

適應性智慧電網電力供需資源組合 之動態模擬與應用

洪紹平、張四立*

摘 要

本研究引用演化經濟 (evolutionary economics) 與適應性控制理論 (adaptive control theory) 作為基礎，據以建構以智慧電網為核心之整合性電力供需資源組合，包括供給面之集中型電源、分散型電源、再生能源和需求面之需求面管理與需量反應，以及調節性資源包括儲能系統和電動車等，從而形塑一個兼具低碳和智慧化之電力系統，具備動態彈性調節系統電力供需之能力，以利未來氣候變遷下之減緩與調適。

其次，進一步立基於此一架構下，考量相關狀態變數（包括電力供給之能量、容量和輔助服務等電力資源）、量測變數（包括可觀測之能源與永續指標）、性能變數（包括可識別之價值指標與風險指標）和控制變數（包括可控性之政策制度因素、技術因素、市場因素和營運因素）；並考量其相互間之互動與耦合關係和回饋機制，據以建構一個可以進行情境模擬分析之多元代理系統動力模型，進行實證性模擬。

依據模擬結果，經由得出不同情境下各種電力資源和相關指標之發展趨勢，從而推論永續發展下：(1)適應性之電力需求；(2)適應性路徑依賴之「非線性自組織」智慧電網電力資源組合；(3)電力規

* 兩位作者分別為聯絡作者：洪紹平，國立臺北大學自然資源與環境管理研究所博士候選人/台灣電力公司綜合研究所電力經濟與社會研究室主任，10016 臺北市中正區羅斯福路 4 段 198 號 3 樓，電話：02-23601250，E-mail: u827131@taipower.com.tw。張四立，國立臺北大學自然資源與環境管理研究所教授，23741 新北市三峽區大學路 151 號，電話：02-86741111 轉 67334，E-mail: ssuli@mail.ntpu.edu.tw。

投稿日期：民國 104 年 1 月 1 日；修訂日期：民國 104 年 5 月 6 日；

接受日期：民國 104 年 11 月 20 日。

經濟研究 (Taipei Economic Inquiry), 52:1 (2016), 73-127。

臺北大學經濟學系出版

劃與資產管理演進下之適應性備用與備轉容量；(4)適應性電力價格之可能趨向，可以提供電力「規劃與管理」決策參考之用。

關鍵詞：演化經濟、智慧電網、電力資源組合、適應性控制、系統動力模擬

JEL 分類代號：C53, C61, C63, L94, Q01, Q41

1. 前言

電力資源組合之特性、挑戰與不確定性因素，主要來自經濟變數、負載變動、預測誤差和電力供應方案計畫推動，及其過程之變動與時程落差、其他偶發事故，以及污染排放限制、燃料價格變動、電價變動、技術發展、政策制度變動等因素；而當非核與低碳之未來政策發展願景，促使再生能源占比逐漸提高後，則另外增加了一項更為顯著的不確定性來源，共同衍生了經營上因不確定性所需的適應性彈性需求。

此一彈性需求，除了對於再生能源預測及其負載特性必須有效掌握外，更需要具有彈性能力（即調節能力）之資源來加以適度搭配、平衡和吸收，包括可快速啟動之燃氣機組、需求面管理與需量反應、儲能系統、電動車和其他輔助服務或聯網等。其間，則有賴智慧電網結合即時價格訊號在時間和空間上，加以全系統或區域性之有效整合、連結和調度控制此一多元電力資源組合，以形塑一個具有強健性和適應力，且能兼顧可靠、安全和穩定之智慧化低碳電力系統，方足以因應未來複雜而不確定性因素下有利於進行減緩和調適之動態情境。

整體而言，它是由技術進步、市場趨力、政策制度推動和經營模式等要素主導所複合而成的控制因素組合。經由可用之量測變數和性能指標，即時、即地、即境適應性進行電力資源最適動態組合規劃與控制，以維持電力供需平衡、可靠、安全、效率和低碳化。

為了滿足上述維持即時電力供需平衡的基本特性行為，本研究一方面試圖聯結到開放系統下「非平衡耗散結構」熱力學第二定律能量平衡原理、演化動力學、演化經濟學和適應性控制理論，作為理論基礎，另一方面考量其所需要之配套基礎建設條件：(1) 立足於即時供需平衡之適應性電力規劃與調度觀點；(2) 搭配未來朝向智慧電網架構下之即時線上適應性控制能力；(3) 耦合 3E（能源

(energy)、經濟 (economy) 和環境 (environment)) 多目標規劃模型暨當前國家能源發展政策之參考模型下的適應性控制系統。而為了驗證這樣的一個設計構想，本研究建構一個簡化的模型並運用緣於控制理論之系統動力模擬工具，來進行實證模擬。

2. 電力資源組合之理論基礎與研究架構

2.1 問題背景與演化經濟理論

面對氣候變遷衝擊以及對於經濟與環保生態整合之要求下，永續發展之各種思想理論、經營模式和應用工具在各式趨力與壓力下因應而生。其中，環境經濟學派致力於追求將環境外部性內部化，惟仍受限於其根本上立足於新古典經濟理論之範疇與限制，亦即從理性經濟人觀點來治理以均衡理論為核心之經濟系統，資源與環境祇是經濟系統之外生因數，它隸屬於一種弱永續之確定性發展模式。生態經濟學派則試圖從系統觀點，在空間上將生態系統與經濟系統加以結合，考量其間之互動與回饋關係，亦即從生態與經濟複合觀點來治理生態與經濟複合系統，資源與環境成為系統之內生因素，可歸類為由弱永續趨向永續之發展模式。循環經濟則立基於區域經濟之生態經濟觀點，從資源減量、再循環和再利用之 3R 具體實務觀點，進一步從物質流之生命週期價值鏈上，強化了生態經濟的循環性與回饋性和微觀面與執行面；亦即從循環經濟觀點來治理資源、生態與經濟複合系統，其永續發展模式又向前邁進。演化經濟則從資源系統、生態系統與經濟系統互動下所衍生之突現性 (emergence) 之共同演化 (coevolution) 觀點，更進一步強化了時空上系統發展與穩定之動態性和適應性，亦即從演化經濟觀點來治理資源、經濟與生態複合動態系統，更為趨向永續發展。

相較新古典經濟學立基於：(1) 滿足靜態均衡、利潤最大化和完全理性；(2) 給定偏好、技術和制度不變之假設前提；(3) 簡化觀點

下之還原論、決定論和機械論，而演化經濟學則強調：(1) 追求動態均衡、滿意解和有限理性；(2) 給予偏好、技術和制度之動態演變機制；(3) 複雜性觀點下之整體論、隨機論和有機論。其涵蓋範疇包括宏觀與微觀之：(1) 技術演化；(2) 制度演化；(3) 經濟發展演化；(4) 企業演化；(5) 產業演化；(6) 演化博弈；(7) 網路演化等。¹

本文旨在結合「演化經濟學」、「耗散結構熱力學」、「演化動力學」和「適應性控制」理論，經由系統動力模擬分析所內嵌之正負回饋機制，來詮釋面對不確定因素下，智慧電網「複雜適應性系統」在電力資源組合之共同演化行為，其所涵蓋之相關理論基礎包括：

- (1) 演化經濟學：萃取新古典經濟各學派所蘊含演化意涵之精華，包括制度學派之制度演化、創新學派之技術演化、調節學派之機制演化和奧地利學派之社會演化；並吸納生物演化和企業演化之隱喻；再結合系統理論、複雜性科學和開放系統下非平衡耗散結構理論，所形塑一個新典範的動態經濟發展理論。
- (2) 耗散結構熱力學：開放系統經由物質與能量交換，在系統遠離平衡態下自組織維持系統之有序結構。
- (3) 演化動力學：反還原論下，彰顯不可逆、路徑依賴、新奇和動態特性之演變行為。
- (4) 適應性控制理論：考量內外不確定性因素變動下經由量測、估計，彈性動態調整系統結構參數，從而達成系統最適控制。
- (5) 複雜性科學：系統組分間之非線性相互作用，所產生之系統湧現特性，包括系統科學（系統論、信息論、控制論）、自組織理論（耗散結構論、協同學、突變論、超循環論、混沌理論、分形理論）和網路複雜性。
- (6) 系統動力學：經由正負回饋內在機制，聯結存量、流量和輔助變數，從而表現系統動力機制之演化特性。

¹ 盛昭瀚與蔣德鵬（2002）整理「演化經濟學」之內涵，涵蓋技術變遷演化理論、制度經濟演化理論、經濟增長演化模型、實驗經濟演化分析、演化博弈論、產業演化模型和企業演化分析。

2.2 簡要歷史文獻摘述

本研究參考之歷史文獻，主要涵蓋「演化經濟」以及「系統科學」所衍生之(1)適應性控制、(2)複雜性科學、(3)耗散結構非平衡熱力學、(4)系統動力模擬之相關理論與研析，並聯結至「電力經濟」實務領域之攸關應用內涵。

在演化經濟方面，包括：(1)生物學隱喻、(2)技術演化、(3)制度演化、(4)共同演化、(5)企業演化（微觀經濟）、(6)經濟發展演化（宏觀經濟）、(7)演化博弈、(8)模式演化、(9)網路演化和、(10)其它演化。其中，楊虎濤（2008a）就生物學隱喻其使用之合理性提出論述，而在楊虎濤（2008b）「霍奇遜教授訪談錄」中，則從實驗經濟學與演化博弈觀點論及「制度演化」，並對技術與制度相互回饋之共同演化，有其深入之洞見；Dopfer (2005) 主篇「經濟學的演化基礎」，涵蓋演化微觀經濟、演化中觀經濟和演化宏觀經濟三大層次；Simmie et al. (2014) 比較德國與英國其風力再生能源發電，在「技術路徑創新」之演化歷程差異；Cecere et al. (2014) 從鎖定效應與路徑依賴觀點，論述生態創新在技術、制度、企業和社會整體共同演化下之轉型與巨變過程；Tedeschi et al. (2014) 從創新網路之動態演化觀點，探討技術變革之轉型模式與行為；張夏准等（2011）從制度與經濟發展之因果關係的動態演化觀點，批判主流經濟學之簡化看法與局限性；賈根良（2014）比較溯因法與回溯法，相較於傳統經濟學演譯法與歸納法等四種模式在結構、形式、邏輯推理、強項和限制性等屬性之差異。

在系統科學方面，Ioannou and Fidan (2006) 編寫適應性控制操作手冊，涵蓋間斷型與連續型以及非線性之適應性控制；Widrow and Walach (2008) 就信號處理方法，從「適應性控制」延伸至「適應性逆控制」；Mainzer (2007) 從物質、精神和人類的計算動力學，提出複雜性思維，涵蓋複雜系統與物質進化、複雜系統與生命進化、複

雜系統與心腦進化、複雜系統與可計算性進化，複雜系統與人工生命暨人工智能演化、複雜系統與經濟演化、複雜系統與社會進化等；Holland (1995) 提出複雜適應系統之適應性主體、「湧現」的隱秩序和回聲模型的計算機模擬；Woldrop (1992) 寫出「複雜」科普書，涵蓋秩序、複雜到混沌之「湧現」性科學。Rammel et al. (2007) 從共同演化觀點，探討自然資源之「複雜適應性系統」管理；Haghnevis and Askin (2012) 研析工程複雜適應性系統之建模架構；諾貝爾獎得主 Prigogine (1962) 首先提出具有生命之開放系統，在遠離平衡下，經由物質與能量交換下之自組織，得以維持系統之有序結構，稱之為「耗散結構」；Meadows et al. (2004) 提出 30 週年增訂之「成長的極限」，歸納出持續增長、S 型增長、過度與震盪和過度後崩潰四種有限世界的成長動力模型；Botterud et al. (2002) 就自由化電力市場之長期投資決策，提出「系統動力模擬」模型。

在電力經濟方面，其相關領域主要包括：(1)預測、(2)規劃、(3)調度、(4)智慧電網等，並擴及環境經濟（包括碳交易、氣候變遷）、生態經濟和永續發展。陳鳳惠等（2007）建立電力負載預測模型，並進一步發展成決策支援系統；鍾輝乾等（2008）建立電力規劃模型，並模擬分析氣候變遷下之減緩政策—抑低 CO₂ 排放對經濟發展之影響；Ingham et al. (2007) 考量不確定性下之學習效果，進行氣候變遷下之減緩與調適研究；張四立（2005）建構能源、經濟、環境 3E 多目標規劃模型，結合產業關聯分析與多目標規劃之情境模擬方法，涵蓋滿足產業附加價值極大、發電成本極小，二氧化碳排放量極小等優化目標，及考量發電燃料投入、發電容量、電力供需均衡、尖離峯機組配置、可靠度等限制之電力規劃模型，並實際應用於「永續能源結構下之我國最適再生能源結構」；洪紹平等（2008）建構智慧電網下區域電力資源整合模型，應用於電力資源組合之轉型演化；張文恭等（2009）建構汽力、複循環及抽蓄機組之機組排程調度模型，並開發建置成一資訊系統；洪紹平等（2012）進行碳資產規劃，推動太陽光電之碳權交易計畫；洪紹平等（2011）進行氣候

變遷對電力系統之衝擊與調適策略探討；黃書禮（2004）從能值評估之能量觀點，探討都市生態經濟系統之能量分佈、流動與變遷；Rammel and van den Bergh (2003) 從適應性彈性觀點，探討永續發展下之演化政策。

2.3 研究架構流程

綜合上述，本文擬從理論基礎與電力資源組合特性之聯結關係，據以進行整體觀念設計與簡化模型建構，進而進行個案情境模擬與模擬結果詮釋，從而提出電力資源組合規劃與管理之適應性電力經濟意涵，研究架構流程如圖 1 所示。

3. 適應性智慧電網電力供需資源組合之觀念設計

3.1 適應性控制理論

3.1.1 適應性控制理論基礎

相對論、演化論和控制論係 20 世紀人類之三大發明，其中控制論已實際廣泛應用於工程控制、經濟控制、社會控制和生態控制；其演進發展從古典控制（頻域控制）、現代控制（時域控制）到智能控制（智慧化控制）；而其中理論基礎，包括最適控制（確定性）、隨機最適控制（機率性，考量隨機干擾與量測誤差）和適應性控制（考量系統結構性調適，包括確定性和機率性模式）；涵蓋狀態變數(X)、量測變數(Y)、性能變數(Z)、控制目標(J)和控制變數(U)，以及環境干擾變數(W)與量測誤差變數(V)之相互關係與連結機制。²

² 韓曾晉（2002）編著「適應性控制系統」，歸納出 (1) 確定性最適控制問題、隨機最適控制問題和適應性控制問題。(2) 參考模型適應性控制和線上鑑別適應性控制兩種適應性控制模式。本研究即以 3E 多目標規劃模型作為參考模型，並與系統動力模型加以耦合；本研究另以「智慧電網」作為資源組合內嵌之基礎建設，則立基於線上鑑別適應性控制模式。

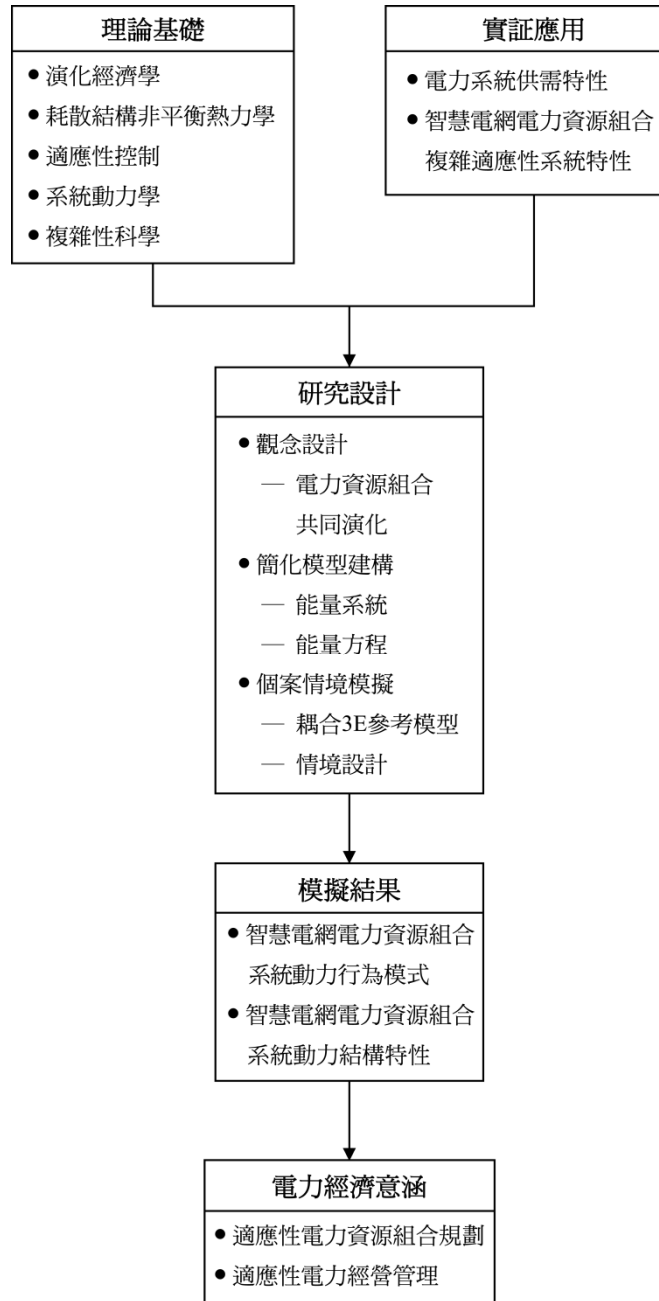


圖 1 研究架構

3.1.1.1 狀態方程

1. 連續型

$$\dot{X} = f[X(\theta, t), U(t), t] = A(\theta, K)X(K) + B(\theta, K)U(K) + W(K) \circ \quad (1)$$

2. 離散型

$$X(K+1) = A(\theta, K)X(K) + B(\theta, K)U(K) + W(K) \circ \quad (2)$$

3. 矩陣型（電力資源為例）

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \vdots \\ \dot{X}_n \end{bmatrix}_{1 \times n}^T &= \left\{ \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \right\}_{1 \times n}^T + \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}_{1 \times m}^T \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ U_{m1} & \cdots & U_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \\ &+ \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_t \end{bmatrix}_{1 \times t}^T \begin{bmatrix} W_{11} & \cdots & W_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{t1} & \cdots & W_{tn} \end{bmatrix}_{t \times n}, \end{aligned} \quad (3)$$

n = 電力資源狀態變數維數，包括水力、油、煤、氣、核、汽電、風力、光電、生質能、需量反應、能源效率、儲能、電動車等。

m = 電力資源控制變數維數，包括市場、技術、政策制度、經營模式等。

t = 電力資源干擾變數維數，包括可靠度因子、減緩因子、調適因子等。

3.1.1.2 控制方程

1. 連續型

$$U(t) = -K(\theta, t)X(t) \circ \quad (4)$$

2. 離散型

$$U(k) = -K(\theta, t)X(k) \circ \quad (5)$$

3. 矩陣型

$$\begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ U_{m1} & \cdots & U_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} = - \begin{bmatrix} K_1 \\ \vdots \\ K_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}_{1 \times n}^T \circ \quad (6)$$

3.1.1.3 量測方程

1. 連續型

$$Y(t) = C(\theta, t)X(t) + D(\theta, t)U(t) + V(t) \circ \quad (7)$$

2. 離散型

$$Y(k) = C(\theta, k)X(k) + D(\theta, k)U(k) + V(k) \circ \quad (8)$$

3. 矩陣型

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & \cdots & Y_{kn} \end{bmatrix}_{k \times n} &= \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_k \end{bmatrix}_{k \times 1} \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}_{1 \times n}^T \\ &+ \begin{bmatrix} D_{11} & \cdots & D_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{k1} & \cdots & D_{km} \end{bmatrix}_{k \times m} \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ U_{m1} & \cdots & U_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \\ &+ \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1g} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{k1} & \cdots & e_{kg} \end{bmatrix}_{k \times g} \begin{bmatrix} V_{11} & \cdots & V_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{g1} & \cdots & V_{gn} \end{bmatrix}_{g \times n} \circ \quad (9) \end{aligned}$$

k = 電力資源量測變數維數，包括供給面、需求面、價格面、環境面等。

g = 電力資源誤差變數維數，包括信度誤差、效度誤差等。

3.1.1.4 性能方程

1. 連續型（二次型）³

$$\begin{aligned} Z &= f[X(t), U(t), t] = \phi[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} F[X(t), U(t), t] dt \\ &= X^T(t_f)Q_0X(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [X^T(t)Q_1X(t) + U^TQ_2U(t)] dt \end{aligned} \quad (10)$$

2. 間斷型（二次型）

$$Z = E\{X^T(l)Q_0(l) + \sum_{k=0}^{l-1} [X^T(k)Q_1(k)X(k) + U^T(k)Q_2(k)U(k)]\} \quad (11)$$

3. 矩陣型（線上鑑別）

$$\begin{aligned} Z &= \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \\ \vdots \\ \hat{X}_n \end{bmatrix}_{1 \times n}^T = \hat{A} \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \\ \vdots \\ \hat{X}_n \end{bmatrix}_{1 \times n}^T + \begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \vdots \\ \hat{b}_m \end{bmatrix}_{1 \times m}^T \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ U_{m1} & \cdots & U_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \\ &+ \begin{bmatrix} \hat{C}_1 \\ \vdots \\ \hat{C}_k \end{bmatrix}_{1 \times k}^T \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & \cdots & Y_{kn} \end{bmatrix}_{k \times n} + \begin{bmatrix} \hat{e}_1 \\ \vdots \\ \hat{e}_t \end{bmatrix}_{1 \times t}^T \begin{bmatrix} W_{11} & \cdots & W_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{t1} & \cdots & W_{tn} \end{bmatrix}_{t \times n} \quad (12) \end{aligned}$$

4. 電力最適規劃模型

$$\begin{aligned} J &= \max \int_0^{\infty} [U(E_t) - C(S_t)E_t] \exp(-\rho t) dt, \\ \text{s.t. } \dot{S}_t &= G(S_t) - E_t, \end{aligned} \quad (13)$$

其中， J 為目標， U 為效用， C 為能源單位成本， E 為能源耗用量， S 為能源存量， G 為再生能源開發量，及 ρ 為折現率。

³ 劉豹（1992）主編「現代控制理論」，論及線性二次型最適控制問題。

3.1.1.5 電力資源組合意涵 (圖 2)

1. 系統參數向量 θ 未知；狀態變數 $X(t)$ 和量測變數 $Y(t)$ 中之 θ 意指「電力資源組合適應性系統」中能流上之結構參數。
2. 擾動 $W(t)$ ，雜訊 $V(t)$ 隨機序列； $W(t)$ 意指「電力資源組合適應性系統」之隨機干擾，包括政策制度、市場和科技等不確定性變動因素； $V(t)$ 為「電力資源組合適應性系統」輸出變數之量測或指標的隨機誤差。
3. 系統、環境不確定下選擇控制函數 $U(t)$ ，使得性能 $Z(U, X, t)$ 最適； $U(t)$ 意指「電力資源組合適應性系統」之控制變數，如能源政策、經濟政策、環境政策等； $J(U, X, t)$ 意指「電力資源組合適應性系統」之目標函數，如 GDP、CO₂ 排放等。
4. 涵蓋狀態回饋控制（自回饋）和輸出回饋控制（他回饋）。
5. 涵蓋前饋和回饋以及正回饋與負回饋。
6. 包括參考模型（例如與 3E 多目標規劃模型耦合）之適應性控制和線上鑑別調節之適應性控制（例如智慧電網架構）。
7. 所述適應性控制理論模型，常係基於線性、連續假設前提下之微分方程求解；惟實務上變數間之關係常屬非線性、非連續，難以求解；往往需要轉化為差分方程之模擬模型，經由模擬來加以處理。

3.1.2 廣義適應性控制模擬與決策

廣義之控制論更擴及預測、規劃和動態模擬範疇，其中預測、規劃屬事前之前饋控制，而預測需要由狀態變數與狀態函數來加以推估；規劃除考量狀態變數與狀態函數之限制外，另包括目標函數以求得最適解；模擬則涵蓋前饋與回饋控制（事前與事後）。其中回饋控制係藉由狀態變數或量測變數之回饋訊息來評估性能指標，並據以事後調整控制變數從而達成最適化目標；至於決策則是上述預測、規劃和模擬再加上評價之最後綜合，如圖 3。

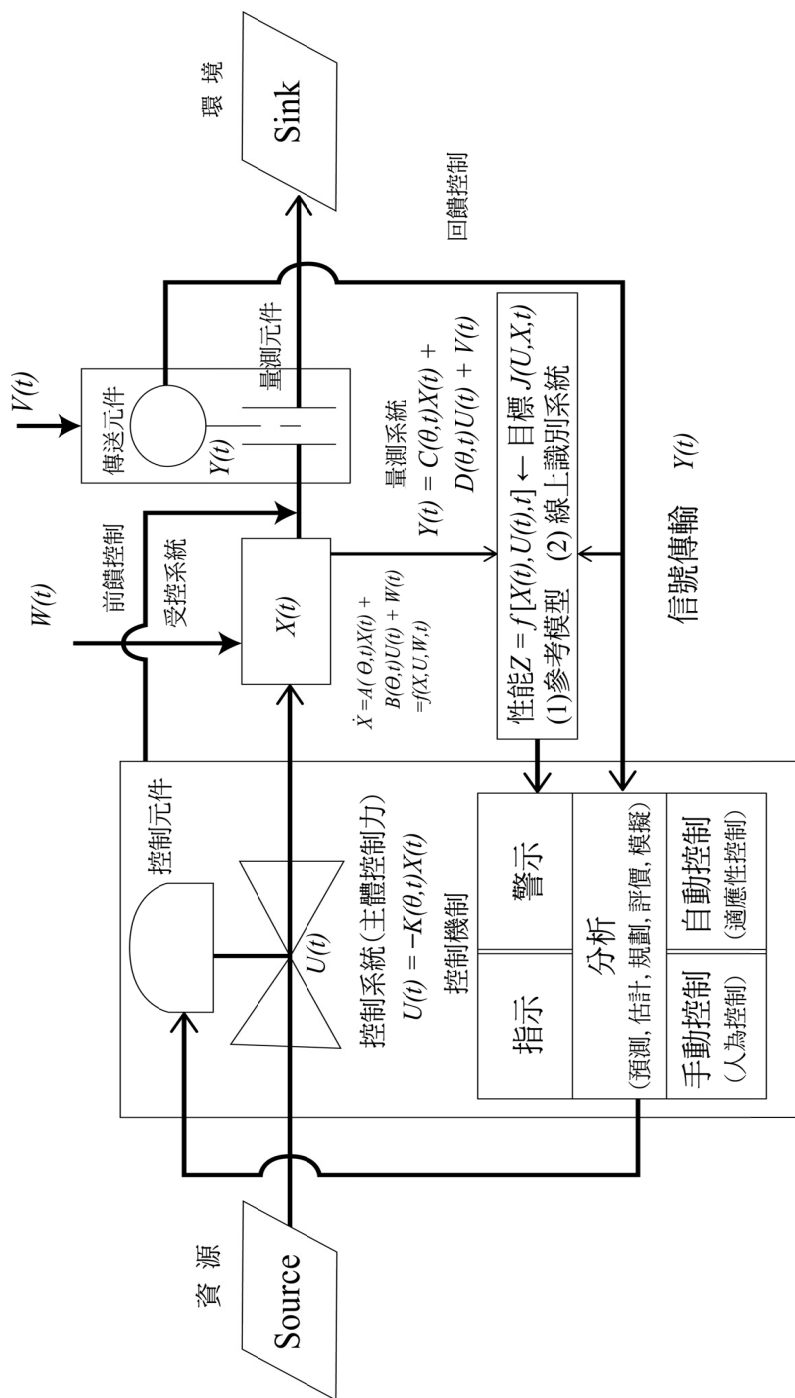


圖 2 適應性控制流程图—電力資源組合適應性系統

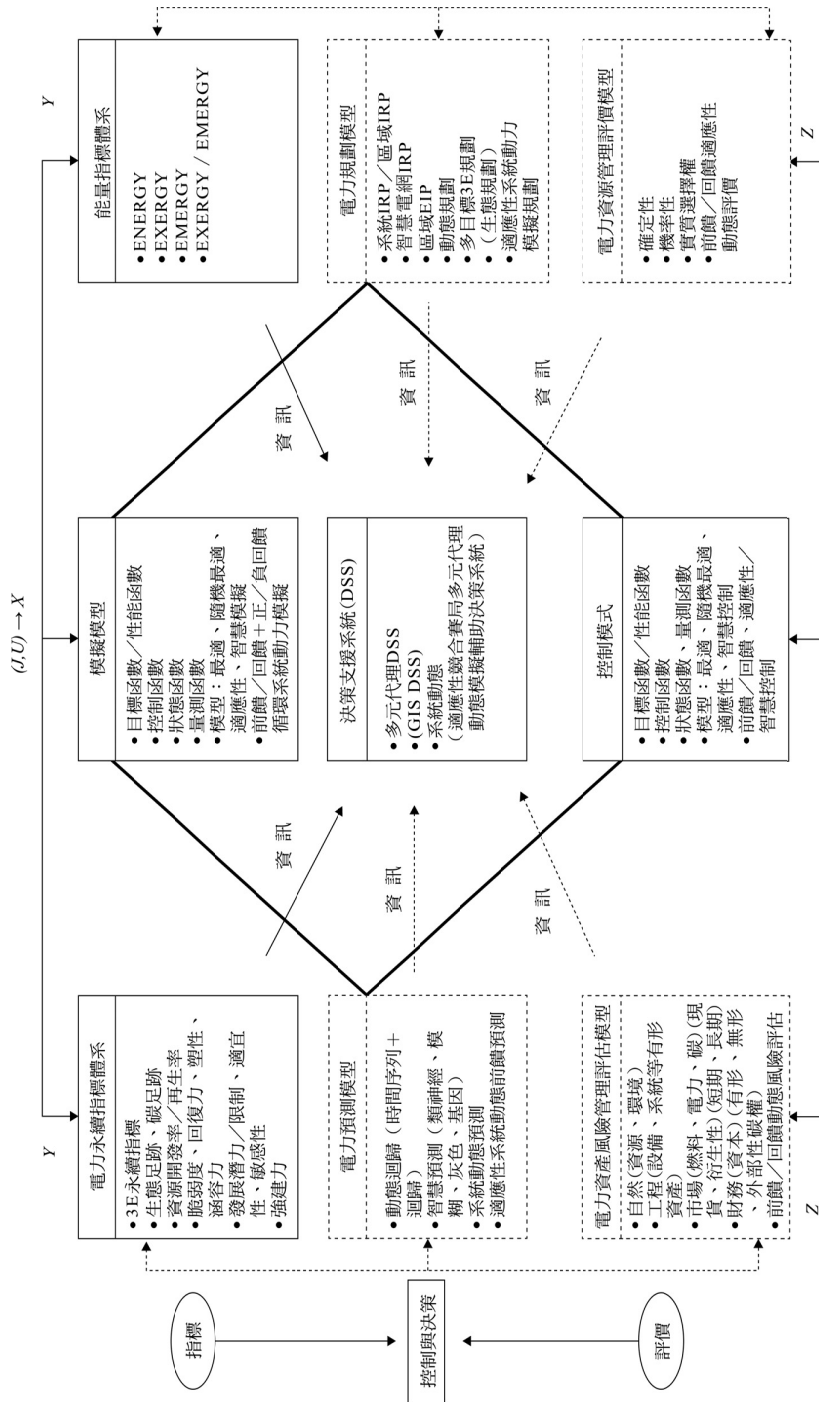


圖 3 電力資源組合適應性模擬與決策模式建構之觀念設計

3.2 智慧電網

3.2.1 電力供需平衡觀念架構

智慧電網旨在應用數位科技，結合先進電力電子暨自動化和資通訊技術，以電網為核心，最適化動態組合供給面資源（集中型發電、分散型發電和再生能源等）、需求面資源（需求面管理、需量反應等）和調節性資源（儲能系統、電動車等）；從而建構一個新系統架構、新運轉能力和最佳化資產管理能力之電力系統，朝向更具智慧化之發電、輸電、配電和用電之「強健性」電力基礎設施。⁴

在此建構基礎下，俾能有效結合發輸配售智慧型低碳先進技術、能源－環境－經濟與科技政策、燃料與電力暨碳市場和發輸配售最適化經營模式，隨時隨地隨著不同情境，經由可觀性之量測變數 (Y) 和可識性之性能指標 (Z)，適應性動態組合控制 (U) 電能生產、電能管理、電能交易與電能服務攸關之電力資源 (X)；以利確保電力供需平衡和因應未來氣候變遷減緩與調適之艱鉅挑戰，引領國家朝向未來智慧化之低碳社會發展，如圖 4 所示。

3.2.2 電力資源組合之演化路徑與藍圖

傳統電網的供電模式係立基在計畫經濟之電力開發規劃計畫下，由許多大型發電廠，包括核能、火力之燃煤、燃氣與燃油機組，和水力等所組合而成之基、中、尖載搭配的集中式發電。但隨著再生能源、分散型能源和需求面管理的發展趨力，未來之電力系統將朝向市場經濟暨共享經濟下之運作模式；由集中型電源與電網和分散型電源與電網（微型電網）所複合形塑而成之智慧型電力基礎設施，即時即地即境協同合作與協調搭配，進行電力資源之適應性動態組合與調控。

⁴ Forsten (2015) 主導之美國電力研究院 (Electric Power Research Institute) 進行智慧電網研究，提出具有適應性、自愈性和彈性之「強健性」智慧電網架構，涵蓋發電、輸電、配電和用電。

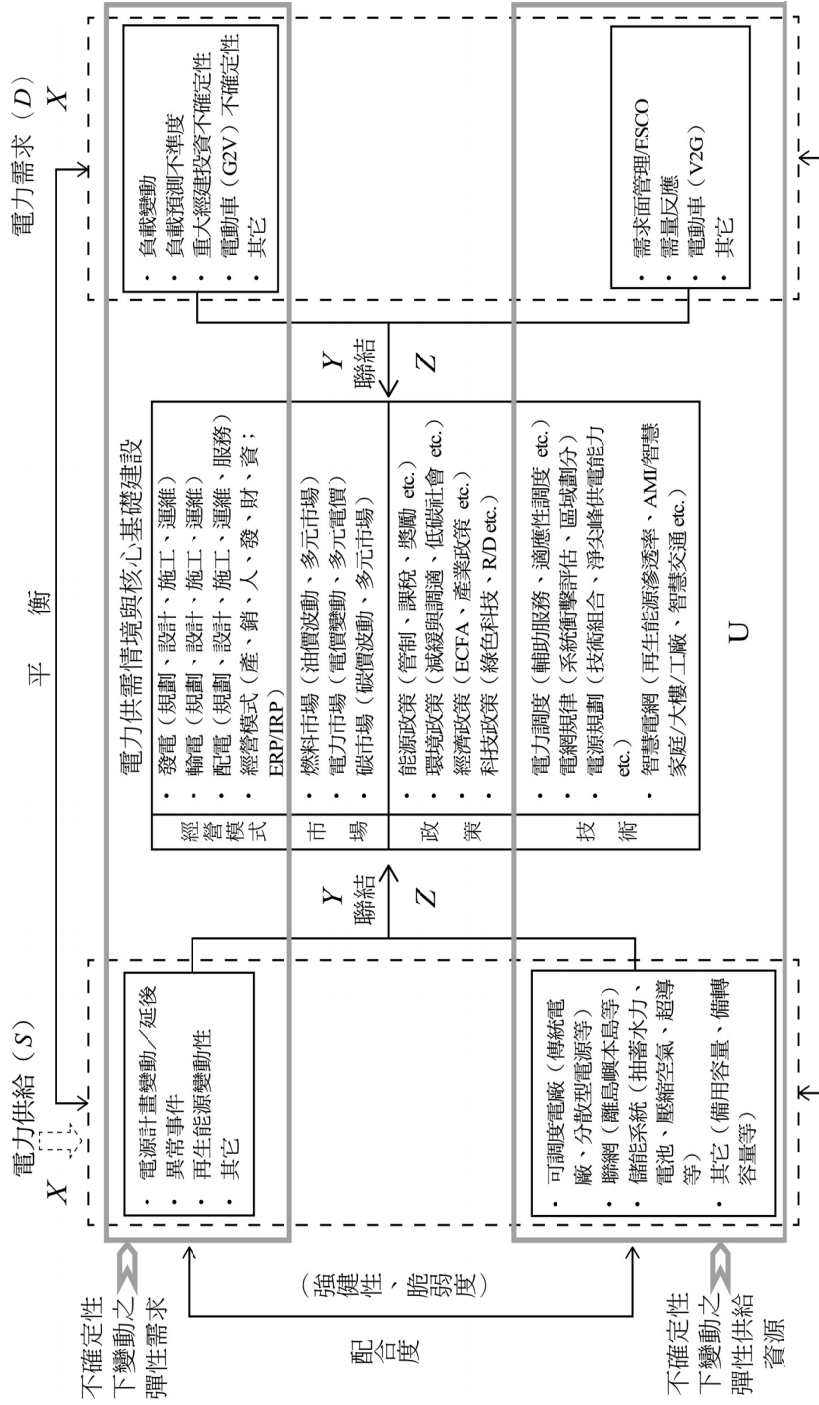


圖 4 適應性智慧電網電力供需資源組合動態平衡架構

換言之，經由集中型電源與分散型電源、再生能源與非再生能源、供給面資源與需求面資源，以及系統智慧電網與區域微型電網等相互間之互補與替代組合關係，共同演化朝向未來永續發展之智慧化低碳或無碳的明日電力世界。它是一個動態 S 曲線函數演進的歷程，包括新舊發展曲線之轉型、新生和複合，並涵蓋資源面、技術面、市場面、政策法制面和經營管理面之相互搭配，從而創造電力資源適應性動態組合之最大價值，如圖 5。

3.3 系統動力架構

基本上，電力供給、需求和價格，將在以智慧電網為樞紐中心 (hub) 所建構之平台 (platform) 下，進行電力資源物聯網 (internet of things) 之最適動態價值組合，形成一個雙元回饋循環之 DPSR (趨

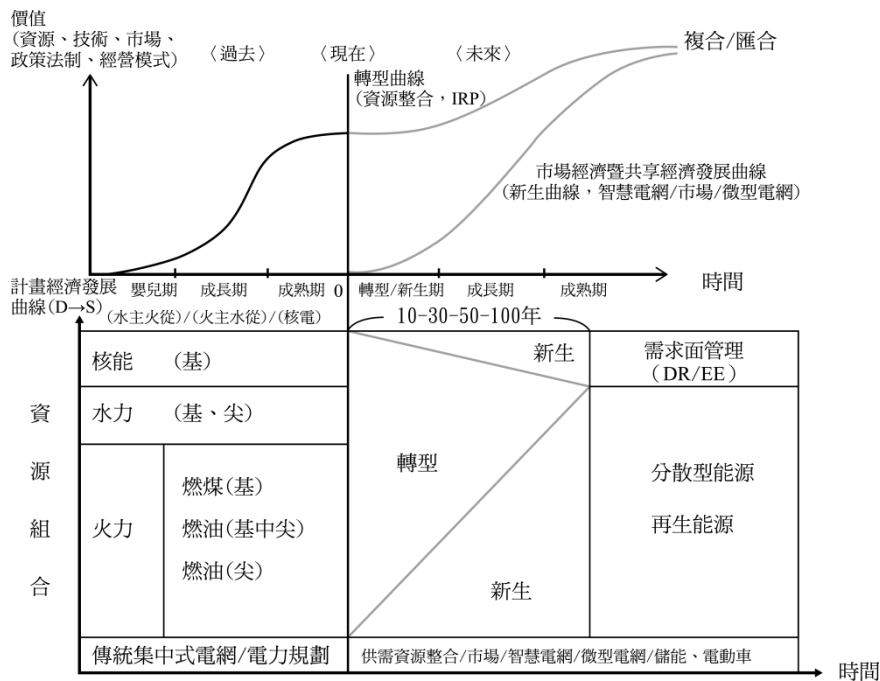


圖 5 電力資源組合之適應性演化路徑

力 (driving force)、壓力 (pressure)、狀態 (state) 和回應 (response)) 電力供需系統動力機制。在電力供給方面，包括聯結電源組合結構之規劃、運轉和經營，以及攸關能源與環境政策和法規制度。在電力需求方面，包括連結至工業與住商用戶之用電需求暨生產及其需求面管理、微觀產業經濟和宏觀總體經濟，以及攸關之能源－環境－經濟政策與法規制度。在價格方面，則包括管制下之電價機動訂定與調整，以及自由化下之市場波動價格等機制。三者耦合連結並相互回饋，形成一個具有非線性湧現特性（正回饋）與調節（負回饋）機制之共同演化系統，如圖 6 所示。⁵

3.4 永續指標建構

上述系統動力模型，旨在適應性動態融合狀態變數、量測變數、性能指標和控制變數，其中性能指標需要朝向永續發展目標；而永續發展指標可以從 DPSR（趨力、壓力、狀態和回應）之多元回饋角度來加以構建，包括：(1) 能源指標－以能源 (energy) 為核心，其中可用能 (exergy) 和能值 (emergy)，除了揭示能源之量外更強調能源之品質，前者 exergy 以可用能（可以轉換為功之部份）和不可用能（耗散能，無法轉換為功之部份）來區格能量之品質；而後者能值 (emergy) 則以太陽能作為基本單位，來界定能源從太陽能傳送至使用端轉換過程中之各類能源型態之量的大小與品質；(2) 價值指標－以價值為核心，涵蓋 GDP、綠色 GDP 或其他超越經濟屬性之量度；(3) 風險指標－相對於價值而言，涵蓋作業風險、市場風險、財務風險和環境風險等；(4) 環境指標（減緩指標）－以環境為核心，涵蓋考量資源與環境限制下生態足跡和容受力，以及考量碳排放強度之碳足跡，並擴及水資源利用之水足跡；(5) 調適指標－考量自然、經社

⁵ Olsina et al. (2006) 提出「電力市場之長期系統動力模型」，涵蓋供給面、需求面和價格面之電力資源組合內涵；楊碩英等 (2003) 進行「台電長期策略規劃系統動力模型」研究，涵蓋電源開發模組、發電模組、輸變電模組、配電模組、管制模組、財務模組及市場競爭等模組。

和系統敏感性 (sensitivity) 和恢復力 (resilience) 之脆弱度 (vulnerability)、強健力 (robustness) 和穩定性 (stability)；及 (6) 綜合指標－兼容能源、經濟和環境之 3E 以及減緩與調適之永續指標。

4. 適應性智慧電網電力供需資源組合之系統動力個案模擬建構

4.1 簡化模型系統流程

立基於電力供需平衡下之能量平衡原理（熱力學第二定律），構建簡化電力模型之系統流程如圖 7 所示：

1. 自然存在之再生能源，部分容量受控進入人類所控制之系統成為存量，部份則又回到自然系統；
2. 再生能源存量 (Q) 與非再生能源存量 (A) 經由動態組合之互動關係產生電力 (E)，在考量備用與備轉容量可靠度需求下供應經濟社會用電需求，並可加以有效管理 (demand side management, DSM)；
3. 經由智慧電網暨電力交易平台售電至市場用戶，從而獲取收入創造電力價值收益 (M)；
4. 部份收入向燃料供應商躉購燃料（成為非再生能源存量）並與再生能源組合，轉換成電力和向民間電廠 (IPP) 購買電力，經由動態調節供需平衡，供電予用戶，反覆回饋循環；
5. 化石能源一方面既產生 CO_2 構成碳排放存量（碳資產）之投入，另一方面又經由碳補獲與儲存 (CCS) 等碳資產管理形成碳匯輸出；
6. 間歇性之再生能源優先與家戶儲能系統結合供應家戶用電，其次再與區域儲能系統結合，供應區域用電（微型電網），最後再與系統智慧電網結合，供應所有用戶；
7. 循環型再生能源（生質能）成為再生能源存量；及
8. 電價部份考量外生與內生兩種情境。

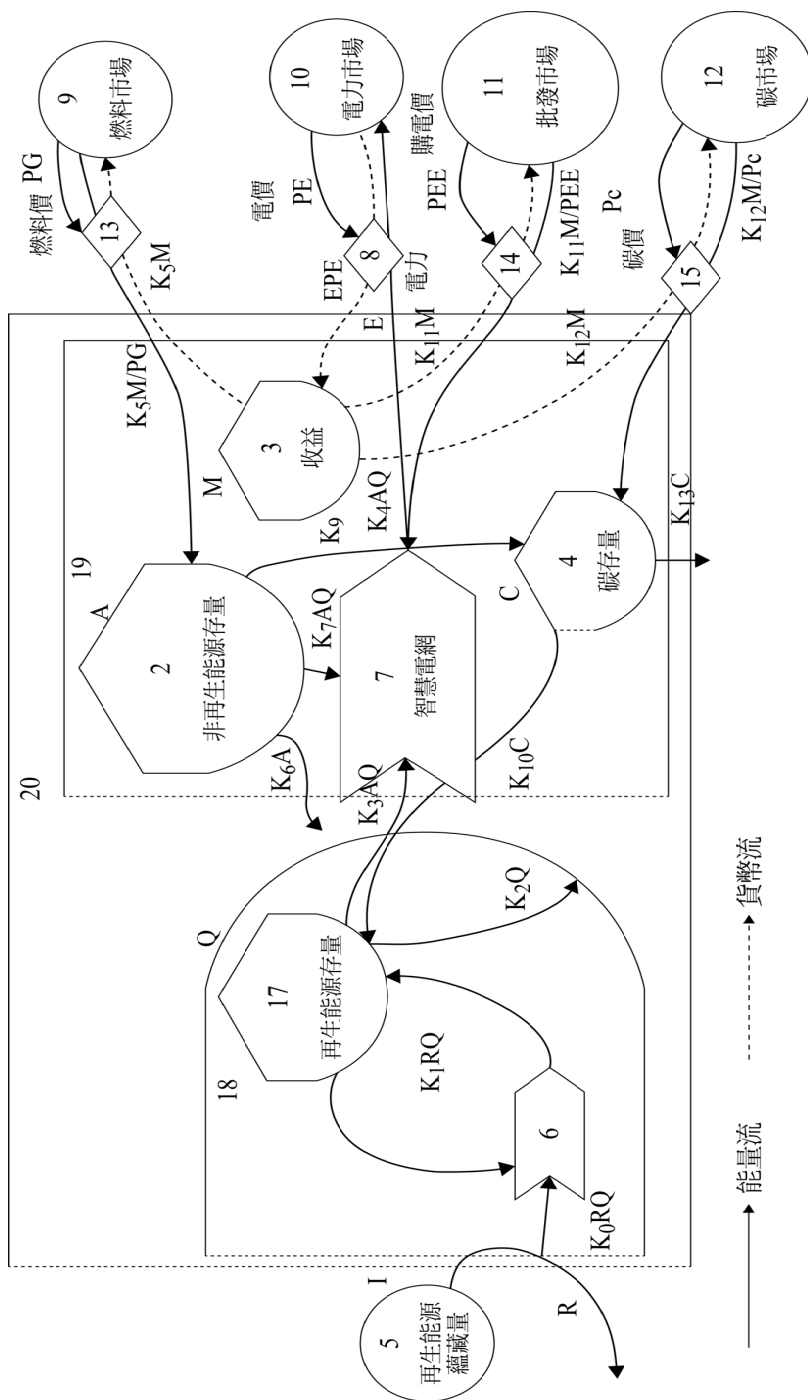


圖 7 智慧電網下電力資源組合系統流程圖 (簡化模型)

4.2 簡化模型系統動力機制

(一)依圖 7 系統流程圖，考量各存量之能量平衡及其非線性互動關係，從而建構其差分系統方程如下。

1. 再生能源可開發量平衡方程式

$$I - R = K_0 \times R \times Q, \quad (14)$$

其中， I 為再生能源蘊藏量， R 為再生能源未開發量，及 K_0 為再生能源可開發流量參數。

2. 再生能源存量平衡方程式

$$DQ = (K_1 \times R \times Q + K_{10} \times C) - (K_2 \times Q + K_3 \times A \times Q), \quad (15)$$

其中， Q 為再生能源存量， K_1 為再生能源流入流量參數， K_2 為再生能源流出發電流量參數， K_3 為再生能源流出未發電流量參數，及 K_{10} 為碳循環流量參數。

3. 非再生能源存量平衡方程式

$$DA = (K_5 \times \frac{M}{PG} - (K_6 \times A + K_7 \times A \times Q + K_9 \times A)), \quad (16)$$

其中， A 為非再生能源存量， PG 為燃料價格， K_5 為購入燃料流量參數， K_6 為非再生能源流出未發電流量參數， K_7 為非再生能源流出發電流量參數，及 K_9 為碳排放流量參數。

4. 收益平衡方程式

$$DM = PE \times (K_4 \times A \times Q + K_{11} \times \frac{M}{PEE}) \times K_{14} - (K_5 \times M + K_{11} \times M + K_{12} \times M), \quad (17)$$

其中， M 為收益， K_4 為電力流量參數， K_{11} 為購電流量參數，及 K_{12} 為碳權流量參數。

5. 碳排放平衡方程式

$$DC = K_9 \times A - (K_{10} \times C + K_{13} \times C + K_{12} \times \frac{M}{Pc}), \quad (18)$$

其中， C 為碳排放， K_{10} 為碳循環流量參數，及 K_{13} 為碳補獲流量參數。

6. 電力供給方程式

$$E = K_4 \times A \times Q + K_{11} \times \frac{M}{PEE} \times K_{14}, \quad (19)$$

其中， E 為電力，及 K_{14} 為需求面管理流量參數。

7. 電價方程式

$$PE = K_8 \times A \times Q \times PG \times PEE \times Pc, \quad (20)$$

其中， PE 為電價， K_8 為電價結構參數， PEE 為購電價格，及 Pc 為碳價。

(二) 依上述系統方程建構系統動力模擬圖如圖 8 所示，據以進行情境模擬，涵蓋如下。

1. 以存量為核心：包括再生能源 (Q)、非再生能源 (A)、收益 (M)、碳資產 (C) 等四個存量；
2. 連結流量：包括再生能源之流入 J_1 及流出 J_2 、 J_7 ；非再生能源之流入 J_3 及流出 J_4 、 J_8 ；收益之流入 J_5 及流出 J_6 ；碳資產之流入 J_9 及流出 J_{10} 、 J_{11} ；各項流入和流出依系統方程所決定；
3. 連結輔助變量：包括再生能源蘊藏量 (I)、未利用再生能源 (R)、電力供需 (E)、燃料價格 (PG)、躉購價格 (PEE)、電價 (PE)、碳價 (Pc) 以及 K_0 至 K_{14} 流路結構參數（由耦合多目標參考模型之 2015 年、2025 年、2035 年國家能源政策下近期、中期、長期低碳結構目標平衡點，⁶ 求算其對應之低碳結構參數；以 2013 年現況高碳結構平衡點求算現況對應之高碳結構參數）；
4. 考量上述各項變量相互間之正負回饋關係。

⁶ 陳曾裕 (2014) 構建 3E 多目標規劃模型，應用於「能源安全與我國電力規劃研究」，考量經濟、能源與環境整體資源之有效配置下，涵蓋經濟成長極大、發電成本極小、再生能源佔比極大、能源消費量極小和二氧化碳排放量極小等五項子目標及十三組限制條件下進行求解，本研究則視其為參考模型，並引用其模擬結果與本個案所構建之系統動力模型加以耦合。

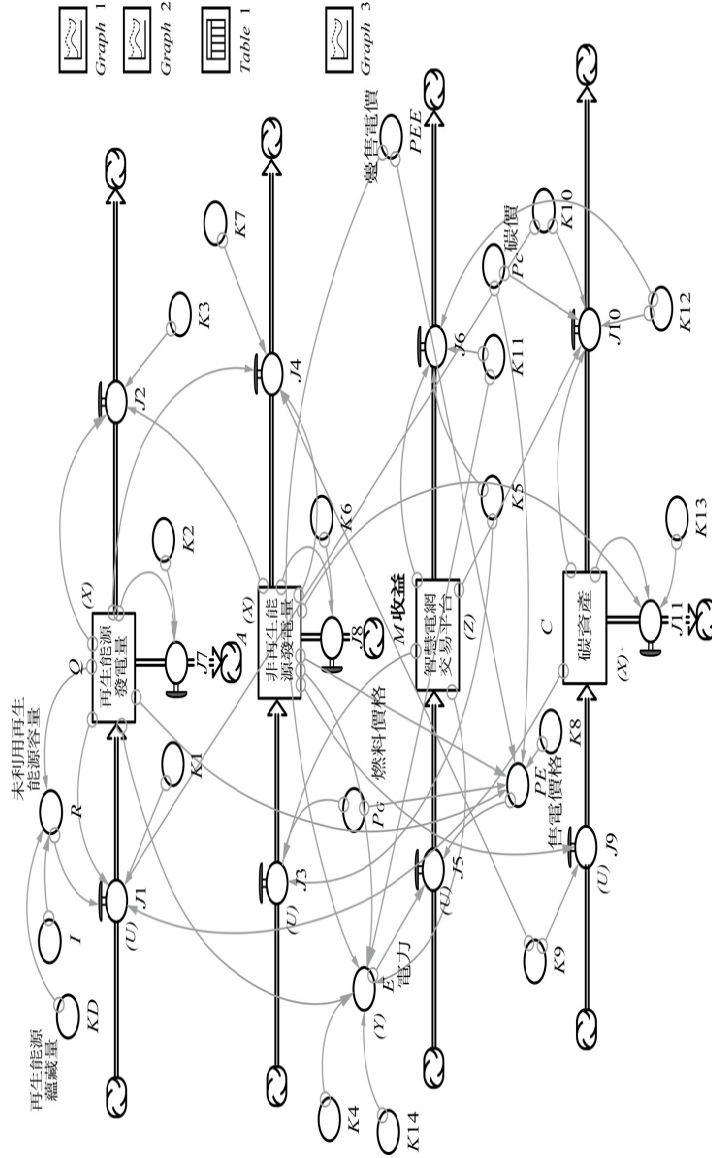


圖 8 智慧電網下電力資源組合系統動力圖 (簡化模型) ⁷

⁷ (再生能源, 非再生能源) → (電力價值, 破資產); 適應性控制邏輯: X (狀態) → Y (量測) → Z (性能) → U (控制); 資源組合模式: 線性 (平衡點) 或非線性 (非平衡點)。

5. 適應性智慧電網電力供需資源組合之系統動力個案模擬結果

5.1 情境模擬

5.1.1 質化分析

5.1.1.1 事件模擬 (情境描述)

基本上，分成價格外生與內生，進行事件導向之情境模擬如附表 1 及附表 2。首先，1. 基本情境：立基智慧電網下耦合模擬再生能源與非再生能源所建構之電力資源組合，並考量多目標模型作為參考模型之耦合模型，據以進行適應性系統動力模擬；分別以 2013 年（現況）、2015 年（近期低碳政策目標）、2025 年（中期低碳政策目標）、2035 年（長期低碳政策目標）之平衡點組合結構存量值，並以 2013 年存量作為其起始值進行基本情境模擬，包括近平衡和遠平衡。

其次，2. 模擬情境：在高低碳結構下另考量電力需求、再生能源蘊藏量、燃料價格、購電價格、碳價和電價對於狀態變數（再生能源存量、非再生能源存量、碳排放）、觀測變數（再生能源可開發量、電力供給、電價）和性能變數（收益）之敏感性，進行敏感性之模擬情境模擬。

5.1.1.2 模擬結果

(一) 行為模式 (系統動力)

綜合上述各項模擬之結果如附表 1 至附表 4，可歸納為四大類別（A 類簡單型、B 類複合型、C 類暫態型、D 類混沌型）24 種演化型態如表 1，其中由基本情境近平衡之事件模擬，顯示 1. 「定態平衡」之行為模式（簡單有序 11 型），而基本情境遠平衡和模擬情境之事件模擬，則分別顯示 2. 「動態非平衡」之行為模式（簡單有序

和複合有序型)：包括 (1) 穩定 (a) 目標驅動調節增長 (3 型)、(b) 目標驅動調節衰減 (7 型)、(c) S 曲線增長 (12 型)、(d) 反 S 曲線衰減 (13 型)；(2) 不穩定 (a) 遠離目標湧現增長(1 型)、(b) 遠離目標湧現衰減 (5 型)、(c) 倒 S 曲線增長 (14 型)、(d) 反倒 S 曲線衰減 (15 型)、(e) 拋物線增長後衰減 (16 型)、(f) 浴缸曲線衰減後增長 (17 型)；和 3. 「暫態非平衡」之行為模式：包括 (1) 過度調節增長後衰減 (18 型)、(2) 過度湧現增長後衰減 (19 型)、(3) 過度調節衰減後增長 (20 型)、(4) 過度湧現衰減後增長 (21 型)；以及 4. 「混沌非平衡」行為模式：(1) 週期 (a) N 型振盪 (22 型)、(b) 反 N 型振盪 (23 型)、(2) 非週期 (24 型)，如表 1。

(二) 結構機制

研究結果顯示：1. 狀態變數 (X)、觀測變數 (Y) 和性能變數 (Z) 之發展方向與路徑、2. 再生能源 (Q) 與非再生能源 (A) 之替代與互補關係、3. 碳排放 (C) 與非再生能源 (A) 之相依性；自然可用再生能源 ($I-R$) 與系統再生能源 (Q) 之相依性；電力 (E)、電價 (PE) 與再生能源 (Q)、非再生能源 (A) 之相依性、4. 收益 (M) 與電力 (E)、電價 (PE) 之相依性、5. 控制變數之敏感性，包括電力需求、資源稟賦、市場價格和政策等。

(三) 路徑依賴分析 (圖 9 至圖 12)

1. 參考平衡點：以 2013 年電力資源組合參數結構並搭配 2013 年初始值，形成平衡點之演化動力，據以進行模擬，模擬結果發現：
(1) 時間序列圖呈現近平衡之靜態平衡；及 (2) 相位圖呈現再生能源與非再生能源之線性關係，如圖 9。
2. 鎖定效應：以 2013 年電力資源組合參數結構為基礎，並以 2025 年 (中期低碳目標) 之再生能源、非再生能源、收益和碳排放之目標組合作為初始值，形成非平衡演化動力，據以進行模擬，模擬結果發現：
(1) 再生能源朝向非線性負回饋遞減後負回饋遞增減少之趨勢；
(2) 非再生能源朝向負回饋遞增振盪平衡之增加趨勢；
(3) 電力呈現非線性負回饋遞減後負回饋遞增減少之趨勢；
(4) 收

表 1 電力資源組合路徑模式摘要表

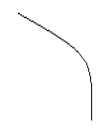
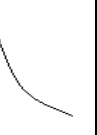





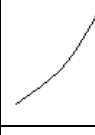






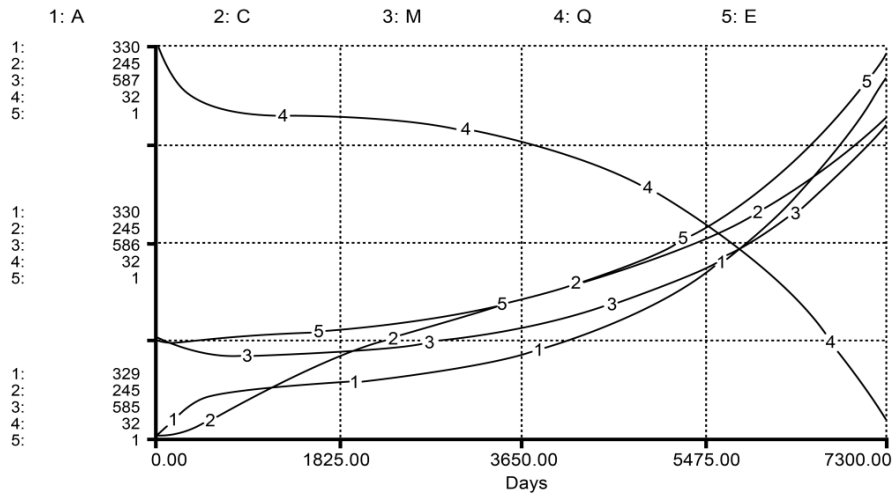
模式類型	模式圖型	模式類型	模式圖型	模式類型	模式圖型
A. 簡單型 (有序)					
1. 遠離平衡非線性正回饋遞增 (遠離目標湧現增長)		2. 非線性正回饋遞增 (湧現增長)		3. 非線性負回饋遞增 (目標驅動調節增長)	
4. 非線性負回饋遞增 (調節增長)		5. 遠離平衡非線性正回饋遞減 (遠離目標湧現衰減)		6. 非線性正回饋遞減 (湧現衰減)	
7. 非線性負回饋遞減 (目標驅動調節衰減)		8. 非線性負回饋遞減 (調節衰減)		9. 線性遞增	
10. 線性遞減		11. 靜態平衡			
B. 複合型 (有序)					
12. 遠離平衡非線性正回饋遞增後非線性負回饋遞增平衡 (S 曲線增長)		13. 遠離平衡非線性正回饋遞減後非線性負回饋遞減平衡 (反 S 曲線衰減)		14. 非線性負回饋遞增後非線性正回饋遞增 (倒 S 曲線增長)	

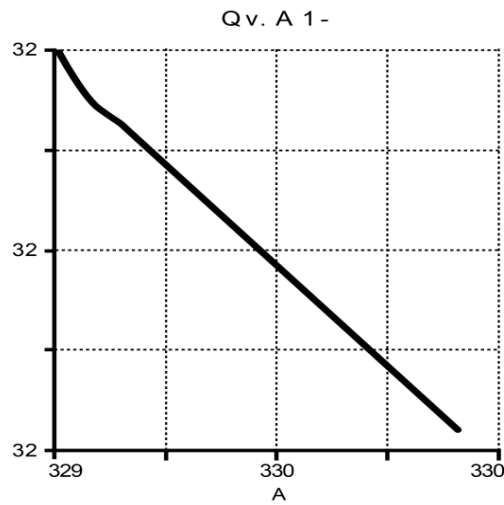
表 1 電力資源組合路徑模式摘要表 (續前頁)

模式類型	模式圖型	模式類型	模式圖型	模式類型	模式圖型
15. 非線性負回饋遞減後 正回饋遞減 (反倒 S 曲線衰減)		16. 非線性負回饋遞增後 正回饋遞減 (拋物線增長後衰減)		17. 非線性負回饋遞減後 正回饋遞增 (浴缸曲線衰減後增長)	
C. 暫態型 (無序)					
18. 非線性負回饋遞增後 負回饋遞減平衡 (過度調節增長後衰減)		19. 非線性正回饋遞增後 正回饋遞減 (過度湧現增長後衰減)		20. 非線性負回饋遞減後 負回饋遞增平衡 (過度調節衰減後增長)	
21. 非線性正回饋遞減後 正回饋遞增 (過度湧現衰減後增長)					
D. 混沌型 (有/無序)					
22. 非線性負回饋遞增後 正回饋遞減再正回饋 遞增 (N 型振盪)		23. 非線性負回饋遞減後 負回饋遞增再正回饋 遞減 (反 N 型振盪)		24. 非線性負回饋遞增後 負回饋遞減再正回饋 遞增再正回饋遞減 (又再正回饋遞增) (非週期性)	

資料來源：本研究整理。



時間序列圖（平衡，2013結構）



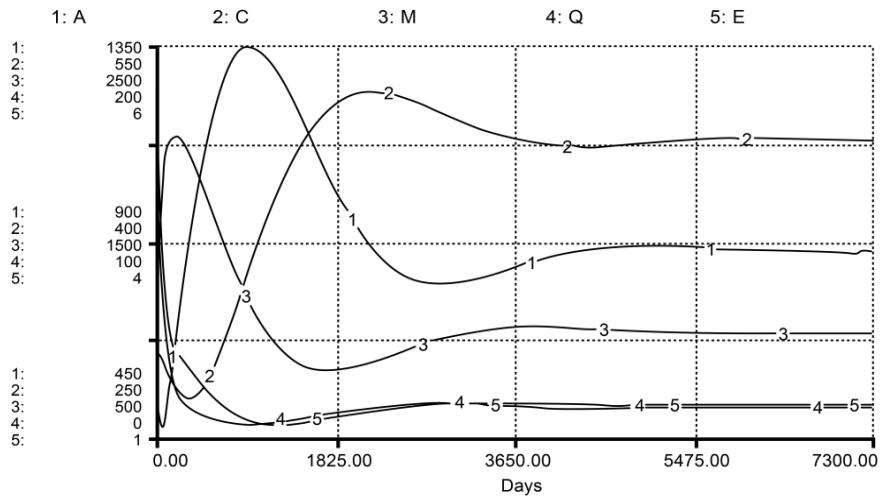
相位圖（平衡，線性）

說明：A 為非再生能源，十億度；C 為碳排放，百萬噸；M 為收益，十億元；Q 為再生能源，十億度；E 為電力，平衡點為 1。

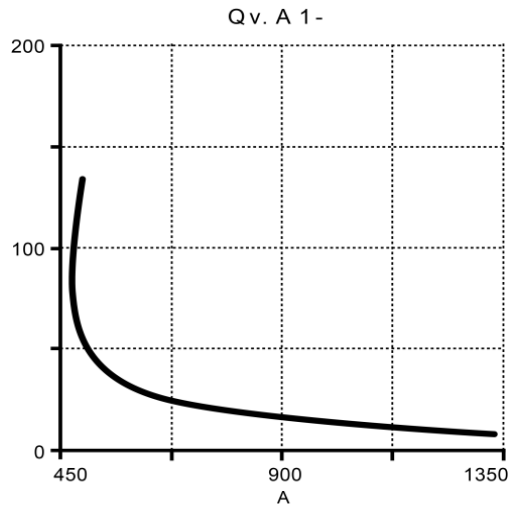
圖 9 （近）平衡下之電力資源組合（2013 現行高碳結構）

益呈現負回饋遞增後負回饋遞減再負回饋遞增振盪平衡之減少趨勢；(5) 碳排放呈現負回饋遞減後負回饋遞增再負回饋遞減振盪平衡之增加趨勢；及 (6) 意涵：在高碳路徑結構參數下，任何朝向低碳目標之措施（起始值），其結果呈現非線性鎖定效應的限制和不穩定現象，包括再生能源（減少）與非再生能源（增加）互為相長，並朝向高碳（碳增加）之共同演化路徑及其暫態型演化路徑，如圖 10，宜加以適應性可變結構控制。

3. 路徑創造：以 2025 年電力資源組合參數結構為基礎，並以 2013 年之再生能源、非再生能源、收益和碳排放之現值作為初始值，形成非平衡演化動力，據以進行模擬，模擬結果發現：(1) 再生能源朝向 2025 年目標趨近呈負回饋遞增趨勢（目標調節型）；(2) 非再生能源朝向 2025 年結構呈反 S 曲線遞減趨勢；(3) 電力呈現負回饋遞增後負回饋遞減之不穩定趨勢；(4) 收益呈現反倒 S 曲線衰減趨勢；(5) 碳排放呈現負回饋遞增後遞減平衡之減少趨勢；及 (6) 意涵：在中期低碳路徑結構參數下，任何朝向低碳目標之措施，其結果呈現非線性路徑創新之效果，包括再生能源（增加）與非再生能源（減少）互為消長，並朝向低碳（碳減少）之共同演化路徑和電力供給可能存在之暫態型演化路徑，以及趨向低邊際成本之演化路徑，如圖 11，宜加以適應性創新與協調控制。
4. 混沌效應：以 2013 年電力資源組合參數結構為基礎，並改變再生能源可開發流量參數 0.5 倍，形成非平衡演化動力，據以進行模擬，模擬結果發現：(1) 再生能源、非再生能源、電力、收益、碳排放出現週期振盪行為（時間序列圖）；(2) 收益與非再生能源間呈現週期吸引子之混沌行為（相位圖）；及 (3) 意涵：電力資源組合可能存在之不確定性，形成無序中之有序，如圖 12，宜加以適應性混沌控制。



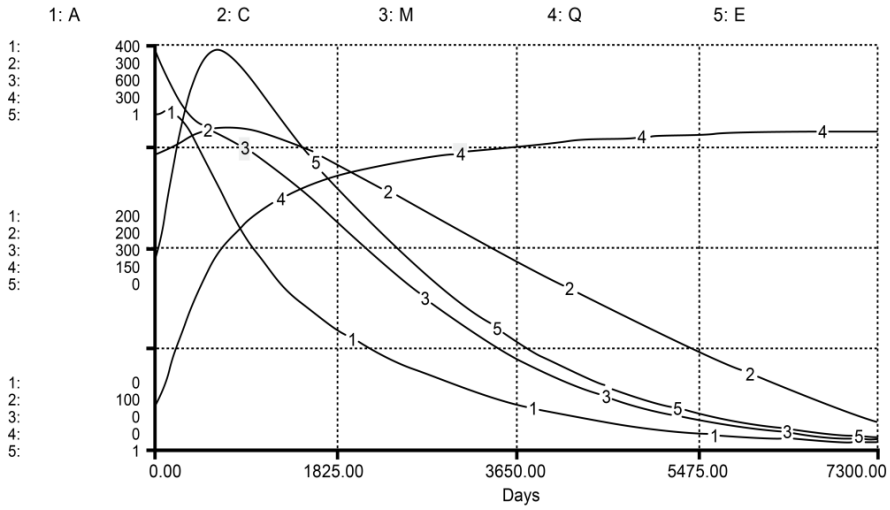
時間序列圖（非平衡，路徑依賴 — 鎖定2013結構）



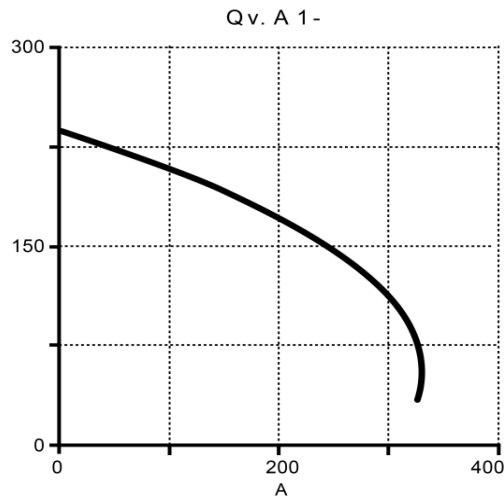
相位圖（非平衡，非線性）

說明：同圖 9。

圖 10 路徑依賴（鎖定效應，2013 電力資源組合結構）



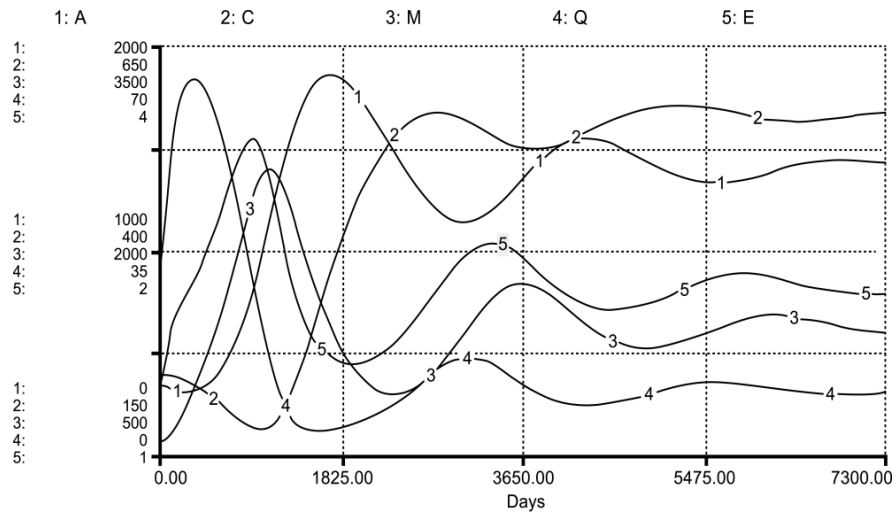
時間序列圖（非平衡，路徑創造—2025結構）



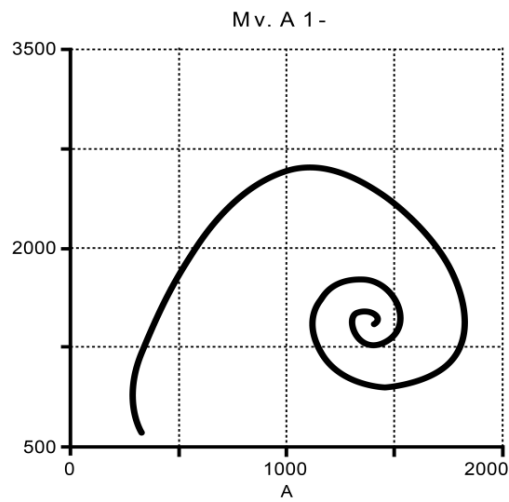
相位圖（非平衡，非線性）

說明：同圖 9。

圖 11 路徑創造（2025 中期低碳結構）



時間序列圖（非平衡週期震盪，改變再生能源可開發量）



相位圖（非平衡，週期吸引子）

說明：同圖 9。

圖 12 混沌效應（2013 現行高碳結構下改變再生能源可開發量）

5.1.2 量化分析

5.1.2.1 事件模擬 (情境描述)

針對 2013 年電力資源組合結構 (現況)、2015 年電力資源組合結構 (近期低碳政策結構)、2025 年電力資源組合結構 (中期低碳政策結構)、2035 年電力資源組合結構 (長期低碳政策結構)，並分別以 2013 年、2015 年、2025 年、2035 年平衡點存量值作為起始值，進行 A 至 D 情境模擬如附表 3 及附表 4。

5.1.2.2 模擬結果

1. 以 2015 年電力資源組合結構暨 2013 年平衡點存量作為起始值，模擬結果顯示：於 2033 年，再生能源可增加 3 倍 (電價外生) / 4 倍 (電價內生)。
2. 以 2025 年電力資源組合結構暨 2013 年平衡點存量作為起始值，模擬結果顯示：於 2033 年，再生能源可增加 6 倍 (電價外生) / 7 倍 (電價內生)。
3. 以 2035 年電力資源組合結構暨 2013 年平衡點存量作為起始值，模擬結果顯示：於 2033 年，再生能源可增加 7 倍 (電價外生) / 8 倍 (電價內生)。
4. 非再生能源在電價外生情況下成遞減趨勢，而在電價內生情況下則於 2033 年可趨近於以再生能源為主之低碳情況。
5. 在電力資源組合低碳結構下 (政策目標結合智慧電網)，於 2033 年，再生能源將成為主要能源，而非再生能源則成為輔助能源。
6. 當再生能源佔比遠高於非再生能源的佔比情況下，其朝向低邊際成本與低邊際收益之趨勢，顯示未來智慧電網電力資源組合下趨向零邊際成本之共享經濟的可能性。

5.2 模擬結果綜合意涵

1. 從再生能源與非再生能源適應性組合下之適應性電力供給，在能量平衡與供需平衡之模擬設計下，反應出適應性需求面管理下之適應性電力需求；和隱含適應性備轉（用）容量下之適應性供給特性，亦即朝向智慧電網下供給面資源、需求面資源和調節性資源之整體動態適應性搭配。
2. 從適應性之再生能源可開發量，反應出未來再生能源適應性朝向目標調節型或 S 曲線增長（或其變形）之發展趨向，和非再生能源朝向目標調節型或反 S 曲線（或其變形）衰減之發展趨向。
3. 從適應性之電價、燃料價格、購電價格、碳價及其適應性價量關係，反應出未來非管制下電價適應性變動之動態特性。
4. 從適應性電力供給和電價以及收入與成本之平衡關係，反應出從狀態回饋、輸出回饋至性能回饋之適應性收益彈性特色。
5. 經由路徑依賴分析，充分彰顯達成低碳目標之關鍵，主要在於改變整體系統結構。因此，如何經由適應性電力資源組合、規劃、調度和經營模式共同演化下之路徑創造，從現況「傳統電力規劃模式」高碳結構下之負面鎖定效應加以解構，轉型演化至未來「電力資源整合規劃模式」低碳結構，進而達到「智慧電網電力資源組合規劃模式」低碳結構的願景目標。
6. 在方法論部份，經由本研究之模擬，初步實證了智慧電網下：(1) 結合前饋（3E 耦合模型）與回饋（系統動力模型）之「參考模型適應性控制理論」之「系統動力」實務模擬應用性；(2) 從電力資源組合之適應性正負回饋動態關係。揭示了未來電力經濟特性係朝向簡單型、複合型、暫態型和混沌型之下之演化路徑行為模式，而超越管制經濟、市場經濟並演化至協同共享經濟之「適應性動態電力經濟學」；及 (3) 從電力資源組合在價、量、質適應性之協同組合關係，揭露了電力物聯網在適應性資產管理經營策略下，

朝向融合政策、市場、技術和經營模式，以及結合狀態變量、量測變量、性能變量和控制變量之未來適應性電業經營管理趨向，並突顯出非適應性電力政策之調適需求和適應性智慧電網強健基礎建設之重要性。

5.3 電業經營管理意涵

綜合上述智慧電網架構下之電力資源組合架構，從觀念設計、簡化模擬模型到實証結果，由其中之狀態變量（再生能源存量、非再生能源存量、碳排放存量）、量測變量（再生能源可開發量、電力供給、電價）、性能變量（收益）和參考目標（國家能源政策下之 3E 耦合模型）及其他控制變量（電力需求、再生能源蘊藏量、燃料價格、購電價格、碳價（稅）、電價）模擬下之互動關係與適應性系統行為；充分顯示電業在面對內外環境包括經社、能源、氣候變遷以及技術、政策、市場、經營等諸多不確定因素下，傳統電業管制下靜態式、確定性之電業經營管理模式已面臨轉型至動態式、不確定性，進而適應性之彈性「實質選擇權」經營模式，即所謂「適應性管理」。

在此模式下，進行動態電力資源組合適應性設計、規劃、運轉和調度（狀態變數可及性），進而加以適應性動態量測（量測變數可觀性）、分析評價（性能變數可識性），並在政策目標指引下有效控制經營（控制變數之可控性），涵蓋價值管理、風險管理、資產管理和適應性管理茲摘要如下。

1. 價值管理：在智慧電網（適應性電力資源組合基礎建設條件）調度觀點（能量平衡）下，追求適應性電力資源組合價值（電價管制或非管制之能源政策目標下的能源、經濟和環境 3E 價值），包括可靠度、經濟效益和氣候變遷下之減緩與調適。
2. 風險管理：智慧電網（基礎建設條件）調度觀點（能量平衡）下，適應性電力資源組合風險（電價管制或非管制之能源政策目標下

的能源、經濟和環境 3E 風險)，涵蓋作業風險、市場風險、財務風險和環境風險。

3. 資產管理：智慧電網（基礎建設條件）調度觀點（能量平衡）下電力資源組合價值與風險之適應性基礎建設投資和營運，包括儲能、智慧電網、微型電網及其所聯結之電力資源等。
4. 適應性管理：動態彈性融合上述適應性價值管理、風險管理和資產管理之實質選擇權經營模式，包括替代與互補、新增與取消、增加與減少、提前與延後之各種選擇權組合。

5.4 電力經濟意涵

另一方面，從電力經濟學的角度來看，過去從靜態式、確定性（中案）之電力需求預測，到靜態式、集中化電源規劃、電網規劃之「串聯模式」，在諸多內外環境不確定因素衝擊下（包括需求面、供給面、價格面和政策面等，尤其是再生能源占比的增加），滿足即時電力調度供需平衡之基本規範要求已面臨實際挑戰。在此情況下，將逐步轉型為集中與分散並行及整合需求面管理之複合型電力資源組合「並聯模式」；進而演化成智慧電網架構下之適應性動態電力資源組合「（神經）網路模式」，即所謂彈性動態之「適應性電力經濟學」，從而朝向適應性電力規劃與調度和適應性之電業經營模式。

其中電力供給部份，隱涵彈性供給面資源（集中與分散）、需求面資源（節能與需量反應）和調節性資源（儲能與電動車）之適應性動態資源組合，亦涵蓋適應性彈性之電價與政策，摘要說明如下。

1. 適應性再生能源組合，包括水力、風力、太陽光電和生質能等，從輔助性能源逐步替代非再生能源，轉型為未來主要能源。
2. 適應性非再生能源組合，包括燃煤、燃氣和核能等傳統能源，從主要能源逐步被再生能源替代，轉型為未來輔助能源。
3. 適應性再生與非再生能源組合，亦即動態彈性協調調度不可控與可控之能源組合。

4. 適應性電力需求暨需求面管理，亦即在變動需求下動態彈性調度需求面管理，包括各種節約能源和需量反應措施。
5. 適應性微型電網電力資源組合，亦即區域性動態彈性協調調度分散型電力資源，包括再生能源、汽電共生、微型渦輪等。
6. 適應性智慧電網電力資源組合，亦即整體系統動力彈性協調調度集中與分散供給面資源、需求面資源和調節性資源（儲能與電動車）。
7. 適應性電力備用（備轉）容量，亦即在能量平衡之動態彈性電力規劃（調度）下兼顧 3E 目標之彈性備用（備轉）容量。
8. 適應性電價，即在能量平衡和收益平衡下訂定動態彈性電價。
9. 適應性政策，亦即動態應變之彈性政策。

6. 結論

6.1 總結

傳統電力規劃在弱適應性情境下，係立基於需求帶動供給導向之電力資源「串聯式」組合規劃（傳統模式在現況組合結構之『舊路徑依賴暨鎖定效應』下，隱含了結構性低度效果之低碳驅力；個別低碳措施在再生能源容量與能量顯著落差與變動下，造成結構性之低度效率），其二氧化碳減緩能力、調適能力與備用容量率主要來自於下述資源組合之適應性發展趨向，包括：電網適應性控制能力之增加、再生能源發電之適應性增加、非再生能源發電之適應性減少、需求面管理資源之適應性增加、碳資產管理碳排放之適應性降低、資源回收再利用之適應性增加。相對而言，其組合效果為：低度永續發展（減緩）能力、低度調適能力與低適應性備用或備轉容量率。

電力資源整合規劃 (IRP) 在中度適應性情境下，係立基於需求面管理為負電源之電力資源「並聯式」組合規劃（並聯模式在政策

驅動新組合結構之『新路徑創造暨鎖定效應』下，隱含了結構性中度效果之低碳驅力；個別低碳措施在資源整合之新結構適應性調節下，造成結構性之中度效率，除一方面進一步在並聯式系統結構下，增進上述電力基礎設施組合之適應性改變外，另一方面將衍生對電力需求端之總體經濟發展限制和產業結構之適應性改變。相對而言，其組合效果為：中度永續發展能力、中度調適能力與中度適應性備用或備轉容量率。

而本研究立基於參考模型適應性控制（3E 耦合模型）和線上適應性控制（智慧電網）之理論基礎與情境下，建構一個兼具低碳與智慧化之適應性動態電力資源組合（網路模式在政策驅動新組合結構之『新路徑創造暨鎖定效應』下，隱含了結構性高度效果之低碳驅力；個別低碳措施在智慧電網新結構適應性調節下，造成結構性之高度效率）。其能具有面對動態環境劇烈變動之強適應性能力，主要係奠基於以智慧電網為核心之電力資源「網絡式」可變結構組合設計，即時即地即境適應性整合各種供給面與需求面資源並運用各項調節性資源，包括：需量反應、電動車、儲能系統並搭配智慧電網（家庭、區域、系統不同層級網絡）與能源管理系統、智慧電表（AMI）和適應性電價（即時電價、區域電價、分級電價和綠色電價）彈性動態調節上述各項可調度和不可調度資源；並趨向兼具經濟成長極限考量的能源經濟環境 3E 適應性融合之永續發展與調適規劃、設計和營運，此係由於碳足跡土地涵容力和能源生態足跡考量下的資源使用限制，以及性能指標正負回饋適應性控制效應所致。

從模擬結果所彰顯之各種不同「路徑依賴」模式之動態適應性調節與湧現特性的電力系統行為，包括：簡單模式（模式 1 至模式 11）、複合模式（模式 12 至模式 17）、暫態模式（模式 18 至模式 21）、混沌模式（模式 22 至模式 24）。相對而言，其組合效果為：高度永續發展能力、高度調適能力與高適應性備用或備轉容量率。

6.2 建議

1. 過去負載預測將電力需求視為一個確定性需求（中案），與事實不盡相符，它應該是一個動態的適應性電力需求，並可經由需求面來加以有效管理。
2. 過去對於長期的備用容量率（15%）和短期的備轉容量率（10%）視為一個確定性的量，與事實亦不完全相符，它應該是一個動態的彈性與適應性的備用或備轉容量，可經由適應性電力資源組合，來加以彈性控制相對高適應性之備用或備轉容量率。
3. 過去在管制經濟下往往將電價視為固定的並不合理，在智慧電網網路共享經濟與價格機制或自由市場經濟有效結合下，它應該是一個動態的適應性價格，並期向低邊際成本之未來發展方向。

6.3 研究限制

1. 本文所建構之系統動力模擬結果，目前著重在分析相關變數相互回饋互動下之結構、方向與發展趨勢。
2. 本研究所建構之系統動力模型，未來除仍有相當之精進空間外，尤需強化模型及資料之校核、驗證和確證 (verification, validation and accreditation)，以利更進一步強化量化分析。
3. 本研究簡化模擬模型，係立基於熱力學第二定律下之能量平衡和調度觀點下之電力供需平衡原理，隱含了許多假設前提與配套基礎建設。其中電力供給隱含了適應性備轉容量之可靠度假設（擴及輔助服務）、需求面管理之效果、智慧電網之減緩與調適能力，並以係數加以簡化，未來可進一步精進建模另增列減緩與調適指標；再生能源為各種類型再生能源之綜合，並隱含了儲能系統和微型電網的配套條件；非再生能源亦為各類非再生能源之綜合，未來亦可進一步細部建模；另外可進一步從能量變量延伸至可用能或能值變量；收益代表的是調度觀點下之成本（包括燃料成本、

購電成本和碳成本)與效益(電價收入),未來可進一步延伸至更廣義和細緻之範疇,並引入價值與風險之性能指標。

附錄 質化與量化分析表

附表 1 電力資源組合情境外生變數模擬摘要 (電價外生) (質化分析)

模擬情境	系統行為 (路徑, 趨勢)		狀態變數(X)			觀測變數(Y)			性能變數(Z)	
	政策情境 (3E)	資源組合結構 J	再生能源存量(Q)	非再生能源存量(A)	碳排放(C)	再生能源可開發量(I-R)	電力供給(E)	電價(PE)		
基本情境	近平衡	現況基本結構 (2013, 2013 至 2033)	C(20, -)	C(18, -)	B(16, +)	C(20, -)	A(8, -)	固定	A(7, -)	
		近期低碳結構 (2015, 2013 至 2033)	A(3, +)	D(22, +)	C(18, -)	A(3, +)	A(4, +)	固定	C(20, +)	
	遠平衡	中期低碳結構 (2025, 2013 至 2033)	A(3, +)	D(22, -)	C(18, -)	A(3, +)	A(4, +)	固定	C(20, +)	
		遠期低碳結構 (2035, 2013 至 2033)	A(3, +)	D(22, -)	C(18, -)	A(3, +)	D(22, +)	固定	C(20, +)	
控制變數 (U)	需求變數	電力需求 E	2 倍	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	B(13, -)	固定	A(3, +)	
			0.5 倍	B(12, +)	B(13, -)	A(5, -)	B(12, +)	B(13, -)	固定	A(7, -)
	資源稟賦	再生能源蘊藏量 I	2 倍	C(18, +)	C(20, +)	B(17, +)	C(18, +)	D(24, +)	固定	A(3, +)
			0.5 倍	C(20, -)	C(18, -)	C(19, -)	C(20, -)	A(8, -)	固定	A(7, -)
	市場變數	燃料價格 PG	2 倍	A(3, +)	A(7, -)	B(13, -)	A(3, +)	A(7, -)	固定	B(13, -)
			0.5 倍	A(7, -)	A(3, +)	B(12, +)	A(7, -)	D(24, +)	固定	D(24, +)
	市場(或政策)變數	購電價格 PEE	2 倍	B(12, +)	B(13, -)	A(5, -)	B(12, +)	B(8, -)	固定	A(7, -)
			0.5 倍	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	B(13, -)	A(3, +)	固定	A(3, +)
碳價 (碳稅) Pc		2 倍	B(16, +)	C(17, +)	A(3, +)	B(16, +)	A(4, +)	固定	A(2, +)	
		0.5 倍	B(17, -)	C(19, -)	A(7, -)	B(17, -)	A(8, -)	固定	B(13, -)	
電價 (管制) PE	2 倍	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	B(13, -)	C(18, +)	固定	A(3, +)		
	0.5 倍	B(12, +)	B(13, -)	A(5, -)	B(12, +)	B(13, -)	固定	A(7, -)		

資料來源：本研究整理。

附表 2 電力資源組合情境內生變數模擬摘要 (電價內生) (質化分析)

模擬情境	系統行為 (路徑, 趨勢)		狀態變數 (X)			觀測變數 (Y)			性能變數 (Z)	
	政策情境 (3E)	資源組合結構 J	近平衡	再生能源存量 (Q)	非再生能源存量 (A)	碳排放 (C)	再生能源可開發量 (F-R)	電力供給 (E)	電價 (PE)	收益 (M)
基本情境	需求變數	電力需求 E	現況基本結構 (2013, 2013 至 2033)	A(1, +)	A(5, -)	A(5, -)	A(1, +)	A(5, -)	A(5, -)	A(5, -)
			近期低碳結構 (2015, 2013 至 2033)	A(3, +)	B(13, -)	B(16, -)	A(3, +)	C(18, -)	B(18, -)	B(15, -)
			中期低碳結構 (2025, 2013 至 2033)	+A(3, +)	B(13, -)	B(16, -)	A(3, +)	C(18, -)	B(18, -)	B(15, -)
			遠期低碳結構 (2035, 2013 至 2033)	A(3, +)	B(13, -)	B(16, -)	A(3, +)	C(18, -)	B(18, -)	B(15, -)
	資源稟賦	再生能源蘊藏量 I	2 倍	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	B(13, -)	D(22, +)	D(22, +)	D(22, +)
			1.5 倍	B(12, +)	B(13, -)	A(5, -)	B(12, +)	B(13, -)	B(13, -)	A(7, -)
			2 倍	C(18, -)	D(22, +)	D(24, +)	C(18, -)	D(22, +)	D(22, +)	D(24, +)
			1.5 倍	C(20, -)	C(18, -)	C(19, -)	C(20, -)	A(7, -)	D(23, -)	A(7, -)
	市場變數	燃料價格 PG	2 倍	D(24, -)	D(24, +)	B(17, -)	D(24, -)	B(12, +)	D(24, -)	B(14, +)
			1.5 倍	B(14, +)	B(15, -)	B(13, -)	B(14, +)	B(15, -)	B(15, -)	B(16, -)
			0.5 倍	C(20, -)	C(18, +)	B(12, +)	C(20, -)	C(18, +)	C(18, +)	B(7, -)
			2 倍	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	B(13, -)	D(22, +)	D(22, +)	C(18, +)
市場 (或政策) 變數	購電價格 PEE	1.5 倍	B(12, +)	B(13, -)	A(5, -)	B(12, +)	B(12, +)	A(7, -)	B(13, -)	A(7, -)
		2 倍	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	B(13, -)	B(13, -)	D(22, +)	D(22, +)	D(22, +)
		1.5 倍	B(12, +)	B(13, -)	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	A(7, -)	B(13, -)	A(7, -)
		0.5 倍	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	B(13, -)	B(13, -)	D(22, +)	D(22, +)	D(22, +)
市場 (或政策) 變數	電價 (非管制) PE	2 倍	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	B(13, -)	B(13, -)	D(22, +)	D(22, +)	D(22, +)
		1.5 倍	B(12, +)	B(13, -)	B(13, -)	B(12, +)	B(13, -)	D(22, +)	D(22, +)	D(22, +)
		2 倍	B(13, -)	B(12, +)	B(12, +)	B(13, -)	B(13, -)	D(22, +)	D(22, +)	D(22, +)
		1.5 倍	B(12, +)	B(13, -)	A(5, -)	B(12, +)	B(13, -)	B(13, -)	B(13, -)	A(7, -)

資料來源：本研究整理。

附表 3 電力資源組合情境外生變數模擬摘要 (電價外生) (量化分析)

模擬情境	系統行為 (路徑, 趨勢)		狀態變數 (X)			觀測變數 (Y)			性能變數 (Z)
	資源組合情境 A (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構(2013)	再生能源 存量(O)	非再生能源 存量(A)	碳排放(C)	再生能源可 開發量(I-R)	電力供給 (E)	電價 (PE)
資源組合情境 B (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	近期低碳結構 (2015)	(32,31,993, 31,994) C(20,-)	(329,329,103, 329,098) C(18,+)	(245,245.13, 245.15) B(12,+)	(424,423.95, 423.96) C(20,-)	(0.99999, 1.000007, 1.000009) D(23,+)	固定	(585,584,889, 584,8892) A(7,-)
		中期低碳結構 (2025)	(32,182,171) A(3,+)	(329,217, 262) D(22,-)	(245,204.9, 179) C(18,-)	(199,4,488.4, 475.4) A(3,+)	(0.242,0.585, 0.666) A(4,+)	固定	(585,745,857) C(20,+)
		遠期低碳結構 (2035)	(32,228,221) A(3,+)	(329,173, 197) D(22,-)	(245,219.6, 179.8) C(18,-)	(140,6,497, 490.8) A(3,+)	(0.163,0.394, 0.438) D(22,+)	固定	(585,737,825) C(20,+)
資源組合情境 A (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構(2015)	(81,81,583, 81,581) A(3,+)	(429,427.39, 427.21) B(13,-)	(250,248.1, 247.6) B(13,-)	(423,2,424.74, 424.73) A(3,+)	(0.999,1.0011, 1.0007) C(18,+)	固定	(865,865.37, 864.96) D(23,-)
		現況高碳結構 (2013)	(81,29,31) C(20,-)	(429,406, 361) D(23,-)	(250,306, 279.5) D(23,+)	(607,9,401, 411) C(20,-)	(2.754,1.112, 1.055) A(7,-)	固定	(865,660,621) C(18,-)
		中期低碳結構 (2025)	(81,161, 153) A(3,+)	(429,326, 366) B(17,-)	(250,239, 233) C(18,-)	(319,462, 451) A(3,+)	(0.561,0.782, 0.838) A(4,+)	固定	(865,1019,1102) C(20,+)
資源組合情境 B (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	遠期低碳結構 (2035)	(81,211,205) A(3,+)	(429,261, 290) B(17,-)	(250,244, 220) C(18,-)	(283,8,481.5, 474.8) A(3,+)	(0.38,0.554, 0.599) D(22,+)	固定	(865,1051,1145) C(20,+)

附表 3 電力資源組合情境外生變數模擬摘要 (電價外生) (量化分析) (續前頁)

模擬情境	系統行為 (路徑, 趨勢)		狀態變數 (X)			觀測變數 (Y)			性能變數 (Z)	
	資源組合情境 C (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構 (2025)	再生能源 存量(Q)	非再生能源 存量(A)	碳排放(C)	再生能源可 開發量(I-R)	電力供給 (E)		電價 (PE)
				再生能源 存量(Q)	非再生能源 存量(A)	碳排放(C)	再生能源可 開發量(I-R)	電力供給 (E)		電價 (PE)
資源組合情境 D (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構 (2025)	(134, 133, 73, 133.56) A(8, -) A(4, +)	(494, 495, 42, 496.64) A(4, +)	(313, 313.2, 313.8) A(1, +)	(423, 92, 423.5, 423.23) A(8, -) C(20, +)	(1,002, 1,004, 1,005) C(20, +)	固定	(865, 1351, 1353) A(4, +)	
			現況高碳結構 (2013)	(134, 26, 30) C(20, -)	(494, 474, 387) D(23, -)	(313, 384, 1, 309.9) D(23, -)	(684, 5, 383.7, 408.3) C(20, -)	(5,093, 1,202, 1,097) A(7, -)	固定	(1348, 718, 649) C(18, -)
			模擬情境 (遠平衡) (3E)	(134, 69, 75) C(20, -)	(494, 605, 528) D(23, +)	(313, 327.8, 307.1) D(23, -)	(527, 8, 389.6, 406) C(20, -)	(1,798, 1,212, 1,138) A(8, -)	固定	(1348, 1072, 997) B(13, -)
資源組合情境 D (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構 (2035)	(134, 189, 184) A(3, +)	(494, 401, 429) B(17, -)	(313, 304, 4, 293) C(18, -)	(385, 2, 457.5, 451.8) A(3, +) C(18, +)	(0,678, 0,767, 0,8) C(18, +)	固定	(1348, 1486, 1559) A(4, +)	
			現況高碳結構 (2013)	(161, 160, 999, 160,998) D(24, -)	(605, 604, 942, 604,930) B(15, -)	(392, 391, 83, 391,76) A(7, -)	(423, 9597, 423,9591, 423,9571) D(24, -)	(0,999442, 0,999371, 0,999342) A(7, -)	固定	(1994, 1993, 987, 1993,930) B(16, -)
			模擬情境 (遠平衡) (3E)	(161, 25, 29) C(20, -)	(605, 523, 404) D(23, -)	(392, 457.1, 331.9) D(23, -)	(707, 4, 373.8, 404.1) C(20, -)	(7,5, 1,264, 1,124) A(7, -)	固定	(1994, 754, 667) C(18, -)
資源組合情境 D (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構 (2015)	(161, 58, 70) C(20, -)	(605, 801, 605,01) C(18, +)	(392, 422, 6, 356.1) D(23, -)	(563, 5, 354.2, 392.5) C(20, -)	(2,65, 1,36, 1,23) A(7, -)	固定	(1994, 1225, 1087) B(13, -)	
			現況高碳結構 (2013)	(161, 106, 119) C(20, +)	(605, 720, 617) C(18, +)	(392, 417, 6, 400.8) D(23, +)	(462, 7, 375, 399.2) C(20, +)	(1,477, 1,18, 1,124) A(8, -)	固定	(1994, 1653, 1543) B(13, -)
			模擬情境 (遠平衡) (3E)							

資料來源：本研究整理。

說明：Q、A 及 I-R 的單位為十億噸，C 的單位為百萬噸，M 的單位為十億元，E 及 PE 的平衡點設為 1。

附表 4 電力資源組合情境內生變數模擬摘要 (電價內生) (量化分析)

模擬情境	系統行為 (路徑, 趨勢)		狀態變數 (X)			觀測變數 (Y)			性能變數 (Z)		
	資源組合情境 A (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構 (2013)	再生能源 存量(Q)	非再生能源 存量(D)	碳排放(C)	再生能源可 開發量(J-R)	電力供給(E)		電價(PE)	收益(M)
				再生能源 存量(Q)	非再生能源 存量(D)	碳排放(C)	再生能源可 開發量(J-R)	電力供給(E)		電價(PE)	收益(M)
資源組合情境 A (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構 (2013)	(32,31.99, 31.95) B(15,-)	(329,329.2, 329.9) B(14,+)	(245,245.14, 245.33) B(14,+)	(424,423.92, 423.68) B(15,-)	(0.999,1.0002, 1.0014) A(1,+)	(0.999,1.0002, 1.0012) A(1,+)	(585,585.06, 586) A(1,+)		
			(32,122, 128) A(3,+)	(329,50.1) B(13,-)	(245,174.4, 89.2) B(16,-)	(239.5,509.3, 518.6) A(3,+)	(0.415,0.157, 0.003) C(18,-)	(0.303,0.176, 0.004) C(18,-)	(585,98.2) B(15,-)		
資源組合情境 B (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	模擬情境 (遠平衡) (3E)	中期低碳結構 (2025)	(32,224, 234) A(3,+)	(329,42, 3.5) B(13,-)	(245,191.7, 111.9) B(16,-)	(163.4,530.2, 539) A(3,+)	(0.242,0.129, 0.011) C(18,-)	(0.159,0.143, 0.012) C(18,-)	(585,131,11) B(15,-)		
			(32,253, 262) A(3,+)	(329,49, 9.2) B(13,-)	(245,213.6, 141) B(16,-)	(140.6,518.5, 525) A(3,+)	(0.163,0.117, 0.022) C(18,-)	(0.108,0.129, 0.025) C(18,-)	(585,182,34) B(15,-)		
資源組合情境 B (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構 (2015)	(81,80.4, 75) A(5,-)	(429,442, 518) A(1,+)	(250,249.6, 261.1) A(17,+)	(423.2,421.8, 406.1) A(5,-)	(0.999,1.024, 1.134) A(1,+)	(1.001,1.023, 1.114) A(1,+)	(865,893,1027) A(1,+)		
			(81,17,16) A(7,-)	(429,761, 848) D(22,+)	(250,410.8, 458.8) C(20,+)	(607.9,296.2, 276.8) A(7,-)	(2.754,1.370, 1.395) A(7,-)	(3.300,1.242, 1.249) A(7,-)	(865,976,1016) D(22,+)		
資源組合情境 B (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	模擬情境 (遠平衡) (3E)	中期低碳結構 (2025)	(81,201, 230) A(3,+)	(429,124, 16) B(13,-)	(250,220.4, 139.7) B(16,-)	(319.4,508.5, 536.1) A(3,+)	(0.561, 0.350,0.050) C(18,-)	(0.525,0.378, 0.055) C(18,-)	(865,380,49) B(15,-)		
			(81,242, 259) A(3,+)	(429,99, 22) B(13,-)	(250,234.2, 161.7) B(16,-)	(283.8,508.8, 523) A(3,+)	(0.380, 0.227,0.052) B(18,-)	(0.357,0.246, 0.058) B(18,-)	(865,365,80) B(15,-)		

附表 4 電力資源組合情境內生變數模擬摘要 (電價內生) (量化分析) (續前頁)

模擬情境	系統行為 (路徑, 趨勢)		狀態變數 (X)			觀測變數 (Y)				性能變數 (Z)
			再生能源 存量 (Q)	非再生能源 存量 (D)	碳排放 (C)	再生能源可 開發量 (J-R)	電力供給 (E)	電價 (PE)	收益 (M)	
			再生能源 存量 (Q)	非再生能源 存量 (D)	碳排放 (C)	再生能源可 開發量 (J-R)	電力供給 (E)	電價 (PE)	收益 (M)	
資源組合情境 C (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構 (2025)	(134,133.5,1 32.4) A(5,-)	(494,497, 505) A(1,+)	(313,313.3, 315.2) A(1,+)	(423.9, 423.2, 421.3) A(5,-)	(1,002,1,006, 1,016) A(1,+)	(1,001,1,003, 1,012) A(1,+)	(1348,1356, 1374) A(1,+)	
	現況高碳結構 (2013)		(134,116, 15) A(7,-)	(494,841, 875) D(22,+)	(313,478, 477.6) D(23,+)	(684.5, 282.2, 271.7) A(7,-)	(5,093,1,435, 1,406) A(7,-)	(6,287,1,275, 1,254) A(7,-)	(1348,1057, 1030) D(22,+)	
資源組合情境 D (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	模擬情境 (遠平衡) (3E)	近期低碳結構 (2015)	(134,33, 29) A(7,-)	(494,1426, 1654) A(3,+)	(313,459.7, 551.1) C(20,+)	(527.8, 245.8, 222.6) A(7,-)	(1,798,1,592, 1,637) C(20,-)	(1,906,1,363, 1,378) A(7,-)	(1348,1846, 1945) A(3,+)	
	中期低碳結構 (2035)		(134,214, 246) A(3,+)	(494,238, 82) A(8,-)	(313,294, 223.8) B(16,-)	(385.2, 484.3, 512.3) A(3,+)	(0,678, 0,494, 0,189) B(16,-)	(0,679,0,523, 0,205) B(16,-)	(1348,854, 301) B(15,-)	
資源組合情境 E (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	基本情境 (近平衡)	參考結構 (2035)	(161,161.1, 161.4) A(1,+)	(605,604, 601.8) A(5,-)	(392,391.8, 391.2) A(5,-)	(424,424.1, 424.5) A(1,+)	(0,999,0,998, 0,996) A(5,-)	(0,999,0,998, 0,996) A(5,-)	(1994,1991, 1985) A(5,-)	
	現況高碳結構 (2013)		(161,15.4, 15) A(7,-)	(605,893, 892.5) D(22,+)	(392,536.4, 490.2) D(23,+)	(707.4, 275.6, 268.6) A(7,-)	(7,499,1,482, 1,413) C(20,-)	(9,252,1,307, 1,257) C(20,-)	(1994,1106, 1038) D(22,-)	
資源組合情境 F (2013, 2023, 2033) (初值, 中值, 終值)	模擬情境 (遠平衡) (3E)	近期低碳結構 (2015)	(161,30, 28) A(7,-)	(605,1609, 1712) D(22,+)	(392,570.9, 567.5) D(22,+)	(563.5, 229.5, 216.3) A(7,-)	(2,650,1,611, 1,635) D(24,-)	(2,805,1,398, 1,373) D(24,-)	(1994,1829, 1952) D(22,-)	
	中期低碳結構 (2025)		(161,70, 68) A(7,-)	(605,1156, 1225) A(3,+)	(392,486.3, 566.6) C(20,+)	(462.7, 290.3, 284.4) A(7,-)	(1,477,1,355, 1,395) D(23,-)	(1,473,1,220, 1,253) D(23,-)	(1994,2242, 2316) D(22,+)	

資料來源：本研究整理。
說明：同附表3。

參考文獻

- 洪紹平、洪育民、郭婷瑋、石信智、顏素娟、林慧敏 Hung, Shao-Pin, Yuh-Ming Hung, Ting-Wei Kuo, Robert Shih, Su-Chuan Yen and Hui-Min Lin (2012),「台電公司自願減碳專案及碳權交易推動計畫」“Taipower Voluntary Emission Reduction and Emission Trading Project”, 台電工程月刊 *Monthly Journal of Taipower's Engineering*, 766, 102-109。(in Chinese with English abstract)
- 洪紹平、洪育民、陳鳳惠 Hung, Shao-Pin, Yuh-Ming Hung and Fung-Fei Chen (2008),「智慧電網發展下之區域電力資源整合規劃」“Regional Integrated Resource Planning under the Development of Smart Grid”, 中華民國能源經濟學會學會論文 Chinese Association for Energy Economics。(in Chinese)
- 洪紹平、黃軒亮、洪育民、郭婷瑋 Hung, Shao-Pin, Hsuan-Liang Huang, Yuh-Ming Hung and Ting-Wei Kuo (2011),「氣候變遷對台電之衝擊與調適策略初探」“A Preliminary Study on Impacts of Climate Change on Taipower and the Company's Adaptation Strategies”, 台電工程月刊 *Monthly Journal of Taipower's Engineering*, 759, 127-145。(in Chinese with English abstract)
- 張文恭、莊景勝、陸台根、徐唯耀、鄭吉良、高孟甫、洪紹平、陳鳳惠 Chang, Wen-Kung, Ching-Sheng Chuang, Tai-Ken Lu, Wei-Yeo Hsu, Chi-Liang Cheng, Meng-Fu Kao, Shao-Pin Hung and Fung-Fei Chen (2009),「支援台電汽力、複循環及抽蓄機組調度之資訊系統開發」“Development of Information System for Supporting TPC Unit Commitment”, 中華民國第 30 屆電力工程研討會 The 30th Symposium on Electrical Power Engineering。(in Chinese with English abstract)
- 張四立 Chang, Ssu-Li (2005),「我國永續能源結構之整合研究：永續

- 能源結構下知我國最適再生能源結構」“The Optimal Renewable Energy Structure for Sustainable Energy Development”，研究報告 Research Paper，科技部 Ministry of Science and Technology, R.O.C.。(in Chinese with English abstract)
- 張夏准、張燕、張林 Chang, Ha-Joon, Yan Zhang and Lin Zhang (2011)，「制度與經濟發展：理論、政策和歷史」“Institutions and Economic Development: Theory, Policy, and History”，演化與創新經濟學評論 *Review of Evolutionary Economics and Economics of Innovation*，1：8，1-20。(in Chinese)
- 盛昭瀚、蔣德鵬 Cheng, Zhao-Han and De-Peng Jiang (2002)，演化經濟學 *Evolutionary Economics*，上海：上海三聯書店 Shanghai: Shanghai Joint Publishing。(in Chinese)
- 陳曾裕 Chen, Zeng-Yu (2014)，「能源安全與我國電力供給規劃研究」“Taiwan’s Energy Security and Electricity Planning”，碩士論文 MA. Thesis，臺北大學資源管理研究所 Institute of Natural Resource Management, National Taipei University。(in Chinese with English abstract)
- 陳鳳惠、洪育民、洪紹平 Chen, Fung-Fei, Yuh-Ming Hung and Sheo-Pin Hung (2007)，「台電長期電力負載預測決策支援系統之構建」“On Building The DSS of Long Term Electricity Load Forecasting for TPC”，中華民國第 28 屆電力工程研討會 The 28th Symposium on Electrical Power Engineering。(in Chinese with English abstract)
- 黃書禮 Huang, Shu-Li (2004)，都市生態經濟與能量 *Energy Basis for Urban Ecological Economic System*，臺北：詹氏書局股份有限公司 Taipei：Chan’s Arch-Publishing。(in Chinese)
- 楊虎濤 Yang, Hu-Tao (2008a)，「演化經濟學中的生物學隱喻—能否使用？如何使用？」“Biological Metaphor in Evolutionary Economics：Can We Use It? How We Use It?”，演化與創新經濟學評

- 論 *Review of Evolutionary Economics and Economics of Innovation* ,
1 : 1 , 130-134 。 (in Chinese)
- 楊虎濤 Yang, Hu-Tao (2008b) , 「霍奇遜教授訪談錄」 “Interview with
Professor Hodgson” , 演化與創新經濟學評論 *Review of Evolutionary
Economics and Economics of Innovation* , 1 : 1 , 18-33 。 (in Chinese)
- 楊碩英、洪紹平、陳家屏、王思峰、屠益民、杜強國、許家銘、蘇
登呼、洪育民、黃義協、林鍾洋、劉幹博 Yang, Showng, Shao-Pin
Hung, Jia-Bing Chen, Si-Feng Wang, Yi-Min Tu, Qiang-Guo Du,
Jia-Ming Xu, Deng-Hu Su, Yuh-Ming Hung, Yi-Hsieh Huang,
Chung-Yang Lin and Gan-Bou Liu (2003) , 「台電長期策略規劃模
擬模型之研究」 “The System Dynamic Simulation Model for
Long-Term Strategic Planning Research” , 研究報告 Research
Paper , 台灣電力公司、中山大學 Taiwan Power Company, National
Sun Yat-Sen University 。 (in Chinese with English abstract)
- 賈根良 Jia, Gen-Liang (2014) , 「溯因法和回溯法：演化經濟學的科
學創造方法」 “Abduction and Retroduction: Scientific Innovation
Approach in Evolutionary Economics” , 演化與創新經濟學評論
Review of Evolutionary Economics and Economics of Innovation ,
1 : 11 , 84-94 。 (in Chinese)
- 劉豹 Liu, Bao (1992) , 現代控制理論 *Fundamentals of Modern Control* ,
臺北：詹氏書局股份有限公司 Taipei: Chan's Arch-Publishing 。 (in
Chinese)
- 鍾輝乾、洪紹平、洪育民、陳鳳惠 Chung, Hui-Chien, Shao-Pin Hung,
Yuh-Ming Hung and Fung-Fei Chen (2008) , 「台灣電力部門抑低
CO₂ 排放對經濟發展之影響」 “The Influence of Reducing Emission
of CO₂ from Power Sector on Economy” , 碳經濟 *Carbon
Economy* , 10 , 23-27 。 (in Chinese)
- 韓曾晉 Han, Ceng-Jin (2002) , 適應控制系統 *Control Systems of
Adaptive* , 臺北：詹氏書局股份有限公司 Taipei: Chan's Arch-
Publishing 。 (in Chinese)

- Botterud, A., M. Korpas, K. O. Vogstad and I. Wangensteen (2002), "A Dynamic Simulation Model for Long-term Analysis of the Power Market," The 14th Power System Computation Conference.
- Cecere, G., N. Corrocher, C. Gossart and M. Ozman (2014), "Lock-in and Path Dependence: An Evolutionary Approach to Eco-Innovations," *Journal of Evolutionary Economics*, 24:5, 1037-1065.
- Dopfer, K. (2005), *The Evolutionary Foundations of Economics*, New York: Cambridge University Press.
- Forsten, K. (2015), "The Integrated Grid - A Benefit-Cost Framework," Electric Power Research Institute, Final Report, <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000003002004878&Mode=download>.
- Haghnevis, M. and R. G. Askin (2012), "A Modeling Framework for Engineered Complex Adaptive Systems," *IEEE Systems Journal*, 6:3, 520-530.
- Holland, J. H. (1995), *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*, California: Addison Wesley Longman Publishing.
- Ingham, A., J. Ma and A. Ulph (2007), "Climate Change, Mitigation and Adaptation with Uncertainty and Learning," *Energy Policy*, 35:11, 5354-5369.
- Ioannou, P. and B. Fidan (2006), *Adaptive Control Tutorial*, Pennsylvania: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Mainzer, K. (2007), *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Meadows, D., J. Randers and D. Meadows (2004), *Limits to Growth: The 30-Year Update*, Vermont: Chelsea Green Publishing.
- Olsina, F., F. Garcés and H. J. Haubrich (2006), "Modeling Long-Term Dynamics of Electricity Markets," *Energy Policy*, 34:12, 1411-1433.

- Prigogine, I. (1962), *Introduction to Nonequilibrium Thermodynamics*, New York: Wiley.
- Rammel, C. and J. C. J. M. van den Bergh (2003), “Evolutionary Policies for Sustainable Development: Adaptive Flexibility and Risk Minimizing,” *Ecological Economics*, 47:2-3, 121-133.
- Rammel, C., S. Stagl and H. Wilfing (2007), “Managing Complex Adaptive Systems: A Co-evolutionary Perspective on Natural Resource Management,” *Ecological Economics*, 63:1, 9-21.
- Simmie, J., R. Sternberg and J. Cartenter (2014), “New Technological Path Creation: Evidence from the British and German Wind Energy Industries,” *Journal of Evolutionary Economics*, 24:4, 875-904.
- Tedeschi, G., S. Vitali and M. Gallegati (2014), “The Dynamic of Innovation Networks: A Switching Model on Technological Change,” *Journal of Evolutionary Economics*, 24:4, 817-834.
- Widrow, B. and E. Walach (2008), *Adaptive Inverse Control, Reissue Edition: A Signal Processing Approach*, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Woldrop, M. (1992), *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, La Jolla: Simon & Schuster.

The Dynamic Simulation and Applications of an Adaptive Smart Grid-Based Power Supply and Demand Resources Mix

Hung, Shao-Pin and Ssu-Li Chang

Abstract

Based on evolutionary economics with adaptive control theory, this research builds up a smart grid to integrate the electricity mix of power resources, including power supply-side resources such as centralized resources and distributed generation (DG) and renewable energy, demand-side resources such as demand-side management (DSM) and demand response (DR), and regulating resources such as energy storage and electric vehicles (EV). Accordingly, the research shapes a low carbon and intelligent grid based power system, with the dynamic adjustment ability to effectively balance electricity supply and demand in response to the mitigation and adaptation to future climate change.

Based on this framework, the model is established through further considerations, including underlying state variables such as energy, capacity and ancillary services of the power mix, measurement variables such as the energy index and the sustainable index, performance variables such as a value index with a risk index, and control variables such as policy, institution, market, and management factors. In addition, the model also takes into account the mutual relationship and interactions from the feedback mechanism. Accordingly, a dynamic multi-agent system (MAS) model for several scenarios can be executed for empirical simulations.

Under sustainable development, system dynamic simulation results are

Hung, Shao-Pin, Doctoral Candidate of Institute of Natural Resources Management, National Taipei University, No. 198, Roosevelt Rd., Sec. 4, Taipei City 10016, Taiwan, R.O.C., Tel: 886-2-23601250, E-mail: u827131@taipower.com.tw. Ssu-Li Chang, Professor of Institute of Natural Resources Management, National Taipei University, No. 151, University Rd., San Shia Dist., New Taipei City 23741, Taiwan, R.O.C., Tel: 886-2-86741111 ext. 67334, E-mail: ssuli@mail.ntpu.edu.tw.

Received 1 January 2015; revised 6 May 2015; accepted 20 November 2015.

found for various scenarios: (1) adaptive electricity demand, (2) adaptive self-organized non-linear path dependence for smart grid power resources mix, (3) adaptive reserve capacity for evolutionary power planning & assets management, and (4) adaptive electricity prices. The results can be used as a reference for decision-making in electricity planning and management.

Keywords: Evolutionary Economics, Smart Grid, Power Resources Mix, Adaptive Control, System Dynamics Simulation

JEL Classification: C53, C61, C63, L94, Q01, Q41

— |

| —

— |

| —