

應用模擬退火法進行地下超高壓變電所接地系統最佳規劃設計

Optimal Planning and Design of Grounding System for Underground EHV Substation Based on Simulated Annealing Method

陳建勳
Chien-Hsun Chen

國立台北科技大學 電機工程系
台灣 台北市
Department of Electrical Engineering
National Taipei University of
Technology
Taipei, Taiwan
yoshine76@gmail.com

韓佳佑
Gia-Yo Han

國立台北科技大學 電機工程系
台灣 台北市
Department of Electrical Engineering
National Taipei University of
Technology
Taipei, Taiwan
t6319017@ntut.edu.tw

周至如
Chih-Ju Chou

國立台北科技大學 電機工程系
台灣 台北市
Department of Electrical Engineering
National Taipei University of
Technology
Taipei, Taiwan
cjchou@ntut.edu.tw

摘要

本文針對地下超高壓變電所接地系統進行最佳規劃設計，其中應用「模擬退火法」(Simulated Annealing Method)為基礎以搜尋出最佳規劃模式。文中將接地網規劃成最佳化模式，以經濟(成本)為目標，並以安全因素及配置規格為限制條件，使規劃的接地網能達到最低的成本且又能符合安全及配置規格的限制條件，其中安全因素將考慮地電位昇、接觸電壓及步間電壓。文中將發展以模擬退火法為基礎的運算求解搜尋法則，並以電腦程式 MATLAB 為工具開發最佳規劃程式，最後經由實例的規劃設計證明本論文所發展的規劃設計法優於傳統的規劃設計法。

關鍵詞：接地系統、地電位昇、接觸電壓、步間電壓、模擬退火法

Abstract

In this paper, the optimal planning and design of grounding system for underground extra-high voltage (EHV) substation based on simulated annealing (SA) method is proposed. The planning and design problems of grounding system will be formulated as a optimization problem with cost function and constraints of safety and grid configuration specifications, from which we can obtain a ground grid with lowest cost and satisfying all the constraints of safety and grid configuration specifications. The safety specifications include ground potential rise (GPR), touch voltage and step voltage. The searching algorithm based on the SA method is developed by the program of MATLAB. Finally a practical case of planning and design of grounding system of a typical underground EHV substation using SA method and conventional method are implemented. The results by conventional method are compared to the results of the SA method to verify the superiority of proposed SA method.

Keywords: Ground System, Ground Potential Rise, Touch Voltage, Step Voltage, Simulated Annealing Method

I. 前言

變電所接地系統的主要目的，在於確保人員生命及機器設備之安全。隨著生活水準之提高及都市經濟活動之頻繁，且都會區電力需求量快速增加，在都會區設置超高壓變電所漸成發展趨勢，但因都會區寸土寸金，用地取得不易，且因都市景觀意識、環境品質意識加上居民抗爭，變電所朝室內地下發展已是必然趨勢。目前台電積極推動屋內式變電所並朝地下化發展，地下超高壓變電所接地設計考量問題很多，特別是安全相關的問題更為重要。因地下化變電所沒有廣大面積埋設接地網，其接地電阻無法降得很低，連帶使得地電位昇(Ground Potential Rise, GPR)、接觸電壓(Touch Voltage)及步間電壓(Step Voltage)較不易解決，此為建置地下化變電所優先考慮的問題之一。超高壓輸電系統發生故障時，流入地網的故障短路電流非常大，包括在平時運轉接地故障、雷擊及開關操作時可能發生的安全問題，所以在接地系統規劃的階段就必須加以考慮。

另外接地網的成本可從數百萬至數千萬，彈性很大，若能適當設計可以節省大量費用。本研究採用模擬退火法(Simulated Annealing, SA)，並依據 ANSI/IEEE Std.80-2000[1]規範安全標準當做限制函數，包括接地電阻、步間電壓、接觸電壓及地電位昇；另外再以接地網系統的材料成本、熔接成本及開挖成本當作成本函數，以成本函數作為設計目標，運用模擬退火法達成具有經濟性考量且考慮安全限制條件下，完成最佳化的設計規劃。

II. 接地系統最佳規劃設計問題描述

本章將地下超高壓變電所的接地系統規劃表示成最佳化模式，首先建立相關的目標函數及限制函數，然後以模擬退火法(SA)為基礎搜尋最佳解。

2.1 目標函數之建立

以接地網的建設成本做為目標函數(成本函數， $F(Gr, a, h)$)，目標函數包含材料成本及施工成本，材料成本正比於導體的總重量或總體積，施工成本包含開挖成本及熔接成本，而開挖成本又正比於導體的總長及埋設深度，熔接成本正比於熔接點數及導體的截面積。故成本函數可表現如下：

$$F(Gr, a, h) = k_1 \cdot a \cdot L + k_2 \cdot h \cdot L + k_3 \cdot a \cdot nd \quad (1)$$

式中 k_1 : 為材料成本之權重係數
 k_2 : 為開挖成本之權重係數
 k_3 : 為熔接成本之權重係數
 a : 導體截面積(m^2)
 h : 埋設深度(m)
 L : 導體總長(m)
 nd : 熔接點數

2.2 限制條件之建立

如前述接地網的限制條件包括：接觸電壓、步間電壓、接地電阻與地電位昇(GPR)的限制以及接地網配置規格的限制，以數學式描述如下：

$$V_{touch} \leq E_{touch} \quad (2)$$

$$V_{step} \leq E_{step} \quad (3)$$

$$R_g < R_{gs} \quad (4)$$

$$GPR < GPRs \quad (5)$$

$$\underline{Gr}(i) \leq Gr(i) \leq \overline{Gr}(i) \quad i=1 \sim n \quad (6)$$

式中 V_{touch} : 接地網接觸電壓(V)
 E_{touch} : 接地網接觸電壓規格標準值(V)
 V_{step} : 接地網步間電壓(V)
 E_{step} : 接地網步間電壓規格標準值(V)
 R_g : 接地網接地電阻值(Ω)
 R_{gs} : 接地網接地電阻值規格標準值(Ω)
 GPR : 接地網地電位昇(V)
 $GPRs$: 接地網地電位昇規格標準值(V)
 $Gr(i)$: 第 i 區域接地網的配置型式規格變數向量
 $\overline{Gr}(i)$: 第 i 區域接地網的配置型式的上限值向量
 $\underline{Gr}(i)$: 第 i 區域接地網的配置型式的下限值向量
 N : 區域數目

2.3 接地網配置型式規劃之限制條件建立

接地網配置型式規格的規劃，依下列步驟建立限制條件：

- (1) 劃分接地區域並編號。
- (2) 沿著被規劃區域的外圍界線佈設導體。
- (3) 標示重要設備位置及其佔地面積。
- (4) 任何重要設備及設施之處應埋有接地導體，且設備及設施佔地面積每超過一定值(本論文設定為 $30m^2$)應再增埋一條導體穿過該設備或設施位置。
- (5) 任何網格的最大間距應小於該區面積等效半徑。
- (6) 相鄰兩區之分界線應埋有導體。
- (7) 無重要設備或設施的地方，網格間距應大於某設定值(本論文設定為 $10m$)。
- (8) 各區域之接地網導體截面積應在設定範圍內如下式：

$$a_i < a_i < \overline{a_i} \quad (7)$$

式中 a_i : 第 i 區接地網導體截面積(mm^2)
 $\underline{a_i}$: 第 i 區接地網導體截面積下限值(mm^2)
 $\overline{a_i}$: 第 i 區接地網導體截面積上限值(mm^2)
 (9) 各區域接地網埋設深度在設定範圍內，即
 $\underline{h_i} \leq h_i \leq \overline{h_i} \quad (8)$
 式中 h_i : 第 i 區接地網埋設深度(m)
 $\underline{h_i}$: 第 i 區接地網埋設深度下限值(m)

$\overline{h_i}$: 第 i 區接地網埋設深度上限值(m)

2.4 模擬退火法介紹

模擬退火法最早是在 1953 年由 N. Metropolis 等人提出[2]，而後也有許多學者將之應用在組合問題的最佳化及超大型積體電路(VLSI)設計[3]其原理乃利用物質進行退火處理程序(Annealing Process)時，粒子可以自由活動並隨著溫度逐漸下降形成低能態(Low Energy State)的結晶體，最後粒子會排列成能量最低而且具有結晶架構的基態(Ground State)，此時此刻，吾稱該物質已達到冷凝(Freezes)。模擬物質退火形成結晶過程的程序包括兩個步驟：

- (1) 首先是將物質加熱至最高溫，溶解成液體狀態，使粒子呈現無序排列。
- (2) 再將該物質溫度緩慢地降低，直到物質的粒子排列成結晶體形成基態(冷凝狀態)。

2.4.1 演算法則

貪婪搜尋法

在每一種溫度情況下由目前系統 S^* ，經隨機擾動產生新的架構 S_1 ，假設目前架構的能量函數為 $E(S^*)$ ，新架構的能量函數為 $E(S_1)$ ，計算前後兩次狀態的能量增量 $de = E(S_1) - E(S^*)$ ，若新架構的能量比前一次架構能量低，即 $de < 0$ ，則接受新架構， S^* 就被 S_1 取代，這種搜尋最佳值的方法稱為貪婪搜尋法，它有個缺點即僅朝著目標函數(能量函數或成本函數)的遞減方向搜尋，因此找到的解經常是局部最佳解而不是全域性的最佳解。

波茲曼分佈選擇條件

模擬退火法即改善前述貪婪搜尋法，應用波茲曼分佈選擇條件[4]跳出局部最佳解，求得全域性的最佳解，以下式說明波茲曼分佈：

$$BF = \exp(-de/Tk) \quad (9)$$

式中 BF : 波茲曼機率分佈在 $[0,1]$ 之間

Tk : 溫度控制係數

模擬退火法演算法則

模擬退火法(SA)應用前述貪婪搜尋法，並加入波茲曼機率分佈選擇條件，求得全域性的最佳解，當能量增加(成本增加) $de < 0$ ，則接受新架構，即 $S^* = S_1$ ，但若能量增量(成本增量) $de \geq 0$ ，則從 $[0,1]$ 平均分配區間隨機選擇一常數 r ，如果 $BF \geq r$ 仍接受新架構(即 $S^* = S_1$)，若 $BF < r$ 則拋棄新架構，保留擾動前的架構再繼續下一次擾動，由於是機率性選擇來決定是否接受 S_1 成為新架構，因此模擬退火法疊代的次數足夠多是可以跳出局部最佳解，而朝向所要的全域性的最佳解。以下是模擬退火演算法步驟：

步驟 1：初始狀態

設一個初始狀態或解 S^* 及一個足夠高的初始溫度 To 。

步驟 2：當未凝結之前執行步驟 3-7。

步驟 3：當未平衡之前執行步驟 4-6。

步驟 4：鄰域解

從目前狀態 S^* 隨機擾動產生鄰域狀態 S_1 。

步驟 5：接受標準

5.1: 令 $de = E(S_1) - E(S^*)$

5.2: 假如 $de < 0$, 則 S_1 被接受, 即 $S^* = S_1$

5.3: 假如 $de \geq 0$, 則比較 BF 與 r 值

$$r = \text{random}[0,1) \quad BF = \exp(-de/T_k)$$

若 $BF > r$, 則 S_1 仍被接受, 即 $S^* = S_1$

若 $BF \leq r$, 則拋棄 S_1 , 保留擾動前的原解 S^*

步驟 6: 平衡

假如接受率小於預設值或執行次數足夠多, 即到達平衡, 未平衡則重複步驟 3。

步驟 7: 凝結

檢查是否收斂到全域最佳狀態解。假如收斂到全域最佳狀態解, 即達到凝結點(Freezing Point), 則演算法結束得到最佳解。否則繼續做降溫程序(Cooling Down)再重複步驟 2。

2.4.2 模擬退火法之應用

模擬退火法可應用在可微分或不可微分的問題上, 是一種最佳化技術[4], 規劃設計大型接地網即是一種不可微分的問題, 因此以微分梯度的演算法並不適用, 本文利用模擬退火法技術應用在接地網之設計, 以傳統接地網之設計(等距離、等深度), 埋設裸銅線及接地銅棒, 在不影響安全規定下, 以模擬退火法經規劃設計後適量減少裸銅線及接地銅棒之數量, 並考量投資成本, 以投資成本作目標函數, 並以接觸電壓、步間電壓、接地電阻、地電位昇(GPR)及接地網配置規格限制標準做限制條件, 進行大型接地網的最佳規劃設計, 其演算法之步驟如下:

步驟 1: 輸入資料

輸入地網面積、設備佔地面積及座標、大地電阻係數、地面電阻係數、接地故障電流、初值地網間距、地網埋設深度、故障持續時間、地網截面積、接觸電壓限制標準值、接地電阻限制標準值、地電位昇(GPR)限制標準值、步間電壓限制標準值、地網導體價格係數、開挖成本係數及熔接成本係數。

步驟 2: 擾動

規劃建立接地網的配置型式 Gr (副程式)。

步驟 3: 產生可行解

測試接地網的配置型式 Gr 是否符合安全限制標準及所建立接地網配置型式 Gr 的接觸電壓 V_{touch} 、接地電阻 R_g 、地電位升(GPR)及步間電壓 V_{step} 是否符合規格標準值。其中有任一條件不符合, 則重複步驟 2。

步驟 4:

(1) 計算目標函數(成本函數 $F(Gr, a, h)$)

(2) 計算前後次成本增量

$$dc = F_i(Gr, a, h) - F_{i-1}(Gr, a, h) \quad (10)$$

(3) 計算波茲曼分佈

$$BF = \exp\left(-\frac{dc}{T_k}\right) \quad (11)$$

(4) 在 $[0,1)$ 間隨機取值 $r = \text{random}[0,1]$ (12)

步驟 5: 接受新解

若成本增量 dc 小於 0 或波茲曼分佈 BF 大於 r , 則接受新的配置型式 Gr , 否則保留原先的配置型式 Gr 。

步驟 6: 平衡

計算接受率 cp 是否小於或等於 0.1 或是擾動次數已達到預設值接受率。接受率 $cp \leq$ 接受次數的總數/符合

限制式的個數總數。

步驟 7: 凝結

在連續降溫 5 次, 每次成本都大於原先地網型式 Gr 成本值, 則稱已達凝結, 停止程式執行, 得到最佳地網型式 Gr 。否則繼續降溫即 $T_{(k+1)} = \alpha \cdot T_k$, α 介在 0.88~0.99 之間, 繼續步驟 2

2.4.3 規劃接地網配置型式(副程式)

地網配置型式的建立是依 2.3 節所建立之限制條件而規劃, 建立的步驟過程如下所述, 而流程圖則如下所示。

步驟 1: 規劃初態地網

(1) 分區及編號, 計算每區面積 A_i 及等效半徑 r_i 。

$$r_i = \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} \quad (13)$$

(2) 決定導體截面積 a_i , 其值為 $\underline{a}_i < a_i < \bar{a}_i$, a_i 可依商品規格隨機決定或直接設定為固定值。

(3) 決定埋設深度 h_i , $0.25 \leq h_i \leq 2m$, h_i 可由 0.25~2m 之間每隔 0.05m 做隨機選擇, 亦可直接設定為固定值。

(4) 對每區取適當長為網目間距 D_i , 其值介在 1m 與等效半徑 r_i 之間。

步驟 2: 設定禁止被剔除的導體條件

設定環繞在該區域的外圍地網導體及重要設備下的地網導體為禁止被剔除旗標。

步驟 3: 隨機剔除導體

以隨機方式剔除初態地網中的任意節點及與其交叉之四根導體, 若剔除者為禁止剔除旗標之導體則保留, 否則剔除。

步驟 4: 計算剔除面積 A_{di} 及等效間距 D_{di}

$$D_{di} = \sqrt{A_{di}} \quad (14)$$

步驟 5: 比較剔除面積等效間距 D_{di} 與鋪設地網區域面積之等效半徑 r_i , 若 $D_{di} \leq r_i$ 則執行步驟 6, 否則執行步驟 3。

步驟 6: 計算導體總長 L_i 與熔點數 N_{di} 。

步驟 7: 輸出配置型式 $Gr(i)$

$$Gr(i) = [A_i, D_{di}, A_i, H_i, L_i, N_{di}] \quad (15)$$

III 實例規劃與比較

首先對於變電所之配置及接地需求加以描述, 然後分別用本文所提的模擬退火法與傳統方法規劃設計, 並將規劃設計結果加以比較, 以證明所提方法之優越性。

3.1 設計案例說明

參考台電公司超高壓變電所之地網佈置規定[5-7], 本文以一典型地下立體式超高壓變電所為例, 將變電所內各設備位置在不同樓層形成立體式之架構, 此外, 因各設備分別設置在各樓層, 其接地必須靠設置樓板導體(Slab Main Conductor)及結構牆導體(Wall Main Conductor)透過各樓層接地銅排連接至主地網, 其主體架構如圖 1 所示。圖中地下化 E/S 建置為深入地下 35m 係地下七層樓的建築物, 其中四台 MTR 設置在地下六樓佔三層樓的高度、電纜整理室位於地下四樓、345kV GIS 設置於地下三樓佔三層樓的高度、161kV GIS 設置於地下三樓佔二層樓的高度以及主控制室位於一樓, 主要設備佈置樓層參見表 1。

在地下超高壓變電所設有主地網及變電所周圍地面地網，主地網位置在變電所地下 1m 處，即是埋設深度距離約地面 35m，主地網面積為 80m×45m，另考量地面行人安全加設一地表地網，地表地網設置為主地網四周邊界加上 20m 即為 120m×85m。主地網與小地網佈設皆使用裸銅導線其截面積為 100mm²，二地網以互連導體相連接。規劃設計 345kV 地下變電所接地網所依據的資料，列出於下表 2。

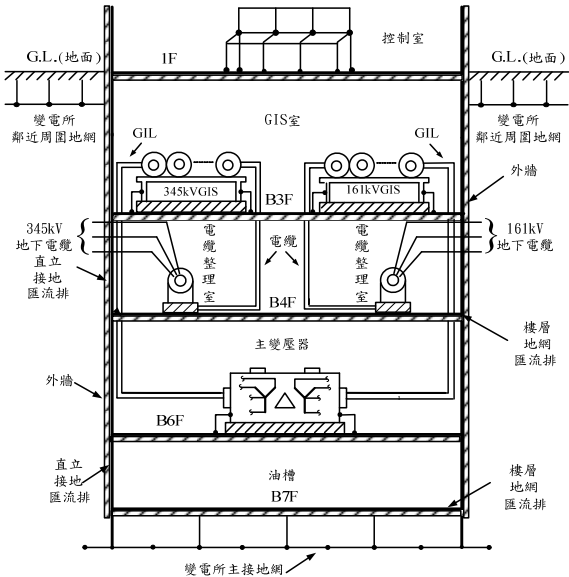


圖 1 典型地下超高壓變電所之配置及接地系統圖

表 1 典型地下超高壓變電所樓層配置

樓層	功用	高度(m)
1 樓	控制室	4
地下 1~3 樓	345kV 及 161kV 氣封絕緣開關設備 (GIS)	9
地下 4 樓	345kV 電纜及 161kV 電纜整理室	4.55
地下 5~6 樓	4 部主變壓器	9
地下 7 樓	冷卻機房、油槽、消防泵浦	2.8
筏式基礎 底下 1m	主地網	

3.2 模擬退火法模擬結果

規劃設計是依各設備特性進行，經 SA 模擬結果的最佳化型式再以導體總長變化不超過 30%情況下，做接地網導體調整，所得結果如圖 2 及圖 3，接地網導體總長 $L_t=1,995\text{m}$ ，接觸電壓 $V_{\text{touch}}=696\text{V}$ ，接地電阻 $R_g=0.51\Omega$ ，地電位昇 $\text{GPR}=3,513\text{V}$ ，步間電壓 $V_{\text{step}}=201\text{V}$ ，投資總成本(NT\$)FT=1,028,110 元，各項數據如表 3 所列。

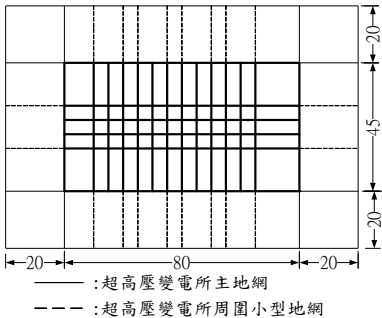


圖 2 經 SA 模擬的最佳化接地網型式

表 2 典型地下超高壓變電所樓層配置

地網面積(m ²)	10,200
重要設備佔地面積(m ²)	600
接地故障電流值(kA)	63
故障清除時間(sec)	0.5
電力系統分流率	0.9
接地系統安全係數	5.0
大地電阻係數(Ω·m)	100
地面電阻係數(Ω·m)	3,000
地網埋設深度(m)	1
地棒長度(m)	2.4
地棒半徑(m)	0.0794
導體截面積(m ²)	0.0002
接觸電壓限制標準值(V)	902
接地電阻限制標準值(Ω)	0.71
地電位昇限制標準值(V)	4510
步間電壓限制標準值(V)	3117
導體價格係數(NT\$/m ³)	1,336,000
開挖成本係數(NT\$/m ³)	200
熔接成本係數(NT\$/m ³)	13,000

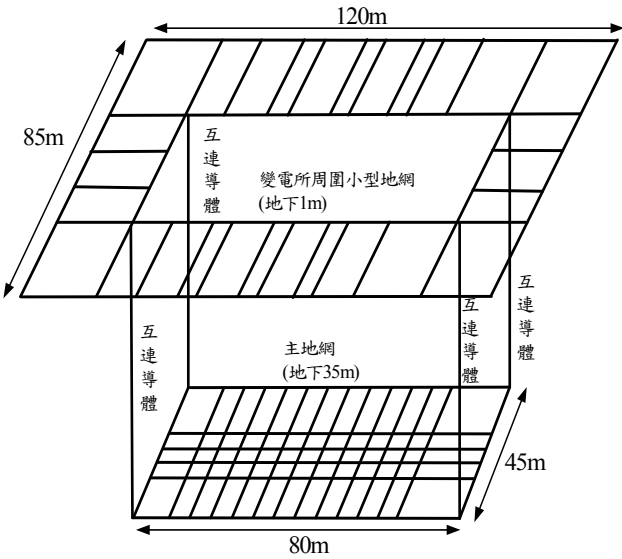


圖 3 SA 最佳化模擬地下超高壓變電所地網分布示意圖

表 3、接地網經 SA 模擬規劃結果

接地網型式	SA 模擬的最佳化接地網型式
接地網導體長度(m)	1,995
接觸電壓(V)	696
接地電阻(Ω)	0.51
地電位昇(V)	3,513
步間電壓(V)	201
投資成本(NT\$)	1,028,110

3.3 傳統接地網規劃設計結果

依據傳統接地網規劃設計法，以合乎各項接地安全的步間電壓及接觸電壓限制標準，設計如圖 4 及圖 5。計算各項數據(步間電壓、接觸電壓、地電位昇及接地電阻)，如表 4 所列為傳統接地網設計結果。

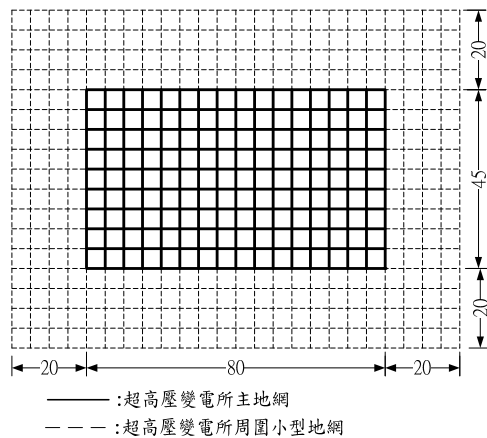


圖 4、傳統接地網規劃設計型式

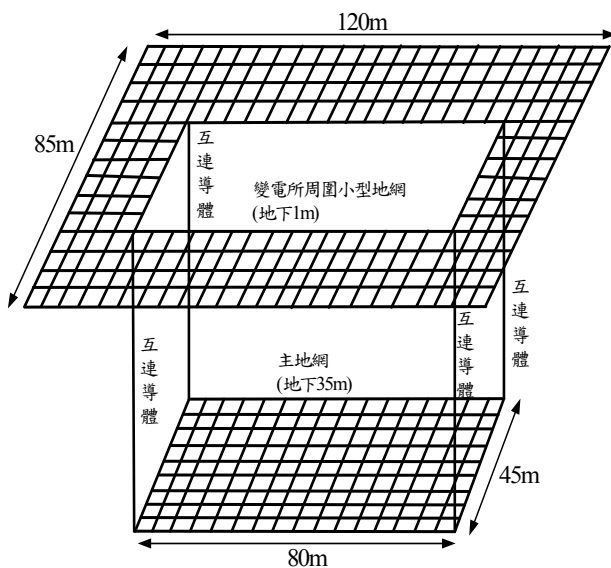


圖 5 地下超高压變電所傳統地網分布示意圖

表 4、傳統接地網設計規劃結果

接地網型式	傳統接地網設計
接地網導體長度(m)	4,285
接觸電壓(V)	105
接地電阻(Ω)	0.467
地電位昇(V)	2,942
步間電壓(V)	187
投資成本(NT\$)	2,002,313

3.4 模擬退火法與傳統接地網設計結果比較及檢討

傳統接地網步間電壓、接觸電壓、GPR 及接地電阻之限制條件，這些限制條件滿足的程度及其成本，與模擬退火法規劃設計的接地網比較如表 5 所示，表中顯示在總成本方面，模擬退火法可使成本約可降低達 20% 以上，除成本降低外，本研究的規劃設計尚有一特點，即能就各區域特性及重要性作適當調整，納入最佳化的設計。例如比較圖 2 及圖 4 可發現，本研究可就重要設備最佳化的加強設計，但傳統方法僅能於均勻網格設計後再補強，而因此成本會再增加。故本研究的規劃設計具有相當的優越性。

表 5 模擬退火法規劃設計結果與傳統規劃設計結果比較

規劃設計法 比較項目	模擬退火法	傳統規劃
接地網導體長度(m)	1,995	4,285
接觸電壓(V)	696(902)	105(902)
步間電壓(V)	201(3117)	187(3117)
地電位昇(V)	3,513(4510)	2,942(4510)
接地電阻(Ω)	0.51(0.71)	0.467(0.71)
投資成本(NT\$)	1,028,110	2,002,313

註:括弧內之數據為限制標準值

IV 結論

目前接地系統的設計大多依據規劃者以往經驗或傳統方法來設計，對於接地建設成本，都未做精細評估；本研究對於典型地下超高压變電所接地設計已成功應用模擬退火法建立地網設計模式及發展電腦程式可提供給實際規劃設計參考之用，設計結果符合各相關安全因素，包括地電位昇、接觸電壓、步間電壓、地表電位，並且考量成本因素與設備配置情況，將接地網的規劃設計與重要設備配置取得協調，並將建置成本降置最低。

V 誌謝

本論文蒙國科會資助，計劃編號 NSC97-2221-E-027-104

參考文獻

- [1] ANSI/IEEE Std.80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," by IEEE Society, New York, 2000.
- [2] N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A.H. Teller and E. Teller, "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines," *The Journal of Chemical Physics*, vol.21, no.6, 1953, pp. 1087-1092.
- [3] R.F. Lee, "Grounding of Computers and Other Similar Sensitive Equipment," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.1A-23, no.3, May.1987, PP.408-411.
- [4] T. Satoh and K.Nara, "Maintenance Scheduling by Using Simulated Annealing Method," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol.5, no.2, 1991, pp.850-857.
- [5] 陳清嚴、林水秀、江榮城，「地網設計實務與模擬分析」，台電工程月刊，第 655 期，Mar. 2003，第 20-39 頁。
- [6] 周至如，「161kV 以上的室內立體式變電所接地系統規劃」，電機月刊，146 期 2 月號，2003，第 186-201 頁。
- [7] 台灣電力公司，變電所接地系統設計準則，2005。