

**行政院原子能委員會**  
**委託研究計畫研究報告**

**提高綠能占比之區域電網饋線重組與轉供技術研究**  
**Study of Increasing Green Energy Penetration into Regional Power**  
**Grid using Feeder Reconfiguration and Load Transfer Technology**

計畫編號：108A003

受委託機關(構)：成功大學電力系統暨電能設計實驗室

計畫主持人：張簡樂仁

聯絡電話：06-2757575 ext 62387

E-mail address：leren@ee.ncku.edu.tw

協同主持人：

研究期程：中華民國 108 年 2 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣      80      萬元

核研所聯絡人員：蔡佳豪、姜政綸

報告日期：108 年 11 月 25 日

此研究報告部分內容摘錄自計畫主持人張簡樂仁教授所指導之碩士  
研究生（亦是本研究計畫之研究人員）溫承歡之碩士論文「以最佳  
化輸電線路轉換解決線路壅塞及提升再生能源併聯容量」

## 目 錄

|                        |    |
|------------------------|----|
| 中文摘要 .....             | 5  |
| ABSTRACT.....          | 6  |
| 壹、計畫緣起與目的 .....        | 7  |
| 一、 研究背景與動機.....        | 7  |
| (一) 研究背景 .....         | 7  |
| (二) 研究動機.....          | 8  |
| 二、 研究目的與方法.....        | 10 |
| 三、 饋線重組與轉供點之文獻回顧.....  | 11 |
| 四、 本文章節概要 .....        | 14 |
| 貳、研究方法與過程 .....        | 16 |
| 一、 電網重組之應用 .....       | 16 |
| (一) 前言 .....           | 16 |
| (二) 系統損失最小化.....       | 16 |
| (三) 電力系統的工作停電規劃.....   | 17 |
| (四) 分散式能源對配電系統之影響..... | 20 |
| (五) 電網重組應用於輸電系統.....   | 27 |
| 二、 電力系統之線性靈敏度因子.....   | 32 |
| (一) 線路分配因子 .....       | 33 |
| (二) 發電機組之靈敏度因子.....    | 34 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 三、 區域電網拓撲配置重組最佳化演算法.....      | 35        |
| (一) 模擬退火法 .....               | 35        |
| <b>參、主要發現與結論 .....</b>        | <b>39</b> |
| <b>一、 最佳化方法結合模擬架構的實現.....</b> | <b>39</b> |
| (一) 前言 .....                  | 39        |
| (二) 模擬系統的架構.....              | 40        |
| (三) 最佳化數學模型 .....             | 45        |
| <b>二、 案例分析與模擬結果.....</b>      | <b>51</b> |
| (一) 前言 .....                  | 51        |
| (二) 南部區域配電系統研析 .....          | 52        |
| (三) 中部區域輸電系統研析 .....          | 63        |
| <b>三、 結論 .....</b>            | <b>82</b> |
| <b>肆、參考文獻 .....</b>           | <b>84</b> |

## 中文摘要

近年來再生能源的蓬勃發展，在增加併接再生能源需求下，區域電網饋線將面臨逐漸飽和的情況，若要再增加再生能源併接容量，必然對系統的穩定性造成影響。本計劃將針對分散式能源併網後，如何透過電網重組方式提高併聯容量並對輸配電系統之影響加以研究。區域輸配電系統中的電力潮流控制操作有幾種策略，其中為輸配電饋線重組以及負載轉供技術，其作為是藉由改變分段開關與連絡開關的狀態進而改變配電饋線的拓撲結構，使電力潮流得以改變，進而增加原本吃緊的饋線容量，提高分散式能源併聯容量的可能性以及找到一個最佳的轉供路徑。為了得到最佳化的分段開關閉鎖狀態而達成最大化可輸送電力潮流，需要使用最佳化演算法處理之。本計畫將利用最佳化演算法-模擬退火法為核心，從龐大的系統架構中快速尋找較佳的開關操作。另外，為了驗證所提出演算法之成效，再利用 Python 環境執行最佳化演算法，再將其演算法結果導入 PSS/E 電力系統模擬軟體的環境下執行系統衝擊分析，驗證執行配電饋線重組後能兼顧饋線負載平衡、電壓變動率、及增加併網容量的可能性。本計畫將以台灣某些地區輸配電系統為研究對象，在輸配電系統含有分散式電源的情形下，達成輸配電系統之拓撲配置重組及輸配電饋線轉供路徑之最佳化。

## **Abstract**

With the rapid development in renewable energy, the increasing penetration into the transmission or distribution grid could reach the line capacity limit and impact the stability of the regional power system. This research will focus on the method of enhancing the grid-connected capacity for the renewable generation. In general, there are several strategies which can solve the power flow congestion inside the grid by feeder reconfiguration or load transfer. These strategies basically attempt to change the topology of the transmission/distribution grid by changing the state of sectional switch or tie switch. Through the change of regional grid topology, regional power flow can be diverted to the other routes that could help alleviate the congested lines. This approach could also increase the possibility of integrating more distributed generation into system. Based on this concept, the research team will find out more effective ways to achieve this goal using the Simulated Annealing (SA) artificial intelligent algorithms. To verify the performance of proposed algorithm, the Python environment is conducted to perform artificial intelligent algorithm, the outcome of the algorithm is fed into the PSS/E power system simulation software to verify the feeder configuration, while the regional load-generation balance, voltage regulation, and increase of the feed-in renewable capacity are satisfied. The study case will be focusing on one practical regional grid in Taiwan to achieve the optimal feeder configuration and load transfer under the abundant renewable generation in-feed.

# 壹、計畫緣起與目的

## 一、研究背景與動機

### (一) 研究背景

一般電力系統主要可分為三個部分，包含發電系統、輸電系統以及配電系統。所謂配電系統是由輸電線傳送至各地的配電變電所後再進一步將電壓降低一個層級，透過配電饋線將電能傳送至用戶端。隨著科技的蓬勃發展，台灣各行各業的快速成長及民生需求都更加依賴電力供應，也漸漸地增加整個輸配電系統的負載密度，使輸配電系統中饋線結構隨著負載量急速增長也日趨變得更加複雜。

輸配電系統涵蓋範圍廣大，負載中潮流日益複雜且會依時間改變，為了達到迅速且有效地取得相關資訊並加以處理，調度人員必須藉由良好的配電管理系統處理其中複雜的潮流資料，但現今台電多以調度人員經驗法則與人工處置的方式做管理，但此方法勢必會使工作效率以及安全性無法提升。另外，由於現今環保意識的興起，傳統火力機組運轉時伴隨而來的二氧化碳、氮氧化物、懸浮微粒等，以造成嚴重的空汙問題，國內逐漸引進較具環保概念的再生能源。再生能源的種類繁多，包含太陽能、風力、水力、潮汐等，這些能源以風力發電及太陽能發電為大宗。這些再生能源具有分散及容量較小的特性，但當分散式能源併入至電力系統中，將衍生出

其他需進一步探討與解決的問題。由於國內的再生能源運轉區域，主要以配電層級為主，而配電系統也是整個電力系統中負載較為繁複的一個環節，因此配電網路必須在如此多變與複雜的環境下能夠安全的運轉甚至符合經濟效益，對於未來配電系統的規劃者，針對配電系統的最佳規劃與操作來說，都是一個相當大的挑戰。

依照不同的再生能源裝置容量，須遵照台電公司之再生能源發電系統併網技術要點：總設備容量未滿 100kW，得併接於低壓系統(電壓等級 600V 以下)；總設備容量 100kW 以上未滿 20MW，得併接於高壓系統(電壓等級 600V 至 25kV 以下)；總設備容量 20MW 以上者，得併接於特高壓系統(電壓等級 25kV 以上)。此外再生能源併接至適當電壓等級之系統後，執行完整的系統衝擊分析，其中系統影響規範包含：電力潮流、偶發事故分析、電壓變動率與閃爍、故障電流、暫態穩定度、諧波管制等，由此可知未來在配電系統中併入分散式能源的運轉、分析及操作都是必須考慮到諸多穩定操作的規範。

## **(二) 研究動機**

隨著經濟與科技的高速發展，人民及各企業對於電力的需求也相對提升，因負載密度不斷的增加，造成輸配電系統的饋線傳輸裕度逐漸吃緊的情況，若要解決供電及傳輸裕度不足的問題，則需要



再新增電力供輸設備，然而新增電力設備除了需額外增加建置成本外，在建置評估上受到台灣的地形影響與人口密度的關係，土地上取得較為不易，且新增輸配電線路的規劃上易受到許多異議與阻礙。因此本研究以現有的輸配電系統為基礎，透過線路開關轉換的概念，找出最佳的開關組合，使得電力潮流有較好的傳輸路徑，達到最大的輸電裕度。

由於提升再生能源占比政策的推動，未來將引進更多的風力、太陽能、小水力發電等機組至系統中。就目前國內再生能源運轉方式而言，此類機組主要併接於配電網路，而配電網路在電力系統中分佈最廣且負載分配較為複雜，同時在再生能源裝置容量的規劃上，需考量機組併入電網所產生系統衝擊性問題。為提高其運轉的經濟效益，本研究利用輸配電系統既有的線路，透過開關投切的方式改變電網拓撲，在符合再生能源對系統衝擊的限制下，達成提升再生能源併聯容量目標。

經由以上所述，本文主要目的在探討含有分散式電源的情形下如何使用線路轉換的方式找出最佳化輸配電網結構。在不增加供電饋線的前提下，有效利用原有系統設備的容量，並尋求合適的開關操作策略進行線路壅塞的排除以提升線路輸電裕度及再生能源裝置容量。

## 二、研究目的與方法

本文主要針對配電與輸電兩不同系統進行分析，未包含再生能源與包含再生能源機組結構兩者研究，而研究之目標皆是最大化目標線路裕度，限制條件包含不可超過線路容量與電壓變動率。

本文的研究方法使用模擬退火法(Simulated Annealing, SA)演算法進行最佳化研究與分析。本文研究流程圖如下圖 1-1 所示：

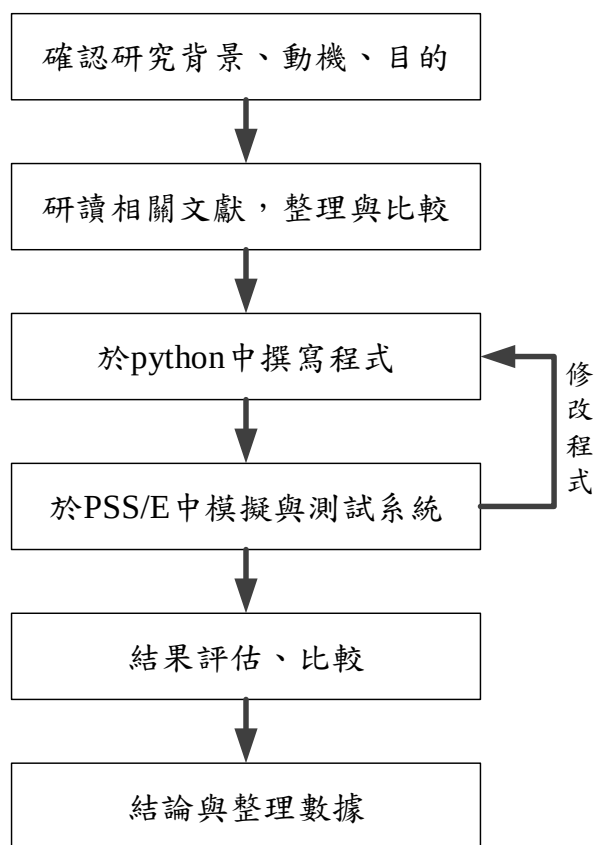


圖 1-1 研究流程圖

### 三、饋線重組與轉供點之文獻回顧

過去針對電網重組的技術已有諸多的專家學者加以研究，而相關文獻甚多，因此將參考較多的論文、期刊中進行整理。在應用上主要講述輸配電網的重組概念如何降低系統之線路損失、改善饋線電壓相關問題、最小化開關操作次數、負載平衡等目標。在降低線路損失上：文獻[1]中使用窮舉法(Exhaustive Algorithm, EA)，利用電流靈敏度矩陣對系統評估及列舉所有饋線重組的可行解，此法可以確保搜尋的結果為最佳，但若饋線分支數目過於龐大時，較無法高效率地搜尋所有可行解。文獻[2]中使用一種啟發式搜尋法，先將饋線上全部的開關打開，再逐步關閉開關，此法執行速度較慢，且容易使解落入局部最佳解。在處理饋線電壓問題上：文獻[3]中提出利用配電系統中分段開關的切換，將電壓驟降發生時系統中最脆弱的一負載區域，將其轉供至其他正常供電之饋線，以降低電壓驟降對電網所造成的傷害。文獻[4]中提出將放射型架構之配電系統利用線路最大承載與電壓偏移指標，使用模糊演算法整合兩目標函數，並以數學規劃的方式進行電網重構。在分析系統事故後的安全規劃上：[5]利用模糊理論將欲求解的目標函數進行模糊化，在模擬配電系統發生事故需進行故障點隔離時，決定目標函數的上下限以及期望值，再結合分支界限法先將饋線上開關全部關上，再嘗試逐步打

開關直到系統最終呈現輻射型架構並求得最佳的轉供路徑。[6]中針對含有再生能源電網的復電問題，主要利用 PSS/Adept 電力模擬軟體對配電網路的拓撲規劃，並使用最佳化潮流法確保電網經過重組後，在最少的開關操作下排除壅塞狀況，且各負載依舊維持電力供應。在[7]中為了可大幅降低負載的供電成本，提出以進化規劃法(Evolutionary Programming, EP)決定再生能源的最佳安置點以及規劃容量大小。

在電網重組問題上也廣泛地運用智慧型演算法求解，例如[8]利用類神經網路法(Neural Network)根據負載模式的變化決定適當的電網拓撲，以最小化系統損失作為重組目標；[9]使用遺傳基因演繹法(Genetic Algorithm, GA)，以降低配電系統的功率損耗為目標，設計一套將基因結合開關狀態的編碼方式，並以 GA 的交配與突變特性提升搜索範圍，避免落入局部最佳解；[10]使用模擬退火法(Simulated Annealing, SA)對於固體物質的退火過程，以隨機的方式調整線路開關，依照設定的退火溫度來決定收斂速度以及搜索的空間，並與禁忌搜尋法的結果進行比較，此法對於求解組合最佳化問題較具一般性，但若溫度設定不當，則會影響執行時間與收斂範圍。此外，近年來一種採取仿生物智慧的概念，也逐漸發展並應用於最佳化問題研究，此類方法的興起，是為了改善傳統數學規劃法

的缺點。這些仿生物智慧演算法主要的共同點為：具備自我學習能力、模擬生物的思考方式與非線性特性[11]。常見利用仿生物智慧最佳化求解電網重組問題包含：粒子群優演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)[12]、蟻群優化演算法(Ant Colony Optimization, ACO)[13]、人工魚群演算法(Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA)[14]等，其中粒子群演算法與上述的基因演算法概念相似，此兩種演算法皆隨機地產生初始解，經由世代演化的過程得到最佳解。由於粒子群演算法演化機制上沒有明顯的交配、突變與選擇程序，於演化的過程中，粒子藉由自身個體與族群的最佳經驗，來更新自身的資訊，並將資訊分享至其他的粒子，以期望整個族群會朝向最佳解的位置逼近，因此在數學式的設計與計算上粒子群演算法的處理速度普遍優於一般智慧型演算法。

在研讀最佳化輸配電系統拓撲的文獻上，研究目標大多以最小化線路損失、電壓控制以及負載轉供為主要方向，較少提到再生能源的裝置容量規劃問題，在未來國內將大量引入再生能源併網的情形下，除了降低線路損失及控制電壓穩定度的目標外，如何在現有網路實體架構下提升再生能源可併聯容量亦是值得研究的課題。

本文的研究方法將參考以上文獻資料所提供的經驗與技術，以不同的思維，建立一套結合電網安全限制與增加再生能源併聯容量

目標之最佳化演算法以執行輸配電網的線路開關組合，再利用 PSS/E 電力系統模擬軟體執行結果的測試與驗證，期望能在現有的輸配電基礎上提升分散式能源併網容量的可能性並確保系統安全。

## **四、本文章節概要**

本文內容主要分為四個章節，茲將各章內容簡述如下：

### **壹、計畫緣起與目的**

簡述本文研究背景、動機與方法、文獻回顧及架構概要。

### **貳、研究方法與過程**

首先，本章會介紹目前國內輸電與配電系統的基本架構，以及說明電力系統於運轉時可透過電網重組解決哪些問題。接著，說明電力系統中之線路與發電機組兩項靈敏度因子的分析方法，並利用靈敏度因子進行電網重組與規劃再生能源最大併網容量分析。

最後，介紹模擬退火法(SA)最佳化理論與其數學原理。

### **參、主要發現與結論**

本章介紹輸配電系統之電網於 PSS/E 電力模擬軟體建模以及在不同條件(有、無再生能源併網)下電網重組潮流分析。

利用前述所提的方法執行輸配電兩大系統電網安全分析程序，並對 N-1 故障案例、維修(停檢修區)案例及再生能源併網規劃進行修

正電網拓樸以達電網安全性，以提升整體電網之輸電裕度及再生能源機組可併網之最大發電裕度。

#### **肆、 參考文獻**

臚列本研究所參考的文獻資料。

## 貳、研究方法與過程

### 一、電網重組之應用

#### (一) 前言

在電力系統中電網重組可以解決諸多電網安全性的問題，在正常運轉時，主要於降低線路損失節省成本提升運轉效能，或者規劃一套完整的電網維修方案，包含系統停電規劃、復電策略等。另一方面在電網出現偶發事故時，亦可提出相對應的電網拓撲以舒緩線路壅塞，以便調度人員排除故障的期間，無負載受到影響，確保電網的安全性。

#### (二) 系統損失最小化

由於電力系統架構幅員廣大，且負載特性不一，導至線路損失相比於一般的輸電線路較大，約佔整個電力系統的 15%~20%。配電系統的線路損失主要是由線路上的電阻所產生，計算方式如式(2.1)[15]：

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^n Re(I_i^2 \times Z_i) \quad (2.1)$$

其中  $P_{loss}$  為配電系統中總線路損失， $n$  為配電系統中總線路數量， $I_i$  為第  $i$  條線路上的負載電流大小， $Z_i$  為第  $i$  條線路上的線路阻抗值。

在配電系統中，根據用戶端負載量的大小而提供所需的電流給用戶，稱為負載電流，換言之，在配電系統中的電流大小是由負載端而定，所以根據上式中可知，若要降低線路損失，能改變的僅有調整



線路上的阻抗值，而一般改變線路阻抗值的方法必須更換線路，但對台電公司而言，除了是一項成本上的負擔外，且不可將此成本增加至用戶的電價上，為了考量成本的問題，除非有不可避免的因素，否則台電公司不會採用此做法。因此考量上述的情況下，配電網絡的重新配置可有效的降低系統線路整體的阻抗值，以減小通過線路上的電流，使得系統整體損失達到最低。

### **(三) 電力系統的工作停電規劃**

#### **1. 工作停電的種類**

當供電能力不足，且危及電力系統的安全時，台電公司將依照情況施行不同的停電措施，將此措施分為兩大類：

##### **(1) 緊急停電**

亦稱緊急負載限制，當系統遇上突發事故無法正常供電，如：地震、颱風等天災不可抗力因素、發電機組的燃料供應吃緊或設備故障影響運轉發生故障等，這些原因皆可能會導致設備超過負荷或電源不足、電壓嚴重偏低時，為了維持電力系統的安全性，必須立即對負載實施停、限電措施。

##### **(2) 計畫性停電**

如發生緊急狀況，預測隔日將造成電源供應不足時，須採用停、限電措施，另一方面則是台電公司會在定期檢討系統的供電情況，並

考量備轉容量、供電區域的負載平衡以及大修的人力、工期、周期等因素，安排發電機組或輸配電線路的維修時程。

上述之停、限電行為乃是為了確保系統供電安全，避免在排除事故或機組、線路維護檢修的過程中發生大規模的停電。

## 2. 停電規劃之負載轉供模式

由於電力系統結構較複雜，且配電網組成方式普遍為放射性架構，若上游執行維修規劃時，將可能導致下由負載區發生停電，故配電饋線大多設計為開迴路架構，藉由聯絡開關(tie switches)互相連接，以便於負載與相鄰饋線連接。在執行停電前，操作人員必需要事先規劃好負載轉移，饋線的負載轉移上會因饋線網路的組成方式而有所不同，其中分為[16]：

### 1. 單饋線群組復電

此模式假設維修區下游負載視為一單群體，且附近的轉供饋線裕度足夠供應停電區域之所有負載。如圖 2-1 所示，此簡易系統包含兩饋線 Feeder 1 與 Feeder 2、5 個分段開關(S1、S2、S4、S5，S6)、1 個連絡開關(S3)，另外 A、B、C 三個負載區由 Feeder 1 供應，D、E、F、G 四個負載區由 Feeder 2 供應。如圖 2-1 所示若 A 負載區欲進行設備維修，此時將 S1 切換為連絡開關，S3 切換為分段開關，使 A 區

負載得以隔離，則 B、C 負載轉換至 Feeder 2 供應，使為修時間可維持正常供電。

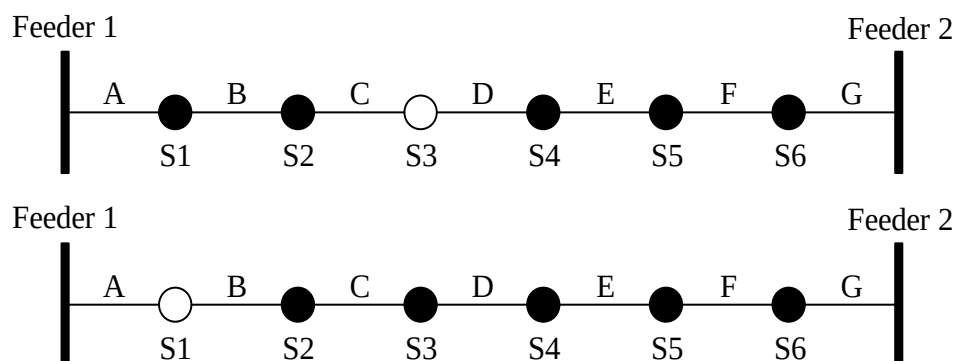


圖 2-1 單饋線群族系統架構

## 2. 多饋線群組復電

此模式是將維修區下游轉供區域切割為多組代轉區，代轉區經由相鄰饋線進行供電，而代轉區數量越多，則表示進行轉供的饋線越多。如圖 2-2 所示為一個穩定的系統，若 A 負載區域內欲進行設備維修，在執行停電作業前，如圖 2-2 所示將 S1、S2 啟斷將 A 區隔離，並利用 S3 啟斷將 A 區下游的 B、C 兩負載區分別由 Feeder 2 與 Feeder 3 進行供電。

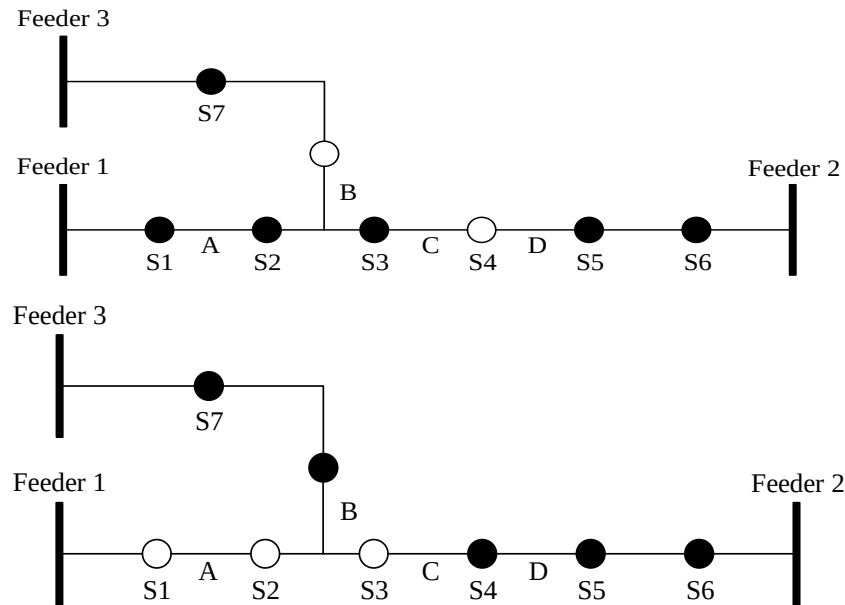


圖 2-2 多饋線群族系統架構

依上述說明，在系統設備進行例行性維護時，在規劃上調度員可依照不同的系統架構及規劃維修區域，並靈活地切換線路開關找出最佳的負載轉移點，而在實際維修的過程中，系統依舊可以穩定供電至各個負載，使用戶不受影響。

#### (四) 分散式能源對配電系統之影響

電力是現代人生活中不可缺少的能源，由於石化能源漸漸的減少，面對未來的用電問題必須尋找並發展新能源以代替傳統發電方式。再生能源屬於分散式能源(Distributed Generator, DG)，由於此種發電方式一般併接於配電系統中，基本上不需要由高壓電網調度中心接受調派，而是直接併入至當地負載最鄰近的電網中，相較於傳統集中式發電有較大的差異。

因此分散式能源具備對環境的低污染、建置時間短以及可裝置於鄰近負載處等優勢。相較於傳統式發電系統，不僅可以減少投資輸變電設備的成本，降低長程輸變電的風險，亦可有效提高電力供應之可靠度，使電力供應穩定，此外，對台電公司而言，除了可以增加系統可靠度、延緩輸配電設備的擴建，也可避免興建大型電廠對環境的污染以及抑制尖峰用電等；而對用戶而言，分散式發電系統可作為備用的電力來源，達到電力連續供應以增進電力供應的穩定度等目的。此外隨著現今科技技術及材料的進步並透過商業化量產，使得分散式電源發電成本大為降低，日本、歐美等先進國家都在積極地研發替代能源與再生能源，因此現今分散式發電技術與管理已成為電力系統發展的趨勢。

## **1.分散式能源對系統之衝擊**

若於電網中併入分散式能源，可提升電能供應裕度，舒緩尖峰負載壓力，且在偶發性的事故所造成的停、限電中，亦可做為緊急備用電源，提升電網可靠度。一般的分散式發電的設備容量較小，由於此類發電系統大多會連接於既有的配電電網，當配電系統中加入分散式能源時會產生許多規劃與運轉等相關問題，同時也連帶著各種衝擊，因此台電公司對分散式能源併網的技術加以規範。由於太陽光電與風力發電等再生能源最大的缺點是發電能力受氣溫、風速、陽光照度等

自然氣候因素影響，不穩定的機組出力加上發電設備因素，若併聯到既有電網除了會使配電系統的電力潮流重新配置，也容易造成系統中電壓變動、電壓閃爍、故障電流或諧波干擾等不良影響，進而產生系統不穩定甚至對電力與供電品質造成影響，以下對其中幾項要點說明[17]：

### 1. 電力潮流

根據台電公司規定，再生能源併聯於電網後，須符合以下規定：系統應檢討在 N-0 時，發電機組、輸電線路、變壓器之任一設備，無檢修或事故停用情況下，輸電系統可正常運轉。電力潮流經尖峰、離峰分析後，系統穩態電壓應保持在 0.95p.u.至 1.03p.u.之間，且發生事故後，系統穩態電壓變動範圍應維持在 0.95p.u.至 1.05p.u.之間。

### 2. 偶發事故分析

若再生能源併接於 69kV 系統，則將檢討發電機組、輸電線及變壓器之任一設備，因檢修或事故停用的情況下，整體系統仍能可正常運轉。如不符合本標準規定，得提出包含特殊保護設備或過載保護等因應措施，以維持系統供電安全。

### 3. 故障電流

依據台電公司「再生能源發電系統併聯技術要點」規定：再生能源發電機組送至台電公司系統之故障電流，不能造成既有設定、興建

中或已核定之台電公司或其他用戶斷路器的啟斷容量不足，若併接於配電系統，則三相短路電流不可超過 10kA。

因此上述規範為了讓再生能源加入系統中，能夠不影響原系統的穩定供電以外，又可強健原系統的電網安全性，則本研究的做法即當發生在分散式能源併網的過程中，經系統衝及分析後若違反上述規範時，利用電網重組技術，找出最適當的電網拓撲，以達成符合台電公司的規範，除此之外，亦若未來欲再興建分散式能源至系統中，則可利用此電網拓撲規劃新建之再生能源機組的最大發電裕度，以大幅提升系統的供電效率，並減少系統停、限電造成的損失。

## 2. 故障處理

電力系統事故是指在輸配電系統中的機組、輸電線或變壓器等設備在正常運行中遭受破壞或因跳脫導至故障，以致於造成對負載區停止供電，嚴重時甚至使設備受到損壞等情況，然而系統發生事故時後果十分嚴重，若無及時排除或不適當地處理可能會使其影響持續擴大，演變成大規模的停電。如今在配電自動化系統中，在事故發生時可利用即時監控設備(SCADA)以及變電所內所設置的饋線資訊終端設備(Feeder Remote Terminal Unit, FRTU)傳送現場的數據資料，而FRTU 具備內建自我診斷功能，並能在有異常情況回報控制中心，因此操作人員在事故發生時可利用上述的自動化系統規劃維修排程，縮

小停電範圍，並在排除故障後，迅速恢復供電。進行停電規劃擬定時，可配合配電饋線自動化系統，除了預先規劃負載轉供以減少影響的用戶外，同時需要擬定完整的施工規劃，避免工作人員因操作疏失造成設備損壞甚至發生人員感電事故，此外配電系統在事故處理需遵守的限制包含以下幾點：

1. 停電區域盡量減少。
2. 電網架構需維持放射型拓撲。
3. 轉供承接之饋線裕度必須足夠。
4. 分歧線路不得承接主饋線之負載。

當維修區域進行停電維修時，必須利用線路中隔離開關將維修區域隔離，使下游負載可與相鄰的饋線連接完成負載轉供，以減少受影響之用戶。以下簡介配電系統在事故處理程序的步驟，如圖 2-3 所示，在系統正常運轉時，A、B、C、D、E 負載區由 A 變電所供應電力；F、G、H、I 負載區由 B 變電所供應電力。



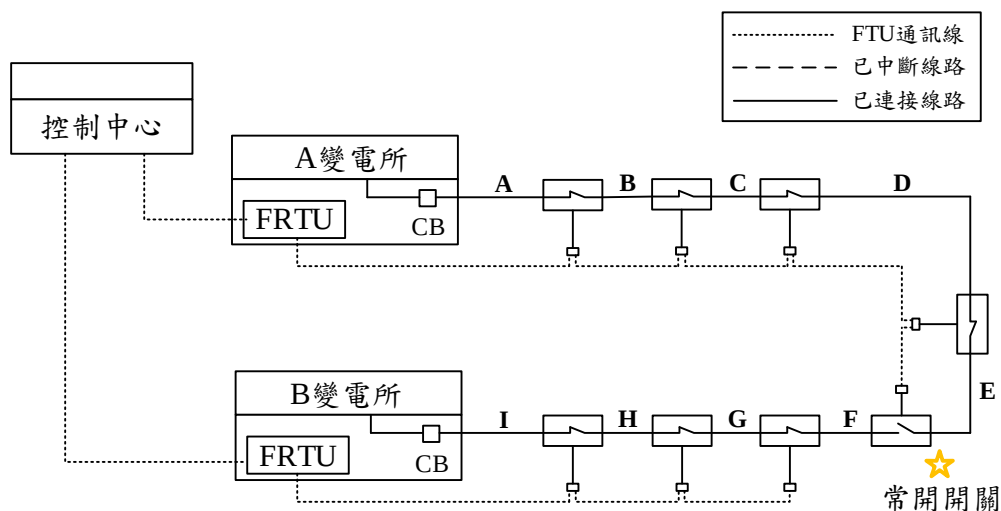


圖 2-3 配電系統架構圖

模擬配電系統事故處理程序，如圖 2-4 所示當負載區 D 點事故發生，此時資訊終端設備(FRTU)立即傳送事故資訊，並指示控制中心將 A 變電所的饋線 CB 跳脫使負載區 A~E 停止供電。

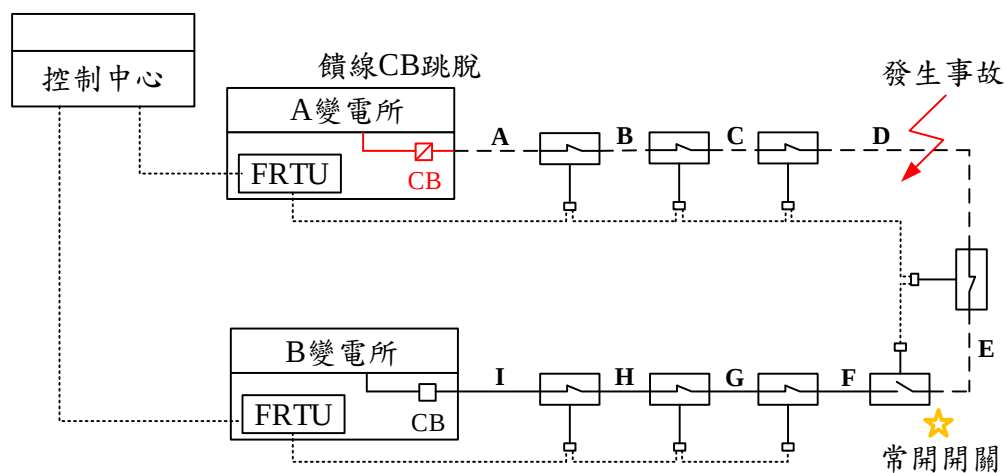


圖 2-4 配電系統事故跳脫模擬

如圖 2-5 所示，當系統偵測到故障點的確切位置後，將自動切開故障區間之上下游開關以隔離故障點，進行後續的維修程序。

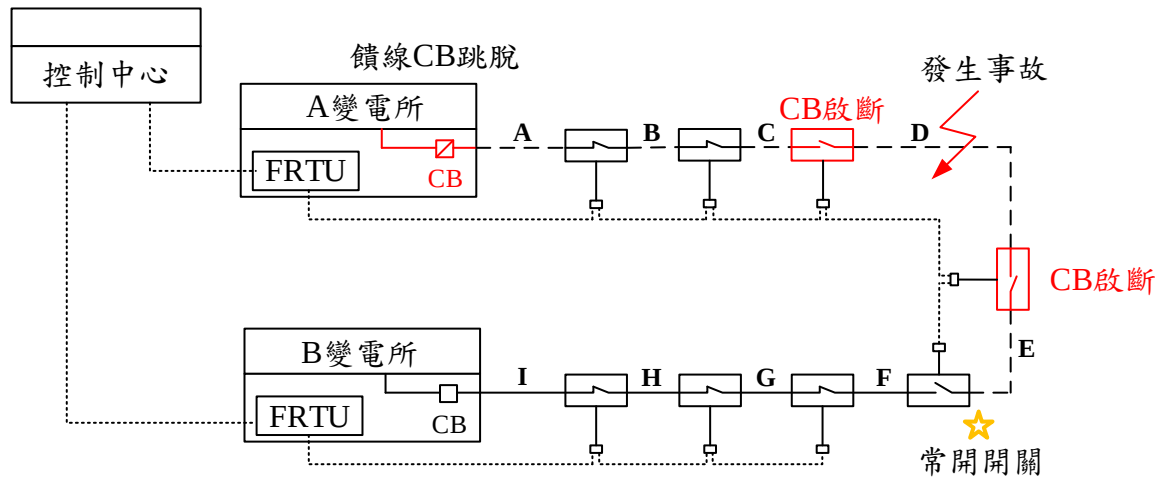


圖 2-5 隔離故障區

如圖 2-6 所示，系統自動併入饋線上 A 變電所的 CB，使上游之健全區間恢復供電，並將轉供點常開開關投入，使下游健全區間恢復供電，此時 A、B、C 負載區由 A 變電所供應電力；E、F、G、H、I 由 B 變電所供應電力。

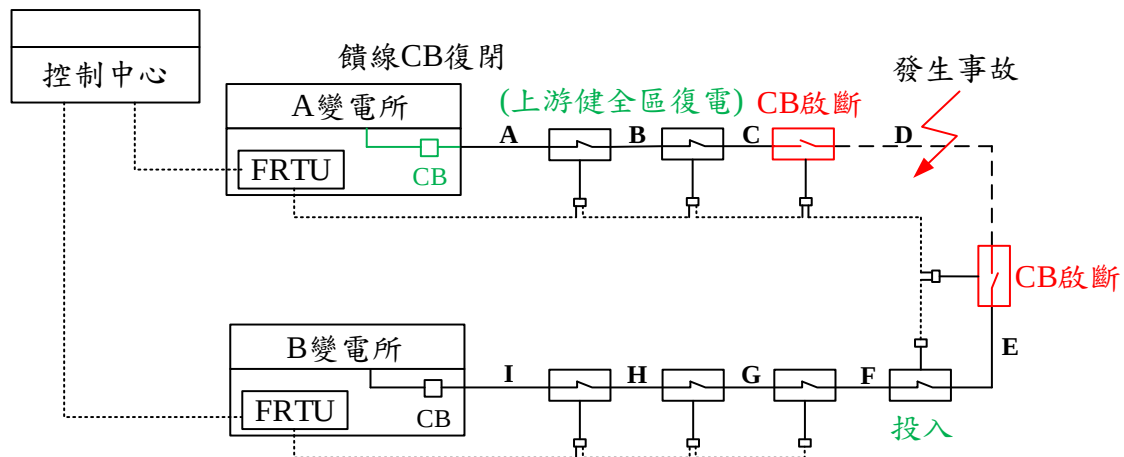


圖 2-6 上游復電及下游轉供

如圖 2-7 所示，事故搶修完成，將常開開關啟斷，各負載恢復原始饋線供應電力，使全系統恢復穩定供電。

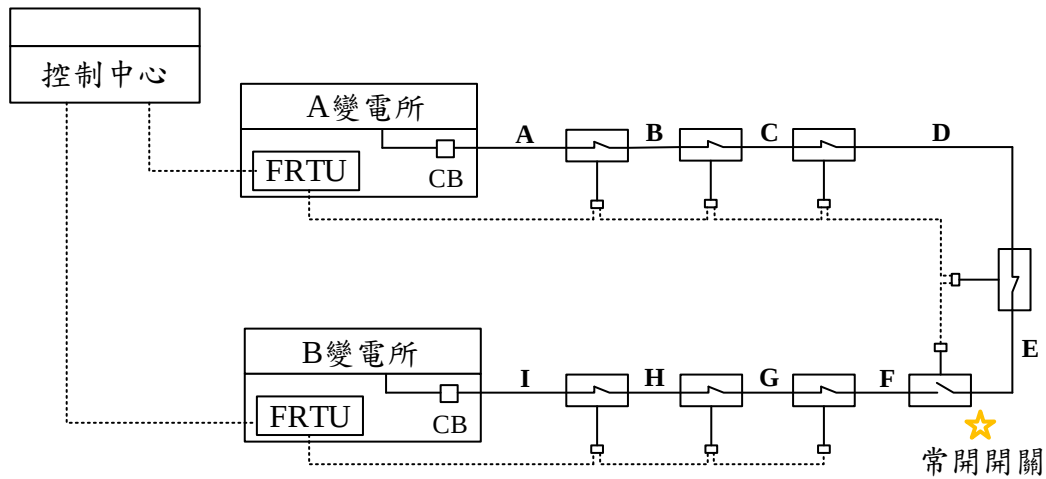


圖 2-7 完成排除事故

以上處理步驟可結合含有再生能源的配電系統，若不符合系統衝擊分析項目中的偶發事故檢測後規定，可利用以上的電網重構方式進行事故的排除，使電網維持系統運轉正常。

### (五) 電網重組應用於輸電系統

了解電網重組功能在配電系統的應用後，在本研究中也提出將此重組功能應用在輸電系統電網上。根據台電公司「輸電系統規劃準則」規定，在輸電系統中所含有的設備發生故障情況或停用條件下，輸電系統仍可維持正常運轉之狀態，故在 N-1 的檢討中，輸電系統與配電系統都必須執行，而目前台電公司在處理線路開關的投切問題時，大多以調度人員的經驗法則輔以手動或自動的方式調度之，但考量輸電系統的複雜性，調度人員無法在很短的時間內處理大量的電網中線路、變壓器及機組的相關資訊並提出有效的調度規劃，若遇上突發事故時，更無法在較短的時間內提出適合的處理方式，以導致無法達到

最大效益，若能輔以相關電腦的輔助程式，先行提供調度人員相關可解決的方案，而調度人員在依照當下情況加以分析，即可快速排除問題。

另一方面，臺灣電力系統的發電方式愈來愈多，發電機種類也日趨增加許多，對此數量龐大的運轉機組而言，適當的機組發電量排程調度，必可大幅度地減少發電成本，而電力系統運轉於正常狀態時，必需有足夠的發電量以滿足系統的負載，當遇上偶發事故或緊急情況時更需如此。目前機組排程可分為全系統排程與競價排程，而在機組排程的流程中，需將日前負載預測扣除抽蓄水利與民營電廠 (Independent Power Producer, IPP) 兩類排程的發電量已取得競價負載需求量後，再進行競價機組排程，而競價機組排程需與電網安全分析整合為具有電網安全考量的競價機組排程 (Security-Constrained Unit Commitment, SCUC)。流程如圖 2-8 所示，在機組的經濟調度執行完畢後，將進行電網安全分析，其目的為確保線路不會發生壅塞情形，若結果出現線路壅塞時，則電網安全分析會找出對壅塞線路影響較大的機組，並提供解決方案，為排除線路壅塞，則需重新執行機組排程，此過程迭代數次，才可使得最後的經濟調度符合電網安全分析。

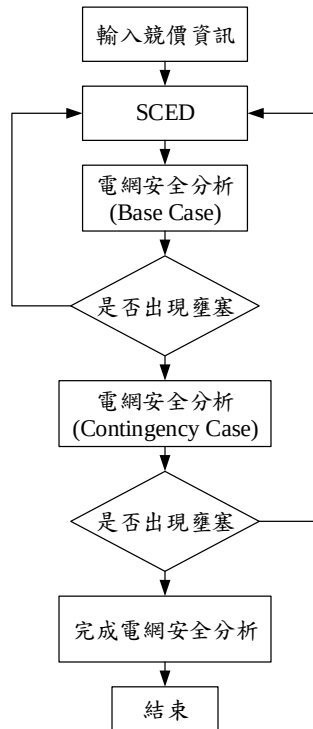


圖 2-8 具電網安全限制之機組排程流程圖

然而在每一次迭代的過程中若出現壅塞線路進行修正再重新排程後，將影響發電機組的經濟效益，若壅塞的案例依舊重複出現，此時對經濟調度的成本勢必會增加不少，若使用先前提出的電網重組方式，在執行 SCUC 前先執行電網重組，將容易發生壅塞的線路設定為重組目標，則在進行電網安全分析時，減少出現線路壅塞數量，除了可以降低 SCUC 執行時間，亦可大幅節省發電成本達到最大效益。

藉由電網中線路開關重組的方式，可以解決許多電網可能遭遇的問題，其中這些問題包括：

### 1. 線路過載

由於負載增加或是 N-1、N-2 故障導致線路上的電流超過額定容許值之範圍，因此造成導線過載。

## **2. 變壓器過載**

由於負載增加或是 N-1、N-2 故障導致變壓器所能承載的電流超過額定容許值之範圍，因此造成變壓器過載

## **3. 線路與主變壓器三相間電流不平衡：**

由於三相間的負載增加、負載分配不均或負載落差甚大，使得三相間負載不平衡導致電流超過容許值。

## **4. 線路損失過大**

由於線路彼此間的負載分配不均造成負載落差太大，導致線路上的損失過大。

## **5. 線路電壓降過高**

因線路之間的負載分配不均，若負載落差過大時，使得部份載重載線路上的電壓降超過容許值。

## **6. 非故障區域的恢復供電**

若發生線路事故，當故障區域隔離後，需盡快恢復因故障區影響而導致停電的非故障區域供電。

## **7. 計畫性停電**

當部分區域因設備老舊或需要進行例行性維護等工作時，將維護區域中的輸配電系統與負載隔離，為了避免因維修造成用戶停電，需將維護區以外的負載轉供至相鄰線路。

藉由上述說明，若系統在運轉時發生線路故障、饋線過載等的問題，可利用電網重構的方式處理，而調度員在操作的考量上亦可藉由電網重構維持系統正常運轉，以提高供電效率及安全性。然而在整個電力系統中存在著各式各樣的負載，而這些負載量並非固定且平均地連接至電網中，另一方面，負載也會因為時間與季節的不同而變動，因此在不同的情況與緊急狀況，這些負載的不平衡可能會導至饋線或變壓器發生過載。

然而電網重組問題並非單純只解決線路壅塞之狀況，不僅要考慮線路潮流是否違反額定，亦需考慮系統故障電流、匯流排電壓等。其故障電流的限制為，345kV 系統：故障電流應低於 63kA，161kV 系統：故障電流應低於 50kA，69kV 系統：故障電流應低於 40kA；除此之外，依照系統穩態電壓之規劃準則，在電網經過重組後使系統恢復穩定運轉，匯流排電壓應保持 0.95 p.u.至 1.05 p.u.之間，這些限制皆是電力品質的重要指標。

另一方面，在得出最佳電網結構後，可利用此電網之新併網之分散式能源機組進行最大發電的規劃，在原先的電網中預設再生能源發

電量，可能會因為 N-1 偶發事故導致線路壅塞，進而限制了此區域的發電機供電效率，無法架設裝置容量較高的再生能源機組，若經過電網重組改變電網結構，使得此區域可容納更多的機組，不僅可使電網安全性提高，也可提高區域再生能源的占比，減少傳統火力機組的發電成本。

## 二、 電力系統之線性靈敏度因子

為了在電力系統中電網的設計、實施預防性與補救措施，在系統設備中斷的情況下，必須快速地執行安全性分析。在系統設備發生偶發事故之後，狀態估測和負載潮流分析是用於確定系統狀態變量的兩種常見的技術，其用於估測節點電壓和傳輸線流中的流量，線路損耗和壅塞事件。但是系統的動態和複雜性需要更快的檢測方法，因此可以通過線性分佈因子來實現。以電力傳輸分配因子(Power Transfer Distribution Factor, PTDF)和線路中斷分佈因子(Line Outage Distribution Factor, LODF)形式的分配因子的使用是對於匯流排和輸電線路中斷之間的有效功率交換的傳輸線靈敏度，提供了這兩種線性技術的替代方案，其效果可使處理程序速度更快，且過程中無需迭代。

在輸系統電網重組問題中，每條線路都設有連絡開關或分段開關，而開關的投切操作可看成線路的中斷與連接狀態，在一穩定系統



中若因線路狀態發生變化，導致電網結構改變，這些問題不僅會影響輸電系統的電力潮流，也會改變其潮流方向，若啟斷的線路數量過多或啟斷的位置太過相鄰，以至於供應負載之饋線減少，可能會使剩餘的負載供應線路發生壅塞的情況。此外，由於在進行輸電電網重組評估中，可能會考量需要新增線路以紓緩壅塞，但新增線路必需增加建設成本與施工時間，無法立即處理當前的運轉問題，因此在處理重組問題時，大多是以既有電網中的常開或常閉線路做調整，而本研究對於開關投切的策略，將電網架構中既有的線路，並使用線路分配因子做為調整的依據[18]。

### (一) 線路分配因子

線路事故分配因子(Line Outage Distribution Factor, LODF)，一般使用於電力系統中對事故的應急分析，屬於功率注入的變化或系統中所發生之任何事件的靈敏度分析，在系統安全分析與電力市場應用中有著很大的用途[19]。在應用層面上，由於事故所引起的線路過載導致電網後端一連串的故障是降低可靠度的主要問題。

此外，不論系統在執行排除故障導致的線路過載情況或計劃性檢修前，當電網架構發生變化時，使整體系統的潮流方向會因此而改變，導致各線路的流量較難以估測，因此為了尋找出最適應的電網拓

撲，利用線路事故分配因子對線路開關重新規劃，以及採取適當地措施，來恢復過載線路上的功率傳輸。

## (二) 發電機組之靈敏度因子

發電機功率傳輸分配因子(Power Tansfer Distribution Factor, PTDF)，用於觀察功率傳遞的線性化影響，通常應用於電力系統輸電網中的可用容量之評估，亦可用於電力系統在運轉規劃、電力交易規劃以及電網的安全性評估。其分析概念為系統中若匯流排的有效功率、無效功率或角度的變化，對於全系統上線路的潮流及匯流排電壓會產生何種影響，在直流模型下，匯流排的電壓大小保持不變以及潮流中的無效功率成分會被忽略；而在交流模型下，即代表整個系統架構，藉由當前的系統運轉情況分析靈敏度因子，可進一步分析當注入匯流排的功率產生變化時，對於全系統中線路的潮流的變化，因此本文利用功率傳輸分配因子評估再生能源發電量的提升度對於系統中線路潮流的影響做為規劃再生能源最大併網容量的參考因子。

### 三、 區域電網拓撲配置重組最佳化演算法

由於傳統的演算法需猜測其初始值，若在執行前就具備較好的初始值，則容易使結果達到收斂，反之容易造成最佳化結果發散，因此在處理電力系統這種高階、非線性且存在許多不確定因素的系統上，若要隨機設定合宜的初始值是相當困難的，因此需要藉由智慧型演算法以有效地解決最佳化問題。

#### (一) 模擬退火法

模擬退火法起源於 1983 年，由 Kirkpatrick 等人提出並成功地應用於組合及解決最佳化之問題中。模擬退火法是模擬物質中材料的冷卻與結晶過程，是基於蒙地卡羅演算法所延伸的方法。退火屬於一種物理變化的過程，將材質加熱至足夠的高溫時，固體型態會轉成液體型態。物質所有的原子會開始自由隨機運動，隨著溫度降低至較低能量時，這些原子會逐漸定型並以結晶狀態重新排列。

模擬退火法中，溫度隨著退火的過程而有所改變；此演算法會先以搜尋空間內隨機產生一個初始解(自己解)，接著，慢慢尋找與選擇「鄰居」解，再計算自己解與鄰居解的適應函數並依照 Metropolis 準則決定是否要接受新解，若接受，鄰居解取代初始解，更新後再產生另一鄰居解，持續迭代至找到最佳解為止，由此可證明此演算法所得之最佳解係利用一種概率收斂至全局最佳解；當退火冷卻速

度較慢時，原子會有較高的機率可以找到並移動至較低能量的位置，而如何設定及有效地調整溫度是模擬退火法最重要的核心。

以下將解釋 Metropolis 準則：

首先，設定  $\omega$  為初始解(當前解)， $f(\omega)$  為初始解之適應函數

$\omega'$  為鄰近解， $f(\omega')$  為鄰近解之適應函數

$$\Delta f = f(\omega) - f(\omega') \quad (2.2)$$

若目標是要找最小值，當  $\Delta f < 0$  則接受新解， $\omega'$  取代  $\omega$  成為當前解；否則須以概率  $\exp\left(\frac{-\Delta f}{T}\right) > \text{Random}(0,1)$  決定是否要接受新解，若不接受，當前解則維持原始解。判斷結束後若迭代是數未達設定次數亦或溫度未達則繼續反覆迭代直至找到最佳解為止。整體 SA 的步驟流程如圖 2-9。

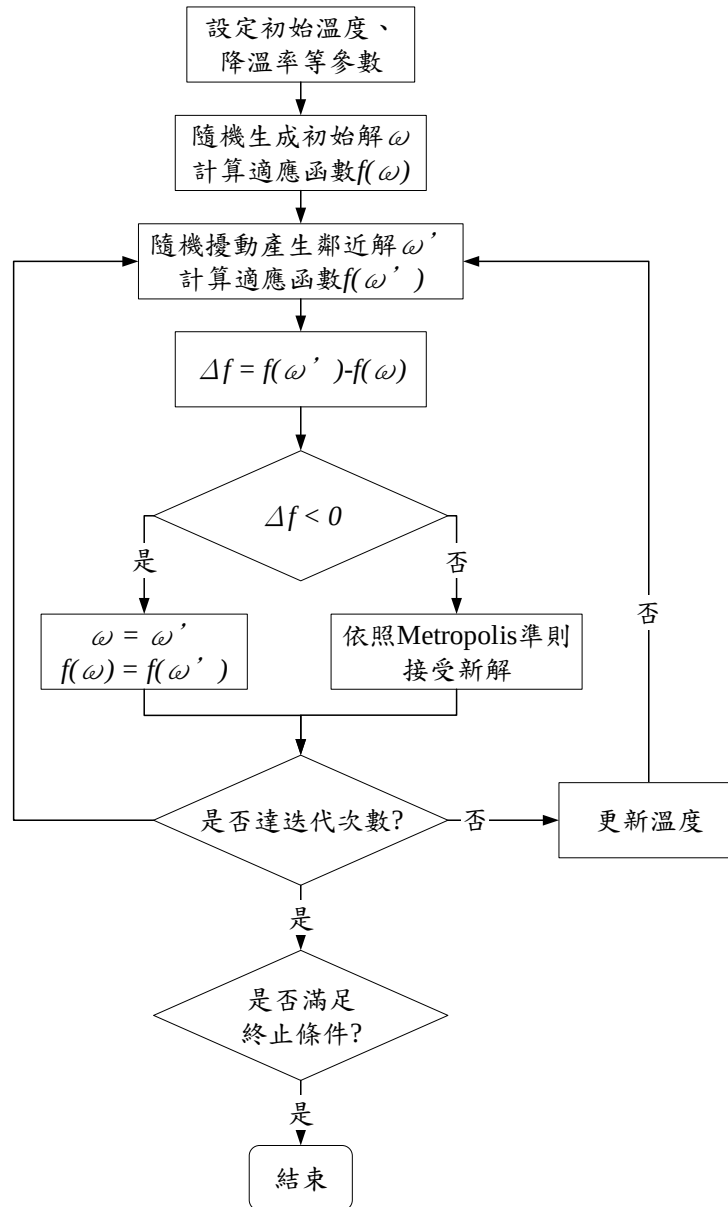


圖 2-9 模擬退火法流程圖

模擬退火法操作步驟方法如下：

1. 首先需先定義目標函數，再將目標函數視為適應函數
2. 設定一個溫度數值  $T$ ，此溫度的設定沒有一固定值，也沒有時值物理意義，僅需設定足夠溫度當作起始溫度可。

3. 訂定一個退火策略(降溫程序)，以此決定每一次退火其溫度下降之比例。
4. 以隨機的方式產生初始解，計算初始解的適應函數(Fitness Value)，接著再隨機擾動出鄰近解，再計算鄰近解的適應函數。
5. 計算初始解與鄰近解的適應函數之差，若目標函數是要找最小值，則鄰近解適應函數減去初始解適應函數需小於 0，其鄰近解才會被接受，並將初始解更新為鄰近解；若是大於 0，則需依照 Metropolis 準則中的  $\exp\left(\frac{-\Delta f}{T}\right) > \text{Random}(0,1)$  條件以決定是否接受鄰近解；若又不滿足 Metropolis 準則，則維持初始解再進行下一次的退火過程
6. 判斷計算出來的解是否滿足終止條件，若滿足則跳出迴圈，反之則繼續更新下一次的鄰近解，直到滿足終止條件。

## 參、主要發現與結論

### 一、最佳化方法結合模擬架構的實現

#### (一) 前言

此章介紹本文所分析配電及輸電案例之模擬架構，利用台電公司目前所使用的 PSS/E 電力系統模擬軟體執行事故分析程序，當事故導致線路發生壅塞時，找出壅塞案例與相關電網及線路的潮流資訊，作為執行輸電電網重組之目標案例。其中選擇使用可以執行 PSS/E 軟體中(Application Program Interface, API)指令功能的 Python 語言撰寫 PSO 粒子群最佳化演算法，結合第三章所提出電力系統的靈敏度因子分析，並在 Python 撰寫的最佳化演算法與 PSS/E 軟體兩者之間進行迭代，解決系統發生事故後的壅塞情況，以尋找最佳的電網拓撲，最後介紹如何結合系統的分配因子與靈敏度因子應用在輸電電網重組與規劃分散式機組的發電裕度等功能。

另外說明輸電系統在事故所需要分析項目的選擇，依照不同的負載特性、電壓等級在穩態及暫態分析上使用不同的規範，因此在演算法進行最佳化分析時，所設計的相關目標函數與限制條件必須符合台電公司的運轉法規與系統調度員的操作原則。

## **(二) 模擬系統的架構**

針對本文處理電網重組問題可區分為配電與輸電兩者不同的系統，首先研究當輸電系統在無加入分散式能源以及有加入分散式能源時的電網架構，分別進行解決因偶發事故導致線路壅塞的重組問題，並規劃在含有分散式能源的系統，且經過電網重組後，各部分散式發電機組可提升多少發電裕度，並與電網重組前後的發電量結果比較之間的差異。

### **1. 未含分散式能源之電網重組模擬架構**

無加入分散式能源之電網重組模擬架構流程如圖 3-1 所示，首先將台電公司所提供的區域配電系統電網資料(Raw File)輸入至 PSS/E 模擬軟體中，進行 N-1 事故分析程序，再依照電網的壅塞情況進行線路開關啟斷或併入的調整，更新電網結構以解決線路壅塞。



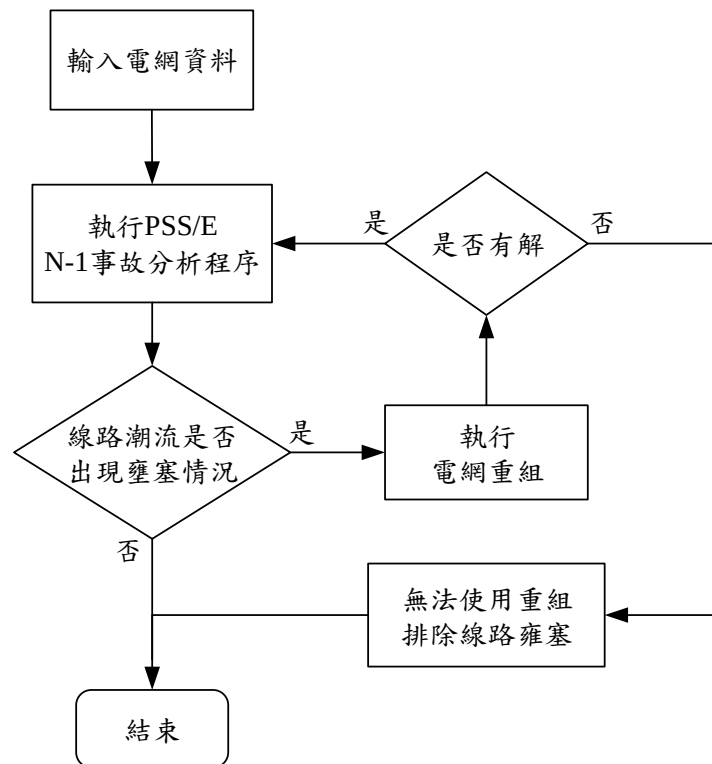


圖 3-1 無加入分散式能源之電網重組模擬架構流程圖

如圖 3-2 所示，首先建立偶發事故檔案，此類別為 N-1 事故。若區域電網內發生 N-1 事故導致線路出現過載情形，利用 PSS/E 的直流模型事故檢查工具(DC Contingency Check, DCCC)，此檢查工具可對電網中過載線路產生警告報表，並依照報表內容作為電網重組的案例。

在取得過載案例後，針對過載線路所對應的匯流排展開兩層以建立事故檔案，其主要原因為電網架構龐大，若去調整距離與過載點太遠的線路投切狀態，則對紓緩壅塞較無明顯的改善，故將過載線路所對應之匯流排展開兩層的子系統(Subsystem)作為後續電網重組的線路開關操作範圍。最後計算在此子系統中所有線路的線路分配因子並記錄，作為後續計算最過載線路影響量的資料。

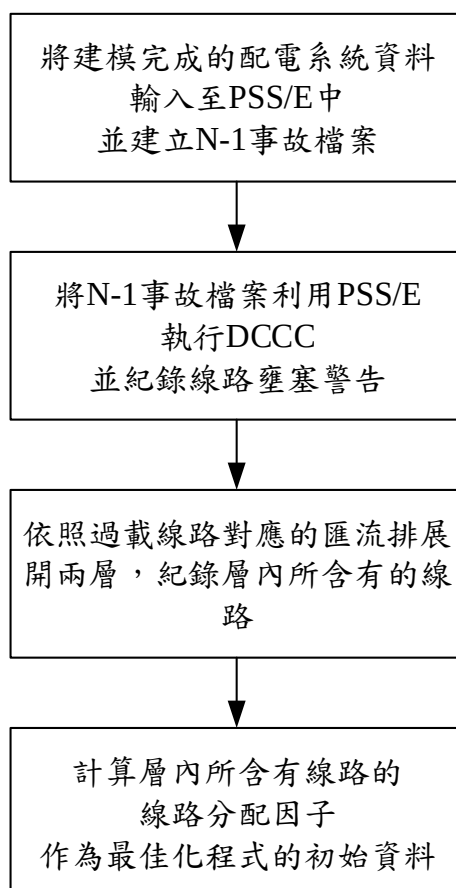


圖 3-2 PSS/E 事故分析程序流程圖

在計算完成層內各線路的分配因子後(LODF)，開始執行電網重組程序，如圖 3-3 所示，首先將計算後的 LODF 乘上各線路上的潮流量 $P(\text{MW})$ ，記錄將該線路啟斷或併入後，對壅塞線路的影響程度為最大之前三條線路，將此三條線路作為演算法的初始輸入資料，執行無加入分散式能源之電網重組。

此外若發生電網架構無法調整的情況下，判斷為無法經由電網重組解決線路壅塞之案例，需使用其他方法如機組排程，進行發電機組的調整或評估是否新建饋線等因應措施，以確保電網在事故發生時仍維持電網安全與穩定性。

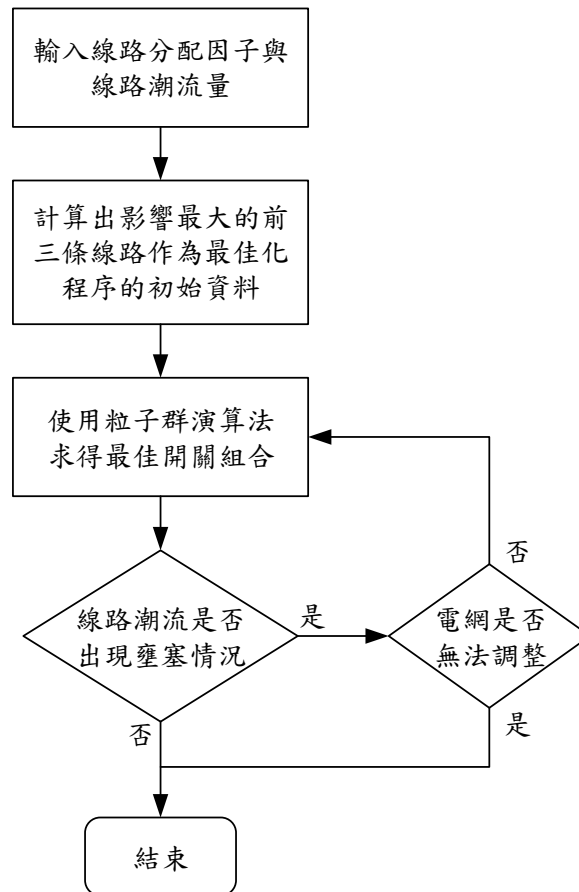


圖 3-3 輸電電網重組流程圖

## 2. 含有分散式能源之電網重組模擬架構

在含有分散式能源之電網重組與規劃分散式機組發電裕度模擬架構流程如圖 3-4 所示，如同先前的模擬架構，首先將台電公司所提供的電網資料與分散式機組資料(Raw File)輸入至 PSS/E 模擬軟體中建置含有分散式能源之區域配電系統模型，執行 N-1 事故分析程序，並依照上述流程進行電網重組以求解具有安全限制的最佳化電網拓撲。

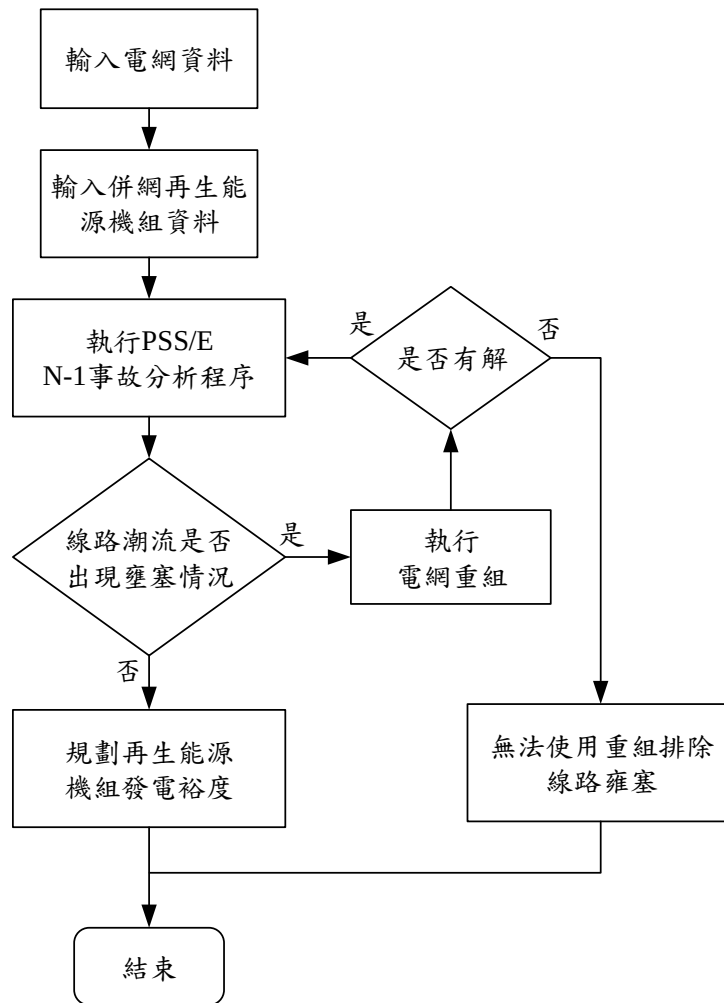


圖 3-4 含分散式能源之電網重組與規劃分散式機組發電裕度流程圖

為了求得在電網經過重新組合後，分析分散式能源的裝置容量提升裕度，其作法如圖 3-5 所示，將重組所得到的具有安全限制之電網拓撲後，利用台電人員實際使用之 PPS/E 軟體中 Sensitivity Analysis 功能執行靈敏度分析，計算分散式機組的發電轉移因子(PTDF)，其目的為計算當機組發電量發生變化時，各線路上潮流的變化量，結合最佳化演算法利用 PTDF 做為機組調整發電量的依據，以求解各再生能源機組在不造成線路壅塞下的最大發電量。

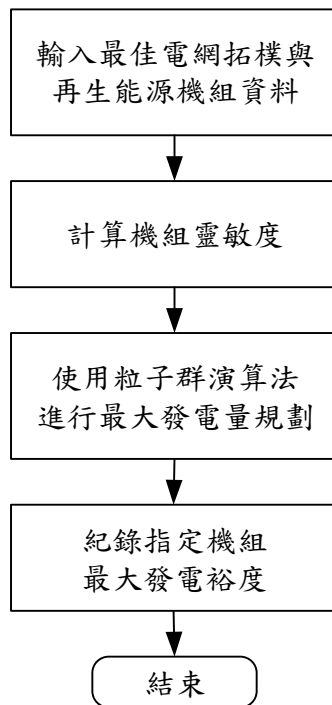


圖 3-5 最佳化分散式機組發電裕度流程圖

### (三) 最佳化數學模型

由於台電公司在分配電力系統中機組發電量的調度考量上，目標通常以燃料成本與其它經濟層面為主要目標，因此經過機組排程後的結果，其結果仍需經過電網分析以驗證輸電安全。為了考慮系統在運轉安全上的問題，分析當發生偶發事故導致線路過載時進行電網重組，則需以在區域內各負載維持穩定供電與符合其他相關運轉規範的情況下舒緩壅塞線路，且在電網經過重組後，可降低其原始電網中線路承載量過高的線路做為首要目標。在含有分散式能源之電網重組方面，目標則是以增加各機組發電量持續至電網中首條線路出現過載的狀況下，並規劃各分散式能源機組可提升多少發電裕度。

## 1. 目標函數

面對電網重組最佳化問題首先要符合電力系統各項安全限制，因此本文利用 4.3 節所介紹之分配因子應用於操作線路開關的選擇，藉由 PSO 粒子群演算法求得在符合限制條件下之多組解，並從多組解中找出符合安全限制的線路開關組合，不僅達到舒緩線路壅塞情況外，亦可使線路載量較緊縮的線路中，降低其潮流量的效果。因此最佳化目標函數如式(3.1)所示：

### (1) 最大化指定線路之潮流裕度

$$\text{MAX} \sum_{i=1}^n P_{Branch_i}^{rate} - P_{Branch_i} \quad (3.1)$$

其中

$n$ ：欲降低潮流之目標線路數量。

$P_{Branch_i}^{rate}$ ：欲降低之線路*i*的額定容量(MW)。

$P_{Branch_i}$ ：線路*i*在經過電網重組後所流過的潮流量(MW)。

經由上述目標找出具有安全限制的電網拓撲後，將假設有  $n$  部再生能源機組併入至此電網拓撲的建置位置，本文藉由機組之靈敏度因子，其目標以在電網在 N-1 事故後出現首條線路過載的情況下，各機組的最大發電量，因此最佳化目標函數如式(3.2)所示：

## (2) 最大化再生能源機組發電裕度

$$\text{MAX} \sum_{i=1}^n P_i^{gen} \quad (3.2)$$

其中

$n$ ：發電機組數量。

$P_i^{gen}$ ：發電機 $i$ 經由調整後的發電量(MW)。

## 2. 限制條件

### (1) 負載維持電力供應：

演算法在選擇切換的線路的同時，必需考量連接負載匯流排的線路不得少於一條，以確保所有負載維持供電，如式(3.3)所示。

$$N_{Load\_BUS} \geq 1 \quad (3.3)$$

其中

$Load\_BUS$ ：連接負載之匯流排。

$N_{Load\_BUS}$ ：負載匯流排所連接的線路數量。

### (2) 線路載量限制：

在投切線路開關以改變電網拓撲後，需利用 PSS/E 穩態電力潮流分析功能，檢查此投切策略在新電網拓撲的 N-0 情況下無任何線路超載，如式(3.4)所示。

$$P_{branch_i} \leq P_{branch_i}^{rate} \quad (3.4)$$

其中

$P_{branch_i}^{rate}$ ：線路*i*的額定容量(MW)。

$P_{branch_i}$ ：電網結構在調整時，線路*i*的潮流量(MW)。

### (3) 匯流排電壓變動率限制：

在投切線路開關以改變電網拓撲後，需執行電力潮流分析，利用 PSS/E 穩態電力潮流中的電壓分析項目，檢查此投切策略在新電網拓撲中的匯流排電壓是否符合台電法規的限制，如式(3.5)、(3.6)所示。

#### ➤當電網發生 N-1 事故時：

$$\frac{V_i^{after\ reconfiguration} - V_i^{before\ reconfiguration}}{V_i^{before\ reconfiguration}} \times 100\% < k\% \quad (3.5)$$

其中

$V_i^{before\ reconfiguration}$ ：線路*i*之重組電網前之電壓(p.u.)。

$V_i^{after\ reconfiguration}$ ：線路*i*之重組電網後之電壓(p.u.)。

$k$ ：若是輸電系統  $k$  為 $\pm 5\%$ ，配電系統  $k$  則為 $\pm 2.5\%$

#### ➤當電網某區域進行停檢修(發生 N-2 事故)時：

$$\frac{V_i^{after\ reconfiguration} - V_i^{before\ reconfiguration}}{V_i^{before\ reconfiguration}} \times 100\% < 2.5\% \quad (3.6)$$

其中

$V_i^{before\ reconfiguration}$ ：線路*i*之重組電網前之電壓(p.u.)。

$V_i^{after\ reconfiguration}$ ：線路*i*之重組電網後之電壓(p.u.)



#### (4) 開關操作數量：

由於台電公司在投切線路開關的考量上，傾向於電網操作最少步驟為目標，避免投切過多線路，在事故排除的過程中若再發生其他設備故障容易導致線路過載，降低電網可靠度。此外，在排除事故時，過多的線路開關操作次數可能會耗費大批人力以及時間，無法縮短維修進度，因此開關操作狀態最多以兩條線路為限，如式(3.7)所示。

$$\sum_{i=1}^T |nowStatus_i - preStatus_i| < 3 \quad (3.7)$$

其中

$nowStatus_i$ ：線路開關*i*目前的狀態。

$preStatus_i$ ：線路開關*i*在重組前一刻的狀態。

#### (5) 目標線路之流量裕度：

此限制條件用於規劃分散式機組之發電裕度。如式(3.8)所示，在調整發電量前，計算目標線路的潮流裕度(Branch Margin)，並利用機組靈敏度因子計算發電量的提升作為影響目標線路潮流的依據，同時目標線路的規劃值在 N-1 事故時以承載 100%為限制，如式(3.9)所示。

$$Branch_{Margin} = P_{Branch}^{rate} - P_{Branch} \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^n Sensitivity_i \times \Delta P_i^{Gen} \leq Branch_{Margin} \quad (3.9)$$

其中

$P_{Branch}^{rate}$ ：目標線路之額定容量(MW)。

$P_{Branch}$ ：調整機組發電量前目標線路之潮流量(MW)。

$Branch_{Margin}$ ：目標線路之流量裕度(MW)。

$Sensitivity_i$ ：發電機*i*對於目標過載線路的靈敏度因子。

$\Delta P_i^{Gen}$ ：發電機*i*經由調整後的實功變化量(MW)。

## 二、案例分析與模擬結果

### (一) 前言

本文選擇南部區域配電系統作為分析案例對象，藉由已知之電網資料進行 N-1 故障案例分析，並使用模擬退火法(SA)進行饋線重組與轉供配置。本研究目的為解決當電網發生事故導致系統線路壅塞之情形，並提升整體電網線路潮流裕度。接著，於原始電網中於指定匯流排併入再生能源機組，使用相同方法進行故障案例分析，尋找可舒緩過載線路之最佳化網路架構；再以調整後的電網在不違反 N-1 事故使線路發生壅塞下，進行規劃再生能源發電機組，紀錄最大發電容量並與重組前之電網拓模進行比較。

第二個測試案例為中部區域輸電系統，參考台電公司提供「106 年夏季尖峰重載設備運轉檢討表」以及 106 年尖載電網資料檔案，挑選中部地區-彰濱轄區；同樣也是先進行 N-1 故障案例分析，以相同的目標下，使用模擬退火法(SA)進行輸電饋線重組，尋找出系統中未含 DG 與含有 DG 運轉時最佳電網線路重組與轉供路徑組合。其中輸電系統中，增加含有 DG 下進行維修案例分析，觀察電網是否因電網進行維修導致其他線路發生壅塞情形，尋找可舒緩線路過載的最佳轉供路徑之系統架構。

## (二) 南部區域配電系統研析

### 1. -模型建立與系統衝擊分析

如圖 3-6 所示，此模擬系統位於台南地區新營轄區之子系統，具有 11 個匯流排、15 個可調線路，包含 14 個分段開關、1 個聯絡開關，且無任何發電機組。其電網資訊對照如表 3-1。

利用新營 107 年度尖載資料 PSS/E .sav 檔執行 DC Power Flow 分析，由圖 3-6 可看出原系統在穩態時線路潮流占比皆未超出線路所能負荷最大容量，將各線路潮流資訊整理如表 3-2。

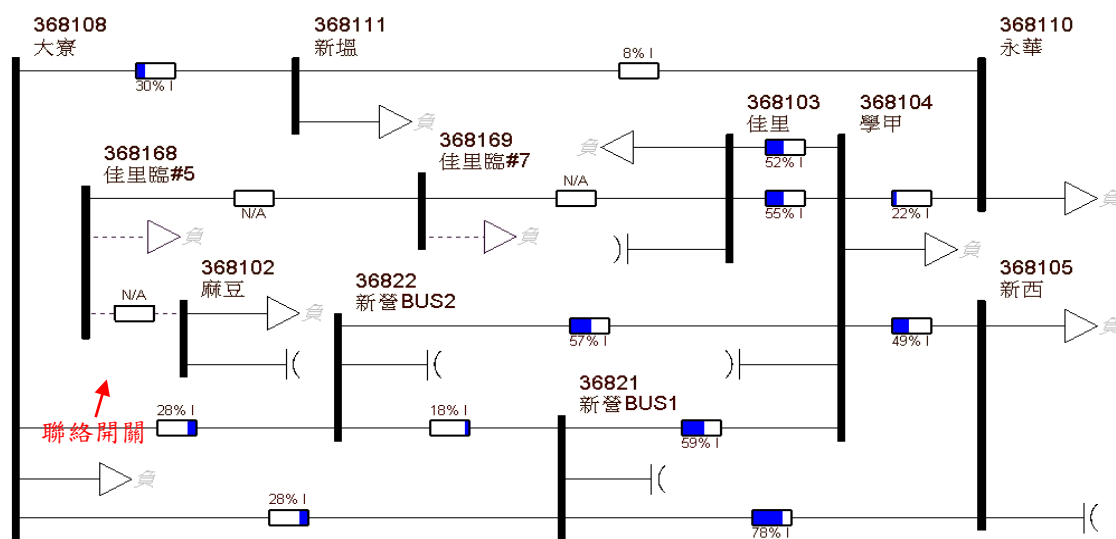


圖 3-6 南部區域配電系統架構圖

表 3-1 南部區域配電網資訊

|          |     |
|----------|-----|
| 匯流排數量    | 11  |
| 線路數量     | 15  |
| 分段開關(常閉) | 14  |
| 聯絡開關(常開) | 1   |
| 機組數量     | 0 部 |

表 3-2 南部區域配電線路與潮流資訊表

| 起始匯流排   | 終點匯流排   | 編號 | 線路額定<br>(MW) | 線路載量<br>(MW) | 線路承載量<br>(%) |
|---------|---------|----|--------------|--------------|--------------|
| 新營 BUS1 | 新營 BUS2 | 1  | 239          | 43.3         | 18.1         |
| 新營 BUS1 | 學甲      | 1  | 107.4        | 63.6         | 59.2         |
| 新營 BUS1 | 新西      | 1  | 110.8        | 86.7         | 78.2         |
| 新營 BUS1 | 大寮      | 2  | 119.6        | 33.0         | 27.6         |
| 新營 BUS2 | 學甲      | 2  | 107          | 61.3         | 57.3         |
| 新營 BUS2 | 大寮      | 1  | 119.6        | 33.0         | 27.6         |
| 麻豆      | 佳里臨#5   | 1  | 107.1        | 0            | 0            |
| 佳里      | 學甲      | 1  | 110.8        | 57.5         | 51.9         |
| 佳里      | 學甲      | 2  | 107          | 58.3         | 54.5         |
| 佳里      | 佳里臨#7   | 1  | 107          | 0            | 0            |
| 學甲      | 新西      | 1  | 117.5        | 57.7         | 49.1         |
| 學甲      | 永華      | 1  | 99.3         | 22.3         | 22.5         |
| 大寮      | 新塢      | 1  | 105.1        | 31.9         | 30.4         |
| 永華      | 新塢      | 1  | 99.3         | 7.8          | 7.9          |
| 佳里臨#5   | 佳里臨#7   | 1  | 107          | 0            | 0            |

## 2. 未含再生能源

### (1) N-1 故障案例之電網最佳轉供路徑研析

將未含有再生能源機組之原始電網執行 N-1 事故分析，藉由挑選出電網當中潮流占比較高的線路將其作組合，檢討當其中一條線路發生跳脫時，其他線路是否會產生過載情形。如圖 3-7 所示，當[佳里]匯流排至[學甲]匯流排編號 2 之線路發生開路故障，則[佳里]匯流排至[學甲]匯流排編號 1 發生過載情況，將 N-1 事故分析整理線路與潮流資訊如表 3-3 所示，藍色區域為故障線路，橘色區域為過載線路，過載線路額定值為 110.8MW，事故後潮流為 119.4MW，線路承載量達 107.7%，需予修正至 100%以內。

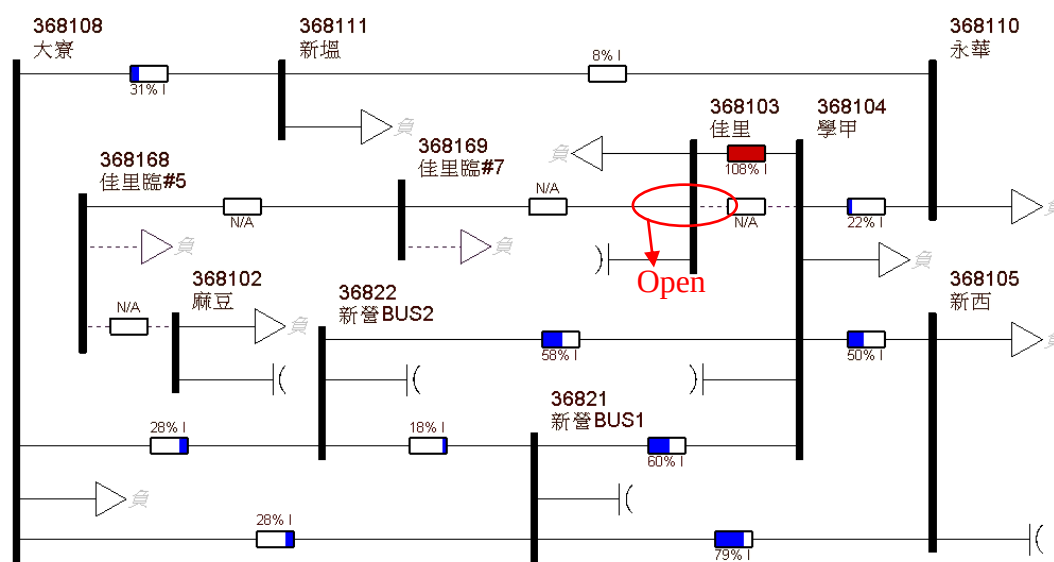


圖 3-7 南部區域配電系統未含有再生能源 N-1 系統架構圖

表 3-3 N-1 故障後各線路與潮流資訊表

| 起始匯流排   | 終點匯流排   | 編號 | 線路額定<br>(MW) | 線路潮流<br>(MW) | 線路承載量<br>(%) |
|---------|---------|----|--------------|--------------|--------------|
| 新營 BUS1 | 新營 BUS2 | 1  | 239          | 43.7         | 18.3         |
| 新營 BUS1 | 學甲      | 1  | 107.4        | 64.5         | 60.1         |
| 新營 BUS1 | 新西      | 1  | 110.8        | 87.1         | 78.6         |
| 新營 BUS1 | 大寮      | 2  | 119.6        | 33.1         | 27.7         |
| 新營 BUS2 | 學甲      | 2  | 107          | 62           | 57.9         |
| 新營 BUS2 | 大寮      | 1  | 119.6        | 33.1         | 27.7         |
| 麻豆      | 佳里臨#5   | 1  | 107.1        | 0            | 0            |
| 佳里      | 學甲      | 1  | 110.8        | 119.4        | 107.7        |
| 佳里      | 學甲      | 2  | 107          | 0            | 0            |
| 佳里      | 佳里臨#7   | 1  | 107          | 0            | 0            |
| 學甲      | 新西      | 1  | 117.5        | 58.4         | 49.7         |
| 學甲      | 永華      | 1  | 99.3         | 22.1         | 22.3         |
| 大寮      | 新塭      | 1  | 105.1        | 32.2         | 30.6         |
| 永華      | 新塭      | 1  | 99.3         | 8            | 8.1          |
| 佳里臨#5   | 佳里臨#7   | 1  | 107          | 0            | 0            |

將此模擬系統利用 SA 演算法執行降低高占比線路潮流裕度之最佳化開關操作，經由模擬分析結果由表 3-4 所示，可得知在經由最佳化調整線路開關所尋找出的系統架構，過載線路承載量由 107.7%降低至 86.3%以達成舒緩壅塞效果，由圖 3-8 所示，在更新電網拓撲後執行電力潮流分析，可知其他線路皆無發生過載情況。

表 3-4 未含有再生能源之電網線路開關配置結果

| 演算法 | 線路開關操作 |          | 過載線路承載量 |
|-----|--------|----------|---------|
| SA  | 併入     | 麻豆-佳里臨#5 | 86.3%   |
|     | 啟斷     | 學甲-永華    |         |

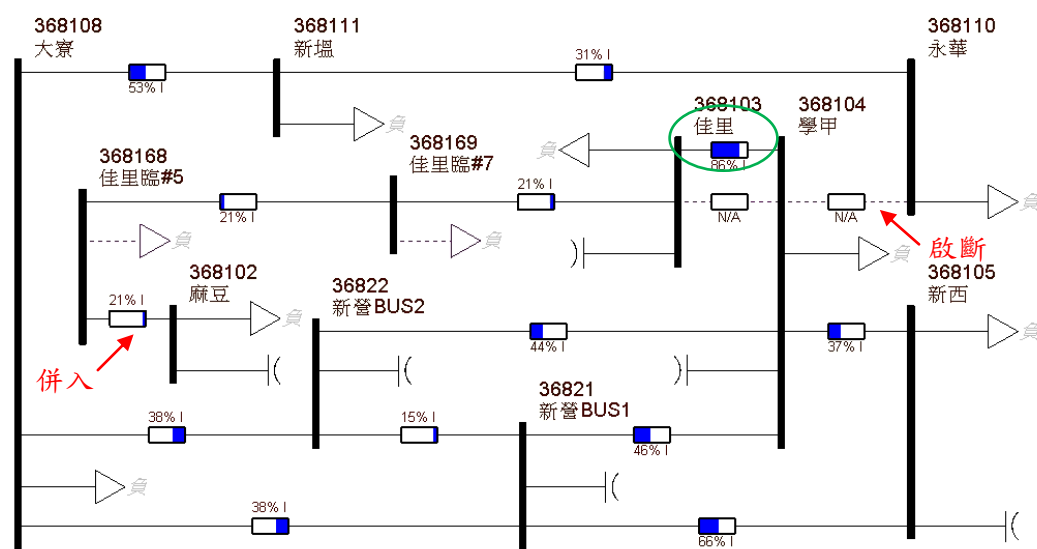


圖 3-8 南部區域配電系統未含 DG 修正線路開關之系統架構圖



### 3. 含有再生能源

#### (1) 已知再生能源發電容量併接於永華匯流排

##### A. 已知再生能源發電容量下舒緩 N-1 線路壅塞

將新營轄區之子系統中加入新設太陽能系統設備，整體系統架構如圖 3-9 所示，將太陽能系統併接在永華 69kV 匯流排，新系統如圖中右上藍框部分。將容量 50MVA 之太陽能系統設備接至 22.8kV 編號 500001 之匯流排，經容量 62.5MVA 升壓變壓器到達新設 69kV 編號 500000 之匯流排 PCC，最後再經容量為 62.5MVA 之線路接至永華 69kV 匯流排。其中，升壓變壓器與併接線路之線路阻抗皆為參考相近容量設備所設定，為得到新系統併接對原本電網造成的最大影響，設定 PV 發電設備為 50MW 滿載出力到系統當中，由圖中其他線路占比亦可看出在新系統併入後，穩態的電力潮流占比皆沒有超出線路所能夠負荷的最大容量。

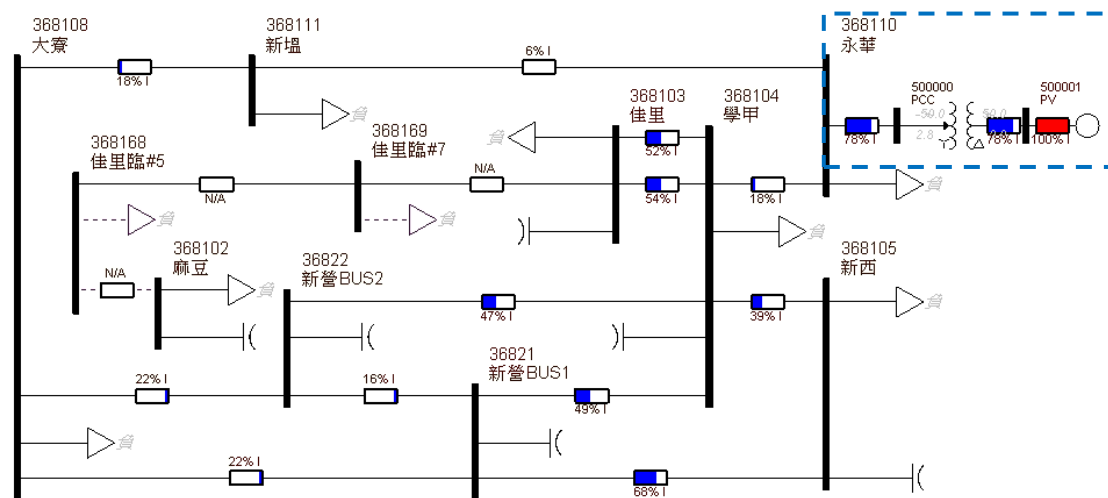


圖 3-9 PV 併接於永華 BUS 之系統架構

將併入 PV 後之電網架構執行 N-1 故障案例分析。將再生能源併接於永華匯流排之系統執行 N-1 分析，得知當[佳里]匯流排至[學甲]匯流排編號 2 之線路發生開路故障，則[佳里]匯流排至[學甲]匯流排編號 1 發生過載情況如圖 3-10 所示，將 N-1 分析結果整理線路與潮流資訊如表 3-5 所示，過載線路承載量達 107.5%，需予修正至 100% 以內。

圖 3-10 PV 併接於永華匯流排之 N-1 系統架構

|                                                       |         |          |          |
|-------------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| FROM BUS 368103[佳里 69kV] TO BUS 368104[學甲 69kV] CKT 1 |         |          |          |
| 事故前(MW)                                               | 事故後(MW) | 線路額定(MW) | 線路承載量(%) |
| 57.4                                                  | 119.1   | 110.8    | 107.5    |

化調整線路開關所尋找出的系統架構，其過載線路承載量由 107.5%

降低至 88.4%，已達成舒緩壅塞的效果，由圖 3-11 所示，在更新電網拓撲後執行電力潮流分析，可知當再生能源滿載出力時，其他線路在 N-1 時皆無發生過載情況。

表 3-6 PV 併接永華 BUS 之線路開關配置結果

| 演算法 | 線路開關操作 |          | 過載線路承載量 |
|-----|--------|----------|---------|
| SA  | 併入     | 麻豆-佳里臨#5 | 88.4%   |
|     | 啟斷     | 永華-新塢    |         |

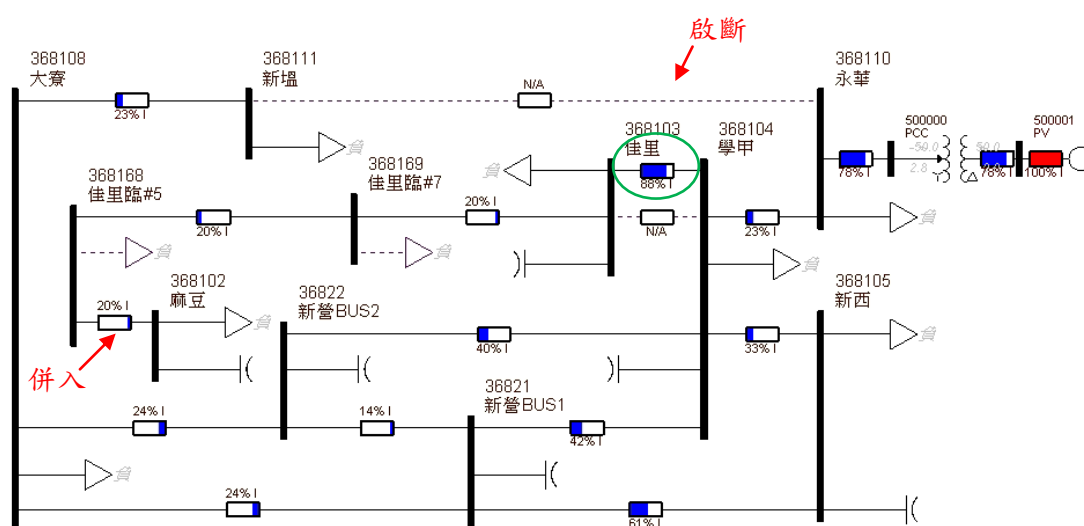


圖 3-11 PV 併接永華之修正線路開關架構圖

當 N-1 故障發生時，在調整線路開關前，除了解決過載的線路外，也需考量將線路占比較高的線路降低其潮流量，以提升整體線路裕度，如圖 3-12 所示，在調整線路開關前除了過載線路，分別由匯流排：新營 BUS1 至學甲、新營 BUS1 至新西、新營 BUS2 至學甲，三條線路之潮流占比最高，經由調整線路開關後，可得知此三條線路

的潮流占比皆有降低，達到提升線路裕度的效果。而匯流排：佳里至佳里臨#7 以及佳里臨#5 至佳里臨#7 兩線路經過重組後潮流量各別由 0MW 增加至 19.7MW，其原因為藉由最佳化結果併入麻豆-佳里臨#5 常開開關，使過載線路的流量可利用佳里端下游線路分散至其他負載，以舒緩壅塞情況。

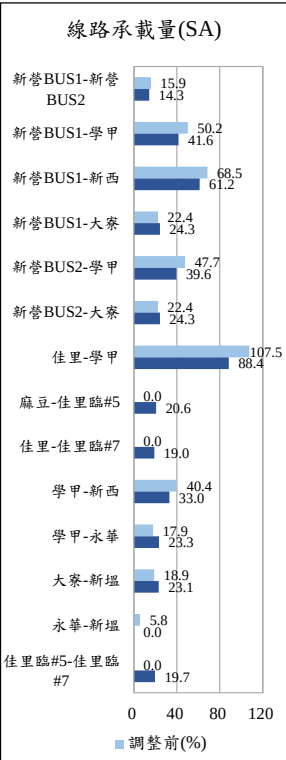


圖 3-12 PV 併接永華之開關修正前後線路占比結果

## B. 評估再生能源可併網最大容量(永華端)

在規劃再生能源發電量方面，已知在電網重組前，規劃PV的裝置容量為50MW，若PV滿載出力到系統中，則系統在N-1事故時會發生線路過載的情況，因此藉由重組的方式，當電網結構產生改變，除了可解決線路壅塞外，在供電方面對於機組的發電量亦可得以提升，因此在建置再生能源機組時，可先行規劃其裝置容量。

如圖 3-13 所示，假設不考慮發電端之連接線路與變壓器容量，逐漸增加 PV 之發電量直至 N-1 電網中出現第一條線路過載，過載線路為[學甲]至[永華]編號 1 之線路，機組發電量的資訊與增加裕度如表 3-7 開關調整前後之 PV 發電量比較表所示。

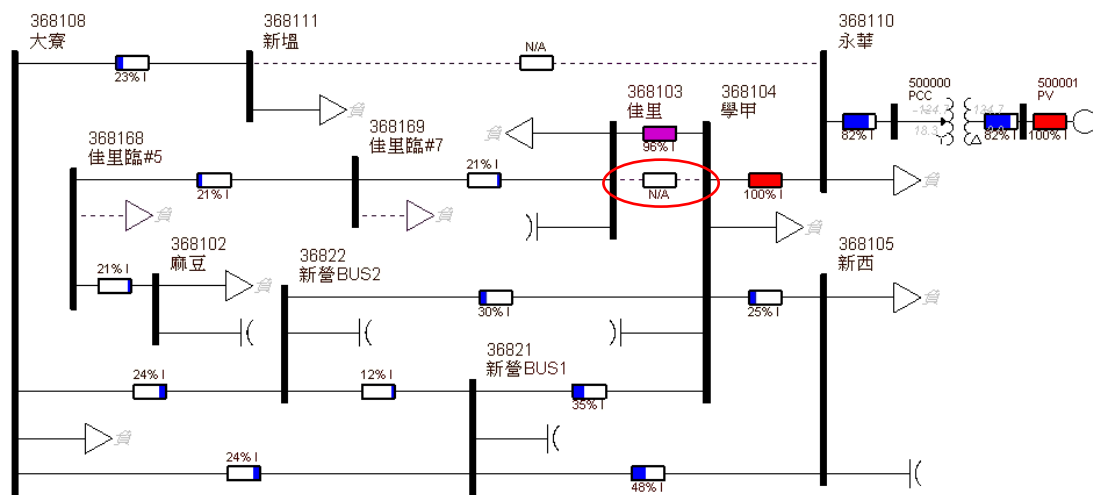


圖 3-13 PV 最大發電量規劃之系統架構圖

表 3-7 開關調整前後之 PV 發電量比較表

| 發電機組 | 調整前發電量(MW) | 調整後發電量(MW) | 增加裕度   |
|------|------------|------------|--------|
| PV   | 50         | 124.7      | 74.7MW |

#### 4. 再生能源發電裕度比較

在未含有再生能源併聯運轉案例中，主要針對 N-1 事故導致系統中的線路發生過載情況，利用最佳化演算法求解不同的開關組合，將過載潮流轉移至其他線路以紓緩壅塞，而電網結構的改變也會使各線路的潮流裕度隨之增減，因此在分析含有再生能源併聯運轉案例除了解決系統 N-1 過載問題外，也會將更新開關組合後的拓撲，對各部再生能源機組進行最大發電量的規劃。將上述含有一到四部再生能源機組案例之結果整理，觀察各部機組提升的發電裕度，如表 3-8 所示。

表 3-8 併接再生能源系統之開關調整前後發電量比較表(單位：MW)

| 併接匯流排 |     | PV           | 增加裕度 |
|-------|-----|--------------|------|
| 永華    | 調整前 | 50           | 74.7 |
|       | 調整後 | <b>124.7</b> |      |

### (三) 中部區域輸電系統研析

#### 1.模型建立與系統衝擊分析

如圖 3-14 所示，此模擬系統為 161kV，位於彰化地區彰濱轄區，具有 39 個匯流排、36 個可調線路，包含 33 個分段開關、3 個聯絡開關，於星元與星彰匯流排分別有 3 部 IPP 發電機組。其電網資訊對照如表 3-9。利用台電公司所提供之 107 年度尖載資料 PSS/E .sav 檔執行 DC Power Flow 分析，由圖可看出原系統在穩態時線路潮流占比皆未超出線路所能負荷最大容量，將各線路潮流資訊整理如表 3-10。

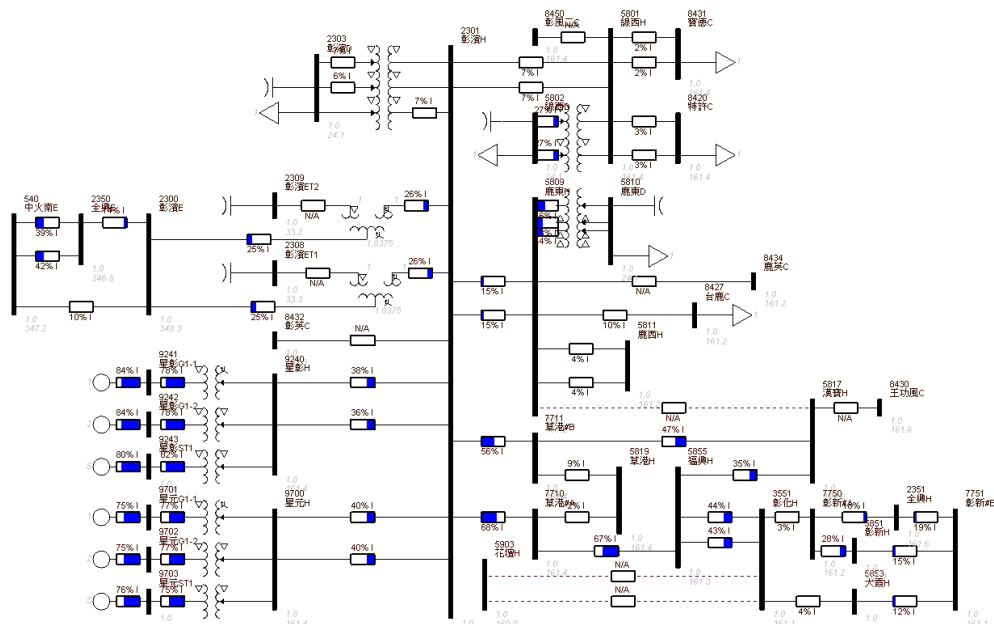


圖 3-14 中部區域輸電系統架構圖

表 3-9 中部區域輸電網資訊

|       |    |
|-------|----|
| 匯流排數量 | 39 |
| 線路數量  | 36 |

|          |                          |
|----------|--------------------------|
| 分段開關(常閉) | 33                       |
| 聯絡開關(常開) | 3                        |
| 機組數量     | 星元 IPP：3 部<br>星彰 IPP：3 部 |

表 3-10 中部區域輸電系統線路與潮流資訊表

| 起始匯流排 | 終點匯流排 | 編號 | 線路額定<br>(MW) | 線路載量<br>(MW) | 線路承載量<br>(%) |
|-------|-------|----|--------------|--------------|--------------|
| 中火南 E | 彰濱 E  | 1  | 2182.3       | 213.2        | 9.8          |
| 中火南 E | 全興 E  | 1  | 2182.3       | 851.3        | 39.0         |
| 中火南 E | 全興 E  | 2  | 2182.3       | 921.5        | 42.2         |
| 彰濱 H  | 全興 E  | 1  | 2182.3       | 311.7        | 14.3         |
| 彰濱 H  | 線西 H  | 1  | 567.2        | 40.2         | 7.1          |
| 彰濱 H  | 線西 H  | 2  | 567.2        | 42.3         | 7.5          |
| 彰濱 H  | 鹿東 H  | R  | 499.7        | 75.4         | 15.1         |
| 彰濱 H  | 鹿東 H  | W  | 499.7        | 75.3         | 15.1         |
| 彰濱 H  | 草港#A  | 1  | 499.7        | 341.9        | 68.4         |
| 彰濱 H  | 草港#B  | 2  | 499.7        | 279.4        | 55.9         |
| 彰濱 H  | 彰英 C  | 1  | 179.3        | 0.4          | 0.2          |
| 彰濱 H  | 星彰 H  | R  | 652.5        | 247.7        | 38           |
| 彰濱 H  | 星彰 H  | W  | 652.5        | 232.7        | 35.7         |



|      |      |   |       |       |      |
|------|------|---|-------|-------|------|
| 彰濱 H | 星元 H | 1 | 596.2 | 238.5 | 40   |
| 彰濱 H | 星元 H | 2 | 596.2 | 239.8 | 40.2 |
| 全興 H | 彰新#A | R | 439.5 | 79.7  | 18.1 |
| 全興 H | 彰新#B | W | 439.5 | 83.6  | 19   |
| 彰化 H | 大霞 H | 1 | 439.5 | 18.9  | 4.3  |
| 彰化 H | 福興 H | 1 | 537.6 | 235.2 | 43.8 |
| 彰化 H | 福興 H | 2 | 537.6 | 233.3 | 43.4 |
| 彰化 H | 花壇 H | M | 499.7 | 0     | 0    |
| 彰化 H | 花壇 H | O | 499.7 | 0     | 0    |
| 彰化 H | 彰新#A | R | 439.5 | 12.8  | 2.9  |
| 線西 H | 特許 C | 1 | 335.5 | 10.2  | 3.0  |
| 線西 H | 特許 C | 2 | 335.5 | 10.7  | 3.2  |
| 線西 H | 寶德 C | 1 | 434.7 | 10.6  | 2.4  |
| 線西 H | 寶德 C | 2 | 434.7 | 10.6  | 2.4  |
| 鹿東 H | 漢寶 H | 1 | 500.0 | 0     | 0    |
| 鹿東 H | 鹿英 C | 1 | 245.0 | 1.1   | 0.5  |
| 漢寶 H | 福興 H | 1 | 567.2 | 197.6 | 34.8 |
| 漢寶 H | 草港#B | 2 | 499.7 | 235.9 | 47.2 |

|      |      |   |       |       |      |
|------|------|---|-------|-------|------|
| 草港 H | 草港#A | 1 | 499.7 | 9.2   | 1.8  |
| 草港 H | 草港#B | 2 | 499.7 | 44.7  | 8.9  |
| 彰新 H | 草港#A | R | 262.1 | 72.9  | 27.8 |
| 彰新 H | 草港#B | W | 262.1 | 38.4  | 14.7 |
| 大霞 H | 彰新#B | W | 439.5 | 50.8  | 11.6 |
| 福興 H | 草港#A | 1 | 499.7 | 334.5 | 66.9 |

將彰濱轄區之子系統執行 N-1 故障案例分析，依照報表顯示會有 2 個事故，分別是當匯流排[彰濱 H]至匯流排[草港#A]編號 1 之線路發生開路故障，匯流排[彰濱 H]至匯流排[草港#B]編號 2 發生過載情況；當匯流排[彰濱 H]至匯流排[草港#B]編號 2 之線路發生開路故障，則匯流排[彰濱 H]至匯流排[草港#A]編號 1 發生過載情況。因此，以下將針對此兩案例進行分析。

## 2.N-1 故障案例之電網最佳轉供路徑研析

### (1) 未含再生能源電網重組模擬結果

如圖 3-15 所示，其事故分析的結果為當匯流排[彰濱 H]至匯流排[草港#A]編號 1 之線路發生開路故障，匯流排[彰濱 H]至匯流排[草港#B]編號 2 發生過載情況，過載線路承載量達 117.5%，需予修正至 100%以內。

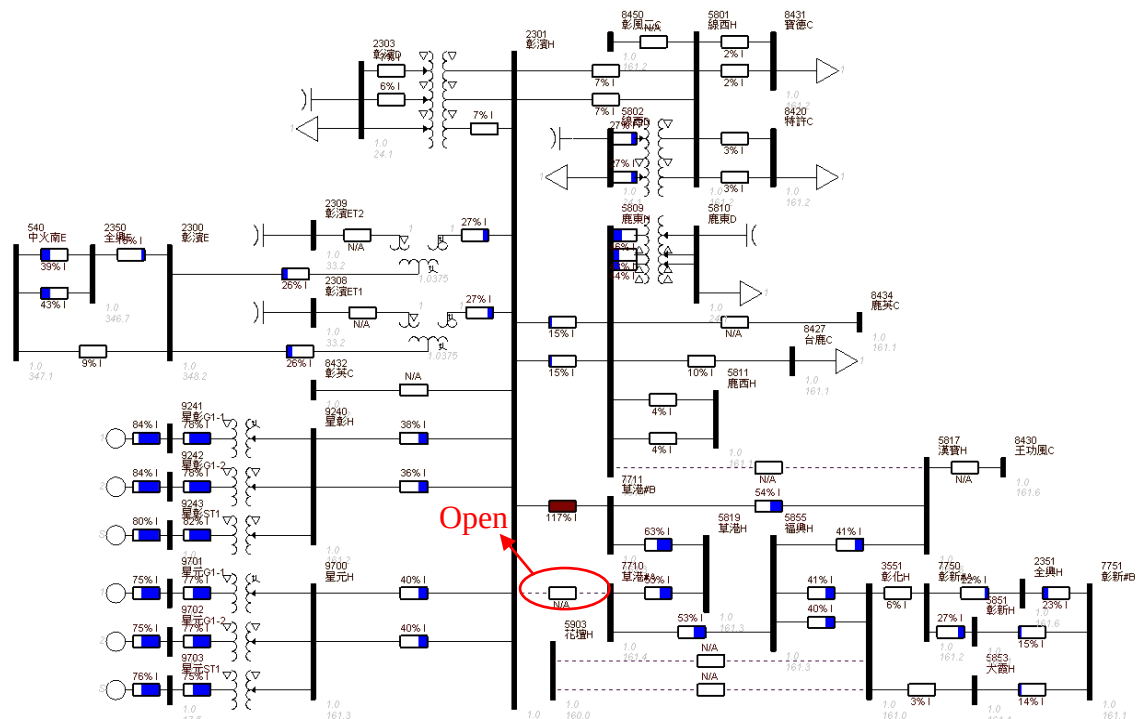


圖 3-15 匯流排[彰濱 H]-[草港#A]之 N-1 系統架構

表 3-11 匯流排[彰濱 H]-[草港#A]之 N-1 事故表

| FROM BUS 2301[彰濱 H 161kV] TO BUS 7711[草港#B 161kV] CKT 2 |         |          |          |
|---------------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| 事故前(MW)                                                 | 事故後(MW) | 線路額定(MW) | 線路承載量(%) |
| 279.4                                                   | 587     | 499.7    | 117.5    |

將此模擬系統利用 SA 演算法執行最佳化開關操作，模擬分析結果由表 3-11 所示，可得知經由最佳化調整線路開關所尋找出的系統架構，其過載線路承載量由 117.5%降低至 79.1%，達成舒緩壅塞的效果，由圖 3-12 所示，在更新電網拓撲後執行電力潮流分析，可知其他線路在 N-1 時皆無發生過載情況。

表 3-12 匯流排[彰濱 H]-[草港#A]之線路開關配置結果

| 演算法類別 | 線路開關操作 |           | 過載線路承載量 |
|-------|--------|-----------|---------|
| SA    | 併入     | 鹿東 H-漢寶 H | 58%     |
|       | 啟斷     | 漢寶 H-草港#B |         |

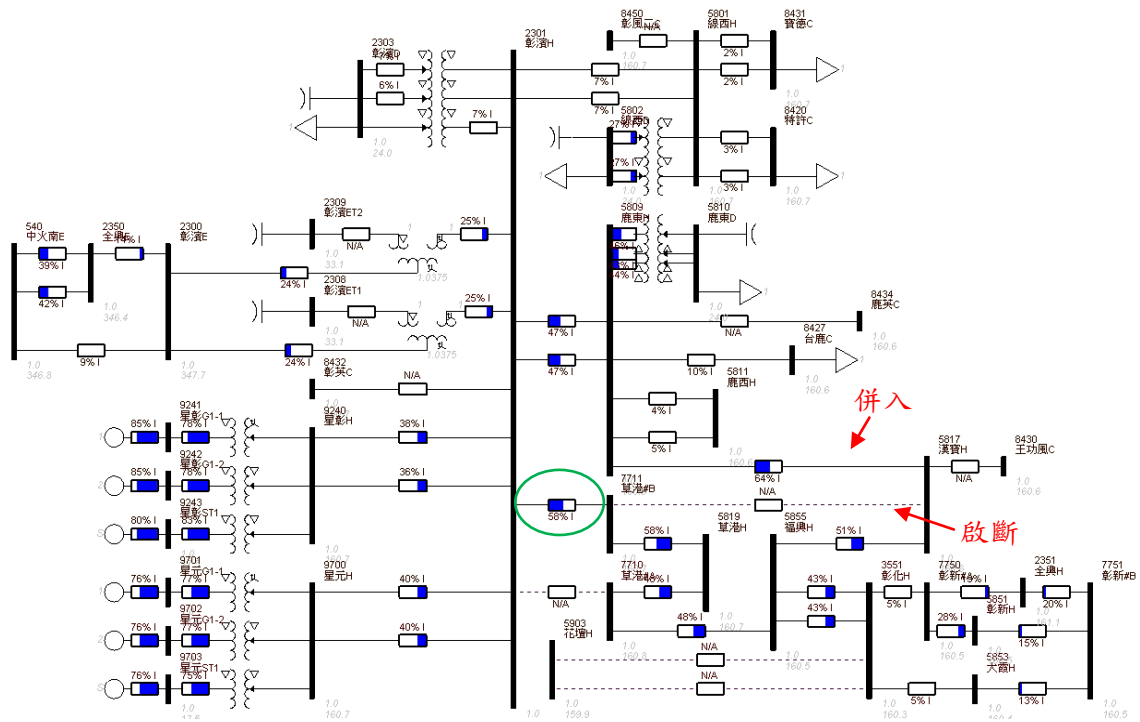


圖 3-16 匯流排[彰濱 H]-[草港#A]之修正線路開關架構圖

本文作法選擇將鹿東 H-漢寶 H 併入與漢寶 H-草港#B 線路啟斷，其目的為使部分的線路降低其流量，對於過載線路的潮流占比由 117.5%降低至 58%，降低幅度為 59.5%。當事故發生時，在調整線路開關前，模擬退火法除了優先解決過載的線路外，也需考量將其他線路占比較高的線路降低其潮流量，以提升整體線路裕度，如圖 3-17 所示，在調整線路開關前除了過載線路，分別由匯流排:[草港 H]至[草

港#A]、[草港 H]至[草港#B]、[福興 H]至[草港#A]，三條線路之潮流量占比為最高，經由調整線路開關後，皆有降低的趨勢，而其中[鹿東 H]至[漢寶 H]因併入的關係，其潮流量達 64.1%。

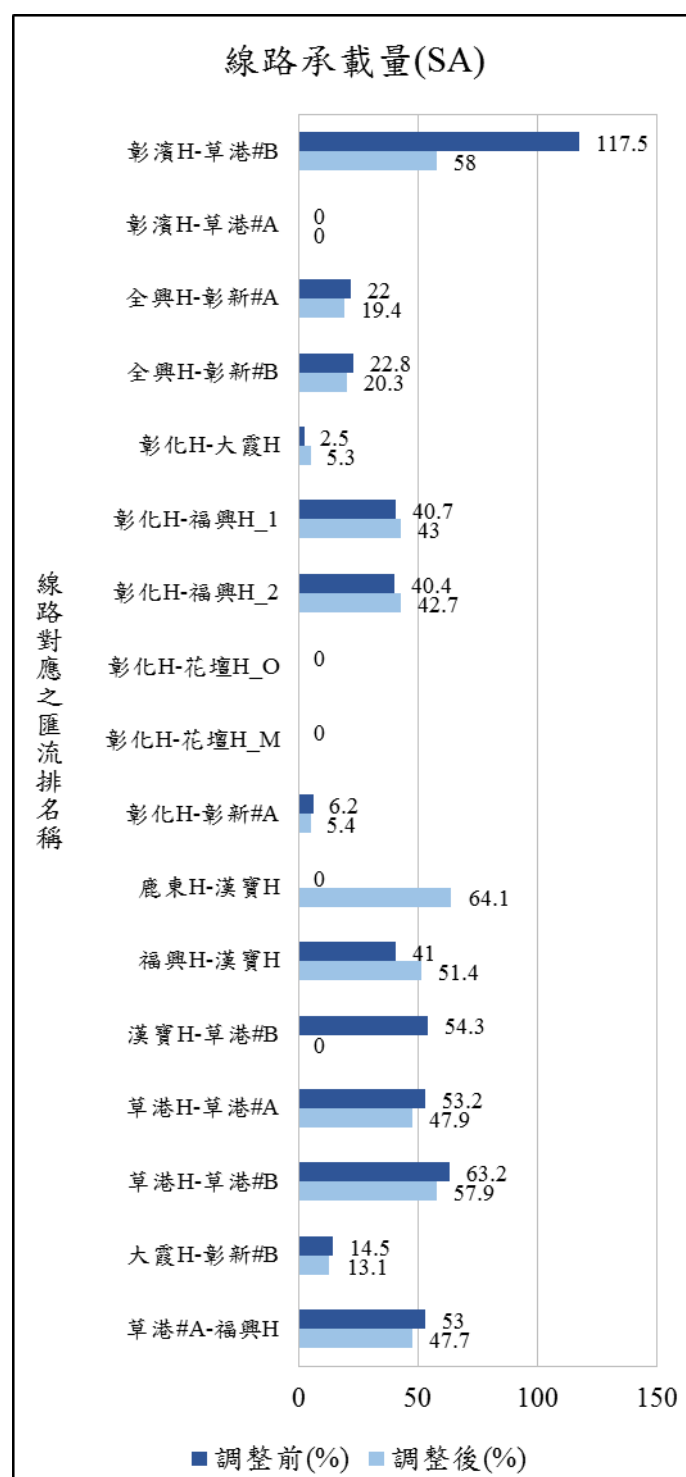


圖 3-17 匯流排[彰濱 H]- [草港#A]之開關修正前後線路占比結果

## (2) 含有再生能源電網重組模擬結果

### — 已知再生能源發電容量併接於彰濱匯流排

#### A. 已知再生能源發電容量下舒緩 N-1 線路壅塞

將彰濱轄區之子系統中加入新太陽能系統設備，整體系統架構如圖 3-18 所示，將太陽能系統併接在永華 161kV 匯流排，新系統如圖中右上藍框部分。將容量 50MVA 之太陽能系統設備接至 18kV 編號 10001 之匯流排，經容量 125MVA 升壓變壓器到達新設 161kV 編號 10000 之匯流排 PCC，最後再經容量為 125MVA 之線路接至彰濱 161kV 匯流排。其中，升壓變壓器與併接線路之線路阻抗皆為參考相近容量設備所設定，為得到新系統併接對原本電網造成的最大影響，設定 PV 發電設備為 50MW 滿載出力到系統當中，由圖中其他線路占比亦可看出在新系統併入後，穩態的電力潮流占比皆沒有超出線路所能夠負荷的最大容量。

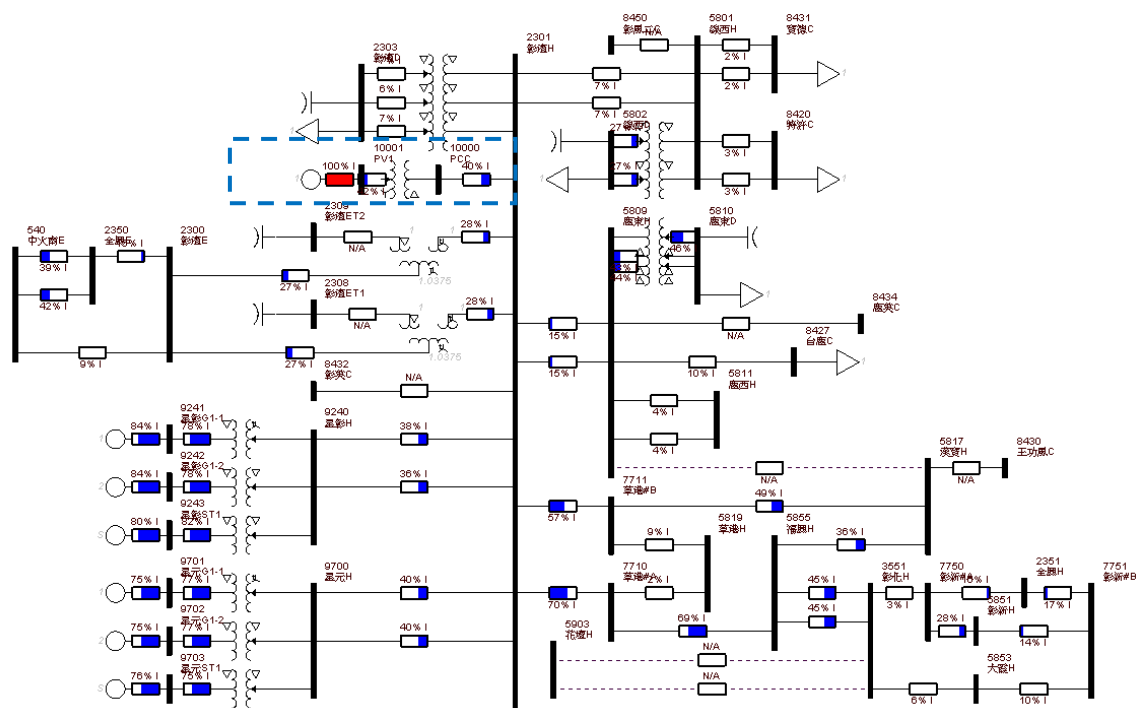


圖 3-18 PV 併接於彰濱 BUS 之系統架構

將併入 PV 後之電網架構執行 N-1 事故分析。將再生能源併接於彰濱匯流排之系統執行 N-1 分析，得知當[彰濱 H]匯流排至[草港#A]匯流排編號 1 之線路發生開路故障，則[彰濱 H]匯流排至[草港#B]匯流排編號 2 發生過載情況如圖 3-19 所示，將 N-1 分析結果整理線路與潮流資訊如表 3-13 所示，過載線路承載量達 120.7%，需予修正至 100%以內。

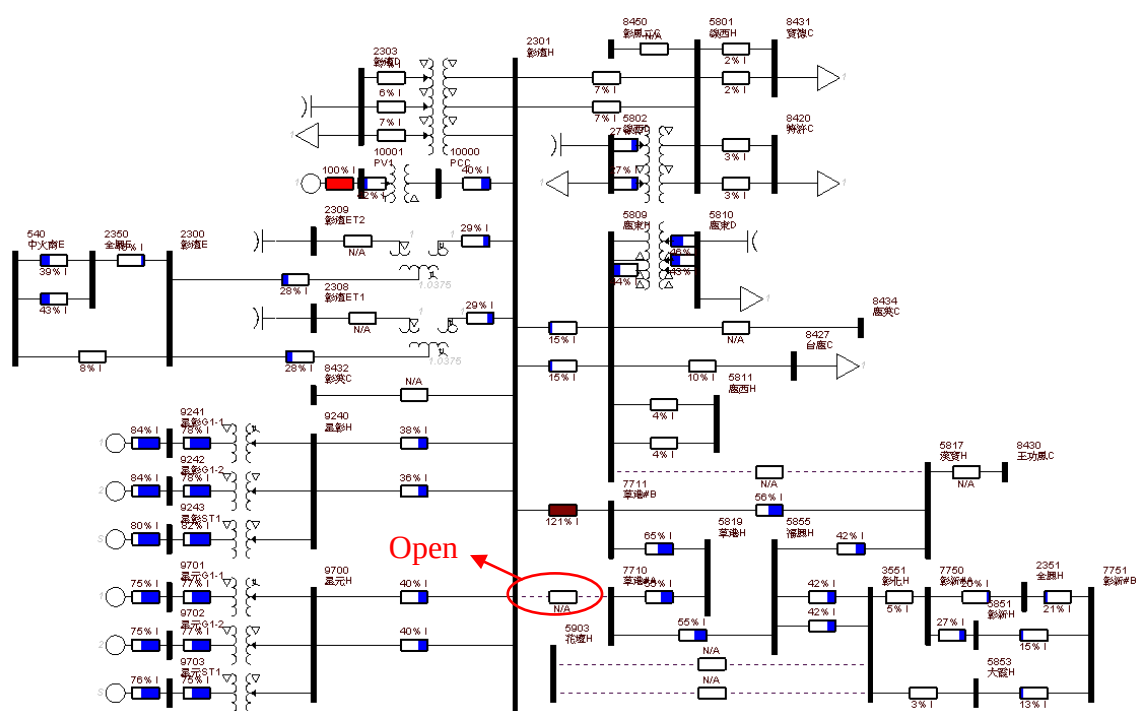


圖 3-19 PV 併接於彰濱匯流排之 N-1 系統架構

表 3-13 PV 併接彰濱匯流排之 N-1 事故表

| FROM BUS 2301[彰濱 161kV] TO BUS 7711[草港#B 161kV] CKT 2 |         |          |          |
|-------------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| 事故前(MW)                                               | 事故後(MW) | 線路額定(MW) | 線路承載量(%) |
| 286.7                                                 | 602.9   | 499.7    | 120.7    |

經由模擬分析結果由表 3-14 所示，可得知在經由最佳化調整線路開關所尋找出的系統架構，模擬退火法結果可使過載線路承載量由 120.7%降低至 59.4%，以達成舒緩壅塞的效果，在更新電網拓撲後執行電力潮流分析，可知當再生能源滿載出力時，其他線路在 N-1 時皆無發生過載情況，如圖 3-20 所示。最佳化調整線路不僅僅解決過載線路問題，同時也將前三條線路承載量較高之線路調整使其下降，匯



並將各線路潮流占比整理如圖 3-21 所示，

表 3-14 PV 併接彰濱 BUS 之線路開關配置結果

| 演算法類別 | 線路開關操作 |           | 過載線路承載量 |
|-------|--------|-----------|---------|
| SA    | 併入     | 鹿東 H-漢寶 H | 59.4%   |
|       | 啟斷     | 漢寶 H-草港#B |         |

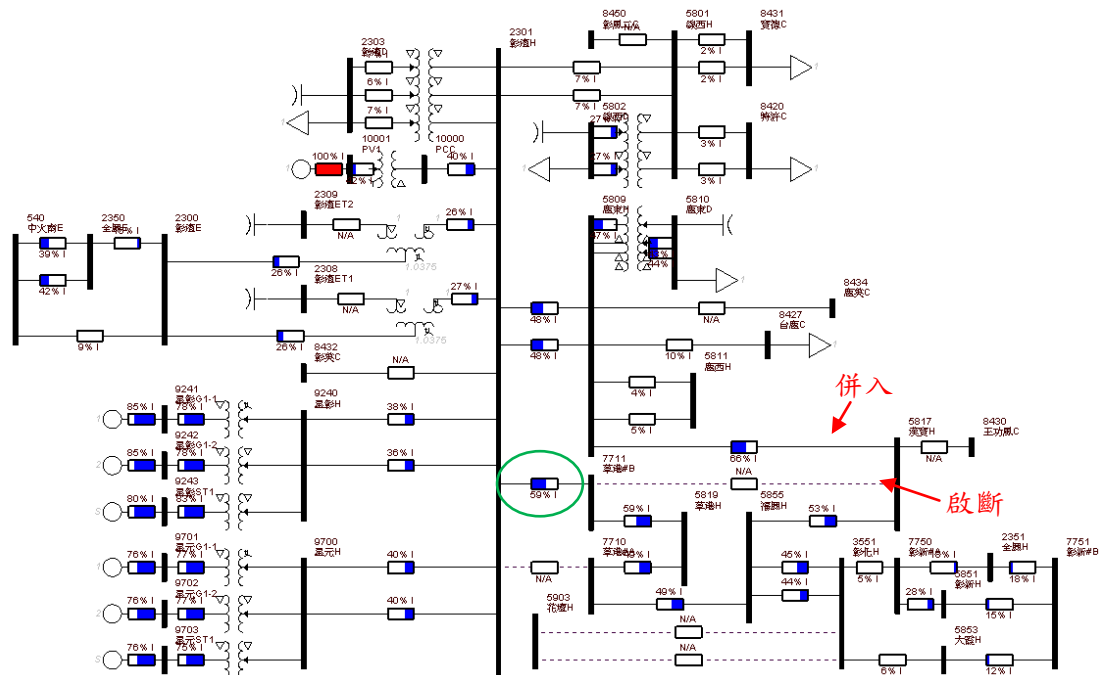


圖 3-20 PV 併接彰濱 H 之修正線路開關架構圖

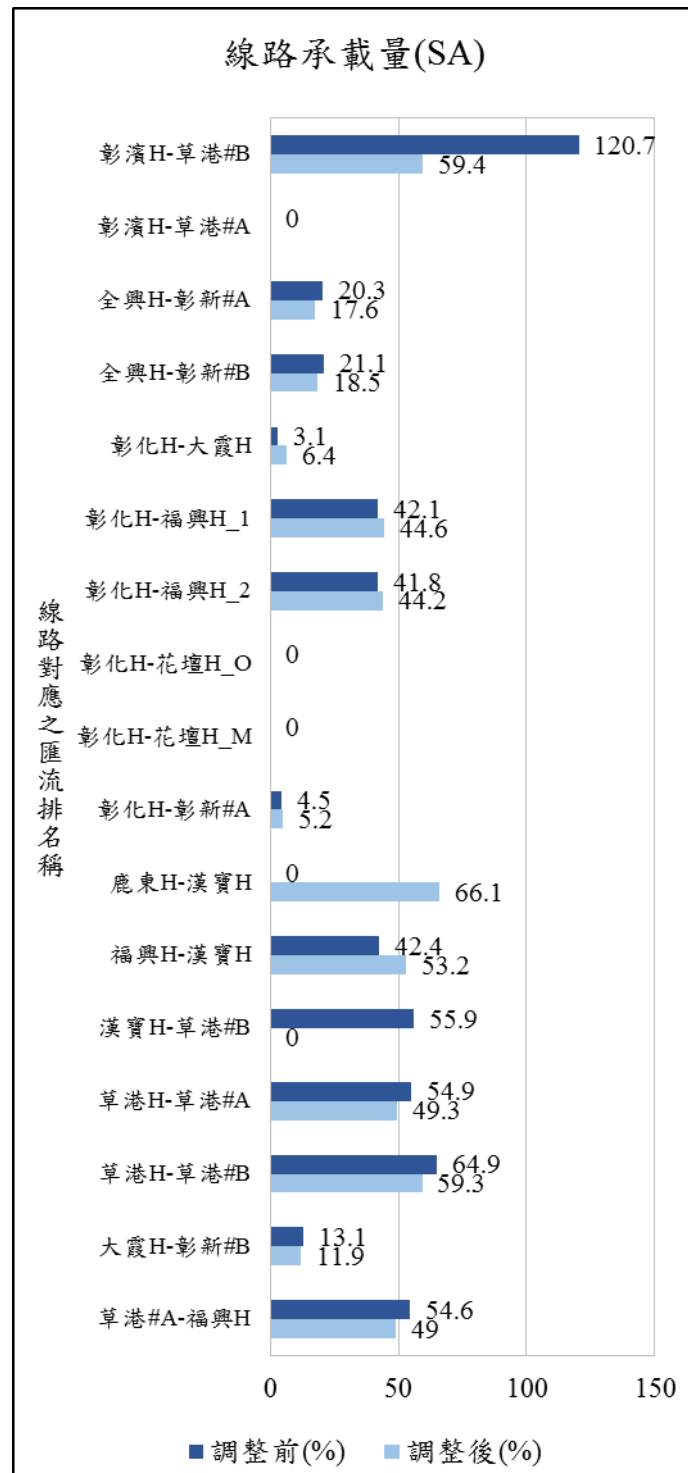


圖 3-21 匯流排[彰濱 H]- [草港#A]之開關修正前後線路占比結果

## B. 評估再生能源可併網最大容量(彰濱端)

在規劃再生能源發電量方面，已知在電網重組前，規劃 PV 的裝置容量為 50MW，若 PV 滿載出力到系統中，則系統在 N-1 事故時會發生線路過載的情況，因此藉由重組的方式，當電網結構產生改變，除了可解決線路壅塞外，在供電方面對於機組的發電量亦可得以提升，因此在建置再生能源機組時，可先行規劃其裝置容量。

如圖 3-23 所示，假設不考慮發電端之連接線路與變壓器容量，逐漸增加 PV 之發電量直至 N-1 電網中出現第一條線路過載，同時也限制各匯流排之電壓變動率不可超過 5%，機組發電量的資訊與增加裕度如表 3-15 開關調整前後之 PV 發電量比較表所示。

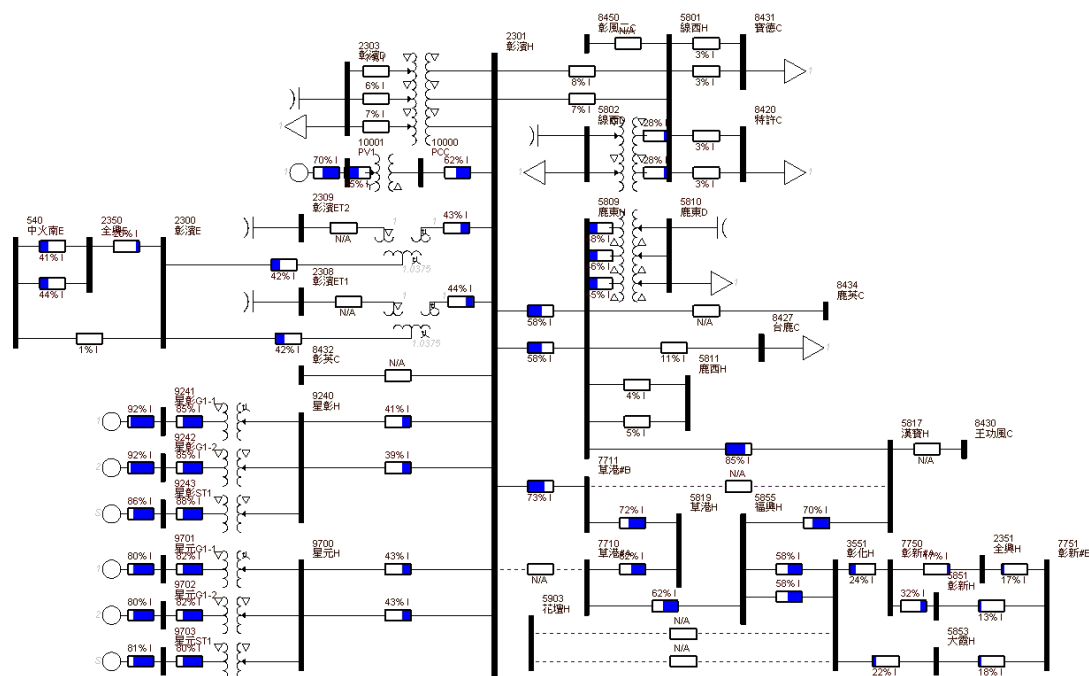


圖 3-22 PV 最大發電量規劃之系統架構圖

表 3-15 開關調整前後之 PV 發電量比較表

| 發電機組 | 調整前發電量(MW) | 調整後發電量(MW) | 增加裕度  |
|------|------------|------------|-------|
| PV   | 50         | 441        | 391MW |

然而，在出現第一條線路過載之前就已達電壓變動率 5%之限制條件。因此匯流排彰濱 H 最大可併聯容量為 441MW。將各匯流排電壓資訊整理如下，如表 3-16 所示；其中彰濱 H 為 PV 併接點，以黃底表示，橘底為電網重組前與重組後之電壓與電壓變動率，綠底為重組後進行 PV 發電量規劃前(增加容量前)與規劃後(增加容量後)之電壓與電壓變動率。從表可確定電壓變動率皆在安全範圍內，若再增加 PV 發電量，電壓變動率會超過限制值範圍。

表 3-16 各匯流排電壓資訊表

| Bus Number | Bus Name | Base kV | 原始電網<br>(0MW) | 原始電網新增再生<br>能源(50MW) | 調整前<br>(發生N-1後) | 調整後          |              | 電壓變動率(%) |        |
|------------|----------|---------|---------------|----------------------|-----------------|--------------|--------------|----------|--------|
|            |          |         |               |                      |                 | 增加容量前        | 增加容量後        |          |        |
|            |          |         | Voltage (pu)  | Voltage (pu)         | Voltage (pu)    | Voltage (pu) | Voltage (pu) | 規劃發電量    | 電網重組   |
| 540        | 中火南E     | 345     | 1.0063        | 1.0062               | 1.0060          | 1.0050       | 0.9960       | 0.8955   | 0.0994 |
| 2300       | 彰濱E      | 345     | 1.0094        | 1.0093               | 1.0090          | 1.0078       | 0.9959       | 1.1808   | 0.1189 |
| 2301       | 彰濱H      | 161     | 1.0021        | 1.0019               | 1.0010          | 0.9979       | 0.9653       | 3.2669   | 0.3097 |
| 2303       | 彰濱D      | 23.9    | 1.0094        | 1.0091               | 1.0083          | 1.0051       | 0.9959       | 0.9153   | 0.3174 |
| 2308       | 彰濱ET1    | 33      | 1.0077        | 1.0073               | 1.0064          | 1.0029       | 0.9663       | 3.6494   | 0.3478 |
| 2309       | 彰濱ET2    | 33      | 1.0071        | 1.0068               | 1.0058          | 1.0024       | 0.9662       | 3.6113   | 0.3380 |
| 2350       | 全興E      | 345     | 1.0052        | 1.0050               | 1.0049          | 1.0038       | 0.9939       | 0.9863   | 0.1095 |
| 2351       | 全興H      | 161     | 1.0035        | 1.0032               | 1.0032          | 1.0005       | 0.9824       | 1.8091   | 0.2691 |
| 3551       | 彰化H      | 161     | 1.0003        | 1.0000               | 0.9999          | 0.9953       | 0.9685       | 2.6927   | 0.4600 |
| 5801       | 線西H      | 161     | 1.0023        | 1.0020               | 1.0012          | 0.9980       | 0.9655       | 3.2565   | 0.3196 |
| 5802       | 線西D      | 23.9    | 1.0078        | 1.0075               | 1.0067          | 1.0035       | 0.9941       | 0.9367   | 0.3179 |
| 5809       | 鹿東H      | 161     | 1.0013        | 1.0011               | 1.0002          | 0.9974       | 0.9663       | 3.1181   | 0.2799 |
| 5810       | 鹿東D      | 23.9    | 1.0074        | 1.0072               | 1.0063          | 1.0033       | 0.9943       | 0.8970   | 0.2981 |
| 5811       | 鹿西H      | 161     | 1.0013        | 1.0010               | 1.0002          | 0.9973       | 0.9662       | 3.1184   | 0.2899 |
| 5817       | 溪寶H      | 161     | 1.0038        | 1.0035               | 1.0033          | 0.9973       | 0.9672       | 3.0181   | 0.5980 |
| 5819       | 草港H      | 161     | 1.0023        | 1.0020               | 1.0017          | 0.9979       | 0.9661       | 3.1867   | 0.3794 |
| 5851       | 彰新H      | 161     | 1.0008        | 1.0005               | 1.0004          | 0.9964       | 0.9722       | 2.4287   | 0.3998 |
| 5853       | 大霞H      | 161     | 1.0006        | 1.0002               | 1.0002          | 0.9961       | 0.9715       | 2.4696   | 0.4099 |
| 5855       | 福興H      | 161     | 1.0017        | 1.0014               | 1.0013          | 0.9964       | 0.9683       | 2.8202   | 0.4894 |
| 5903       | 花壇H      | 161     | 0.9940        | 0.9939               | 0.9938          | 0.9930       | 0.9850       | 0.8056   | 0.0805 |
| 7710       | 草港#A     | 161     | 1.0024        | 1.0021               | 1.0022          | 0.9983       | 0.9671       | 3.1253   | 0.3891 |
| 7711       | 草港#B     | 161     | 1.0025        | 1.0022               | 1.0015          | 0.9979       | 0.9656       | 3.2368   | 0.3595 |
| 7750       | 彰新#A     | 161     | 1.0010        | 1.0007               | 1.0006          | 0.9966       | 0.9723       | 2.4383   | 0.3998 |
| 7751       | 彰新#B     | 161     | 1.0009        | 1.0006               | 1.0005          | 0.9965       | 0.9725       | 2.4084   | 0.3998 |
| 8420       | 特許C      | 161     | 1.0023        | 1.0020               | 1.0012          | 0.9981       | 0.9655       | 3.2662   | 0.3096 |
| 8427       | 台鹿C      | 161     | 1.0013        | 1.0010               | 1.0002          | 0.9973       | 0.9662       | 3.1184   | 0.2899 |
| 8430       | 王功風C     | 161     | 1.0038        | 1.0035               | 1.0033          | 0.9973       | 0.9672       | 3.0181   | 0.5980 |
| 8431       | 寶德C      | 161     | 1.0023        | 1.0020               | 1.0012          | 0.9981       | 0.9655       | 3.2662   | 0.3096 |
| 8432       | 彰英C      | 161     | 1.0021        | 1.0019               | 1.0010          | 0.9979       | 0.9653       | 3.2669   | 0.3097 |
| 8434       | 鹿英C      | 161     | 1.0013        | 1.0011               | 1.0002          | 0.9974       | 0.9663       | 3.1181   | 0.2799 |
| 8450       | 彰風二C     | 161     | 1.0023        | 1.0020               | 1.0012          | 0.9980       | 0.9655       | 3.2565   | 0.3196 |
| 9240       | 星彰H      | 161     | 1.0023        | 1.0021               | 1.0012          | 0.9981       | 0.9658       | 3.2361   | 0.3096 |
| 9241       | 星彰G1-1   | 16.5    | 0.9700        | 0.9700               | 0.9700          | 0.9700       | 0.9700       | 0.0000   | 0.0000 |
| 9242       | 星彰G1-2   | 16.5    | 0.9700        | 0.9700               | 0.9700          | 0.9700       | 0.9700       | 0.0000   | 0.0000 |
| 9243       | 星彰ST1    | 18      | 0.9700        | 0.9700               | 0.9700          | 0.9700       | 0.9700       | 0.0000   | 0.0000 |
| 9700       | 星元H      | 161     | 1.0024        | 1.0021               | 1.0013          | 0.9982       | 0.9659       | 3.2358   | 0.3096 |
| 9701       | 星元G1-1   | 18      | 0.9700        | 0.9700               | 0.9700          | 0.9700       | 0.9700       | 0.0000   | 0.0000 |
| 9702       | 星元G1-2   | 18      | 0.9700        | 0.9700               | 0.9700          | 0.9700       | 0.9700       | 0.0000   | 0.0000 |
| 9703       | 星元ST1    | 18      | 0.9700        | 0.9700               | 0.9700          | 0.9700       | 0.9700       | 0.0000   | 0.0000 |
| 10000      | PCC      | 161     | 0.0000        | 1.0019               | 1.0010          | 0.9979       | 0.9627       | 3.5274   | 0.3097 |
| 10001      | PV1      | 18      | 0.0000        | 0.9512               | 0.9504          | 0.9475       | 0.6745       | 28.8127  | 0.3051 |

### 3. 維修(停檢修)案例之電網最佳轉供路徑研析

分析完 N-1 事故後，本文將進行停檢修區域之分析，同樣是彰化地區之彰濱轄區子系統，且於匯流排彰濱 H 與漢寶 H 併聯再生能源機組，其裝置容量皆為 80MW，如圖 3-23 所示。停檢修區之定義為(含)兩條線以上發生開路，執行電力潮流分析，檢查是否有其他線路因停檢修而發生過載情況。本文參照台電公司提供真實停檢修日程表，從中挑選彰濱轄區之停檢修區進行分析，以下將有三個案例分析說明：

停檢修區 1：彰濱 H~草港#A、草港 H~草港#A、福興 H~草港#A

停檢修區 2：全興 H~彰新#A、彰化 H~彰新#A、彰新 H~彰新#A

停檢修區 3：彰濱 H~草港#B、草港 H~草港#B、漢寶 H~草港#B

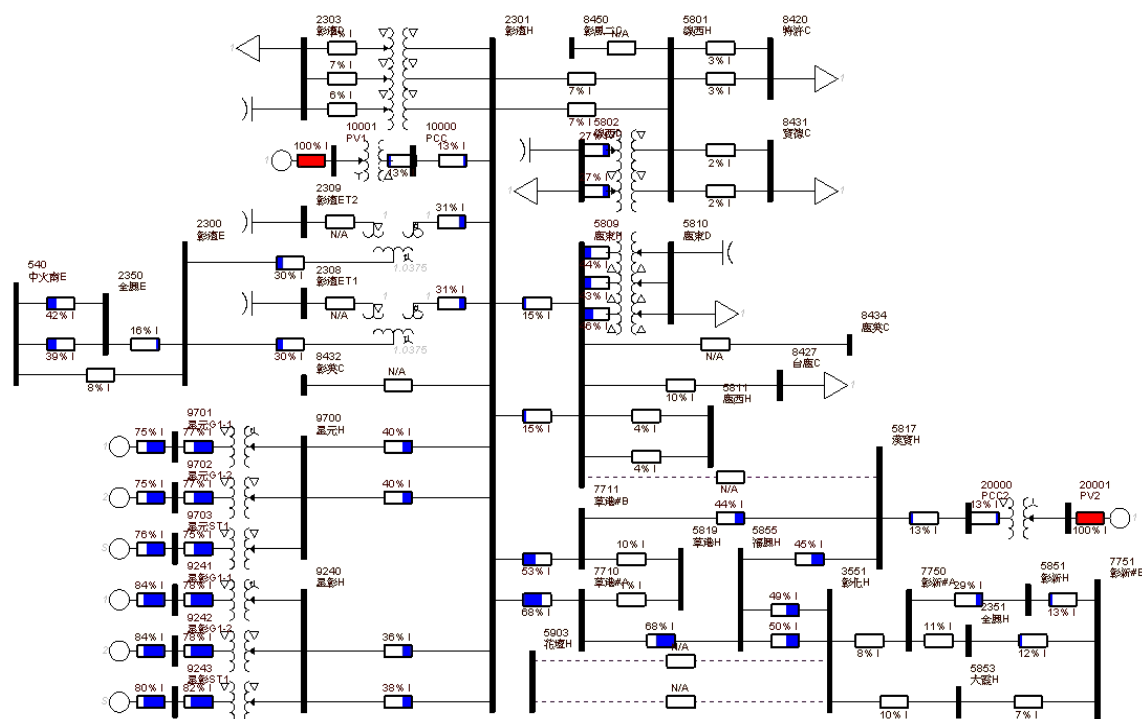


圖 3-23 PV 併接於彰濱、漢寶匯流排之系統架構

# (1) 停檢修區 1：彰濱 H~草港#A、草港 H~草港#A、福興 H~草港#A

由圖 3-24 所示，將電網執行電力潮流分析，得知當匯流排[彰濱 H]至[草港#A]、[草港 H]至[草港#A]、[福興 H]至[草港#A]進行停檢修時，以淺橘底表示，將使[彰濱 H]至[草港#B]編號 1 線路接近過載，其線路潮流占比達 95.2%，將分析結果整理線路與潮流資訊如表 3-17 所示，雖然未達過載情形，但考慮安全性問題，將與以修正使其下降。

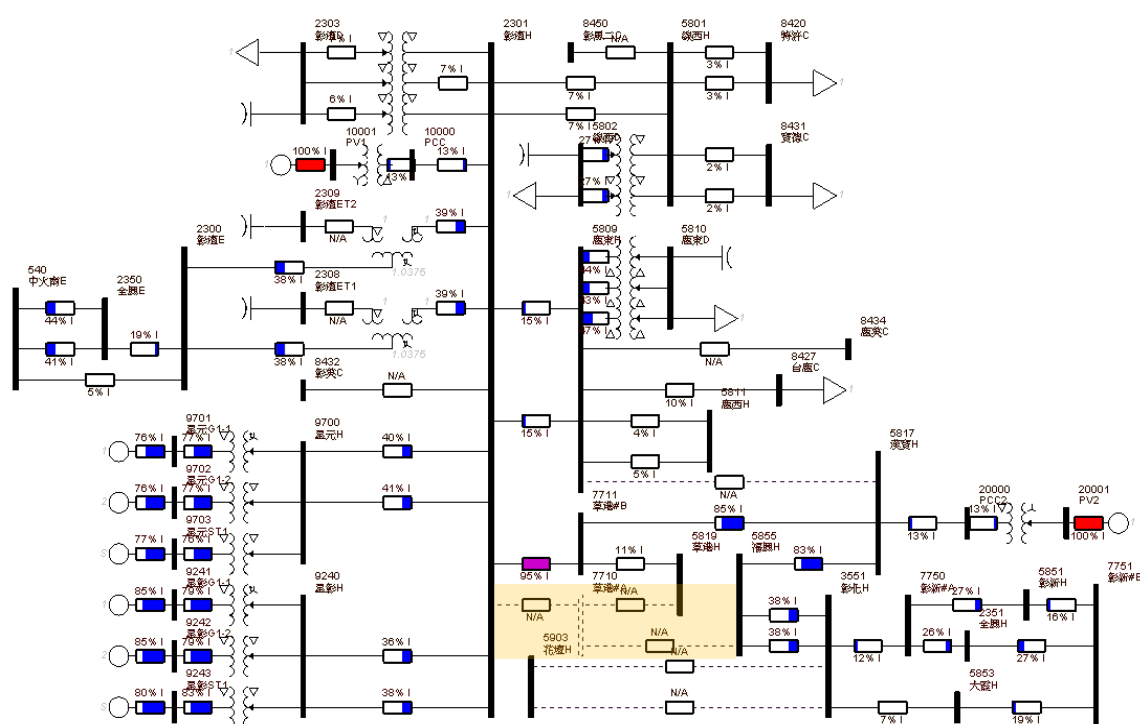


圖 3-24 停檢修區 1 系統架構

表 3-17 停檢修區 1 事故表

| FROM BUS 2301[彰濱 H 161kV] TO BUS 7711[草港#B 161kV] CKT 2 |         |          |          |
|---------------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| 事故前(MW)                                                 | 事故後(MW) | 線路額定(MW) | 線路承載量(%) |
| 265                                                     | 475.9   | 499.7    | 95.2     |





此開關策略使前二條潮流占比高之線路下降許多，但也使部分線路上升，其中[全興 H]至[彰新#A]與[全興 H]至[彰新#B]上升至接近75%。

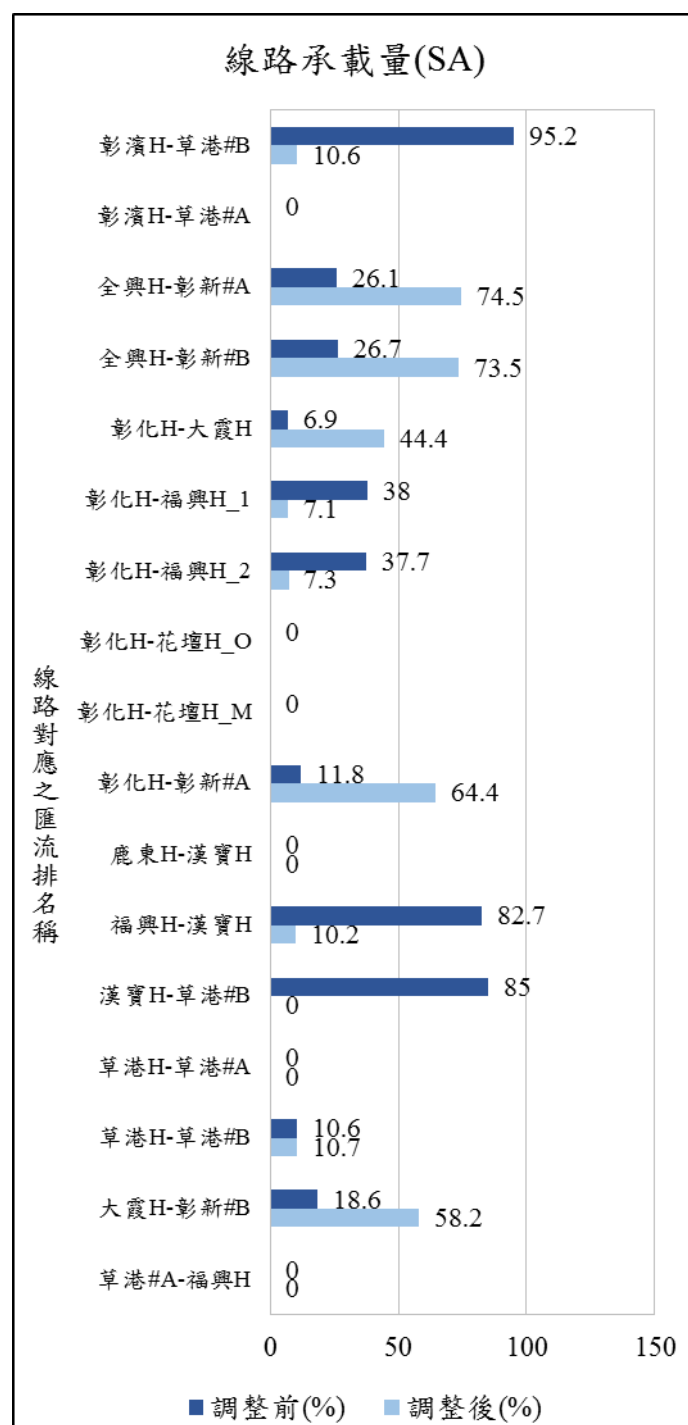


圖 3-26 停檢修區 1 之開關修正前後線路占比結果

### 三、 結論

近年來國內對於環保意識的興起，位於用戶端的分散式電源發展已成趨勢。在電力系統的運轉上不論是目前既有的系統，或者是加入再生能源的電網架構下，如何提升與增進整體系統的運轉效率以及可靠度都是非常重要的課題。本文首先針對系統發生偶發事故的情況下考慮當單一線路跳脫，導致輸電線路的過載情形進行排除，作法上選擇以電網的饋線重組技術為主要的研究方向，其概念為調整線路開關使電網結構產生變化，進而改變線路潮流，解決壅塞情況。本文選擇運用電力系統之靈敏度分析為評估線路潮流影響之基礎，使用模擬退火法作為選擇適當線路開關之最佳化工具。

欲了解線路開關的操作所能解決的問題及分析方法，本文在第二章針對輸配電系統架構、系統運轉限制以及電網重組的應用場合逐一介紹，此外透過線路中斷分配因子 LODF 以及機組靈敏度因子 PTDF，分析線路的中斷/連接狀態與機組發電量的變化對於特定線路潮流的影響變化做為開關投切策略的依據。介紹電網重組的研究分類與其流程，分別為未含有再生能源與含有再生能源系統的電網重組問題，其中包含 N-1 故障案例、最佳化演算法求解開關組合以及再生能源機組發電量規劃。另外從台電的電力系統相關運轉規範中，依照模擬系統的不同選擇必須符合的規範進行最佳化演算法的數學式設計。

本文第三章講述案例分析，首先從未含有再生能源的南部區域配電系統進行線路開關的重組。接著在某個指定的匯流排中設置太陽能機組，並在滿載出力下檢測系統發生 N-1 事故時的電網情況。在系統輕載無線路過載的案例下，此情況無需進行電網重組；而系統在尖載情況下，當 N-1 狀況下可能在某一線路發生過載，需尋找最佳的開關組合以解決線路壅塞問題，並確保系統中無任何線路過載。

在透過線路開關調整後的拓撲，依序增加再生能源機組發電量直至某條饋線出現壅塞現象或是違反規定的電壓變動率。在所探討之配電或輸電系統案例中發現經過調整後的電網可提升再生能源發電裕度達 1.9 倍至 2.5 倍。由此可知未來在建置再生能源且規劃裝置容量上，可運用電網重組的概念，尋找最佳的電網拓撲以及安置點，使再生能源在併聯的區域範圍內提供最大的供電量。

## 肆、參考文獻

- [1] Xiaoyun Huang, Qincheng Yuan, Chunguang Li, Qihong Yuan and Liang Dong, "Research on the network reconfiguration after distribution network fault," 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Shenzhen, 2014, pp. 1-7.
- [2] S. Huang, Q. Wu, L. Cheng and Z. Liu, "Optimal Reconfiguration-Based Dynamic Tariff for Congestion Management and Line Loss Reduction in Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1295-1303, May 2016.
- [3] J. Blanco-Solano, J. F. Petit-Suárez and G. Ordóñez-Plata, "Optimal placement of voltage sag monitors in smart distribution systems: Impact of the dynamic network reconfiguration," 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), Montevideo, 2015, pp. 361-365.
- [4] B. Venkatesh, R. Ranjan and H. B. Gooi, "Optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 260-266, Feb. 2004.
- [5] M. Kabirifar, A. Shojaei and M. Moallem, "Distribution system reconfiguration using heuristic method and enhanced genetic algorithm with fuzzy sets objectives," 2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering, Tehran, 2015, pp. 1568-1573.
- [6] Z. M. Yasin and T. K. A. Rahman, "Service Restoration in Distribution Network with Distributed Generation," 2006 4th Student Conference on Research and Development, Selangor, 2006, pp. 200-205.
- [7] M. M. Aman, G. B. Jasmon, K. Naidu, A. H. A. Bakar and H. Mokhlis, "Discrete evolutionary programming to solve network

- reconfiguration problem," IEEE 2013 Tencon - Spring, Sydney, NSW, 2013, pp. 505-509.
- [8] V. S. Patel, S. Chakrabarti and S. N. Singh, "A hopfield neural network based reconfiguration algorithm for power distribution systems," 2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), Cochin, 2017, pp. 1-5.
- [9] N. H. Shamsudin, M. S. S. M. Basir, A. R. Abdullah, M. F. Sulaima and E. F. Shair, "Losses minimization in network reconfiguration for fault restoration via a uniform crossover of genetic algorithm," 2015 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET), Langkawai Island, 2015, pp. 330-334.
- [10] B. A. R. de Andrade and N. R. Ferreira, "Simulated annealing and tabu search applied on network reconfiguration in distribution systems," 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), Niteroi, 2018, pp. 1-6.
- [11] Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. Hernandez and R. G. Harley, "Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 12, no. 2, pp. 171-195, April 2008.
- [12] D. V. Sunil and N. Yadaiah, "A novel improved particle swarm optimization frame work for reconfiguration of radial distribution system," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, 2017, pp. 1-5.
- [13] E. Chen, S. Zhang and T. Wang, "Research on distribution network reconstruction based on improved simulated annealing — Ant colony algorithm," 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, 2017, pp. 3575-3579.

- [14]Z. Gao, J. Ding and H. Liu, "Hybrid algorithm based on artificial fish swarm algorithm and tabu search in distribution network reconfiguration," *2010 International Conference On Computer Design and Applications*, Qinhuangdao, 2010, pp. V5-415-V5-418.
- [15]劉力誠，"含有分散能源支配電饋線重組研究"，碩士論文，國立台北科技大學，2008
- [16]M. Makandar, C. S. R. Atla and S. Velamuri, "Reliability assessment of distribution system with renewable Distributed Generation," *2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*, Bangalore, 2016, pp. 1-5.
- [17]台灣電力公司，"台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點"
- [18]H. Ahmadi, J. R. Martí and A. Alsubaie, "Sensitivity factors for distribution systems," *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, CO, 2015, pp. 1-5.
- [19]Siemens Industry, Inc., "PSS® E 33.5 Progtam Operation Mannual,"October 2013