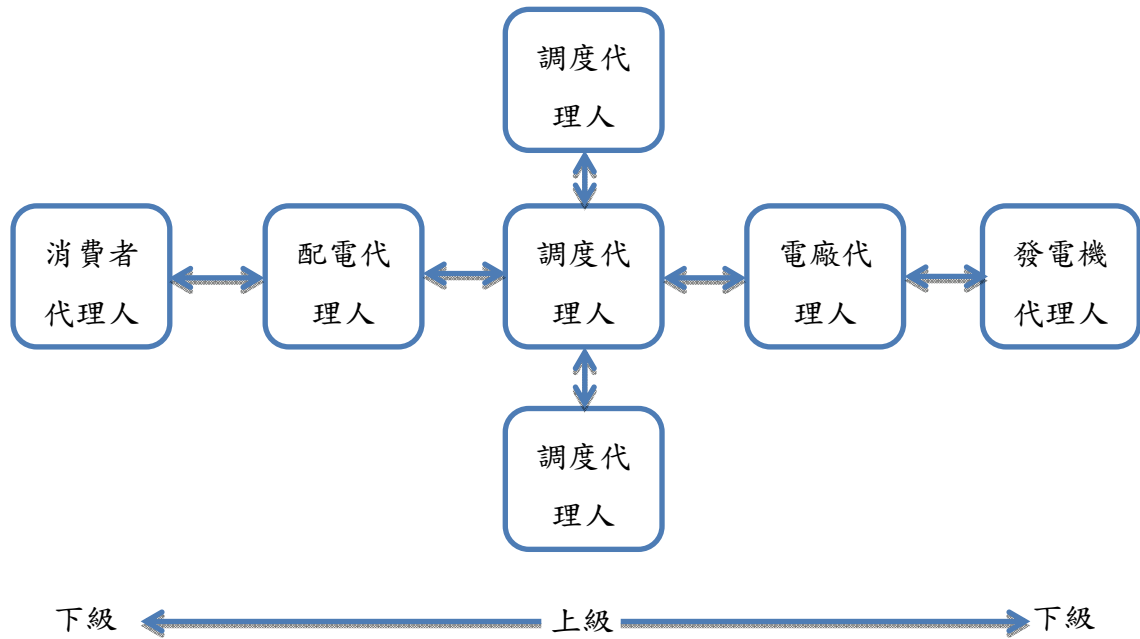
電力系統在正常運轉時，即會不斷遭受各式各樣的隨機小型擾動，如：負載量的隨機變化。亦有可能遭受到較大型的擾動，如：輸電幹線跳線、或者是發電機跳機等。而觀察電力系統穩定度，是觀察模擬結果的一個重要指標。廣義而言，電力系統穩定度是指電力系統遭受整體大大小小的擾動時，保持或者重返可接受之穩定平衡狀態的能力。電力調度即是發電、輸電和配電的整合的過程。

(三)、設計構想

概觀來說，電力系統的模型是一種生產消費者模型。小至發電端發電時所需消耗之原料供需問題，如：水、石油、天然氣等等；大至發電端與用電端的電力供需問題。這些現象都可以歸類為生產與消費者模型。隨著系統複雜度的上升，若將這些規則套用在較少種類的代理人上時，會增加每一位代理人規則的複雜度。因此，我們參考了[1]和台灣電力公司的輸配電過程，設計了階層式架構的電力系統代理人，將分別介紹於後。而在介紹各種代理人前，為了方便，我們定義各個代理人間共通的部分。

代理人狀態，我們以 S 表示這個代理人的狀態，例如：供給與需求是否平衡、代理人的負載程度、元件是否異常等。一個代理人可能同時具有複數個不同類型的狀態。

代理人策略，我們以 P 表示此代理人的策略集，不同種類的代理人都會有需要決策的時候，例如：決定與哪些代理人合作的策略、發電機組運用的策略。藉由給予不同的策略，代理人即可表現出不同的行為模式。



圖四、階層式代理人示意圖

目前我們設計了具有五層階層的代理人（如圖四所示），分別介紹如下：

客戶端代理人，以 CustomerAgent 表示。

$$\text{CustomerAgent} = \{S, P, d, D\}$$

其中 S 代表此代理人的狀態，反映出其是否得到充足的電力。 P 是決定其向各相連之配電代理人要求的電力量。 d 代表此代理人的需求用電量， D 代表此代理人所有相連的配電代理人。在我們的模型中客戶端代理人屬於單純的消費者。這種代理人代表用電端，可以是一間公司、一座城市這類單純消費而不生產的角色。

配電代理人，以 DispatchAgent 表示。

$$\text{DispatchAgent} = \{S, P, C, O\}$$

其中 S 代表此代理人的狀態，與客戶端代理人類似，都是反映出與配電代理人連結的客戶端代理人和調度代理人之間的供需是否平衡。 P 則是包含電力如何分配給其相連的客戶端代理人，在電力供應不足的狀況下，配電代理人的決策就越顯重要。 C 則是代表其相連的客戶端代理人，而 O 則是代表其相連的調度代理人。目前我們實作的配電代理人可以根據不同的客戶端代理人的權重，分配電力給其連結的客戶端代理人。此外配電代理人亦會接受調度代理人分配的電力。

調度代理人，以 OperatorAgent 表示。

$$\text{OperatorAgent} = \{S, P, D, O, PP\}$$

其中 S 代表此代理人狀態，主要以反映供需是否平衡為主。 P 則是包含了電力調度的相關策略，例如：根據客戶端的需求調整其相連之電廠的發電量、優先支援哪個配電代理人、或者是與其他調度代理人商討借電的策略等。 D 、 O 和 PP 則分別代表了其相連的配電代理人、調度代理人 and 電廠代理人。調度代理人連結了配電代理人、電廠代理人和其他的調度代理人。調度代理人會根據其連結的配電代理人的需求用電總合，對其相連之電廠代理人下達發電指令。調度代理人可以根據其管轄之電廠代理人的發電量，將配電端之用電需求轉換成電廠代理人的發電目標。在我們的模型設計中，有考慮了不同調度代理人之間的借電與供電的問題。如果一個調度代理人管轄的電廠還能產生多餘的電力，且其他調度代理人有供電需求時，調度代理人亦可以將電力輸送至其他調度代理人。同樣的，若是其管轄之電廠無法發出足夠的電，調度代理人也會試著向其相連的調度代理人尋求協助。而我們的決策集 P 影響的就是如何選定互動的代理人以及互動時的參數。

電廠代理人，以 `PowerPlantAgent` 表示。

$$\text{PowerPlantAgent} = \{S, P, O, G\}$$

其中 S 代表此代理人的狀態； P 則代表了該電廠發電機組運用的策略集。 O 和 G 則分別代表了其相連的調度代理人 and 發電機代理人。電廠代理人連結了調度代理人 and 發電機代理人。電廠代理人會根據調度代理人指定的發電需求，適度調整其管轄之電廠代理人發電的量；亦能對不同的發電機組個別指派該機組的發電量。電廠代理人同時必須能判斷其管轄之發電機是否異常，如溫度過高或者是長期過載，而給定的策略集可讓該代理人根據策略，選定合適的發電機組負責發電，避免其發電機過度使用造成損害。

發電機代理人，以 `GeneratorAgent` 表示。

$$\text{GeneratorAgent} = \{S, P, PP, MW, MVar, w, r\}$$

其中 S 代表此代理人的狀態，發電機代理人是屬於底層的代理人，因此能夠反映的狀態較多，除了常見是否滿足電廠代理人交付之發電量外，還需監測是否過熱或過冷，或者是否過載等這些基礎的硬體狀態。 P 則代表了此發電機的發電策略，例如：自我保護的機制，異常範圍的容許值等。 PP 則是代表其相連的電廠代理人。 MW 和 $MVar$ 則代表了此發電機的規格，最多可以產生多少有效和無效的電力。 w 則是此發電機目前的負載； r 代表此發電機受到損傷的復原速度。發電機代理人連結了電廠代理人，屬於一種規則相對單純的代理人。他能夠根據電廠代理人指定的發電量來發電。除了發電外，該代理人尚有自我保護的機制，能夠判斷像是環境溫度或者是負載率等等各項數據是否異常，進行自我保護。而在發生災害時，透過每個發電機不同的 r 值，也能模擬隨著時間而漸漸回復的過程。

上述五種代理人在目前我們的模型中都具有檢視其所知數據，進行簡易的狀態判斷。而每一個代理人都會定期檢驗他的狀態，進行策略調整。透過這五種代理人互相配合，能夠簡化代理人本身的規則，此乃階層式架構電力模擬系

統的優勢。

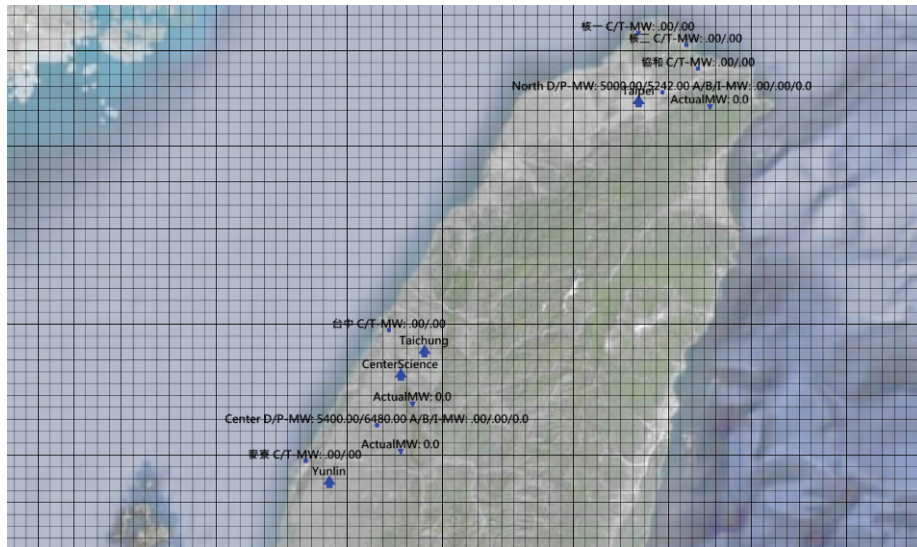
除了上述五種代理人外，我們亦將災害製作成一種代理人。該代理人能根據與其他代理人的距離，產生不同的傷害。以目前設計的模型為例，我們設計了一個地震代理人，他能夠影響其範圍內的發電設施，對其造成損害。發電設施因此需要時間進行修復，因此造成客戶端代理人缺電的現象。然而隨著時間過去，當發電設施修復完成後，客戶端代理人會再度回到供電正常的狀態。

(四)、系統實做：

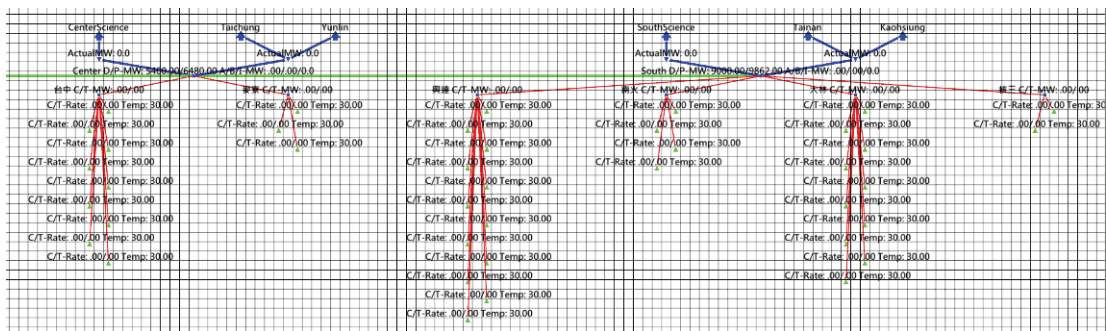
目前我們以 Repast Symphony 為模擬實驗的平台，選擇使用 Repast Symphony 是因為這個模擬工具是目前較多數人使用的平台，且是開放原始碼的軟體尚有人維護。相較於其他模擬平台資源較多且較穩定。Repast Symphony 可以幫我們處理整個模擬的過程，像是時間以及指定資料輸出等，讓我們可以更加專注在模型的設計和介面的設計上。以下我們將分別介紹我們設計的使用者介面以及模型的實作。

1. 使用者介面

在使用者介面的配置中，我們目前採用了兩種不同狀態的檢視：第一種是真實世界的地理座標圖 (Geographical View) (如圖五)。此種座標圖會顯示出配電代理人、客戶端代理人、電廠代理人和調度代理人這四種代理人，當災害發生時也會顯示出災害所在的位置和影響範圍。這些代理人的位置都是以真實世界為基準，目的是讓使用者能清楚了解是什麼地區出現問題。不特別顯示電廠代理人的原因則是為求精簡，避免介面過於混亂。第二種檢視方式是電力系統的架構圖 (Schematic View) (如圖六)。此種檢視會顯示客戶端代理人、配電代理人、調度代理人、電廠代理人 and 發電機代理人。這種檢視會將焦點放在整個電力網路的架構上，因此所有的代理人位置都是以相對的階層關係來排列，此種圖能反應這些代理人的狀態，因此能快速看出整個電力系統的哪一部分出現問題，也較方便做即時的命令下達。

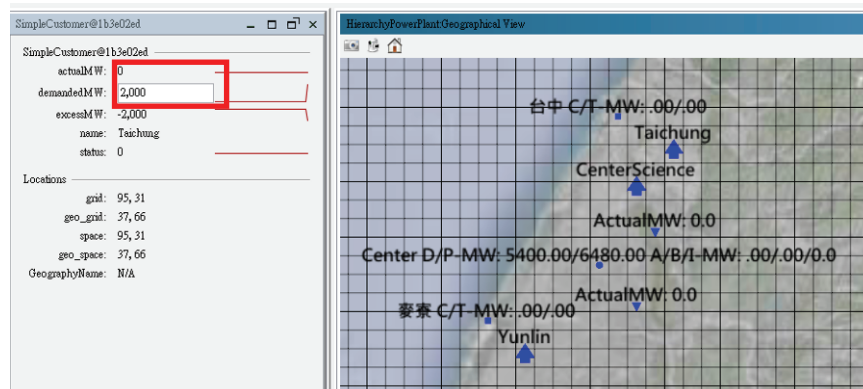


圖五、地理座標圖顯示模式



圖六、電力系統架構圖顯示模式

在我們用 Repast 實作的模型中，在進行模擬時，我們能夠隨時切換不同的檢視方式，亦可以將兩種檢視方式同時顯示在一個螢幕上，方便進行對照和觀察，未來亦可記錄模擬數據做後續分析。此外不論在任何一種檢視方式下，我們都能及時的修改代理人當前的狀態，動態改變模擬的過程。



圖七、動態改變代理人狀態介面

2. 代理人模型行為

在第三章我們定義了各個代理人的分工行為，接下來將詳細介紹我們實作代理人的規則和行為。

2.1. 消費者代理人

消費者代理人在每回合都會設定一個電力需求的數值給其相連的每個配電代理人 D_i 。此數值是根據策略 P 決定的，在目前我們的設計中，我們是以各配電代理人的能力進行比例分配需求大小。設定需求後，客戶端代理人即向各個配電代理人取得所配到的電量。最後判斷其狀態是否供電充足。以下是消費者代理人每回合的決策過程。

```
for each  $D_i$  in  $D$ 
do
     $r := \text{determineRequest}(d, P)$ 
     $\text{requestDispatcher}(D_i, r)$ 
end
 $\text{gain} := \text{collectRecievedMW}(D)$ 
 $S := \text{determineStatus}(\text{gain}, d)$ 
```

2.2. 配電代理人

配電代理人每回合都會彙整每位相連的消費者代理人的需求，傳遞給調度代理人。此外配電代理人也會彙整其相連的調度代理人分配的電量，再依據他的決策分給相連的客戶端代理人。最後判斷其狀態是否供電充足或者是其他異常。在供電不足時，我們的配電代理人也能根據預先設定的權重，決定優先將電分配給較重要的客戶端代理人。例如：一個配電站供應了兩個區域的電力，其中一個區域是行政特區，而另一個是一般的區域，此時優先維持行政特區正常運作就更顯重要。

在目前的模型我們讓配電代理人對不同調度代理人提出的要求是依照調度代理人的能力比例分配，在電力充足的狀況下，配電代理人也會盡量去滿足每一個客戶端代理人，然而在供電不足的狀況下，我們的設計是依照權重的高低，優先分配給權重最高的客戶端代理人。以下是其每回合決策的過程圖。

```
 $d := \text{collectDemandMW}(C)$ 
for each  $O_i$  in  $O$ 
do
     $r := \text{determineRequest}(d, P)$ 
     $\text{requestOperator}(O_i, r)$ 
end
 $\text{gain} := \text{collectRecievedMW}(O)$ 
 $S := \text{determineStatus}(\text{gain}, d)$ 
 $\text{dispatchRecievedMW}(C, P, S)$ 
```

2.3. 調度代理人

調度代理人每回合都會收集其相連的調度代理人的總需求，以及計算此調度代理人相連的電廠代理人潛在可發電的量，並依照策略設定其相連的電廠代理人應該發電的量，以進行第一階段的發電工作。緊接著調度代理人會判斷可用的電是否滿足調度代理人的需求。如果可以滿足時，則會將這些電力分配給相連的調度代理人，並進行分配電力給需要借電的調度代理人。

如果無法滿足時，調度代理人會進行第二階段的借電工作，我們設計的調度代理人會向其相連的其他調度代理人進行借電，而決定借多少電也是依據此調度代理人的決策 P 而定，目前我們的設計也是依照調度代理人潛在能力的比例來給定借電的量。無論是否借到充足的電量，調度代理人也會根據他的策略決定如何分配電力給相連的配電代理人。

在我們的設計裡面，調度代理人會優先分配電力給他相連的調度代理人，隨著決策不同，未來我們也可以考慮優先支援特定代理人來模擬極端的例子。此外，由於我們有模擬發電機啟動調整功率的延遲效果，因此我們的調度代理人在其相連的電廠代理人仍具有潛力滿足配電代理人的需求時，即便當時電力仍是供不應求，我們的調度代理人仍不會輕易去進行借電的動作。因為借電會讓各個區域的相依性上升，並增加整體網路的危險性，所以只有在最不得已的狀況下，我們才會進行借電的動作。以下是調度代理人每一回合的模擬過程。

```
d := collectDemandMW(D)
M := collectPotentialMW(PP)
if M >= d then
  for each PPi in PP
  do
    r := determineGenPower(d, P)
    generatePower(PPi, r)
  end
else
  for each Oi in O
  do
    r := determineRequest(d, P)
    borrowFromOperator(Oi, r)
  end
gain := collectRecievedMW(PP, O)
S := determineStatus(gain, d)
dispatchRecievedMW(C, P, S)
```

除了上述調度電力的過程外，我們的調度代理人也會試圖去檢驗其目前借電的策略是否合適，因此我們實作了定期向其他調度代理人取消借電的功能。

讓他能夠在前述主要過程內能夠再次檢驗是否能靠自己獨立運行，減低整體電路網的相依性。

2.4. 電廠代理人

電廠代理人在每一回合的模擬過程，會根據其指派的策略 P 去設定相連的發電機代理人需要產生多少電量。如果發電機的狀態出現異常，那麼這組發電機就必須檢修且無法正常工作。在目前的設計我們也是以比例的方式來設定每一台發電機需要產生的電力。若是此電廠無法滿足調度代理人給定的需求，電廠也會盡可能滿足調度代理人的需求，並將其狀態反映出來讓調度代理人知道。以下是電廠代理人每次模擬的流程。

```
for each  $G_i$  in G
do
   $r := \text{determineGenPower}(\text{demand}, P)$ 
   $\text{generatePower}(G_i, r)$ 
end
 $\text{gain} := \text{collectGenerateMW}(G)$ 
 $S := \text{determineStatus}(\text{gain}, \text{demand})$ 
```

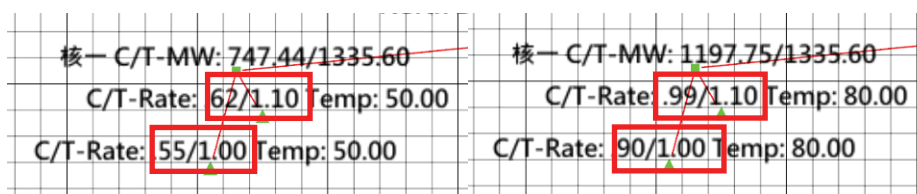
2.5. 發電機代理人

發電機代理人在每一回合的模擬過程中，首先會判斷自己是否遭受到損傷（如前述提過災害造成的影響），若有損傷則會停止一切發電工作，進行復原工作。在我們目前的設計，復原工作僅模擬需要若干時間讓該發電機正常運轉，而隨著發電機種類的不同復原的時間也會有所不同。若發電機沒有受到任何損傷及影響的狀況下，則發電機代理人會盡量滿足給定的發電量進行發電。而發電的過程會影響該發電機代理人的目前工作效率的數值，而隨著目前工作效率數值的不同，影響發電機環境溫度上升下降的梯度也會不同，不同種類的發電機也會有不同的溫度上升或下降梯度。以下是發電機代理人每回合模擬的流程。

```
if not damage then
   $\text{target} := \text{demand} / \text{MW}$ 
   $w := \text{approachToTargetWR}(\text{target})$ 
else
   $\text{recoveryFromDamage}(r)$ 
end if
 $\text{selfProtection}(P)$ 
```

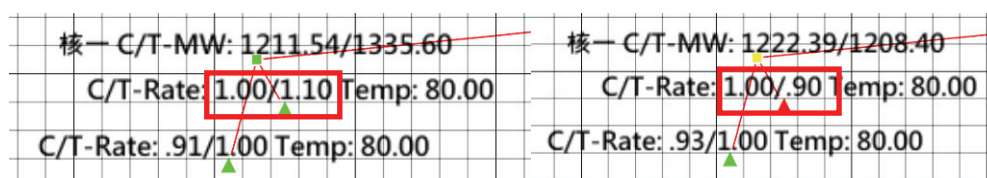
為了讓模擬的結果更加真實，我們實作了工作效率不會馬上達到指定的目標工作效率的延遲效果。在真實世界中，如果我們提升或者降低發電機的工作效率，都會需要經過一段時間後發電機才能滿足我們設定的目標工作效率。以

核能電廠來說，每一座反應爐冷卻或者停機的時間有些可長達數個月或者是半年以上，其原因在於核反應衰退與原子的半衰期有關，因此即便我們停止了核能反應，核能反應也不會馬上終止。因此在我們的模型中我們也模擬了這樣的延遲效果，讓指令傳遞不是馬上就成功達成，而是需要一些等待時間的。如圖八框起來的部分，每個框內表示的兩個數字分別代表當前工作效率與目標工作效率。可以看到經過一定時間後，當前工作效率逐漸上升的過程。



圖八、延遲效果示意

此外，如圖九所示，我們也加上了自我保護效果，在階層式的架構中每一層的代理人都應該要有基礎問題處理的能力。因此，在我們設計的模型中，以發電廠代理人為例，我們設定當目前的工作效率超過 100%時，為了避免過度負載，我們會自動暫時降低該發電機組的工作效率。在我們的模型中，長期維持在高負載時，會讓此代理人的溫度上升，而溫度過高最終將導致故障，所以我們設計不論發電機組得到的目標工作效率為何，其自我保護措施是永遠優先於任何命定的。如下圖所示，當工作效率超過 100%後，代理人自動降低了他的目標工作效率。



圖九、自我保護效果示意

2.6. 災害代理人

在目前設計的模型中，我們實作了一個簡單的災害代理人。災害可能是地震，也可能是海嘯，或者是火災。但無論是哪一種災害，最終的影響都是設備的損害。在我們目前的模型裡面，災害代理人會直接影響周圍的發電機代理人，隨著發電機代理人 and 災害代理人在地理座標上的幾何距離的不同，產生的損害程度也會有所不同。當災害發生時，藉此讓若干發電機代理人失能，而觀察這些電力網路中代理人的互動行為。雖然目前只實作的部分災害代理人僅能影響發電機代理人，但在未來我們亦考慮加上災害代理人可以影響到整個電廠，甚至是調度代理人等。

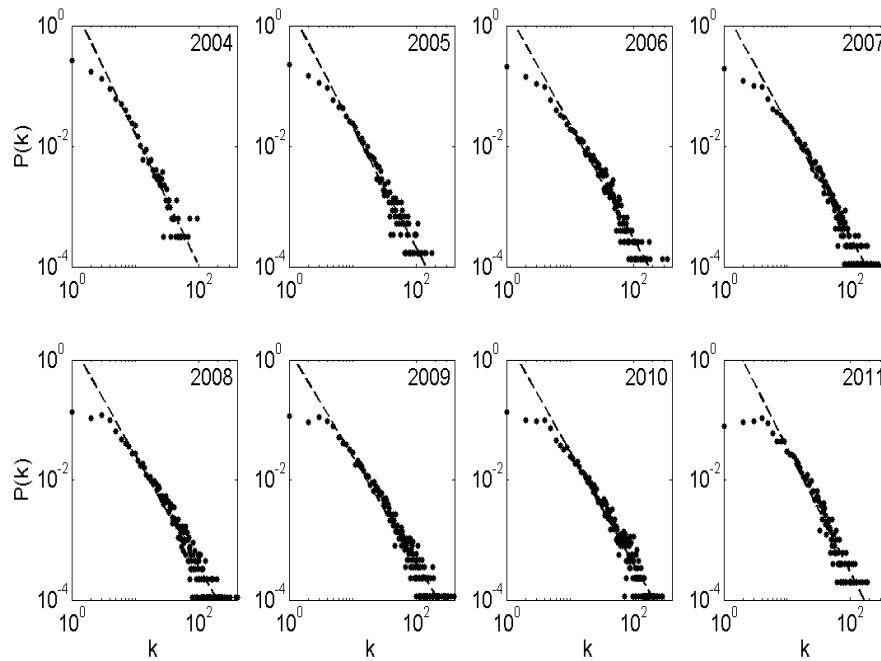
參、主要發現與結論

一、BA 網路拓樸性質與脆弱性分析

因為實際電力網路資料尚未取得，為了驗證我們具有計算大型網路的能力我們先以台灣業餘桌球選手對戰資料進行分析。我們取得的資料來自坊間業餘桌球賽事網站，該網站提供每一年間所有參賽選手的對戰紀錄。我們將此份資料視為一沒有權重、沒有方向性的網路結構，也就是說若兩者間在有對戰的紀錄，即將這兩人視為網路結構上的一節點，且這兩點間的鄰接矩陣視為 1，若兩者間在這一年內沒有對戰，則其鄰接矩陣視為 0。我們分析了 2004~2011 的對戰紀錄。表二即為逐年的網路大小與其中最大的連接群大小，以及以迴歸分析得出的冪次度分布的 γ 值。而圖十則是畫出了每年的度數機率分布。從圖中可以明顯看出此運動對戰網路結構的度分布遵循冪次法則。也就是說桌球對戰網路是具有無尺度(scale-free)特性的。

表二每年的對戰網路大小與 γ 值

Year	Full Network Size	LC Size	LC %	γ	$\gamma_{k_i \geq 5}$
2004	3438	3166	92.09	1.96	2.19
2005	6317	5901	93.42	1.85	2.00
2006	7890	7622	96.60	1.77	1.90
2007	9376	9193	98.05	1.78	1.90
2008	9116	9001	98.74	1.75	1.87
2009	8722	8650	99.18	1.68	1.77
2010	8998	8802	97.82	1.74	1.88
2011	5055	4979	98.50	1.79	2.08



圖十、每年的度數與度數出現機率分布圖。

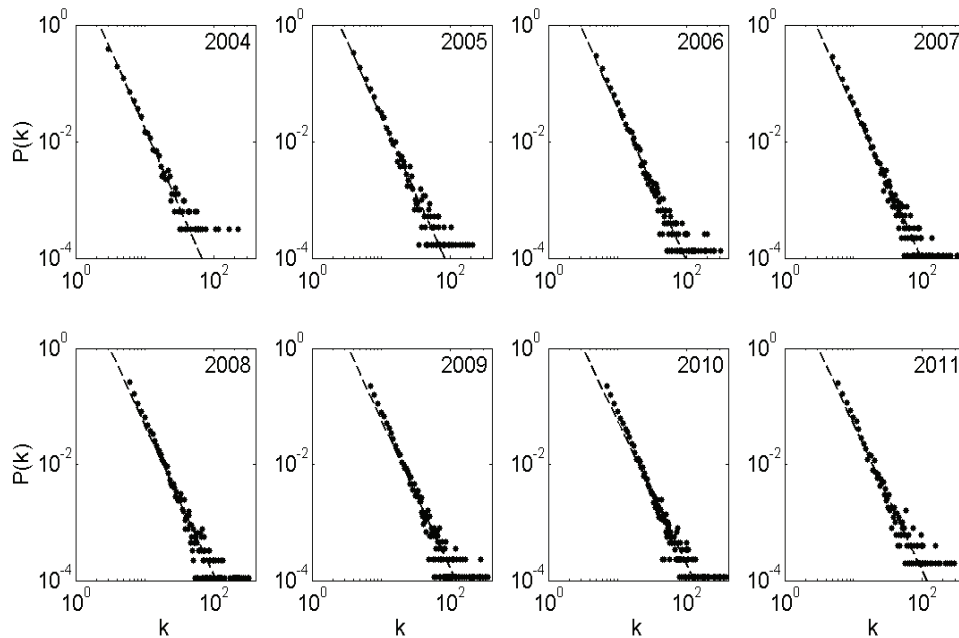
在表三中，我們列出了每一年的平均群聚係數以及平均最短路徑，並以其對應的隨機網路特性，計算每年的小世界 Q 值。透過這樣的分析，我們可以發現每年的桌球對戰網路其小世界特性是非常顯著的。

表三、桌球對戰網路逐年的最大群大小、平均群聚係數、平均最短路徑、其所對應的隨機網路特性，以及小世界值。

Year	LC size	Clustering Coefficient (CC)			Path Length (PL)		Small World Q	
		Local	Global	Random ⁴	Actual	Random ⁴	Local	Global
2004	3166	0.2394	0.1297	0.0017	5.55	5.00	126.4	68.4
2005	5901	0.2387	0.1154	0.0013	4.83	4.48	169.2	82.2
2006	7622	0.2598	0.1105	0.0012	4.69	4.24	190.8	80.6
2007	9193	0.2727	0.1123	0.0012	4.42	4.09	215.7	89.2
2008	9001	0.3454	0.1104	0.0013	4.29	3.91	235.6	75.3
2009	8650	0.3757	0.1190	0.0016	4.11	3.75	216.8	68.6
2010	8802	0.3472	0.1149	0.0015	4.23	3.78	204.8	68.1
2011	4979	0.4176	0.1484	0.0022	4.39	3.79	162.2	57.4

接下來，我們透過 BA model 的機制來模擬每一年的桌球對戰網路大小，以及連結的數目，透過這樣的比較我們試圖可以對桌球對戰網路產生的機制有更深入的理解，同樣地將來取得台灣電力網路資料也可做類似的比較，進而對未來設計高效率的電力網路有所助益。在圖十一中我們可以看到 BA model 產生的網路模型，可以反應真實的桌球對戰網路的度數無尺度分布特性，這代表

的是 BA model 的機制可以反應部分的業餘桌球循環賽制的設計。也就是不斷地有新的節點(參賽者)加入，以及這些節點有比較高的機率與之前存在並擁有比較高的鄰點數(degree)的節點相連(贏越多場的參賽者越有機會與更多的人對壘)。



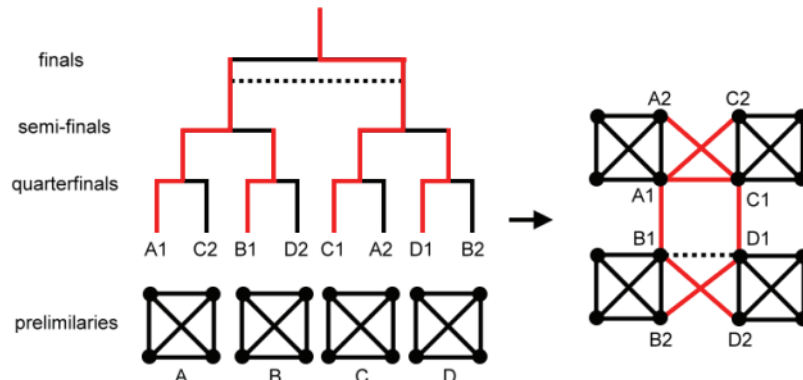
圖十一、BA model 模擬的度數分布圖。橫軸是度數，縱軸是度數的機率分布。

但在表四中我們可以發現 BA model 模擬之下，並不能反映真實網路的小世界特性，也就是計算出來的小世界值相對來說比較低的，經由比較我們可以發現，這樣的差別主要是由於 BA model 模擬所算出來的群聚係數與隨機網路相比，相差無幾。我們認為這一部分可以由業餘桌球賽事的設計來探討。

表四、這裡我們列出與表三一樣的數值，不同的是分析的網路變成是我們透過 BA model 模擬的每年近似網路。

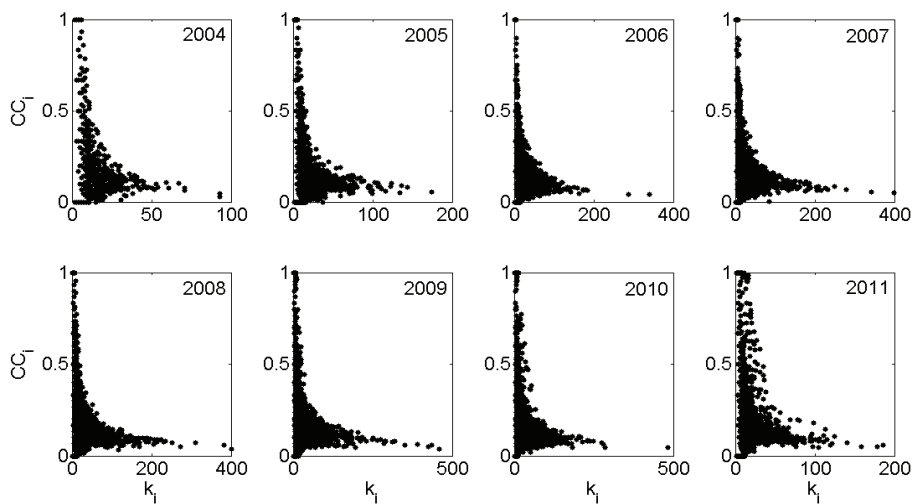
Year	size	k	γ	Clustering Coefficient			Path Length		Small World Q	
				Local	Global	Random*	BA model	Random*	Local	Global
2004	3166	6	2.72	0.010	0.0038	0.0020	3.89	4.60	5.91	2.25
2005	5901	8	2.63	0.009	0.0061	0.0017	3.74	4.41	6.24	4.23
2006	7622	10	2.62	0.008	0.0061	0.0013	3.59	4.13	7.08	5.40
2007	9193	10	2.61	0.007	0.0054	0.0011	3.64	4.22	7.38	5.69
2008	9001	12	2.59	0.008	0.0064	0.0014	3.47	3.92	6.46	5.16
2009	8650	14	2.57	0.009	0.0078	0.0017	3.31	3.72	5.95	5.16
2010	8802	14	2.48	0.009	0.0076	0.0016	3.32	3.72	6.30	5.32
2011	4979	12	2.54	0.013	0.0100	0.0027	3.30	3.69	5.38	4.14

在圖十二中的業餘桌球賽事說明裡，我們可以看到業餘桌球的循環賽由分組循環預賽以及單淘汰的複賽。我們認為雖然 BA model 可以部份地表現出複賽的行為，也就是贏越多場的人，越有機會遇到越多的對手。但在分組預賽的部分，BA model 就無法具體呈現了。而分組循環預賽，恰恰是造成真實的桌球對戰網路中，相對較高的群聚係數的原因。

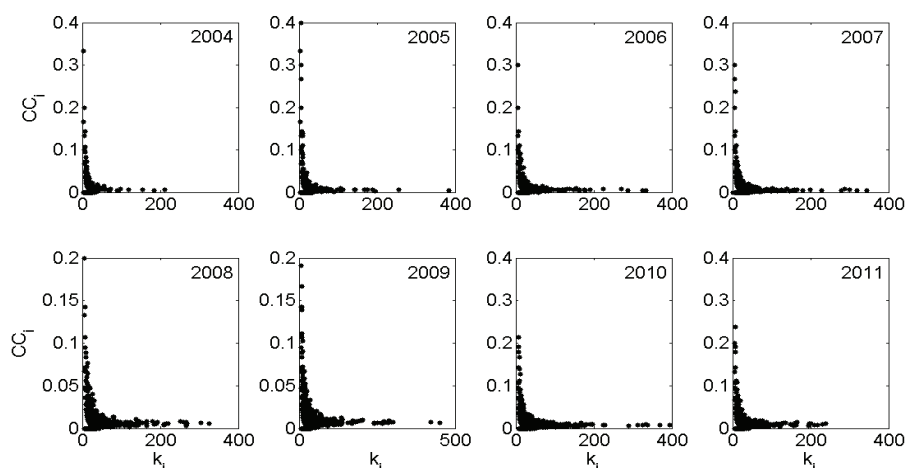


圖十二、業餘桌球循環賽事的組成

更進一步地，我們可以透過下面兩張圖，圖十三與圖十四來說明分組預賽的有無對於群聚係數分布的影響，在這兩張圖中，我們列出了真實桌球對戰網路與 BA model 模擬的度數與群聚係數分布圖。在圖十三、十四中，我們可以看到在中間的區塊，圖十三的度數雖然增加，但是這些節點的群聚係數卻沒有像在圖十四中這麼快，且這兩個圖中的最高群聚係數，圖十三明顯比圖十四高。

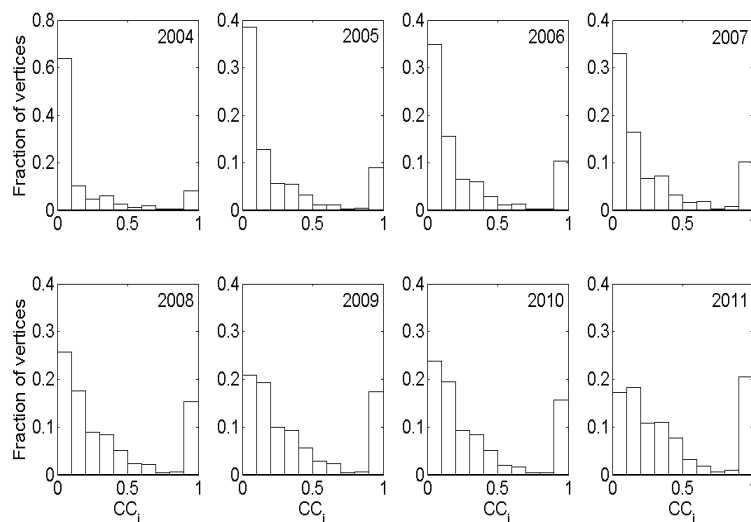


圖十三、業餘桌球對戰網路的度數與群聚係數分布圖。

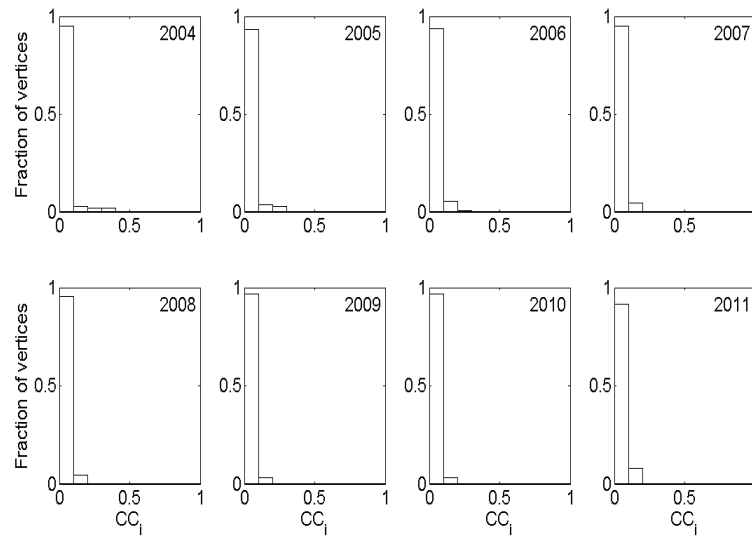


圖十四、BA model 模擬下的度數與群聚係數分布圖。

圖十五與圖十六是真實桌球網路與 BA model 模擬的群聚係數分布直條圖。我們可以看到在 BA model 模擬的群聚係數分布，大部分位於 0.1~0 的區間內。而在真實的桌球對戰網路裡，雖然大部分也集中在這個區域，但有一些在較高的群聚係數分佈。且在圖八中，我們也可以看到群聚係數接近 1 的區塊附近，有一條”孤立”的方布。我們認為這就代表了有一群在分組循環賽就被淘汰的參賽者。也就是說如果這些參賽者只參加了循環賽就被淘汰，那麼它們的群聚係數就會維持在 1，隨者晉級複賽的人員不斷地在單淘汰複賽中晉級，他們的群聚係數就會隨之降低。所以我們才會在圖十五中看到階梯式的群聚係數分布以及右邊的孤立長條。



圖十五、真實桌球對戰網路群聚係數的分布圖



圖十六、BA model 模擬的群聚係數分布圖

在表四中，透過脆弱性分析，我們列出了每一年的最重要對戰關係在哪一個賽事中出現。我們經由這樣的分析，可以發現，在桌球對戰網路中，最重要的連結，都存在跨地域性、對參賽資格限制較少的比賽裡。我們相信這個脆弱性分析的結果是相當合乎直觀的，因為限制越少、越全國性的比賽，越能在這個網路結構裡製造出捷徑，而這樣的捷徑對於整體的傳輸效率來講，重要性也就越高。至目前為止我們透過 BA model 對桌球對戰網路產生的機制有更深入的理解。除此之外，經由計算得知 BA 網路的平均可靠性效率可達二十個百分點，這與米蘭科技大學核子工程系的 Zio 教授研究瑞士電力網路相符合。當移除最重要連結後，BA 網路的脆弱性 V^* 大約為二個百分點，這說明以 BA 網路作為電力網路的設計範本是相當合宜。表五說明 IEEE-118 電力網路脆弱性分析結果，當移除最重要連結後 V^* 達到十個百分點，未來我們將以 BA 網路作為研究範本，以動態模擬的方式理解當電力網路受到攻擊時的斷電狀況。

表四、我們列出了每一個年度的最重要連結(對戰關係)是在哪一個賽式中出现

Year	Competition Name	V^*
2004	第十一屆清水紫雲巖桌球賽	2.58E-02
2005	第十二屆清水紫雲巖桌球賽	2.63E-03
2006	2006 長青國際桌球賽	6.47E-03
2007	台電邀請賽	1.14E-03
2008	高雄岡山桌球賽	6.79E-04
2009	三重市民盃桌球錦標賽	1.86E-03
2010	台電邀請賽	1.92E-03
2011	雞籠山青年商會青商盃桌球	1.41E-03

表五、IEEE-118 電力網路脆弱性分析結果[Bompard et al. (2011) Electric Power Systems Research 81, 1334-1340.]

The first 25 most critical lines in IEEE-118 test system.

Rank	ID of lines	$T(l)$	ID of lines	$\Delta A(Y)$
1	100	1	30	0.117
2	93	0.7785	100	0.0772
3	121	0.7609	93	0.0693
4	122	0.7609	121	0.0577
5	54	0.6642	122	0.0577
6	30	0.542	106	0.0528
7	8	0.4154	54	0.0513
8	123	0.4136	66	0.0498
9	95	0.4122	37	0.0483
10	98	0.408	8	0.0456
11	148	0.3973	108	0.0455
12	37	0.3921	107	0.0451
13	94	0.3743	124	0.0371
14	156	0.3737	115	0.0366
15	36	0.3494	105	0.0335
16	115	0.3445	123	0.0315
17	103	0.3351	152	0.0311
18	51	0.3292	38	0.0301
19	66	0.3215	156	0.0293
20	38	0.3195	135	0.0292
21	106	0.3185	32	0.029
22	124	0.3102	178	0.029
23	135	0.2967	94	0.0287
24	107	0.2849	171	0.0283
25	119	0.2732	146	0.0278

二、代理人模擬

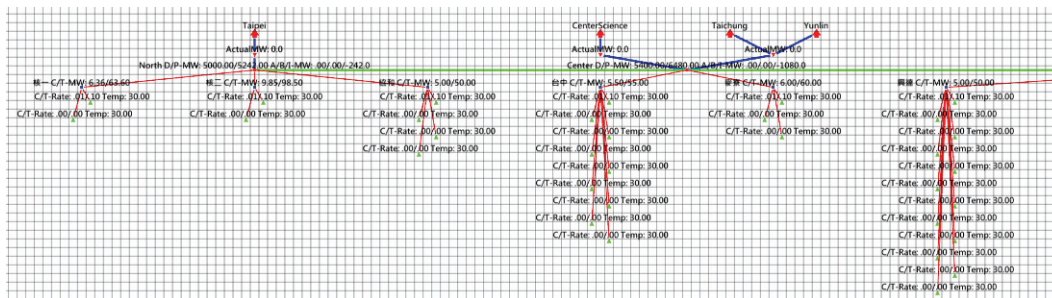
在目前的代理人架構下，我們設計了一個情境來驗證我們模型行為的正確性。這個情境包含了七個消費者代理人、五個配電代理人、三個調度代理人、九個發電廠代理人以及四十八個發電機代理人。詳細的階層關係可以參照表六。

表六、模型測試環境架構關係圖

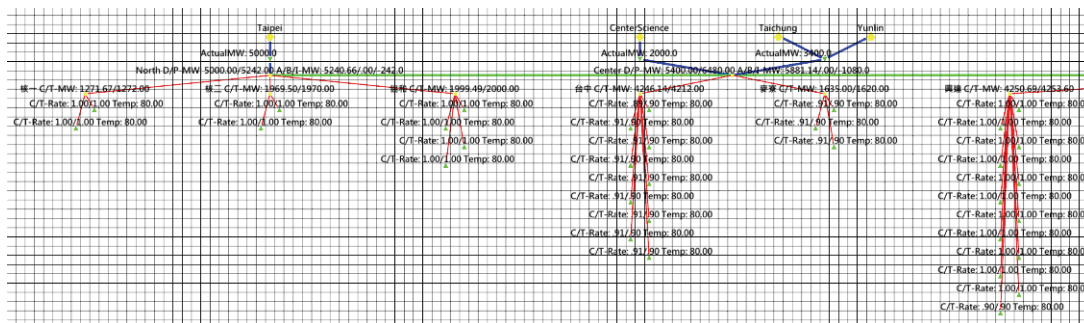
消費者代理人	配電代理人	調度代理人	電廠代理人	發電機代理人
Taipei Demand:5000MW	Northern Dispatcher	Northern Operator	核一	636MW x 2
			核二	985MW x 2
			協和	500MW x 4
CenterScience Demand:2000MW	CenterScience Dispatcher	Central Operator	台中	550MW x 8 280MW x 1
Taichung Demand:2000MW	Central Dispatcher		麥寮	600MW x 3
Yunlin Demand:1400MW				
SouthScience Demand:3000MW	SouthScience Dispatcher	Southern Operator	興達	500MW x 2 550MW x 2 450MW x 3

			164MW x 5
Tainan Demand:3000MW	Southern Dispatcher	南火	289MW x 3 251MW x 1
Kaohsiung Demand:3000MW		大林	300MW x 2 375MW x 2 500MW x 1 550MW x 1 43MW x 4
		核三	951MW x 2

在目前設計的系統架構內，整體的供需是大致相等的，僅有些許的餘裕電力可以使用。此外，每一個調度代理人之間也是兩兩相連的，彼此可以互相救援。所有的發電機代理人初始化的目前工作效率也都是 0%。在第一個模擬行為測試中，我們將測試代理人之間的供電行為是否如預期，由於初始時所有的發電機代理人目前工作效率都是 0%（圖十七），且每個消費者代理人都有他們的需求電量，如上表所示。因此，我們預期的行為應該是消費者代理人將他的需求透過配電代理人傳達給調度代理人。而調度代理人匯集這些需求後，會讓其管轄的電廠代理人開始進行發電的行為。由於我們實作了延遲效果，因此我們預期消費者代理人會維持一段缺電狀態，再等到各個電廠代理人的發電機的工作效率達到能夠產生足夠電力時，整個電力網路會進入平衡的狀態（圖十八）。而模擬的結果也如我們的預期。



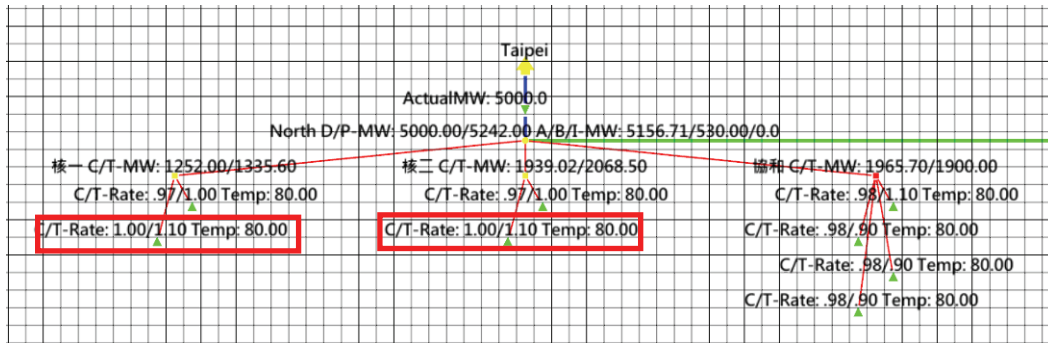
圖十七、初始化時發電機工作效率為 0%時的狀態



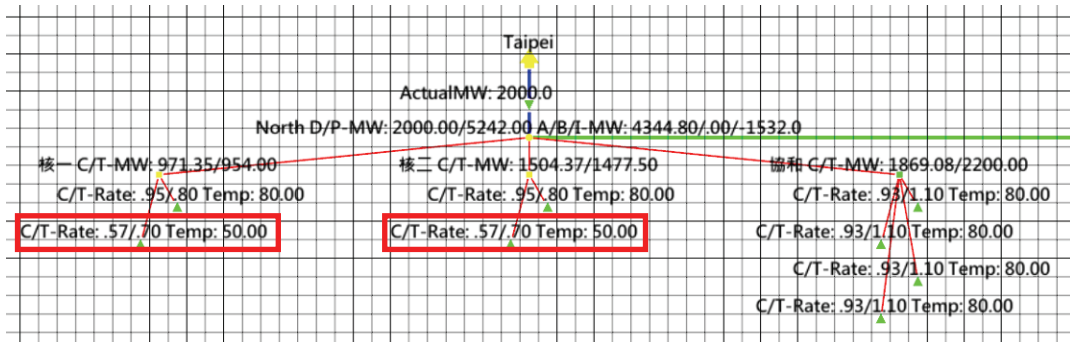
圖十八、經過一段時間後，整體電力網路平衡的狀態

緊接著我們使用使用者介面互動的功能，動態改變消費者代理人的需求。我們預期發電機代理人的目前工作效率會逐漸下降。此乃消費者代理人的新需求，透過配電代理人傳遞給調度代理人，而調度代理人再調整電廠代理人的發

電量。而我們再將消費者代理人的需求提高，發電機代理人的目前工作效率也會因此提升（圖十九、二十）。

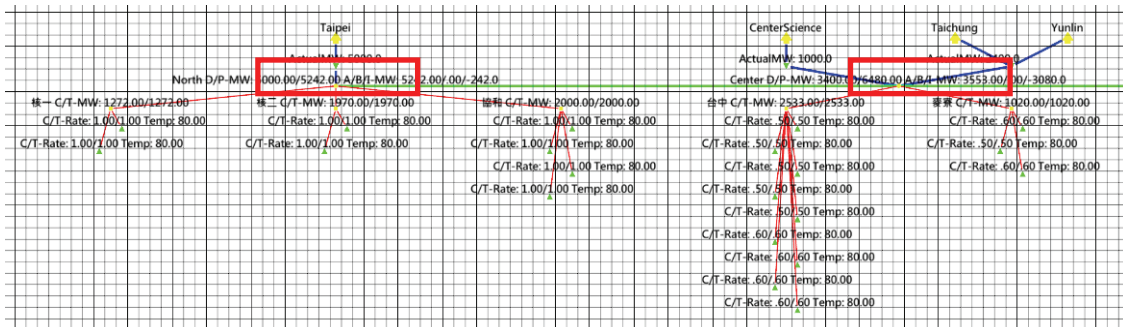


圖十九、Taipei 的需求是 5000MW 時，發電機代理人的工作效率都相當高。

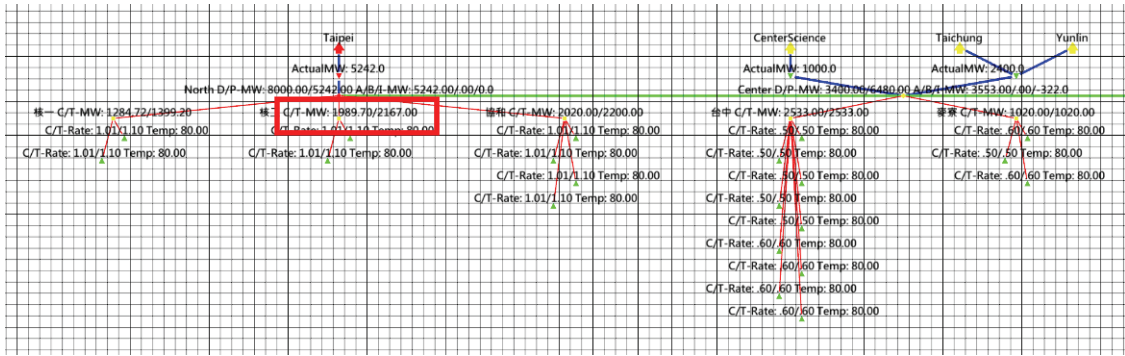


圖二十、當 Taipei 的需求降為 2000MW 時，可看到部分發電機已經降低輸出。

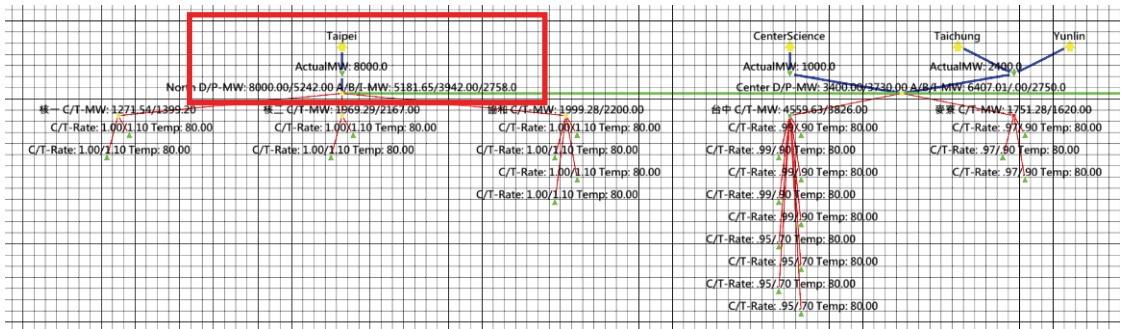
接下來我們要測試借電的行為，由於整體的用電供需已經趨近於飽和，因此我們降低 CentralOperator 這個調度代理人管轄的消費者代理人：Taichung、Yunlin 和 CenterScience 的用電需求，讓中部的供電區有充足的電力餘裕可以救援（圖二十一）。此時 SouthernOperator 和 NorthernOperator 這兩個調度代理人的供電區仍維持供需平衡，僅有些許的餘裕空間。此時我們將 Taipei 的需求大量提高，我們預期 NorthernOperator 這個調度代理人會向 CentralOperator 去借電來滿足 Taipei 這個消費者代理人。而因為延遲效應的關係，發電機提升工作效率也需要一些時間，因此我們預期 Taipei 會短暫維持在缺電的狀態。而模擬的代理人行為也如預期。（如圖二十二、二十三）



圖二十一、北區和中區的用電需求與供電極限分別為 5000/5242 和 3400/6480 MW

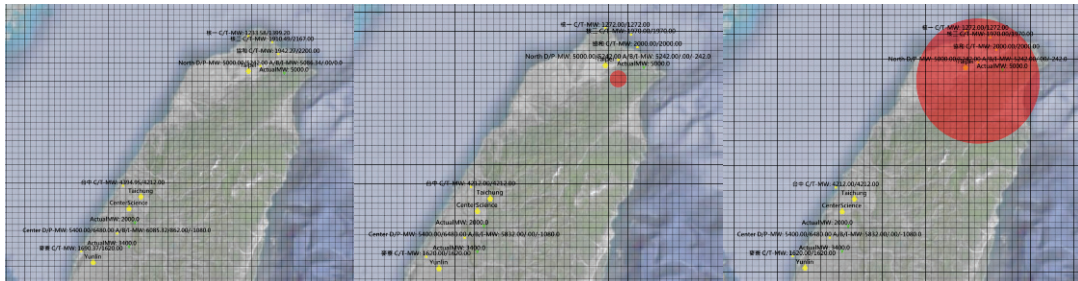


圖二十二、將北區用電需求提升到 8000MW 時，北區呈現紅色的供電不足狀態

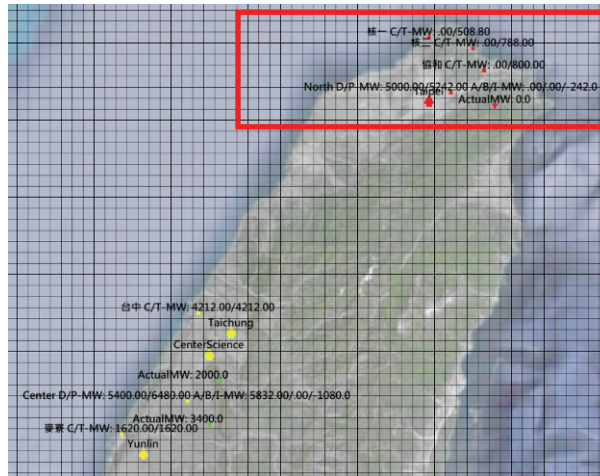


圖二十三、經過若干時間後，北區再度回到供電正常的狀態。

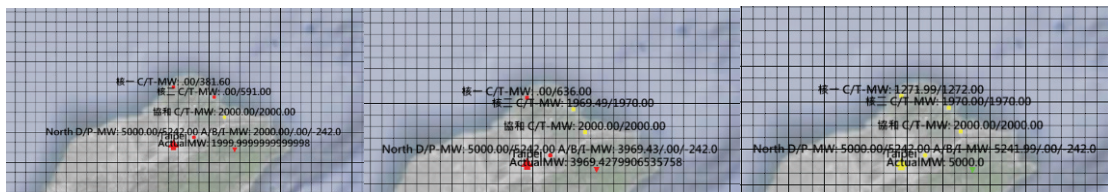
最後我們要測試的行為是災害代理人的破壞行為和發電機代理人被影響後自我修復的過程。如前所述，我們的災害代理人會影響其地理座標點上附近的代理人，給予隨距離遠近不同而有若干的傷害。在這裡我們假設這個災難代理人是一場地震，所以我們在視覺呈現的效果上也特別對災害代理人做出特別的動畫效果，來呈現出地震的晃動和逐漸擴大的樣貌。在災害代理人的效果消失後，我們預期看到北區的發電機全部陷入停擺的狀態而造成整區的停電，由於其他區的電力也是吃緊的狀態，所以無法供電給北區，這也是我們設計優先支援本區消費者代理人的關係。隨著時間過去，我們可以見到發電機逐漸回復正常並開始工作，消費者代理人也可以再度得到充足的電力。(如圖二十四、二十五、二十六)



圖二十四、災害代理人的地震效果，其影響範圍包含了整個北台灣



圖二十五、北區進入缺電狀態，但中區仍供電正常



圖二十六、不同電廠的受損程度不同，回復的時間也不同

肆、結論

我們設計了一個電力系統的階層式代理人系統，並對其進行簡單的模擬。該系統提供了兩種檢視模式：架構圖檢視模式和地理座標圖檢視模式。而我們的代理人基模擬系統是由五種代理人構成的五階層架構，這樣的架構能降低代理人邏輯行為的複雜度，讓代理人的行為單純化、模組化。最後我們也設計了一個簡單的情境，模擬了在緊急災害下，代理人間的互動，藉此驗證了代理人行為的正確性。模擬的結果可以驗證階層式架構的代理人系統簡化了設計的邏輯，也降低了每一個代理人所需的計算量。而模擬也達成了我們預期設計規則的結果。此外我們也設計了不同的檢視方式，以應用在合適的情境，以便隨時調整模擬參數進行互動。而在網路拓樸性質與脆弱性分析方面，已建立計算大型網路之演算法，並以 BA 網路作為假想電力網路，理解當電力網路受到攻擊時 V^* 參數變化情形，並說明以 BA 網路作為電力網路的設計範本是相當合宜。

在未來的計畫，我們也希望能拿到真實世界的資料進行模擬，也可以參考真實資料或策略來修正我們目前代理人的規則。我們也希望代理人的決策過程能夠以歷史資料或者是弱點分析的結果做為決策時的評估，在決策上我們也希望能夠應用賽局理論來幫助我們做出更好的決策行為。最後我們希望能夠利用這個實驗平台，做出更多的實驗來比較不同策略的影響。

伍、參考文獻

- [1] M. Anim, Toward self-healing energy infrastructure systems, *Computer Applications in Power*, IEEE, 14, pp.20-28, (2001).
- [2] F. Cadini, E. Zio, C.-A. Petrescu, Using Centrality Measures to Rank the Importance of the Components of a Complex Network Infrastructure, in: R. Setola, S. Geretshuber (Eds.) *Critical Information Infrastructure Security*, Springer Berlin / Heidelberg, pp. 155-167, (2009).
- [3] E. Casalicchio, E. Galli, S. Tucci, Federated Agent-based Modeling and Simulation Approach to Study Interdependencies in IT Critical Infrastructures, in: *Proc. of the 11th IEEE Intl. Symp. on Distributed Simulation and Real-Time Applications*, IEEE Computer Society, pp. 182-189, (2007).
- [4] E. Casalicchio, E. Galli, S. Tucci, Modeling and Simulation of Complex Interdependent Systems: A Federated Agent-Based Approach, in: *Critical Information Infrastructure Security*, Springer-Verlag, pp. 72-83, (2009).
- [5] F. Cadini, E. Zio, C.-A. Petrescu, in *Critical Information Infrastructure Security*, R. Setola, S. Geretshuber, Eds. (Springer Berlin / Heidelberg, 2009), vol. 5508, pp. 155-167, (2009).
- [6] P. Crucitti, V. Latora, M. Marchiori, Model for cascading failures in complex networks, *Physical Review E*, 69 (2004).
- [7] P. Crucitti, V. Latora, M. Marchiori, A topological analysis of the Italian electric power grid, *Physica A*, 338 (2004) 92-97.
- [8] P. Crucitti, V. Latora, M. Marchiori, Locating critical lines in high-voltage electrical power grids, *Fluctuation and Noise Letters*, 5 (2005). W. Eusgeld, G. Kröger, M. Sansavini, E. Schlöpfer, Zio, *Reliability Engineering & System Safety*, 94, 954 (2009).
- [9] I. Eusgeld, W. Kröger, G. Sansavini, M. Schlöpfer, E. Zio, The role of network theory and object-oriented modeling within a framework for the vulnerability analysis of critical infrastructures, *Reliability Engineering & System Safety*, 94, pp.954-963 (2009).
- [10] S. A. Harp, S. Brignone, B. F. Wollenberg, T. Samad, *Control Systems*, IEEE 20, 53 (2000).
- [11] V. Latora, M. Marchiori, *Physical Review Letter* 87, (2001).
- [12] C.M. Macal, M.J. North, Agent-based Modeling and Simulation, in: 2009 *Winter Simulation Conference*, (2009).
- [13] R.C. Mihailescu, M. Vasirani, S. Ossowski, Towards Agent-Based Virtual Power Stations via Multi-Level Coalition Formation, *iaurjces*, (2010).
- [14] S. Panzieri, R. Setola, G. Ulivi, An agent based simulator for critical interdependent infrastructures, (2004).
- [15] S.M. Rinaldi, J.P. Peerenboom, T.K. Kelly, Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies, *IEEE control systems magazine*, 21, pp.11-25, (2001).
- [16] V. Rosato, S. Bologna, F. Tiriticco, Topological properties of high-voltage electrical transmission networks. *Electric Power Systems Research*, 77, 99-105 (2007).
- [17] M. Saleem, M. Lind, M. Veloso, paper presented at the ATES (2010).
- [18] M. Schüle, R. Herrler, F. Klügl, in *Multiagent System Technologies*, G. Lindemann, J. Denzinger, I. Timm, R. Unland, Eds. (Springer Berlin / Heidelberg, 2004), vol. 3187, pp. 228-242, (2004).

- [19] L. Tolbert, H. Qi, F. Peng, in *Proc. Power Engineering Society Summer Meeting*, pp. 1676-1679, (2001).
- [20] E. Zio, R. Piccinelli, *Reliability Engineering & System Safety* 95, 379 (2010).
- [21] C. M. R. S, E. Zio, *Reliability Engineering & System Safety* 89, 219 (2005).
- [22] E. Zio, C.-A. Petrescu, G. Sansavini, *Vulnerability analysis of a power transmission system*, (2008).
- [23] [20] E. Zio, R. Piccinelli, Randomized flow model and centrality measure for electrical power transmission network analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, 95, pp.379-385 (2010).
- [24] E. Zio, L. Podofillini, V. Zille, *Reliability Engineering & System Safety* 91, 181 (2006).
- [25] E. Zio, G. Sansavini, A systematic procedure for analyzing network systems. *Int. J. Crit. Infrastruct* 4, pp.172-184 (2008).
- [26] E. Zio, G. Sansavini, An analytical approach to the safety of road networks. *Int. J. Reliab. Qual. Saf. Eng.* 15, pp.67-76 (2008).