

利用 GRASP 解決風力發電場最佳風機配置問題

A GRASP Algorithm for Optimal Wind Turbine Placement in Wind Farms

尹邦嚴

國立暨南國際大學資訊管理研究所
pyyin@ncnu.edu.tw

王泰元

國立暨南國際大學資訊管理研究所
taiyuanking@gmail.com

摘要

尾流效應的關鍵因素導致整體風力發電場效率的降低。對於不同風向和風力的情況下，準確預測風電場成本與發電量之間的關係是非常重要的研究課題。為了最佳化風電場的配置，本研究提出一個以貪婪隨機調變搜尋法(GRASP)為基底的超經驗演算法(Hyper-heuristic)來解決風電場最佳配置的問題，針對三種不同的風場情況分別做探討，第一、單一風向與單一風速；第二、多風向與單一風速；第三、可變風速與多風向的問題。本研究除了可以提供最佳風力發電機配置之外，結果還包括總發電量和總體發電效率。最後，我們的實驗結果顯示，與文獻其它方法相比較，我們的風力發電機配置能夠提供更好的性能以供現實風電場做為規劃參考。

關鍵詞： Wind turbine、Wind farm、Optimization、GRASP、Hyper-heuristic

1. 前言

全球氣候暖化所引起的溫室效應造成氣候變遷，甚至造成毀滅性的自然災害，已成為 21 世紀各國面臨的最大環境議題。回顧 20 世紀，大氣中 CO₂ 濃度從 280ppm 增高到 370ppm，全球平均溫度上升 1°C，若不再加以改善且讓其惡化下去的話，將導致陸地面積減少的嚴重後果。然而，聯合國跨政府氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)預測，未來 21 世紀大氣中 CO₂ 濃度可能將會持續增高至 700ppm ~ 1000ppm，這樣的結果將使全球氣溫再上升 1~4°C，後果將難以想像。

另一方面，自工業革命以來，世界各國對於能源的需求量也與日劇增，在長期

不斷的使用化石能源(fossil fuels)的狀況下，未來，將可能導致化石能源缺乏與能源價格飆漲的現象，這樣的現象讓世界各國陸續意識到能源短缺的危機。另外，在長期過度使用這些能源的情況下，助長地球的氣候環境變遷將也會造成重大影響。面對這樣的全球暖化及化石能源日益枯竭之問題，尋找新的替代能源是刻不容緩的課題。其中，「再生能源」更是令人矚目的項目之一，根據國際能源總署再生能源工作小組的定義，再生能源是指「從持續不斷地補充的自然過程中得到的能量來源」。再生能源泛指多種取之不竭的能源，除了可以彌補能源不足之問題外，亦可降低對環境污染之程度，歐美先進國家皆已積極投入相關之研究，如：風力發電、太陽能發電、水力發電和生質能源等，其中風力發電更是預測成為未來能源供應的主要技術。

風的形成原因是來自於地球的自轉和太陽熱輻射不均所造成的空氣流動，風機葉片藉由空氣流動轉動葉片產生能量，擷取風的動能轉換成機械能，甚至進而轉換成電能，因此風力發電不像化石能源具有有限性，更沒有風力本身成本的問題，風力發電所產生的 CO₂ 和其它的溫室氣體幾乎趨近為零，並且風機設置成本較一般再生能源設置成本來的低，安裝工作天也相對較短，因此「風力發電」，便成為目前各國極力發展的重點之一。

余勝雄(2006)[1]指出，台灣地區屬海島地形，強烈的東北季風吹拂時間約長達 3 至 6 個月，許多海岸地區的年平均風速均達到每秒 5 公尺以上，此類強風區域超過 2000 平方公里，風力潛能約 4000 MW，如考慮人文及地物因素，保守估計，台灣地區至少有 1000 MW 以上陸上風能潛能可

供開發。而海上風能潛力方面，據估計，在台灣西海岸約有 2000 MW 以上的發展潛力，如此優越的條件，再加上台灣地區自產能源貧乏，98%的能源消費均須仰賴進口，環境保護意識日益覺醒，抑制溫室氣體排放也己成為世界各國關注焦點，在種種因素下，具有優勢條件之風力發電，成為台灣發展再生能源發電應用不可缺乏的選擇之一。近年來，台灣電力公司亦積極發展風力能源，若未來政府與民間能攜手合作，全力開發台灣地區的風力能源，相信將減少台灣地區對外來能源的依賴。

根據過去文獻關於風力發電的研究主題，可歸納出以下幾類：第一、混合式發電轉換問題[4][18][22]探討如何將多種不同能源來源(如水、熱、風等)結合發電，才能得到最經濟的發電成本；第二、風力發電機組設計[3][5][15]，如風機葉片外形、垂直軸式和水平軸式風機、風機引擎設計等；第三、風力發電機塔結構設計[12][13]，如風機高度、塔式結構設計等；第四、風力發電機配置問題[2][6-7][9][11][13][19]，計算出多個風力發電機在風力發電場的最佳配置位置，本研究則以第四類的風力發電機配置問題做為研究範圍。

過去文獻針對風力發電廠內風機陣列的設置作探討，在固定面積內以設定網格的方式對風機的排列進行最佳化計算，這樣的研究很難在有限時間內求得品質較好的解，所以也有許多文獻利用啟發式演算法(Heuristics)求解[8][16][23]，但使用啟發式演算法在解決較複雜的問題時，仍然無法求得較佳的解。近年來，許多文獻也利用次經驗演算法(Metaheuristics)來求解(見

表 1)，如 Bilbao & Alba [17]利用模擬退火煉鋼演算法(simulated annealing, SA)來計算最佳的風力發電機配置位置。大部份的學者則是採用基因演算法(genetic algorithm, GA)來計算最佳的風力發電機配置位置[2][6][9][11][13][19]。Wan et al. [7]則以粒子族群演算法改善透過基因演算法所求的解。早期 Mosetti[11]與 Grady[19]等人利用基因演算法進行該風機配置問題之研究，近年來，許多學者不只在基因演算法上逐步改進外，也運用模擬退火煉鋼法與粒子族群演算法進而找尋最佳解。

本研究利用貪婪隨機調變搜尋法(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, GRASP)[21]對風力發電廠內風機陣列的設置作探討，在不同風向、風速的狀況下，搜尋最佳的風機排列陣列。GRASP 是一種次經驗演算法，普遍適用於組合最佳化的問題。GRASP 通常由連續演化組成的一種貪婪隨機建構一組候選解和後續的區域搜尋法來嘗試改進候選解的答案品質。本論文為求在有限的土地面積內安置最佳的風力發電機配置位置，以得到最大的發電效益，假設條件如下：

1. 在面積固定的風場(Wind Farm)內，設置的風機越多，相對可以得到的發電量就越大，但是風機成本相對成正比增加。
2. 設置的風機越多，風機與風機之間距離就越小，造成位於下游處的風機受前置風機尾風的影響，因而產生發電量也就越小。
3. 風向會影響到風機葉片受風的機會，而風速則直接影響風機發電的大小。

表1 風機配置問題求解方法比較表

	模擬退火煉鋼法	基因演算法	粒子族群演算法
Mosetti et al., 1994, [11]		●	
Grady et al., 2005, [19]		●	
Huang, 2007, [13]		●	
Bilbao & Alba, 2009, [17]	●		
Emami & Noghreh, 2009, [2]		●	
Wang et al., 2009, [9]		●	
Wan et al., 2009, [6]		●	
Wan et al., 2010, [7]			●

本研究中嘗試運用GRASP解決風力發電機最佳配置問題，主要原因有以下幾點：

1. 近年來許多文獻 [10][20][21] 顯示 GRASP 在解組合最佳化問題時，經常較 GA、SA 等演算法有更佳的效能。
2. GRASP 的原始設計即是針對組合最佳化的問題，適合求解最佳風力發電機配置，不像粒子族群演算法是為連續型變數問題而設計，
3. 過去尚未有文獻使用 GRASP 當作最佳化方法來求解風力發電機最佳配置問題。

2. 問題定義

大型的風場(Wind Farm)由許多風機組成，以設定固定網格(假設分成 $d \times d$ 個網格，如圖1)的方式對風機的排列位置進行最佳化研究，求取生產更多的電能與相對花費成本較少的配置，並將風機位置設於網格正中央，風機排列方式若採用陣列方式排列，則不同的排列位置將會影響整體的發電效率，位於下游處的風機會受到上游處的風機尾流的影響，風機陣列的間距愈小，風機尾流的風速愈小，下游處的風機發電效率愈差。一般而言，相對距離大於風機的側向間距約為 3 ~ 5 倍的風機扇葉直徑，前後向間距約為 5 ~ 9 倍的風機直徑則影響程度將會極小。

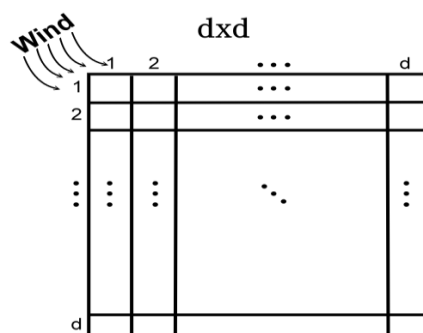


圖1 區域網格設定

風機尾流模型如圖2所示，當上游平均風速通過上游風機之後，尾流風速及影響範圍(如陰影部份)則與上下游風機間隔距離(y)以及上游風機葉片掃過面積之半徑(r_1)息息相關，透過此圖可以更加了解其關聯

性與風機後方距離為 y 的風機受尾流影響的截距(r_2)。

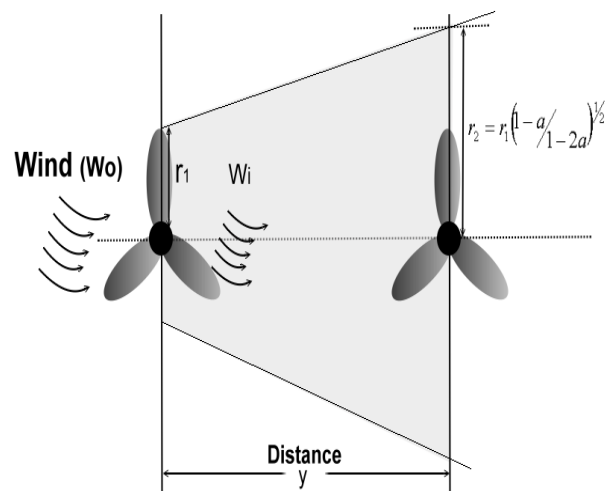


圖2 尾流模型示意圖

本研究所要解決的最佳風機配置問題 (Optimal Wind Turbine Allocation Problem, OWTAP) 用到之變數定義如表 2，其數學模型如下所示。

表 2 變數定義

N	風機總數
C	風機所產生的總成本
E	風機總發電量
\bar{W}	風機後方平均風速
W_0	均勻風速
y	上游風機與下游風機之間的距離
W_i	第 i 台位於下游處與上游風機距離 y 之風機所受的風速
a	環境影響因子
H	風機葉片中心之高度
H_0	環境地表之粗糙長度
r_1	風機葉片掃過面積之半徑
r_2	風機後方尾流影響截距
TC	風機推力係數

Model OWTAP:

$$\text{Minimize } Obj = C/E \quad (1)$$

$$C = N \left(\frac{2}{3} + \left(\frac{1}{3} \right) \left(e^{-0.00174 N^2} \right) \right) \quad (2)$$

$$E = \sum_1^N 0.3 \bar{W}^3 \quad (3)$$

$$Efficiency = \frac{\sum_1^N 0.3 \bar{W}^3}{N(0.3W_o^3)} = \frac{E}{N(0.3W_o^3)} \quad (4)$$

$$\bar{W} = W_o \left(1 - \left(\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{W_i}{W_o} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (5)$$

$$W_i = W_o \left(1 - \left(\frac{2a}{1 + \alpha \left(\frac{y}{r_2} \right)} \right) \right) \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln \left(\frac{H}{H_0} \right)} \quad (7)$$

$$r_2 = r_1 \left(\frac{1-a}{1-2a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$a = \frac{1 - (1-TC)^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (9)$$

目標式(1)為求取成本與發電量之效益比；公式(2)為風機總成本金額 (cost / year)；公式(3)為風機產生的總發電量 (Power Energy)；公式(4)為整體效率，計算方式為受尾流影響之總發電量與不受尾流影響之總發電量效率；公式(5)為在多支風機後方因尾流混合所產生之動能差額 (kinetic energy deficits) 得到平均風速；公式(6)為第*i*台位於下游處與上游風機距離*y*之風機所受的風速；公式(7)為環境影響因子 α ，藉由風機葉片中心之高度(*H*)與環境地表之粗糙長度(*H*₀)求得；公式(8)(9)則假設風機推力係數(*TC*)之情況下推求風機之軸向因子 (axial induction factor) *a*，以推算風機後方尾流影響半徑*r*₂，其中*r*₁為前方風機葉片掃過面積之半徑。當*TC* = 0.88 時，可求得 $a = 0.327$ ， $r_2 = 1.395 r_1$ 。

3. 研究方法

本章首先描述 GRASP 之基礎架構與流程，並且說明本研究如何應用 GRASP

來解決 OWTAP 問題。

3.1 GRASP

GRASP演算法由Feo & Resende[21]所提出，是一個針對解決組合最佳化問題所設計，具備反覆改良後選解品質的演算法，每一次反覆的流程中主要包含兩個階段：「貪婪隨機方式建構初始解 (Greedy_Randomized_Construction)」與「區域最佳解搜尋(Local_Search)」。其流程圖如圖3所示。

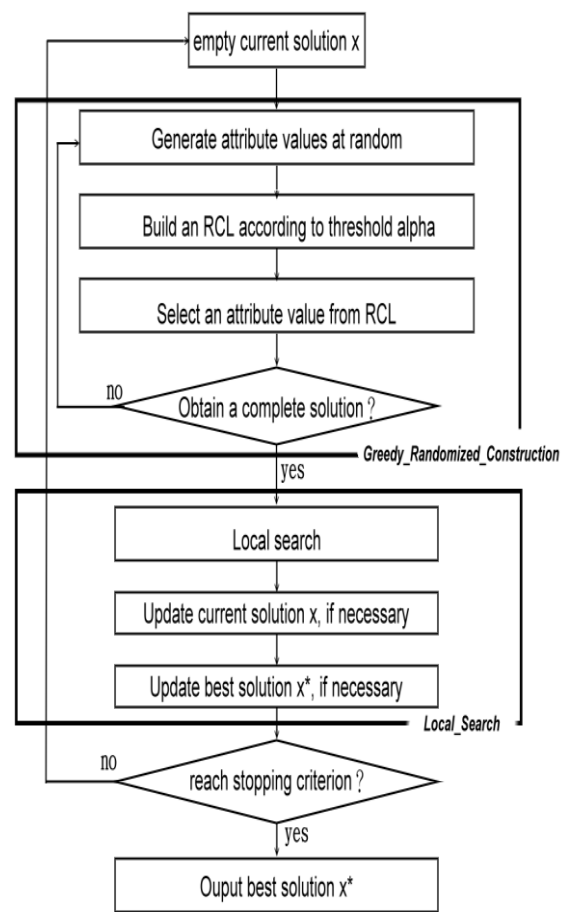


圖 3 GRASP 演算法流程圖

在建構初始解的階段，首先將當代候選解(*x*)設定為空集合開始，利用逐步建構屬性值(attribute)的方式建立一組完整的解。利用GRASP中的alpha參數值決定前面alpha百分比的屬性值集合，稱之為限制性候選名單(Restricted Candidate List, RCL)。RCL中的屬性值才有機會被選中，此alpha值若設太高則大部份屬性值都會進入RCL

而造成挑選過程趨近於隨機挑選；若設太低則會變成貪婪法(greedy)。在逐步建構每一屬性值的程序中，先列出所有挑選值的RCL，從中隨機選出一個來建構該屬性值，重覆此建構方式，直到建立一組完整解為止。接著進入Local_Search階段，對此完整解進行區域最佳解搜尋的動作，將這組解帶到區域最佳解(x)後與歷代發現過的最佳解(x*)比較並更新之，反覆執行此Greedy_Randomized_Construction與Local_Search兩階段，直到抵達終止條件後，即輸出最佳解(x*)。

3.2 GRASP for Wind Turbine Allocation

本研究透過GRASP的基礎架構，嘗試解決OWTAP，我們將本方法命名為GRASP-OWTAP。GRASP-OWTAP包含兩大階段，第一階段以貪婪隨機方式建構初始風機矩陣解；第二階段為多重起點(Multi-Start)區域最佳解搜尋。第一階段中，先藉由隨機方式來產生眾多鄰居，利用GRASP中的alpha值決定前面多少百分比的解是有機會被選中的，設定一個適當alpha值從中隨機挑出一個作為初始解的一部分，透過這樣半貪婪啟發式演算法(semi-greedy heuristic)的方法來挑選初始解。此程序會反覆執行直到建構出一組完整的風機矩陣為止。接著在階段二中，不同於標準GRASP的方法，本研究採用變動鄰居搜尋法(Variable Neighborhood Search, VNS)來執行區域最佳解搜尋，首先將目前解做不同的區域搜尋(子矩陣交換、子矩陣複製等運算操作)，若新的解比目前解好，就將目前解以改善後的解取代，繼續做區域搜尋。若連續多次改善後的解沒有比目前解好，則已落入區域最佳解，再將此解與最佳解比較，若較好則把此解更新最佳解，直到連續多次改善後的解沒有比最佳解好為止。階段二結束後，判斷全域搜尋計數是否已達最大搜尋次數，若為否，則返回階段一再次執行，若已達最大搜尋次數，則停止搜尋並輸出最佳解。

接下來我們針對如何設計GRASP程序的兩階段提出說明。

3.2.1 階段一 以貪婪隨機方式建構完整解

本階段的目的是在利用逐步的方式，依序建構每行的行解，直到完整解被建構為止。舉例來說，假設圖4(a)為完整解X，圖4(b)則為第1行的解 X_1 ，由於本研究所使用二元編碼，0代表該網格沒有配置風機，1代表有配置風機在該網格。

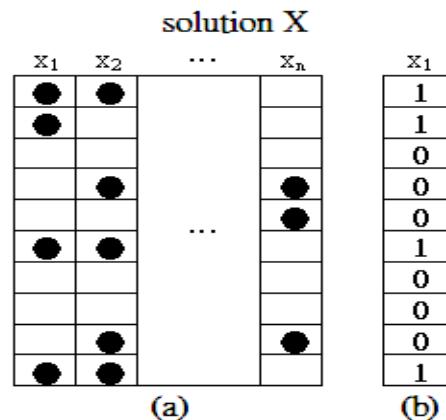


圖 4 完整之風機配置矩陣

接著依次持續填滿矩陣，直至填滿為止。首先從第一行開始，隨機產生k組第一行解(column-solution, $X_1[i], i=1,2,\dots,k$)，會得到k組適合度的值。接下來從此k組行解中挑選符合某一品質門檻以上的行解。品質門檻的決定是利用事先給定的alpha值，符合門檻值即可放入RCL中，然後再從RCL中隨機選出一組行解，將選出的行解併入先前已配置行解的矩陣中，完成此行解的建構，接著反覆執行以上程序，直到整個矩陣解都被填滿為此。

有關各行解的適合度(Fitness)計算，是利用該行解與先前已確定的行解相連結，再運用連結後的解計算Fitness。假設計算第1行解的Fitness時，則可將透過第1行解的風機成本與發電量計算其Fitness；當增加第2行解計算其Fitness時，則將第1行選定後的行解與第2行解連結，透過第1與第2行解的總風機成本與總發電量計算其Fitness；每新增一行解時，計算其Fitness方式如同前述，將該行解與先前選定的解連結，以便計算其Fitness(見公式(1))，預估成本與發電量的比率，虛擬碼如圖5所示。

```

Procedure Greedy_Randomized_Construction( X )
1   j=1
2   While j ≤ n Do
3       Generate k column-solution, Xj[i], i=1,2,...,k ;
4       Evaluate the fitness value, Fitness[i],
        i=1,2,...,k;
5       Min = min{ Fitness[i] | i=1,2,...,k };
6       Max = max{ Fitness[i] / i=1,2,...,k };
7       RCL = { i | Fitness[i] ≤ Min + α(Max - Min) };
8       Select element s from RCL at random;
9       X ← X ∪ Xj[s];
10      j = j + 1
11  END;
12  return X;
end Greedy_Randomized_Construction

```

圖 5 貪婪隨機建構解流程的虛擬碼

3.2.2 階段二 區域最佳解搜尋

本階段利用選擇的區域搜尋策略與VNS為基礎，虛擬碼如圖6所示。

```

Procedure Variable_Neighborhood_Search(X)
1   /* do iterative VNS */
2   submatrixSWAP( X, LSTime);
3   submatrixCOPY(X, LSTime);
4   return X;
end Variable_Neighborhood_Search

```

圖 6 貪婪隨機建構解流程的虛擬碼

當建構完成一個初始解來到階段二時，本研究設計將針對目前最佳解做進一步的演化與改善，階段二將持續執行，透過VNS的概念讓每項選擇的策略更有效的找尋最佳解，搜尋到一定次數連續沒有進步才會停止該策略，直到全部選擇策略執行完畢為止。

策略1. 子矩陣交換策略(submatrixSWAP)：

在完整矩陣中隨機選取兩塊相同大小之子矩陣，將兩子矩陣之區域互換，若解品質有改善則取代之，否則保留原解。重複此交換子矩陣的程序，直到連續數次(LSTime)無法繼續改善為止。

策略2. 子矩陣複製策略(submatrixCOPY)：

在完整矩陣中隨機選取兩塊相同大小之子矩陣，將兩者其矩陣中一塊子矩陣複製到另一塊子矩陣上，若

解品質有改善則取代之，並繼續回到策略一，否則保留原解。重複此複製子矩陣的程序，直到連續數次(LSTime)無法繼續改善為止。

4. 實驗結果

本章將針對三種不同的案例分別做研究探討，一、單一風向與單一風速；二、多風向與單一風速；三、多風向與可變風速的問題。

4.1 單一風向單一風速

首先為單一風向單一風速的問題，在此利用一個簡單的例子做為最佳化測試，將一列為 10 單元格的矩陣做為測試，計算該場域最佳化風車配置，透過窮矩法及本研究之 GRASP 演算法皆得知，該場域最佳化風車配置分別位於 1、6、10 三個位置。如圖 7 所示。此結果與過去文獻所述也相同。我們繼續用 GRASP 實際執行單一風向單一風速之配置問題，該問題為垂直(0°到 180°)之單一風向、平均風速為 12m/s 的情況，本實驗執行結果為圖 8，這樣的配置最佳化結果與 Emami[2]、Wang[9]、Huang[13]、Bilbao[17]、Grady[19] 等人相同。其執行結果風機數量(N)為 30 台、總發電量(Power Output)結果為 15091W、適合度(Fitness)為 0.0014637、整體效率(Efficiency)比也高達 97.03%如表 3。

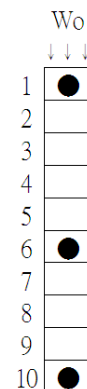


圖 7 簡易 10 單元格最佳化結果

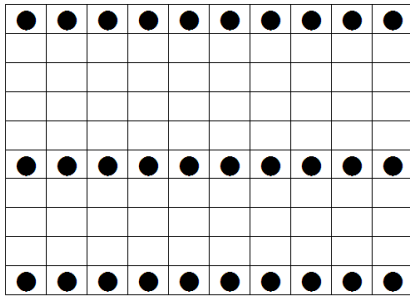


圖 8 本研究單一風向單一風速最佳化結果

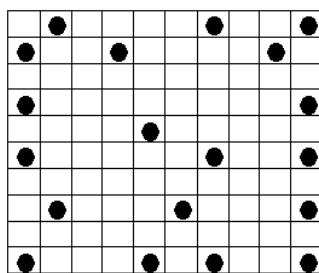
表 3 單一風向單一風速結果

Power Output	15091
Efficiency (%)	97.03
Number of turbines(N)	30
Fitness	0.0014637

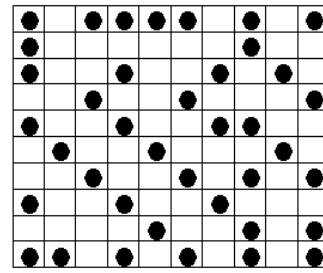
4.2 多風向單一風速

多風向單一風速的問題，針對在平均風速 12m/s 的情況下，將 360° 風向範圍平均分成 36 個不同的角度，計算其產生的發電量並且在各個不同角度發生機率相同的情況下找尋最佳解，本研究結果與 Mosetti[11]與 Grady[19]在多風向單一風速結果如圖 9 所示。

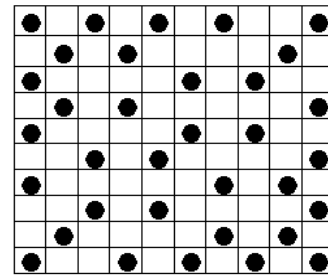
這樣的配置結果所產生的發電量與適合度，可以透過下表 4 清楚了解本研究與 Mosetti 與 Grady 之間的差異。從表中可以顯示出本研究的 Fitness 顯著的優於其它兩種結果，非但如此，在放置較多台風機並且還要保有其總發電量，其中間差異的效度、也可以透過此表了解在本研究不只能夠保有優良的適合度以外，在效度層面上，透過公式(4)可以得知最佳化後風機總數愈多，總發電電也會因為尾流影響而造成效度下降的可能，本研究在效度層面上保有在一定的比例之上，讓其效度不會產生極大的差異，。



(a)Mosetti



(b)Grady



(c)GRASP-OWTAP

圖 9 分別比較(a)Mosetti、(b)Grady、(c)GRASP-OWTAP 在多風向單一風速結果

表 4 多風向單一風速結果

	Mosetti	Grady	GRASP-OWTAP
Power Output	9245	17220	15936
Efficiency (%)	94	83	90.42
Number of turbines(N)	19	39	34
Fitness	0.001737	0.001567	0.001517

4.3 多風向可變風速

最後不只存在多風向還存在風速是可變動的問題，在這樣的情況下還需要考慮在不同的風速下其各種角度所產生的發生機率皆各有不同，從下面圖10中可以清楚的看到，風向角度從270°到350°度其發生的機率較其它風向角度為高，因此必需仔細考慮與計算其發生機率以找出最佳配置。

針對多風向可變風速，本研究結果與 Mosetti[11]與 Grady[19]在多風向單一風速最佳化配置風機結果如圖 11 所示，本研究與文獻上針對多風向可變風速所產生出的總發電量與適合度以及風機數量跟總體效度，都可以透過表 5 清楚了解本研究與 Mosetti[11]與 Grady[19]之間的差異。這樣的比較結果與多風向單一風速最後呈現的表現相同，可以清楚看到本研究的適合度

顯著的優於其它兩種結果，不只如此，Grady[19]在放置較多台風機時所產生效度大幅下降的情形，在本研究非但具備最高的發電量，在效度層面上也保有在一定的比例之上。

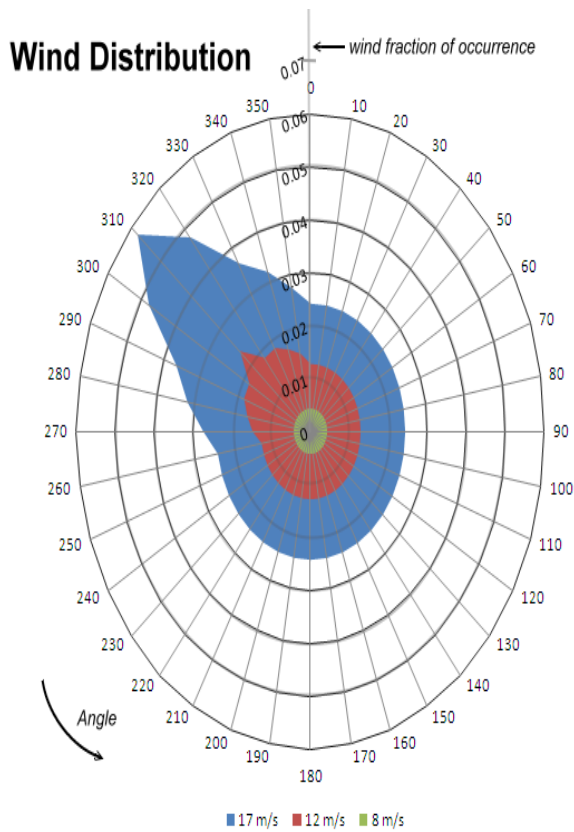
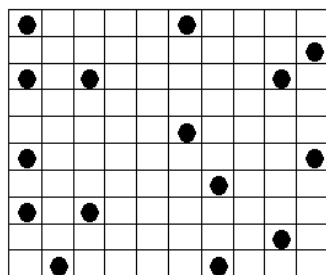
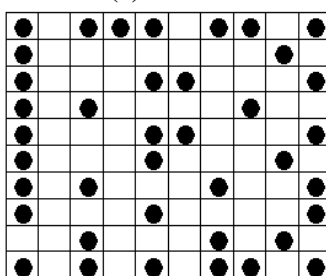


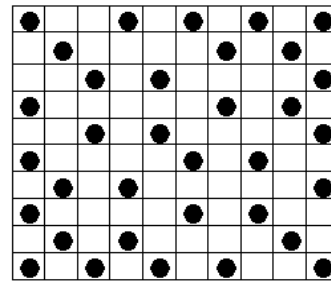
圖 10 多風向可變風速



(a) Mosetti



(b) Grady



(c) GRASP-OWTAP

圖 11 分別比較(a)Mosetti、(b)Grady、(c)GRASP-OWTAP 在多風向可變風速結果

表 5 多風向可變風速結果比較

	Mosetti	Grady	GRASP-OWTAP
Power Output	13460	32038	32608
Efficiency (%)	94.62	86.62	90.52
Number of turbines(N)	15	39	34
Fitness	0.000994	0.000803	0.0007416

5. 結論

本文提出一個以貪婪隨機調變搜尋法 (GRASP) 為基底的超經驗演算法來解決風電場最佳配置的問題，利用 GRASP 演算法的機制來解決三種不同風速與風向分佈的問題。

本研究結果證明，GRASP 能夠產生風力發電機最佳配置，在面對龐大獨立變數的情況下，GRASP 仍能快速且有效的展現效能。此研究結果也顯示出，利用 GRASP 所找出的配置與其它不同演算法的配置比較，GRASP 可以找出較佳的解。

6. 致謝

感謝國科會 (計畫編號 NSC 98-2410-H-260-018-MY3) 補助本論文之研究。

7. 文獻

- [1] 余勝雄. “我國風力發電現況及展望,” 永續產業發展雙月刊No.35, 2006, pp. 16-21.
- [2] A. Emami, P. Noghreh. “New approach on optimization in placement of wind

- turbines within wind farm by genetic algorithms,” *Renewable Energy*, Volume 35, Issue 7, 2010, pp. 1559-1564.
- [3] B. Sareni, A. Abdelli, X. Roboam, D. H. Tran. “Model simplification and optimization of a passive wind turbine generator,” *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 12, 2009, pp. 2640–2650.
- [4] C. E. Zoumas, A. G. Bakirtzis, J. B. Theocharis and V. A. Petridis, “A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem,” *Power Systems, IEEE Transaction on*, 2004, pp. 1356–1364.
- [5] C. Sourkounis, B. Ni, “Iterative adapting power control for wind energy converters based on stochastic optimization,” *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006., International Conference, 2006*, pp. 1-6.
- [6] C. Wan, J. Wang, G. Yang, X. Li, X. Zhang. “Optimal micro-siting of windturbines by genetic algorithms based on improved wind and turbine models,” *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese control Conference. Proceedings of the 48th IEEE Conference, 2009*, pp. 5092-5096.
- [7] C. Wan, J. Wang, G. Yang, X. Zhang. “Optimal Micro-siting of Wind Farms by Particle Swarm Optimization,” *International Conference on Swarm Intelligence, 2010*, pp. 198-205.
- [8] F. A. Farret, L. L. Pfitscher, D. P. Bernardon, “An heuristic algorithm for sensorless power maximization applied to small asynchronous wind turbogenerators,” *Industrial Electronics, 2000., Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium, 2000*, pp. 179-184.
- [9] F. Wang, D. Liu, L. Zeng. “Modeling and Simulation of Optimal Wind Turbine Configurations in Wind Farms,” *World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, 2009*, pp. 1-5.
- [10] G. L. Cravo, G. M. Ribeiro, L. A. N. Lorena, “A greedy randomized adaptive search procedure for the point-feature cartographic label placement,” *Computers & Geosciences*, Volume 34, Issue 4, 2008, pp. 373-386.
- [11] G. Mosetti, C. Poloni, B. Diviacco. “Optimization of wind turbine positioning in large wind farms by means of a genetic algorithm,” *Wind Eng Ind Aerodyn*, Volume 51, Issue 1, 1994, pp. 105-116.
- [12] H. M. Negm, K. Y. Maalawi. “Structural design optimization of wind turbine towers,” *Computers and Structures*, Volume 74, Issue 6, 2000, pp. 649-666.
- [13] H. S. Huang, “Distributed Genetic Algorithm for Optimization of Wind Farm Annual Profits,” *Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007., International Conference on Volume, 2007*, pp. 1-6.
- [14] I. Takewaki, “Optimal frequency design of tower structures via an approximation concept,” *Computers and Structures*, Volume 58, Issue 3, 1996, pp. 445-452.
- [15] J. M. Yang, J. Wu, P. Dong, J. H. Yang, “Passivity-based control in wind turbine for maximal energy capture,” *Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004., Proceedings of the 2004 IEEE International Conference, 2004*, pp. 800-803.
- [16] K.A. Nigim, P. Parker, “Heuristic and probabilistic wind power availability estimation procedures: Improved tools for technology and site selection,” *Renewable energy, 2007*, pp. 638-648.
- [17] M. Bilbao, E. Alba, “Simulated Annealing for Optimization of Wind Farm Annual Profit,” *Loqistics and Industrial Informatics, 2009.*, pp. 1-5.
- [18] N. Sinha, R. Chakrabarti and P. K. Chattopadhyay, “Fast evolutionary programming techniques for short-term hydrothermal scheduling,” *Power Systems, IEEE Transaction on, 2003*, pp. 214–220.
- [19] S. A. Grady, M. Y. Hussaini, et al., “Placement of wind turbines using genetic algorithms.” *Renewable Energy*,

- Volume 30, Issue 2, 2005, pp. 259-270.
- [20] T. A. Feo , M. G. C. Resende, “A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem,” *Operations Research Letters*, Volume 8, Issue 2, 1989, pp. 67-71.
- [21] T. A. Feo , M. G. C. Resende, “Greedy randomized adaptive search procedures,” *Journal of Global Optimization* 6, 1995, pp. 109 – 133.
- [22] Tsung-Ying Lee. “Short term hydroelectric power system scheduling with wind turbine generators using the multi-pass iteration particle swarm optimization approach,” *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 4, 2008, pp. 751-760.
- [23] U. A. Ozturk, B. A. Norman, “Heuristic methods for wind energy conversion system positioning,” *Electric Power Systems Research*, Volume 70, Issue 3, 2004, pp. 179-185