

# 變電站之接地系統與直流系統計算模擬

財團法人台灣機電工程服務社 龍桃溪  
大同大學電機工程研究所碩士

## 壹、前言

一般的接地設計，首先收集基地之大地參數，其後依照接地之規模選擇接地施工法，再據以繪製接地設計圖，按圖施作接地工程，此乃普遍採用之程序。接地設計必須考慮經濟性、可靠性、安全性等，如將過多之接地電極佈設於大地中，則不合經濟原則。且因變電站其重電設備甚多，為考量工作人員之安全，需考慮大地參數易受環境變化影響及人體承受電流之容忍程度，因此要將接地電阻精確計算並加以量化實感困難。

直流系統是整個電力系統的一部分，它與交流系統相互連接，為儀控電路、開關設備及備援系統提供穩定可靠之電源。直流系統包括電源（蓄電池組及充電機）、分電盤、直流負載。目前蓄電池組容量計算，係由已知工作週期來決定電池容量之方法，以適當之次序在負載圖上表示出每一期間內所需最大電流。計算方式簡述如下：在任何工作週期且不同期間內，後段之負載皆較前段之負載所需電流為大，則所需容量可個別計算後加總合計，而得到蓄電池組之總容量，亦等於負載電流（即後段之負載電流量減去前段之負載電流量）除以一係數（依放電時間與終止電壓查電池廠家之放電特性曲線得此係數）。此一計算方法並未考慮溫度對蓄電池組之溫度補償效應、電池老化、設計裕度，且假設蓄電池組之放電特性是呈線性關係。

以往對於接地與直流兩項系統之計算，多以經驗傳承或概估之方式決定其採用容量，並未引用國際標準（如 IEEE、IEC、JIS 等等）計算。為提升設計工作之效率及其結果之公信力與準確度，本文以 IEEE Std. 80-2000(接地系統)及 IEEE Std. 1115-2000(直流系統)之計算方法及計算步驟為依歸，再利用 Visual C#程式語言，編撰一套計算軟體作為輔助設計之工具。該程式除利用簡便、親切、易懂之對話框圖示作為人機介面之溝通外，且採用下拉式選單之方式點選需要輸入之數據，可避免因鍵盤輸入而發生之錯誤。使用者可以透過互動方式容易且快速地操作這套軟體，並可縮短日後因工作人員異動所造成學習上之銜接問題。

## 貳、計算方法

### 2.1 接地系統計算

#### 2.1.1 計算方法與步驟：

接地系統計算的程序，共分為九個步驟，如圖 1 表示之方塊圖所示，每一個步驟的工作內容，依流程圖說明如下 Step1. 決定地網形狀，長寬、面積、埋設深度、接地故障電流等必要之參數，則需下列各項資料：

1. 最終匯流排之單相接地故障電流值
2. 故障清除時間
3. 導線熔化溫度
4. 地網導體分流率
5. 周溫
6. 接地系統結構安全係數

7. 地表層土壤電阻率
8. 地棒半徑
9. 地棒數量
10. 地棒長度
11. 地網埋設深度
12. 地網面積
13. 地網接地導線直徑
14. 接地電阻規範值

### Step2. 計算相關接地電阻率

採用施蘭貝吉法 (Schlumberger Method) [1] 量測大地電阻率，再依 IEEE std.80-2000 eq.47 計算  $\rho_{a(av)}$  值。

$$\rho_{a(av)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} (\Omega\text{-m}) \quad (1)$$

其中

- $\rho_a$  : 土壤視在電阻率 ( $\Omega\text{-m}$ )  
 $n$  : 土壤視在電阻率之數據個數

### Step3. 依設計準則計算流經地網最大接地電流 $I_M$ (kA)。

1. 地網分流率  $K$  之大小，取決於許多的因素和參數[2]，包括：(A) 接地事故的發生地點。(B) 輸電線路之架空地線、地下電纜之遮蔽導體、配電饋線之中性線導線及其它接地回路徑之組抗大小。(C) 輸電線鐵塔塔基、配電線電桿桿角和電纜遮蔽導體之接地電阻的大小。(D) 鄰近或直接連接到地網之地下金屬管線的分流影響等。除此之外，亦有許多計算分流率的不同方法，但在實際應用上卻相當困難。可見在諸多不確定因素及參數的情況下，欲精確計算地網分流率實非易事。因此參考台電公司之接地設計準則

規定， $K$  值之選用依變電所內設有架空線連接站者其分流率  $K=0.7$ ，若無則分流率  $K=0.8$ ，若為全地下電纜引入者其分流率  $K=0.9$ 。

$$I_M = D_f \times I_F \times S_f = D_f \times I_F \times (1-K) \quad (2)$$

其中

$I_M$  : 流入接地網之故障電流量(A)

$D_f$  : 電流衰減因素

$I_F$  : 單相接地故障電流(A)

$S_f$  : 故障電流分佈因素

$K$  : 分流率

### Step4. 計算接地引線截面積 $A_c$ 及地網導線截面積 $A_m$ 。

1. 接地引線截面積  $A_c$  :

$$A_c = \frac{I_F (kA)}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)}} \quad (3)$$

2. 地網導線截面積  $A_m$  :

$$A_m = \frac{I_M (kA)}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)}} \quad (4)$$

其中

$I$  : 最大單相故障電流值(kA)

$T_m$  : 導線熔化溫度( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_a$  : 週溫( $^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha_r$  : 在參考溫度  $T_r$  下之電阻率熱係數( $1/^{\circ}\text{C}$ )

$\rho_r$  : 導體在參考溫度  $T_r$  下之電阻率( $\mu \Omega\text{-cm}$ )

$K_0 = 1/\alpha_0$  or  $(1/\alpha_0) - T_r (^{\circ}\text{C})$

$t$  : 故障清除時間(s)

TCAP : 每單位體積熱容,  $\text{J}/(\text{cm}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C})$

### Step5. 計算容許之步間電壓 (Tolerable Step Voltage) $E_{\text{step}}$ 及容許之接觸電壓 (Tolerable Touch Voltage)

$E_{Touch}(V)$ 。

$$1. C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 \times h_s + 0.09} \quad (5)$$

其中

$C_s$ ：表土層衰減因素

$\rho$ ：土壤電阻率 ( $\Omega\cdot m$ )

$\rho_s$ ：表層土壤電阻率 ( $\Omega\cdot m$ )

$h_s$ ：地表材質厚度 (公尺)

2. 以 70kg 之人員位置於表層土壤電阻率 ( $\rho_s$ ) 上，計算容許之步間電壓 (Tolerable Step Voltage)

$$E_{step} = \frac{(1000 + 6C_s \rho_s) \times 0.157}{\sqrt{t}} \quad (6)$$

3. 以 70kg 之人員位置於地面 ( $\rho_s$ ) 上，計算容許之接觸電壓 (Tolerable Touch Voltage)

$$E_{Touch} = \frac{(1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \times 0.157}{\sqrt{t}} \quad (7)$$

其中

$C_s$ ：表土層衰減因素

$\rho_s$ ：表層土壤電阻率 ( $\Omega\cdot m$ )

$t$ ：故障清除時間 (秒)

Step6. 計算接地網接地電阻  $R_g$ 。若  $R_g$  大於接地電阻目標值，必須調整地網結構。依 IEEE std.80-2000 eq.53、54、55、56 Shwarz 法計算接地網接地電阻值  $R_g$

$$1. R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_c} \left( \ln \frac{2L_c}{a'} + K_1 \frac{L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right) \quad (8)$$

其中

$R_1$ ：地網接地電阻值 ( $\Omega$ )

$\rho_1$ ：地網層土壤電阻率 ( $\Omega\cdot m$ )

$L_c$ ：水平地網總長度 (公尺)

$a' = \sqrt{hd}$   $h$ ：接地網埋設深度；

$d$ ：地網接地導線直徑

$K_1 = 1.41 - 0.04 (L_x/L_y)$

$K_2 = 5.5 + 0.15 (L_x/L_y)$

$L_x$ ：地網之 x 方向導體最大長度

$L_y$ ：地網之 y 方向導體最大長度

$A$ ：地網面積 (平方公尺)

2.

$$R_2 = \frac{\rho_2}{2\pi N_r \ell_r} \left\{ \ln \frac{4\ell_r}{b} - 1 + \frac{2K_1 \ell_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{N_r} - 1)^2 \right\} \quad (9)$$

其中

$R_2$ ：地棒接地電阻值 ( $\Omega$ )

$\rho_2$ ：地棒層土壤電阻率 ( $\Omega\cdot m$ )

$N_r$ ：地棒數量 (支)

$\ell_r$ ：地棒每支長度 (公尺)

$K_1 = 1.41 - 0.04 (L_x/L_y)$

$L_x$ ：地網之 x 方向導體最大長度

$L_y$ ：地網之 y 方向導體最大長度

$b$ ：地棒半徑 (公尺)

$A$ ：地網面積 (平方公尺)

$$3. R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left( \ln \frac{2L_c}{\ell_r} + K_1 \frac{L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right) \quad (10)$$

其中

$R_m$ ：地棒與地網互感之接地電阻值 ( $\Omega$ )

$L_c$ ：水平地網總長度 (公尺)

$$4. R_g = \frac{R_1 \times R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (11)$$

其中

$R_g$ ：接地網接地電阻值 ( $\Omega$ )

$R_1$ ：地網接地電阻值 ( $\Omega$ )

$R_2$ ：地棒接地電阻值 ( $\Omega$ )

Step7. 計算故障時電位昇 (GPR) 值。

$$V_{GPR} = I_M \times R_g \quad (12)$$

其中

$I_M$ ：流入接地網之故障電流量 (A)

$R_g$ ：接地網接地電阻值 ( $\Omega$ )

Step8. 判斷  $V_{GPR}$  電位昇值是否小於容許接觸電壓(Tolerable Touch voltage)  $E_{Touch}$ 。

Step9. 若  $GPR > E_{Touch}$  時，須計算接地網最大之網目平均電壓(Mesh Voltage)  $E_m$  及接地網最大之步間電壓(Step Voltage)  $E_s$ ，判斷是否  $E_m < E_{Touch}$  且  $E_s < E_{Step}$ 。若  $E_m > E_{Touch}$  或  $E_s > E_{Step}$  時須重新調整地網網目結構，使符合 Step 9 要求。

#### 1. 計算有效平行導線數 $n$

地網之幾何形狀若為正方形，則  $n_b = n_c = n_d = 1$

地網之幾何形狀若為矩形，則  $n_c = n_d = 1$

地網之幾何形狀若為 L 形，則  $n_d = 1$

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (13)$$

其中

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x L_y}{A} \right]^{0.7A_{L_x L_y}}$$

$L_p$ ：地網周長 (公尺)

$D_m$ ：地網任意兩點最大距離 (公尺)

#### 2. 計算係數 $K_m$ ， $K_i$ ， $K_s$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (14)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (15)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right] \quad (16)$$

其中

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = (1 + (h/h_0))^{0.5}$$

$h$  = 地網埋設深度(公尺)

$h_0 = 1m$  (地網參考深度)

$D$ ：地網之平均間隔 (公尺)

$d$ ：地網導體直徑 (公尺)

$n$ ：有效平行導線數

#### 3. 檢視地網最大網目平均電壓(Max Mesh Voltage) $E_m$

$$E_m = \frac{K_m K_i \rho I_M}{L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_r} \quad (17)$$

#### 4. 檢視地網最大步間電壓(Max. step voltage) $E_s$

依 IEEE std.80-2000 eq.92 計算

$$E_s = \frac{K_s \cdot K_i \cdot \rho \cdot I_M}{0.75L_c + 0.85L_r} \quad (18)$$

其中

$I_M$ ：流入接地網之故障電流量 (A)

$L_c$ ：水平地網總長度 (公尺)

$L_x$ ：地網之 x 方向導體最大長度

$L_y$ ：地網之 y 方向導體最大長度

$L_r$ ：地棒每支長度 (公尺)

計算流程，如圖 1 所示。

## 2.2 直流系統計算

### 2.2.1 電池容量計算方法

蓄電池組容量受到放電時間、負載大小、電壓高低、工作環境、設計裕度、電池自然衰減等因素影響，說明如下：

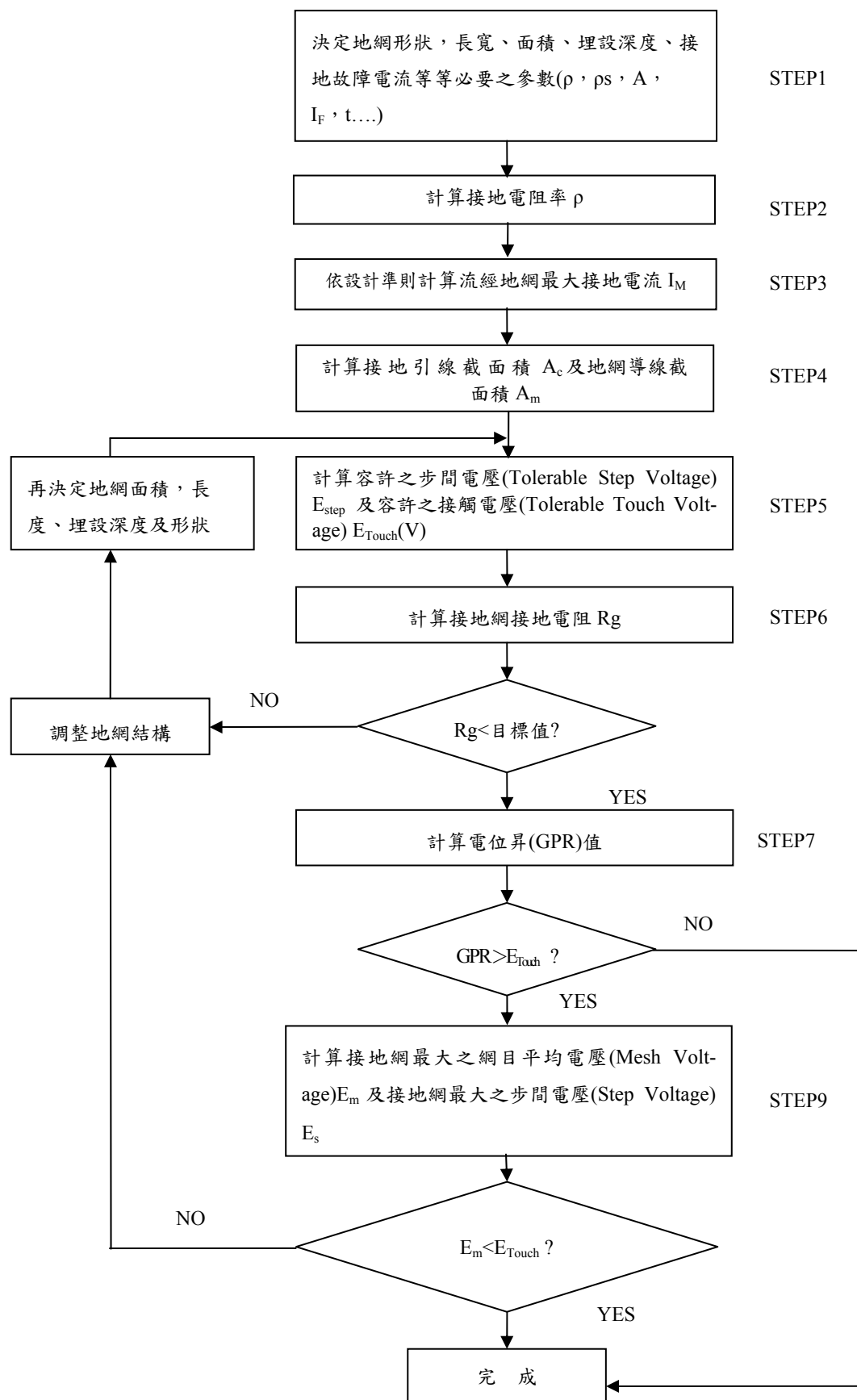


圖 1 接地計算流程圖

1. 標準引用：IEEE Std.1115
2. 電池容量：電池容量因電池之放電率不同而異，當電池放電時間長短與放電電流大小，均影響其電池容量大小。因此需訂定一基準方可比較，故 IEC Std. 623 定義鎳鎘電池之額定容量為每顆電池之終止電壓為 1.0V（溫度在 20°C）時的五小時放電率，以  $C_5$  表示[3]；而鉛酸電池以每顆電池終止電壓為 1.8V 溫度在 20°C 時的十小時放電率，以  $C_{10}$  表示。
3. 系統電壓：最高電壓 160V（因充電機輸出之最大電壓為 160V）  
標稱電壓 125V  
最低電壓 101.2V（92 cells × 1.1 V/cell）
4. 負載之分類[4]  
連續負載：於整個放電時間週期內連續使用電池電源之負載，例如：照明、連續運轉馬達、換流器、指示燈、連續通電之線圈、警報及通訊設備。  
非連續負載：於部分放電時間週期取用電源之負載其持續時間小於 1 秒以 1 秒計；如有可預估之非連續間歇性負載時，其負載電流以最大值估算。例如：緊急泵、緊急通風馬達、消防設備、開關操作、隔離開關操作、馬達啟動電流、湧入電流。
5. 工作溫度：依據 IEEE Std. 1115-2000 6.2.1 中說明周溫若低於 25°C 以下需考慮溫度補償，如為 25°C 以上則不需考慮補償問題，惟仍需依據電池製造廠家所附型錄資料之溫度補償曲線[5]，如圖 2 所示。經查對電池製造廠家 ALCAD 與 SAFT 之型錄資料，其溫度補償曲線顯示工作環境溫度若大於 20°C 以上，則溫度補償係數（Temperature derating factor） $T_i=1$ ，故溫度低於 20°C 以下才需考量補償問題。
6. 電池數量：依據 IEEE Std. 1115-2000 6.1.1 節公式顯示，其所謂之系統最大電壓應考慮其充電機內部是否裝置 SID（Silicon Drop Device）元件，該元件主要功能是當充電機對蓄電池充電時，充電機之充電模式設為均充或浮充方式時，藉由該元件作電壓調整，而不致因充電機輸出電壓之變動，使負載側之電壓過高。因此該公式所謂之「系統最大電壓」應為蓄電池側之電壓而言，非負載側之電壓。而另一參數為「每顆電池之充飽電壓」應為每顆電池所能承受之最大充電電壓，該值大小依各製造廠家而有所不同。

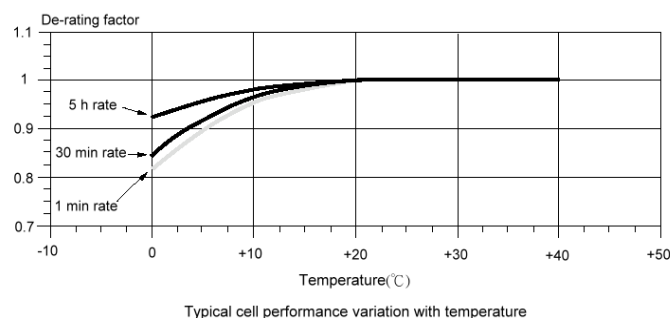


圖 2 溫度補償曲線

$$\text{電池個數} = \frac{\text{系統最大電壓}}{\text{每個電池之充飽電壓}} \quad (19)$$

7. 電池老化係數 (Aging factor) 與設計裕度(Design margin)：電池老化係數因電池種類與型式有所不同，一般密閉式鹼性電池的平均使用壽命為 10~15 年；而設計裕度則依可靠度、環境因素、成本等等考量增減，若設計規範中未提及時，則一般均設為 1。

8. 容量比率係數 (Capacity rating factor,  $K_1$ )：依放電時間與電池終止電壓曲線查得，或依廠家所附之電池效率表[6] (此係數之引用需依據設計規範中所規定之終止電壓值而選用不同之電池容量，如表 1 所示)，再以內插法求之。依據 IEEE Std.1115-2000 Annex A 之公式計算

$$K_1 = K_{t_2} - \frac{(K_{t_2} - K_{t_1}) \times (t_2 - t)}{t_2 - t_1} \quad (20)$$

其中

$t$ ：欲計算之時間

$t_1$ ：依據欲計算時間  $t$  之前一級時間

$t_2$ ：依據欲計算時間  $t$  之後一級時間

$K_1$ ：欲計算時間  $t$  之 Capacity rating fac-

tor

$K_{t_1}$ ：選定該電池型號之  $C_5$  容量÷時間  $t_1$  之放電量

$K_{t_2}$ ：選定該電池型號之  $C_5$  容量÷時間  $t_2$  之放電值

### 2.2.2 充電機容量計算方法

充電機容量計算係依據所連接之負載大小、蓄電池組容量、充電時間長短、蓄電池之充電效率等因素影響，說明如下：

1. 標準引用：IEEE Std.946-1992

2. 計算公式：

$$(1) : I_1 = L_C + \frac{1.4 \times Ah}{T} \quad (21)$$

其中

$I_1$ ：充電機額定電流

$L_C$ ：連續負載電流

1.4：充電效率係數[7]，鎳鎘電池=1.4；鉛酸電池=1.1

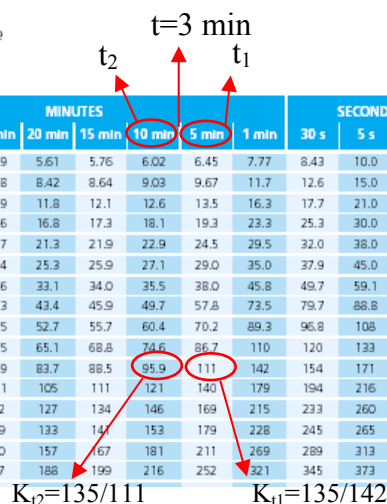
$T$ ：充電時間，係依據 IEEE Std.946-1992 版之附錄 A 所載建議值 8~12 小時。

表 1 電池效率表

Available amperes at +20°C ± 5°C  
Discharge current is for fully charged cells after prolonged float charge

Final voltage: 1.10 Volts per cell

Cell type	C <sub>5</sub> Ah	HOURS					MINUTES							SECONDS			
		10 h	8 h	5 h	3 h	2 h	90 min	60 min	30 min	20 min	15 min	10 min	5 min	1 min	30 s	5 s	1 s
LC10P	10	0.99	1.19	1.75	2.54	3.36	3.98	4.60	5.19	5.61	5.76	6.02	6.45	7.77	8.43	10.0	11.2
LC15P	15	1.49	1.78	2.62	3.81	5.04	5.97	6.90	7.78	8.42	8.64	9.03	9.67	11.7	12.6	15.0	16.9
LC21P	21	2.09	2.50	3.67	5.34	7.06	8.35	9.66	10.9	11.8	12.1	12.6	13.5	16.3	17.7	21.0	23.6
LC30P	30	2.98	3.57	5.24	7.62	10.1	11.9	13.8	15.6	16.8	17.3	18.1	19.3	23.2	25.3	30.0	33.7
LC38P	38	3.78	4.52	6.64	9.65	12.8	15.1	17.5	19.7	21.3	21.9	22.9	24.5	29.5	32.0	38.0	42.7
LC45P	45	4.48	5.35	7.86	11.4	15.1	17.9	20.7	23.4	25.3	25.9	27.1	29.0	35.0	37.9	45.0	50.6
LC59P	59	5.87	7.01	10.3	15.0	19.8	23.5	27.1	30.6	33.1	34.0	35.5	38.0	45.8	49.7	59.1	66.4
LC70P	70	7.02	8.39	12.2	17.9	23.9	27.8	31.9	36.3	43.4	45.9	49.7	57.8	73.5	79.7	88.8	96.0
LC85P	85	8.52	10.2	14.8	21.7	29.0	33.7	38.8	46.5	52.7	55.7	60.4	70.2	89.3	96.8	108	117
LC105P	105	10.5	12.6	18.3	26.9	35.9	41.7	47.9	57.5	65.1	68.8	74.6	86.7	110	120	133	144
LC135P	135	13.5	16.2	23.6	34.5	46.1	53.6	61.6	73.9	83.7	88.5	95.9	111	142	154	171	185
LC170P	170	17.0	20.4	29.7	43.5	58.1	67.4	77.5	93.1	105	111	121	140	179	194	216	233
LC205P	205	20.6	24.6	35.8	52.4	70.0	81.3	93.5	112	127	134	146	169	215	233	260	281
LC220P	220	22.1	26.4	38.4	56.2	74.6	86.1	98.6	119	133	141	153	179	228	245	265	288
LC260P	260	26.2	31.3	45.4	66.4	88.1	102	117	140	157	167	181	211	269	289	313	317
LC310P	310	31.2	37.3	54.1	79.2	105	121	139	167	188	199	216	252	321	345	373	378



電池容量計算流程，如圖 3 所示。

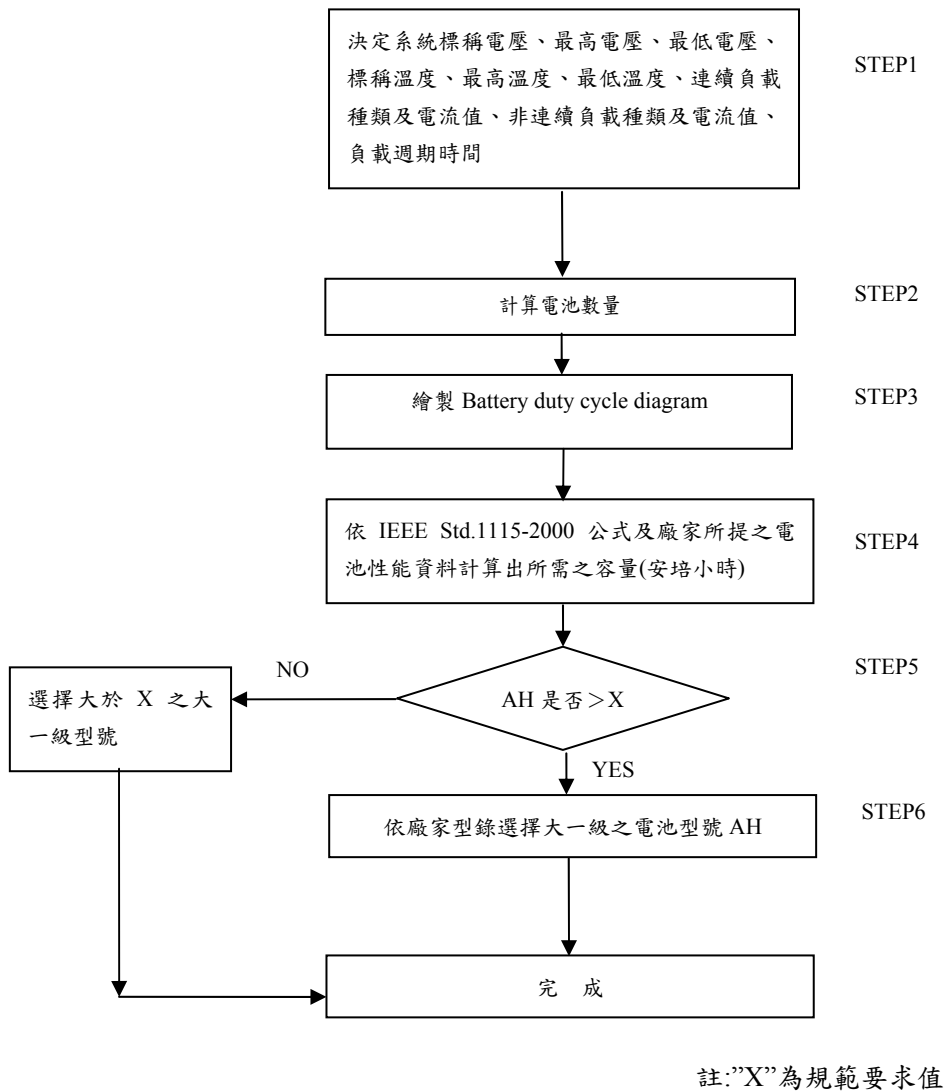


圖 3 電池容量計算流程圖

$$(2) : I_2 = I_c + I_n \quad (22)$$

其中

$I_2$  : 充電機額定電流

$I_n$  : 可能同時連接於直流匯流排之最大非連續負載組合[8] (最大非連續負載之定義係依據 IEEE Std.485-1983, 4.2.2 節之規定)

註: 依 IEEE Std.946-1992 規定選用  $I_1$ 、 $I_2$  較大者作為充電機容量，惟考慮下列因素後，仍選用公式一較為適合。

- i. 計算電池容量時，依據 IEEE Std.1115-2000，第 4.2.2 節 d 項之定義，將開關設備視其為非連續負載。
- ii. 計算充電機容量時，依據 IEEE Std.946-1992，6.2 公式中有關  $I_n$  之定義參考 IEEE Std.485-1983，第 4.2.2 與 4.2.3 節將開關設備視為瞬間負載，故  $I_n=0$  故  $I_2$  明顯小於  $I_1$ 。
- iii. 依上述兩項顯示 IEEE Std.1115 與 IEEE Std.485 在負載分類上並未一



致，雖然前述兩項標準分別講述鎳鎘電池與鉛酸電池，但有關負載分類之原則應求統一。

3. 充電機容量計算流程，如圖 4 所示。

### 2.2.3 直流短路電流計算方法

直流短路電流計算之目的，為確認直流分電盤各分路開關設備之啟斷容量是否足夠，相關說明如下：

1. 標準引用：無
2. 計算公式：

$$I_s = I_{CH} + \frac{V_{\max}}{R_t} \quad (23)$$

其中

$I_s$ ：直流短路電流

$I_{CH}$ ：充電機提供之故障電流，依台電充電機規範所載，其故障電流限制於充電機額定電流之 130% 以下[9]。

$V_{\max}$ ：系統最高電壓

$R_t$ ：電池組之總內阻，單顆電池內阻（需由廠家提供）再乘上電池顆數。

3. 直流短路電流計算流程，如圖 5 所示。

## 參、實例模擬

本節以台電公司某屋內式 161/23kV, 60MVA 一次配電變電所作為接地系統與直流系統計算之模擬對象。

### 3.1 接地系統

#### 3.1.1 參數設定

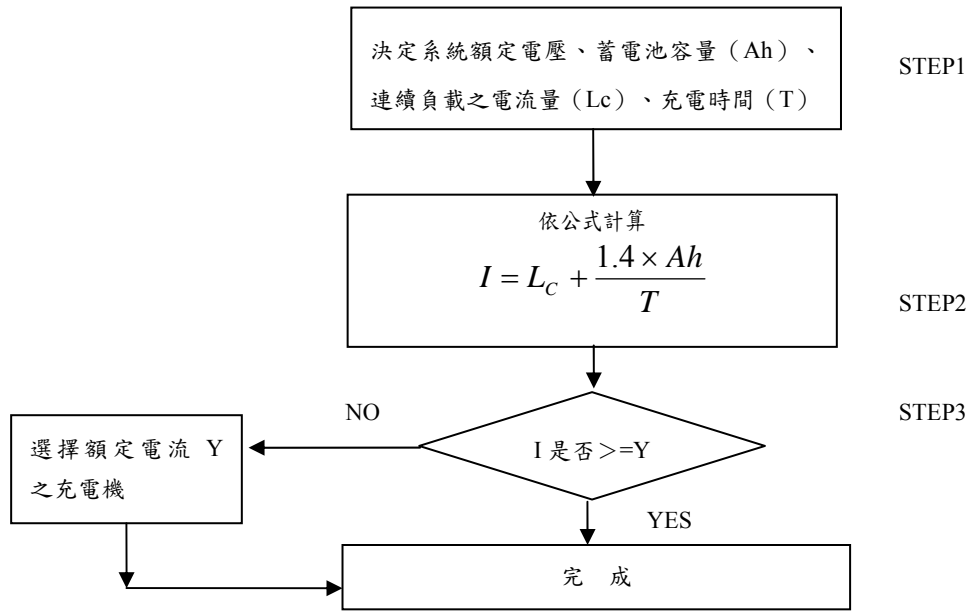
首先定義接地系統之接地網幾何參數包括：最大接地電流  $I_M$ 、故障清除時間  $t$ 、土壤電阻率  $\rho$ 、地表層土壤電阻率  $\rho_s$ 。前述所提及  $K_m$  之公式中，發現當地網導線直徑大小固定時，其地網導線之間距  $D$  與接地網埋設深度  $h$ ，會

影響網目電壓  $E_m$  大小；將設計參數詳列如下：

1. 本所最終的匯流排單相接地故障電流值  $I_F = 50 \text{ kA}$
  2. 故障清除時間  $t = 0.5 \text{ 秒}$
  3. 導線熔化溫度  $T_m = 1084$ (硬銅無受張力)  $^{\circ}\text{C}$
  4. 地網導體分流率  $K = 0.9$  (因全部線路皆為地下電纜)
  5. 接地電阻目標值  $R_g = 0.5 \ \Omega$
  6. 地表土壤電阻率 ( $\rho_s$ ) =  $1500 \ \Omega \cdot \text{m}$
  7. 地網層深度之電阻率 ( $\rho_1$ ) =  $86 \ \Omega \cdot \text{m}$
  8. 地棒層深度之電阻率 ( $\rho_2$ ) =  $43 \ \Omega \cdot \text{m}$
  9. 平均電阻率 ( $\rho_{\text{avg}}$ ) =  $65 \ \Omega \cdot \text{m}$
  10. 地網形狀 = 長方形
  11. 地棒半徑  $b = 0.0191 \text{ m}$
  12. 地棒數量  $N_r = 110 \text{ 支}$
  13. 地棒每支長度  $l_r = 2.4 \text{ m}$
  14. 地網平均埋設深度  $h = 0.6 \text{ m}$
  15. 地網表面土壤平均厚度  $h_s = 0.25 \text{ m}$
  16. 本案地網面積  $A = 4350 \text{ m}^2$
  17. 地網接地導線直徑  $d = 0.0115 \text{ m}$
  18. 地網網目之平均間隔  $D = 6 \text{ m}$
  19. 地網導線之總長度  $L_c = 2094 \text{ m}$
  20. 地網外圍周長  $L_p = 269 \text{ m}$
  21. 地網任意兩點最遠距離  $D_m = 102 \text{ m}$
  22. 地網橫向長度  $L_x = 69.4 \text{ m}$
  23. 地網縱向長度  $L_y = 75.3 \text{ m}$
- 程式畫面如圖 6 所示：

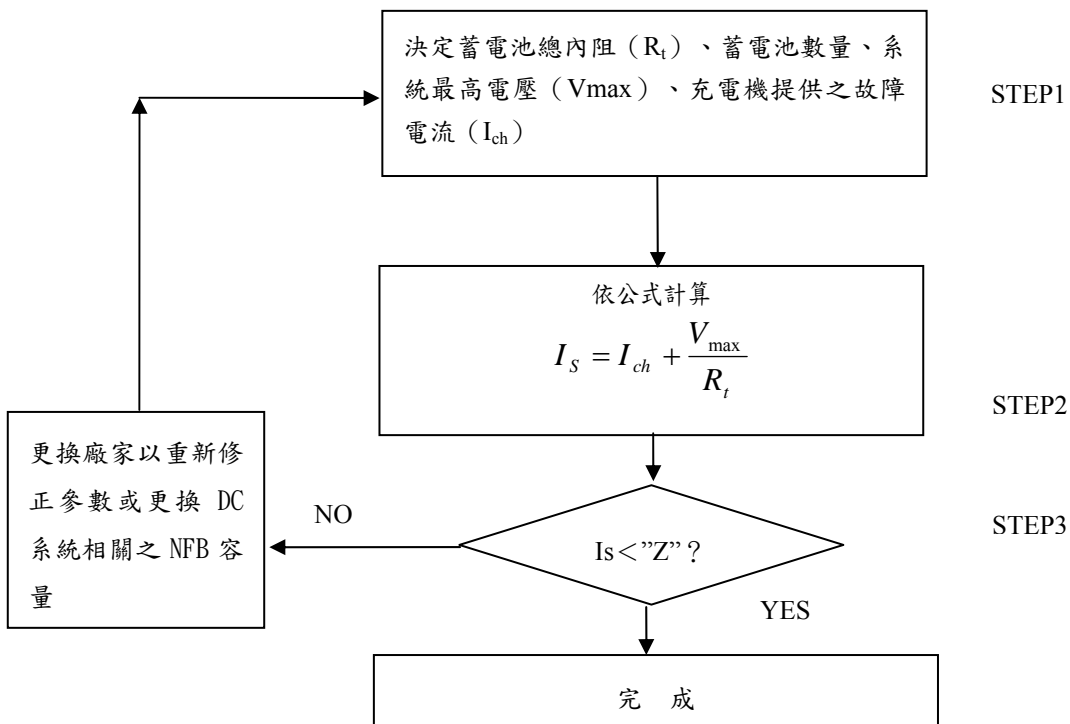
#### 3.1.2 模擬結果

接地系統設計中影響至為甚鉅的是分流率  $k$  值，其主要原因是作為流入整個地網之電流量的依據，此外尚有土壤電阻率表層土壤電阻率、接地網之幾何形狀、接地網面積與接地故障清除時間皆為影響接地安全之重要因素，經程式計算結果如圖 7 所示：



註:”Y”為規範要求值

圖 4 充電機容量計算流程圖



註:”Z”為規範要求值

圖 5 直流短路電流計算流程圖

## 1. 最大容許接觸電壓與步間電壓

因日常變電所內之工作人員多為男性，因此採用體重為 70 公斤為計算參數，其最大容許步間與接觸電壓與地表土壤電阻率 ( $\rho_s$ ) 成正比，而與故障清除時間  $t$  之平方成反比。惟地表土壤電阻率 ( $\rho_s$ ) 之引用數據尚無一致看法，因台電公司之傳統屋外式變電所於屋外之變壓器與開關設備區域多採礫石敷設，故採用  $3000 \Omega \cdot m$ 。但台電公司現階段新建之變電所多採屋內

式，其變壓器與開關設備區域多為鋼筋混擬土 (RC) 結構與 PU 塗料於地板表面，因此地表土壤電阻率 ( $\rho_s$ ) 變為  $1500 \sim 1700 \Omega \cdot m$ 。地表土壤電阻率愈高，意即人體所能承受之電壓愈高。為確保變電所內之工作人員安全，需限制實際網目電壓 ( $E_m$ ) 與步間電壓 ( $E_s$ ) 小於最大容許接觸電壓 ( $E_{touch}$ ) 與步間電壓值 ( $E_{step}$ )，才不致發生電擊之危險事故。

The screenshot shows the 'External Parameter Input' section of the software. It is divided into several sub-sections:

- External Parameter Input (外部參數輸入):**
  - 1. Fault current (IP): 50 kA
  - 2. Fault clearing time (t): 0.5 s
  - 3. Conductor temperature (Tm): 100.4 °C
  - 4. Grounding grid current (K): 0.9
  - 5. Grounding grid resistance (RR): 0.5 (DS)
- Soil Resistivity Parameters (電阻率參數):**
  - 1. Surface soil resistivity ( $\rho_s$ ): 1500  $\Omega \cdot m$
  - 2. Grounding depth soil resistivity ( $\rho_1$ ): 86  $\Omega \cdot m$
  - 3. Grounding depth soil resistivity ( $\rho_2$ ): 43  $\Omega \cdot m$
  - 4. Average soil resistivity ( $\rho_{avg}$ ): 65  $\Omega \cdot m$
- Grounding Grid Parameters (地網參數):**
  - 1. Grid spacing (b): 0.0191 (34°) m
  - 2. Number of grids (Ng): 110
  - 3. Grid spacing (lg): 2.4 m
  - 4. Average depth of grid (k): 0.6 m
  - 5. Average soil resistivity (ks): 0.25 m
  - 6. Area of grid (A): 4350 m<sup>2</sup>
  - 7. Grid spacing (d): 0.0115 (80mm) m
  - 8. Average spacing (D): 6 m
  - 9. Total length of grid (Lg): 2094 m
  - 10. Grid perimeter (Lp): 269 m
  - 11. Distance to nearest structure (Dm): 102 m
  - 12. Grid length (Lx): 69.4 m
  - 13. Grid width (Ly): 75.3 m

圖 6 計算程式之參數輸入畫面

The screenshot shows the 'Internal Parameter Input' and 'Calculation Results' sections of the software. The 'Calculation Results' section displays the following data:

Parameter	Value	Unit
Effective parallel conductor (sa)	15.721	
sa	15.569	
sb	1.61	
sc	1	
sd	1	
Grid correction factor (Ka)	2.971	
Ka	1.263	
Grid spacing factor (Ksm)	0.644	
Ks	0.367	
Maximum grid voltage (Em)	248.434	V
Maximum step voltage (Es)	197.150	V
Grid current (Ig)	5000	A
Grounding grid area (AG)	126.54	m <sup>2</sup>
Grid conductor area (AGm)	12.654	m <sup>2</sup>
Cs	0.851	
Grid spacing (LR)	264	m
Grid length (LT)	2350	m
K1	1.373	
K2	5.638	
i'	0.083	
Permissible contact voltage (Eblock)	1072.064	V
Permissible step voltage (Estep)	3622.162	V
Grid ground resistance (R1)	0.638	$\Omega$
Grid ground resistance (R2)	0.369	$\Omega$
Inductance (Em)	0.303	$\Omega$
Grid resistance (Rg)	0.257919	$\Omega$
Potential (GPR)	1789.594	V

圖 7 程式計算結果之畫面

## 2. 實際網目電壓與步間電壓

變電所之實際網目電壓與步間電壓對接地網埋設深度之間的關係是當接地網埋設深度  $h$  增加時，其網目與步間電壓亦隨之增加而趨於定值。另有關地網導體間距 ( $D$ ) 為變數，而地網埋設深度為 0.6m 時，其地網導體間距 ( $D$ ) 與網目電壓 ( $E_m$ ) 成正比，而與步間電壓 ( $E_s$ ) 成反比。

在圖 7 計算結果中顯示，地表土壤電阻率 ( $\rho_s$ ) 為  $1500 \Omega \cdot m$ 、故障清除時間  $t$  為 0.5 秒、地網埋設深度為 0.6m，此時對 70 kg 的人體而言，實際網目電壓 ( $E_m$ ) 為 248 V、實際步間電壓 ( $E_s$ ) 197 V，分別皆小於而最大容許接觸電壓 ( $E_{touch}$ ) 為 1072 V 與最大容許步間電壓 ( $E_{step}$ ) 為 3622 V，所以本案接地設計為安全的。

## 3. 接地電阻計算值

經程式計算結果，接地電阻計算值為  $0.358 \Omega$ ，小於規範要求值  $0.5 \Omega$ 。

### 3.1.3 軟體性能之比較

依本實例之數據參數，另分別另以套裝軟體 cymGRD 及 ETAP 計算後，將計算結果與本文開發之軟體作性能之分析與比較，如表 2 所示。可得知以下幾點結論：

1. 發現 ETAP 套裝軟體與本文軟體之計算結果較為相近，顯見本文軟體應具實用價值。
2. 因 IEEE Std. 80-1986 版，其中有關  $E_{mesh}$  與  $E_{step}$  之計算公式與 2000 版不同 (如表 3 所示)。
3. cymGRD 套裝軟體有關地網各點電

位梯度之計算與繪圖方法，係依據 IEEE Std. 80-1986 版之 Appendixes A: Mathematical Analysis of Gradient Problem 之公式計算出各點網目之  $E_{mesh}$  與  $E_{step}$  然後繪製圖面，如圖 8 所示。但 2000 版則移除原 1986 版之 Appendixes A Mathematical Analysis of Gradient Problem，僅以公式 91 與 93 分別計算  $E_{mesh}$  與  $E_{step}$  之最大值，這是本文計算軟體與 cymGRD 軟體對於  $E_{mesh}$  與  $E_{step}$  之計算結果數值不同之主要原因。

## 3.2 直流系統

### 3.2.1 參數設定

蓄電池組及充電機容量直接受到電壓大小、溫度變化、負載大小、設計裕度、電池老化等因素影響，將設計參數詳列如下：

1. 系統標稱電壓：125 V
2. 系統最大電壓：160 V
3. 系統最小電壓：101.2 V
4. 標稱溫度：25 °C
5. 最高溫度：40 °C
6. 最低溫度：20 °C
7. 電池老化係數：1
8. 設計裕度：1
9. 溫度補償係數：1
10. 充電機之均充電壓值：1.75 V
11. 選用充電機之額定輸出電流規範值：75 A
12. 連續負載，如表 4 所示。
13. 非連續負載：

為考慮斷路器操作時之瞬間需求量，假設在某一時間內所有斷路器同時跳脫或所有斷路器連續投入之情況，估算如下：

- (1) 161kV 匯流排故障，所有斷路器同

- 時跳脫，跳脫時間 1 秒。每個斷路器跳脫電流 5A 合計  $5 \times 13 = 65A$  (1 秒)
- (2) 所有 161kV 斷路器連續投入，投入時間 2 分鐘。每個斷路器投入電流 1.7A 合計 1.7A(2 分鐘)
- (3) 23kV 斷路器 81 電驛動作，同時跳脫 5 饋線，跳脫時間 1 秒。每個斷路器跳脫電流 4A 合計  $4 \times 5 = 20A$  (1 秒)
- (4) 8 具 23kV 饋線斷路器連續投入，投入時間 1 分鐘。每個斷路器投入電流 4A 合計 4A(1 分鐘)。
- (5) 23kV SC 斷路器 59 電驛動作，同時跳脫 SC-1A 及 SC-1B 斷路器，跳脫時間 1 秒。每個斷路器跳脫電流 4A 合計  $2 \times 4 = 8A$  (1 秒)。
- 程式參數設定畫面，如圖 9 及圖 10 所示。

表 2 效能比較表

項次	功能	本次撰寫之軟體	cymGRD 套裝軟體	ETAP 套裝軟體
1	引用標準	IEEE-80	IEEE-80	IEEE-80
2	介面文字	中文	英文	英文
3	資料輸入方式	下拉選單點選	逐字鍵入	逐字鍵入
4	計算接地導體截面積	可	否	否
5	輸出報表文字	中文	英文	英文
6	購置費用	低	高	高
7	繪圖功能	無	有	有
8	本次模擬接地電阻值之計算結果	0.358 $\Omega$	0.362 $\Omega$	0.43 $\Omega$
9	本次模擬 GPR 之計算結果	1789.594 V	1810.01 V	2137.3V
10	本次模擬容許 $E_{\text{mesh}}$ 之計算結果	648.699 V	635.796 V	648.7 V
	本次模擬容許 $E_{\text{step}}$ 之計算結果	1928.701 V	1877.09 V	1928.7 V
11	本次模擬最大 $E_{\text{touch}}$ 之計算結果	248.434 V	413 V	240.5 V
	本次模擬最大 $E_{\text{step}}$ 之計算結果	197.159 V	31 V	186.2 V

表 3 IEEE Std. 80 公式差異表

IEEE Std. 80-1986	IEEE Std. 80-2000
$Ki=0.656+0.172n$ (Eq 69)	$Ki=0.644+0.148n$ (Eq 89)
$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_c + 1.15L_r}$ (Eq 71)	$E_m = \frac{\rho I_M K_m K_i}{L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{\ell_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R}$ (Eq 91)
$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_c + 1.15L_r}$ (Eq 73)	$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{0.75L_c + 0.85L_r}$ (Eq 93)

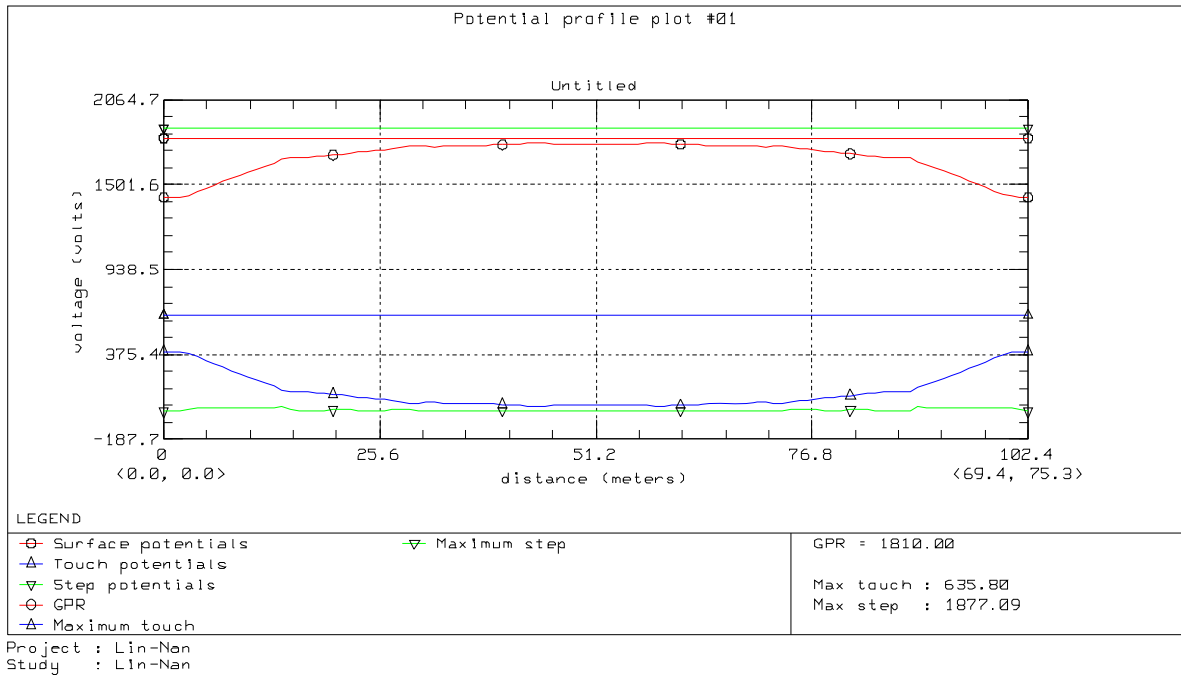


圖 8 cymGRD Software 之  $E_{\text{mesh}}$  and  $E_{\text{step}}$  計算結果

### 3.2.2 模擬結果

依程式操作提示依序完成步驟一至步驟四，建立負載週期表，經軟體模擬試算結果，得知連續與非連續負載量、各時段之放電時間、放電時段之排列順序皆會影響建議選購電池容量 (AH) 計算值之大小，經程式計算結果如圖 11 所示：

#### 1. 電池容量

如將連續與非連續負載量與各時段之放電時間固定不變時，而將放電時段之排列順序作變化組合，得一結論，若將最大之放電量時段置於整個放電時間 (如 8 小時) 之末，則建議選購電池容量 (AH) 計算值會出現最大，如圖 12 直流計算程式之計算結果：

電池個數 = 92 個

建議選購電池容量 (AH) = LC260P  
(即 260AH)

另可選擇負載圖之選項，利用

程式自動繪製負載圖，如圖 11 直流計算程式之負載圖所示，藉此可瞭解負載變化之情形。

#### 2. 充電機容量

依據 IEEE Std. 946-1992 中建議之電池回充時間為 8~12 小時[10]，依公式 (24) 可知充電機容量與電池回充時間成反比關係。

$$I = L_c + \frac{1.4 \times Ah}{T} \quad (24)$$

其中：

I：充電機之額定電流 (A)

$L_c$ ：連續負載電流量 (A)

Ah：電池之安培小時容量

T：電池回充時間 (小時)

計算結果：

$$I = 27.25 + \frac{1.4 \times 260}{8} = 72.75A$$

如圖 10 直流計算程式之計算結果所示。

#### 3. 直流短路電流

本項是以充電機之出口端為參

考點計算，主要目的用以驗證直流分電盤中各開關設備之遮斷容量是否足夠。其中有關電池內阻參數因

廠牌與型號各有不同，且與短路電流計算值成反比關係。

表 4 連續負載表

項次	設備名稱	電流(A)	數量	合計(A)
1	161kV GIS	0.1	15	1.5
2	23kV GIS	0.15	55	8.25
3	主變輔助盤	0.3	4	1.2
4	警報盤	1	1	1
5	SC 盤	1.5	1	1.5
6	OSC 盤	1	2	2
7	161 線路保護盤	0.2	10	2
8	主變電驛盤	1	4	4
9	161 匯流排盤	0.8	1	0.8
10	MCC 盤	1	4	4
11	通訊介面盤	1	1	1
合計				27.25

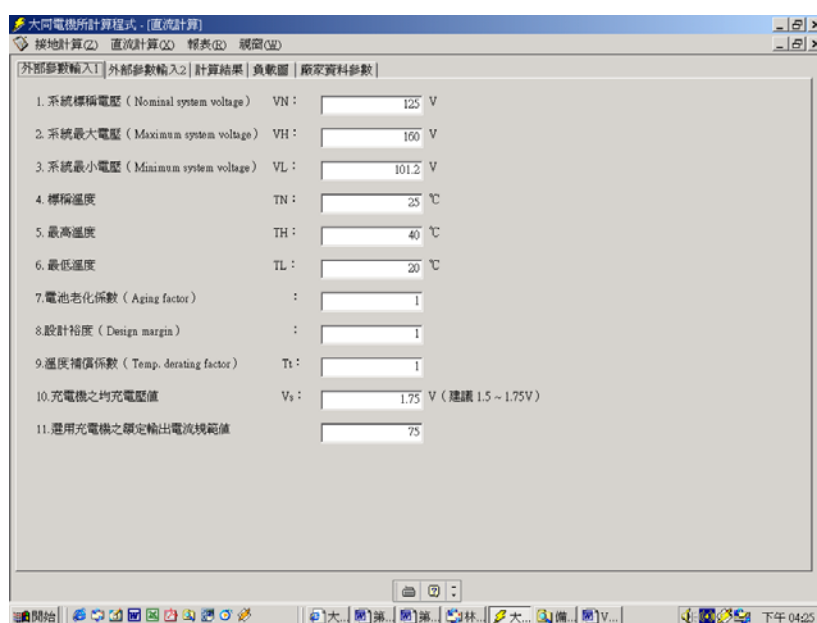


圖 9 直流計算程式之輸入參數畫面一

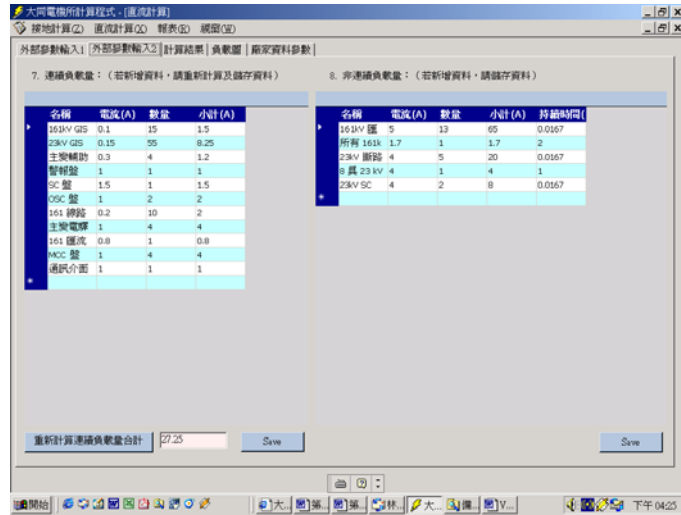


圖 10 直流計算程式之輸入參數畫面二



圖 11 直流計算程式之計算結果

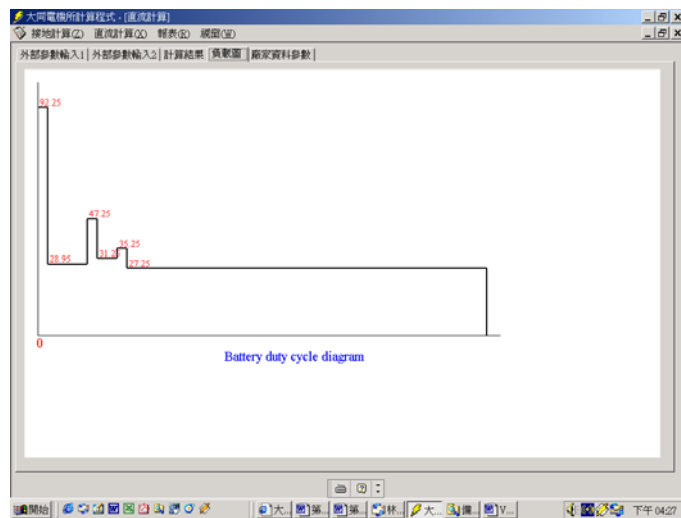


圖 12 直流計算程式之負載圖



輸入參數：

蓄電池內阻：0.55 mΩ/cell(依據廠家型錄)

蓄電池數量：92 cell

負載側最高電壓：160V

考慮蓄電池組在出口端短路：充電機提供之故障電流為額定電流之130%=97.5A(I<sub>ch</sub>)

計算公式：

$$I_s = \frac{V_{\max}}{R_t} + I_{ch} \quad (25)$$

$$I_s = \frac{160V}{92 \times 0.55 \times 10^{-3} \Omega} + 97.5 = 3262.012A$$

(假設考慮蓄電池組出口端短路)

其結果如圖 11、12 直流計算程式之計算結果所示。

#### 四、結論

本文之模擬計算軟體，經工程實例試算，證明其正確性及實用性。同時發現 1986 版與 2000 版之 IEEE Std. 80 有關 Emesh 與 Estep 之計算公式有明顯之不同，但卻沒有任何的說明與理由，使用者如未經察覺而使用舊版之標準，則易生錯誤。

接地與直流兩項系統之設計，以往多以經驗傳承或概估之方式決定其容量。許多數據之引用均係先進前輩之寶貴經驗累積，惟因缺少完整理論依據或相關工業標準據以參考。更因無法驗證，所以容易造成過度設計，增加成本，或設計不足而日後造成事故發生。如依據 IEEE Std.之相

關公式以人工方式計算，則曠日費時且計算程序甚為複雜。如能利用電腦程式計算，可大幅降低工時，節省成本，並提高計算結果之精確度。

#### 五、參考文獻

- [1] IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
- [2] 陳清嚴、林水秀、江榮城、林明民，地網設計實務與模擬分析，台電工程月刊
- [3] IEC Std 623-1983, Open Nickel-Cadmium Prismatic Rechargeable Cells.
- [4] IEEE Std 1115-2000, IEEE Recommended Practice for Sizing Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications
- [5] Technical data for New Ni-Cd Single Cells, SAFT Industrial Battery Group
- [6] Technical Manual for Single Cell Range, ALCAD Battery
- [7] 台電變電工程作業手冊，第 1-1-5-77 頁
- [8] IEEE Std 485-1997, IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications
- [9] 一次配電變電所統包規範—充電機設備，台灣電力公司，92 年 2 月
- [10] IEEE Std 946-1992, IEEE Recommended Practice for the Design of DC Auxiliary Power Systems for Generating Stations