

# EHV 增設耦合地線之雷擊特性研究

## A Study on the Lightning Characteristics for EHV Transmission Line with Coupling Ground Wire

蕭勝文

Hsiao, Sheng-Wen

卓明遠

Cho, Ming-Yuan

蕭勝任

Hsiao, Sheng-Jen

高雄應用科技大學電機工程系

Department of Electrical Engineering

National Kaohsiung University of Applied Sciences

Kaohsiung, Taiwan, R.O.C.

Tel : +886-7-3814526#5565

Fax : +886-7-3923241

E-mail : shenwen@cht.com.tw

mycho@mail.ee.kuas.edu.tw

u897746@taipower.com.tw

### 摘要

台灣超高壓輸電線路常因雷擊造成電壓驟降及線路跳脫事故，台電雖一直有防止雷害之行動計畫，但均未達到理想效果。本文研究係參考IEEE std. 1243-1997之架構[1]，特別針對台電系統雷害事故居高不下之超高壓輸電線路，透過EMTP-ATP建立鐵塔參數、導地線規格、雷擊突波源、輸電線路、耦合地線等暫態模型，模擬增設耦合地線相互比對分析其輸電線路遭受雷擊時之突波特性，並與實際裝設結果互相驗證，以探討裝設耦合地線方式對防雷最佳化之研究。  
關鍵字：雷擊、輸電線路、電磁暫態模擬程式、耦合地線。

### Abstract

EHV transmission line of Taiwan is often struck by lightning creates the voltage sag and the line jump accident. Although Taipower has been the action plan to prevent the Lightning, failing to meet the desired effect. Studies in this paper refer to IEEE std. 1243-1997 of the framework to Taipower system of especial for high lightning disturbance of EHV transmission Line. Eiffel Tower through the EMTP-ATP to establish parameters, specifications of cables, lightning surge, the source, transmission line, coupled transient model of earth, etc. Additional coupling between analog ground of the transmission line than when the surge characteristics of being struck by lightning, and the results are conducted to verify the actual installation to explore the way of the installation of ground coupling optimization of mine.

Keywords : Lighting, Transmission Line, ATP-EMTP, Coupling Ground Wire.

### I. 簡介

台灣超高壓輸電線路走廊大部份位於雷電活動頻繁的山區，致使輸電線路經常在雷雨天跳脫或發生絕緣雷擊閃絡事故，經統計台電供電系統 2002 至 2007 年 345kV 線路跳脫事故雷擊佔比 50.5%，因此雷害是造成線路故障的主要原因。以 2007 年 345kV 線路雷擊事故高達 66%，如圖 1 所示[2-3]，位居各類線路事故之首，故需探討降低雷擊事故為刻不容緩。

由於 345kV 線路避雷器價格昂貴，故台電對 345kV 輸電線路無裝設線路避雷器，為提升線路耐雷基準及整體經濟效益。而採用架設耦合地線的方法以提升線路耐雷基準的效果較為明顯且投資少。因此，本文特別針對台電系統雷害事故居高不下之 345kV 輸電線路，採用增設耦合地線方式，相互比對分析其輸電線路遭受雷擊時之突波特性，以探討裝設耦合地線對防雷最佳化之

析，所獲得結果可作為台電更進一步以經濟效益觀點，強化防雷措施成效評估之參考。

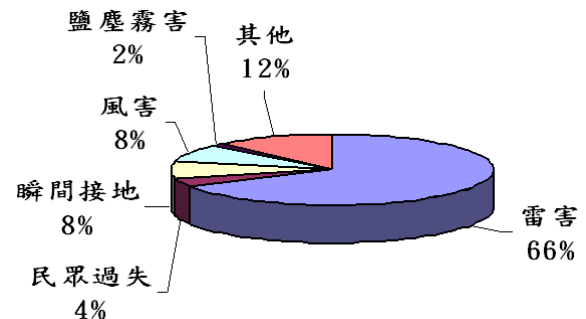


圖 1 2007 年 345kV 輸電線路各類事故分析圖

### II. 超高壓輸電線路耐雷設計與防雷害措施

耐雷設計之主要目的是輸電線路礙子連所需最少礙子數量，一般均由耐開關突波設計或耐污損設計決定。耐雷設計即以此礙子數量為基準，從事下列各項工作：(1) 決定架空地線位置，極力避免相線受直接雷擊，並使跨距中央處逆閃絡事故減少。(2) 受雷擊時抑制鐵塔電位上昇，使發生逆閃絡之機會減少。(3) 有必要時，對於雙回線共架鐵塔採用差絕緣方式，極力避免雙回線，因雷擊而同時跳脫。(4) 預估事故率。

台電公司兩回線共架鐵塔線路大都使用差絕緣，以減少鐵塔直接受雷擊時，兩回線同時跳脫之機會[4-6]，差絕緣設計之相關計算如下：

$$\text{絕緣差} = V_H - V_L = 1.22E + \beta V_H \quad (1)$$

其中：

$V_H$ ：高絕緣回路之 50% 衝擊電壓絕緣強度(kV)。

$V_L$ ：低絕緣回路之 50% 衝擊電壓絕緣強度(kV)。

$E$ ：系統最高運轉電壓(kV)。

$\beta$ ：差絕緣係數 5~15%，一般取 10% 左右。

$$\beta = \frac{V_H - V_L - 1.22E}{V_L} \quad (2)$$

台電或國外電力事業者對於輸電線路雷擊所採取的防護措施大略做法如圖 2 所示[7-8]，其方式均有其特定效果，亦有時會因外在環境、地形、土壤及氣候等問題甚難解決，故考慮採架設耦合地線方式以提高耐雷程度，且投資成本亦較少，效果亦不錯。

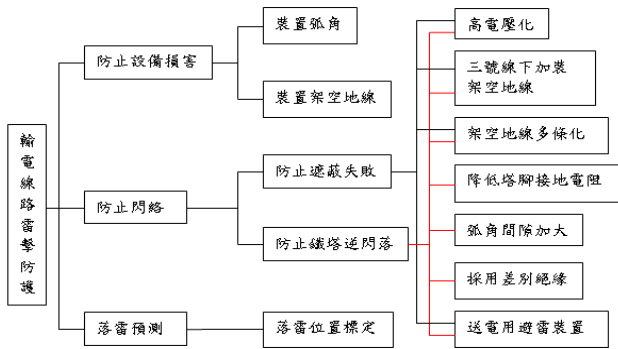


圖 2 輸電線路防雷擊防護措施

### III. 雷擊電流與耦合電線原理

雷擊發生於自然界中具有極多變之波形，圖 3 為 Heidler 模型之雷擊電流波形，該模型由 Heidler 等人於 1987 年提出[9-11]，其表示式如下：

$$i(t) = I_0 \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{[(t/\tau_1)^n + 1]} \cdot e^{-t/\tau_2} = I_0 \cdot x(t) \cdot y(t) \quad (3)$$

其中， $I_0$ ：電流峰值， $\tau_1$ 、 $\tau_2$ ：電流上升與下降的時間常數。另外引入修正因數(correction factor) $\eta$ ，以便於使用者自行定義電流峰值出現的時間點。修正後的 Heidler model 函數為：

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{[(t/\tau_1)^n + 1]} \cdot e^{-t/\tau_2} \quad (4)$$

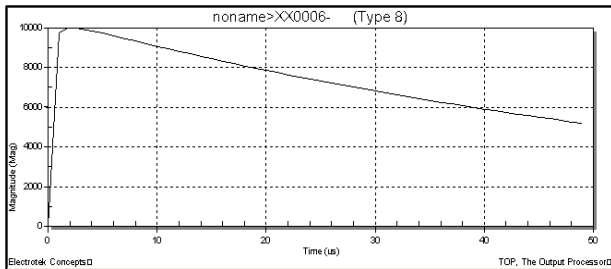


圖 3 Heidler 模型之雷擊電流波形

在鐵塔最下層裝設耦合地線如圖 4 所示，所模擬之假設為耦合地線種類則與地線所使用相同之電線並忽略電暈效應，將鐵塔遭受雷擊後，電流分佈等效圖如圖 6 所示[5-6,9]，為方便分析，僅以一回線之線路分析。其中， $i$  為雷擊塔頂時之雷電流， $i_1$  為雷擊時流經地線之雷電流， $i_2$  為雷擊時流經導線之雷電流， $i_3$  為雷擊時流經耦合地線之雷電流， $i_R$  為雷擊時流經塔基之雷電流。

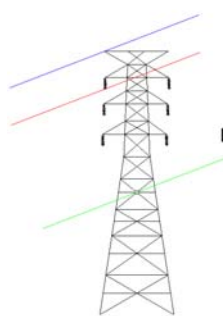


圖 4 BB 型鐵塔概圖

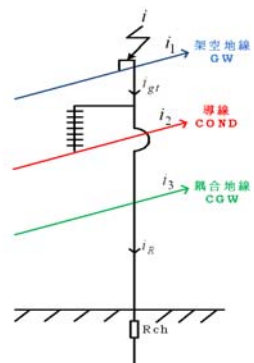


圖 5 BB 型鐵塔雷擊電流分佈等效圖

在考慮輸電線路所產生的耦合電容效應，如圖 6 所示[10-12]，其中  $h_1$ 、 $r_1$  為架空地線之高度與線徑之半徑， $h_2$ 、 $r_2$  為導線之高度與線徑之半徑， $h_3$ 、 $r_3$  為耦合地線之高度與線徑之半徑， $D_{12}$ 、 $D_{12}'$  為架空地線與導線及導線鏡射之距離， $D_{23}$ 、 $D_{23}'$  為導線與耦合地線及耦合地線鏡射之距離， $D_{31}$ 、 $D_{31}'$  為耦合地線與架空地線及架空地線鏡射之距離，因此，

架空地線與架空地線的互阻抗：

$$Z_{11} = \frac{1}{2\pi f \times \left( \frac{2\pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{2h_1}{r_1}} \right)} \quad (5)$$

架空地線與導線的互阻抗：

$$Z_{12} = Z_{21} = \frac{1}{2\pi f \times \left( \frac{2\pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{D_{12}'(\text{GMD})}{D_{12}(\text{GMR})}} \right)} \quad (6)$$

架空地線地線與耦合地線的互阻抗：

$$Z_{13} = Z_{31} = \frac{1}{2\pi f \times \left( \frac{2\pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{D_{13}'(\text{GMD})}{D_{13}(\text{GMR})}} \right)} \quad (7)$$

導線與耦合地線的互阻抗：

$$Z_{23} = Z_{32} = \frac{1}{2\pi f \times \left( \frac{2\pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{D_{23}'(\text{GMD})}{D_{23}(\text{GMR})}} \right)} \quad (8)$$

耦合地線與耦合地線的互阻抗：

$$Z_{33} = \frac{1}{2\pi f \times \left( \frac{2\pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{2h_3}{r_3}} \right)} \quad (9)$$

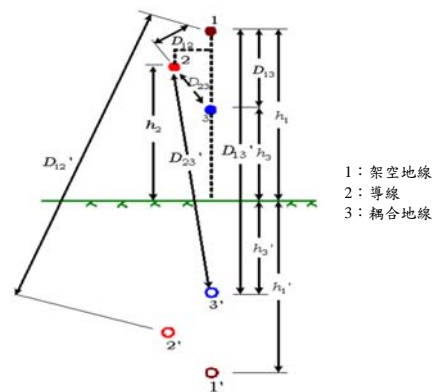


圖 6 地線、導線與耦合地線之距離與大地間產生之電容鏡射距離

### III. 增設耦合地線雷擊特性模擬與分析

本文選落雷密較高之台電 345kV 南科至龍崎一二路#10 至#15 塔區間，IKL 值達到 70 且曾遭受雷害事故 #13 鐵塔做為代表性模擬，建立裝有耦合地線之模擬線路的 EMT-ATP 模型如圖 7 所示[5-6]。

此輸電線路之導線為 795MCM(26/7)ACSR 四導體；地線為 19NO.8ACW 及 160mm<sup>2</sup> OPGW，遮蔽角為 -10 度，並將#10 至#15 塔區間採增設不同條數之耦合地線及裝設不同位置。以不同雷擊電流強度，依表 1 及圖 8 等各種狀況模擬研究其弧角或礙子連端電壓變化情形。

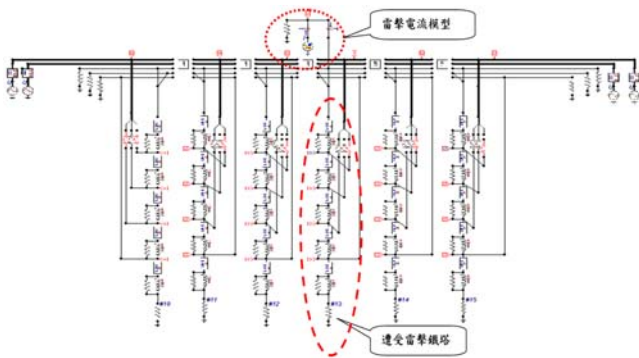


圖7 裝有耦合地線之電磁暫態模型

表1 對345kV南科至龍崎一、二路#13塔  
遭受雷擊之各種模擬狀況

類別	模擬狀況
CASE1	鐵塔不增設架空地線或耦合地線
CASE2	鐵塔上方增設一條架空地線
CASE3	鐵塔下方增設一條耦合地線
CASE4	鐵塔下方增設二條耦合地線
CASE5	鐵塔下方增設三條耦合地線
CASE6	鐵塔下方增設四條耦合地線
CASE7	鐵塔上方增設一條架空地線及下方增設二條耦合地線

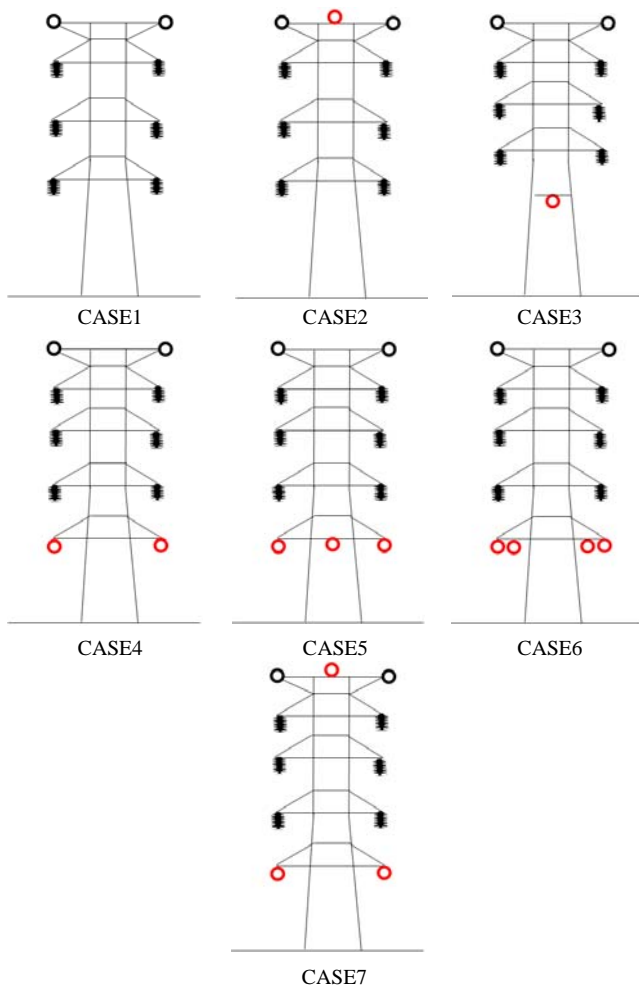


圖8 CASE1~CASE7增設架空地線或耦合地線之位置圖

其模擬的條件為①雷擊電流：30kA~100kA、  
2/70  $\mu$ s。②雷擊點：#13 塔之架空地線或鐵塔頂端。  
③塔腳電阻：#13 塔之塔腳電阻為 10 $\Omega$ 。④雷擊通道

突波阻抗 $Z_t$ ：400 $\Omega$ 。⑤礙子連（19 只/串）：高絕緣側絕緣礙子連 50%衝擊閃絡電壓為 1155kV。低絕緣側裝設弧角，其 50%衝擊閃絡電壓為 1605kV等，模擬所得結果如下：

- 由表 2 中得知，CASE1 在雷擊電流在 30kA 以下，則低絕緣側弧角間暫態端電壓皆小於 50%衝擊閃絡電壓，弧角不會閃絡；高絕緣側礙子連亦小於 50%衝擊閃絡電壓，礙子連不會閃絡。但若雷擊電流在 31kA 時，則低絕緣側上層弧角間暫態端電壓皆大於 50%衝擊閃絡電壓弧角發生閃絡。
- 從圖 9 可看出 CASE3 比在 CASE2 其上層弧角或礙子連等突波端電壓約上升 162.2kV；中層弧角或礙子連等突波端電壓約上升 45.99kV；下層弧角或礙子連等突波端電壓約降為 60.74kV。最主要係 CASE2 發揮架空地線雷擊分流效果，但若採 CASE3 則對鐵塔頂部架空地線未發揮雷擊分流效應，但對下層導線產生耦合作用促使下層弧角或礙子連等突波端電壓有比 CASE 2 降低現象，可降低下層弧角或礙子連發生閃絡機率。
- 從圖 10 可看出 CASE4 比在 CASE3 其上層弧角或礙子連等突波端電壓約上升 15.27kV；中層弧角或礙子連等突波端電壓約下降 59.3kV；下層弧角或礙子連等突波端電壓約下降 115.23kV。其最主要係鐵塔下層導線鐵塔之中心增設二條耦合地線，則對鐵塔頂部架空地線未發揮雷擊分流效應，但對中下層導線產生更大耦合作用促使中下層弧角或礙子連等突波端電壓有比 CASE3 降低現象，可降低中下層弧角或礙子連發生閃絡機率。
- 從圖 11 可看出 CASE5 比在 CASE4 其上層弧角或礙子連等突波端電壓約上升 109.49kV；中層弧角或礙子連等突波端電壓約上升 152.06kV；下層弧角或礙子連等突波端電壓約下降 204.76kV。其最主要係鐵塔下層導線鐵塔增設三條耦合地線，則對鐵塔頂部架空地線未發揮雷擊分流效應，但會使下層導線鐵塔增設三條耦合地線中間之一條耦合地線產生互感減少趨勢，致使鐵塔下層導線鐵塔增設三條耦合地線對弧角或礙子連等突波端電壓有比 CASE4 偏高現象，故對 CASE4 來得不理想。
- 由表 3 得知，CASE6 在雷擊電流 30kA 時，其低絕緣側全相弧角及高絕緣側全相礙子，未大於 50%衝擊閃絡電壓，故不會發生閃絡；但當雷擊電流 40kA 時，低絕緣側上層弧角間暫態突波端電壓大於 50%衝擊閃絡電壓，弧角而發生閃絡，另高絕緣側須在雷擊電流 60kA 時，礙子連上中層暫態突波端電壓才會大於 50%衝擊閃絡電壓，上中層礙子連發生閃絡。
- 從圖 12 可看出在#13 塔頂部遭受雷擊電流 50kA 時，CASE6 比在 CASE5 其上層弧角或礙子連等突波端電壓約下降 77.21kV；中層弧角或礙子連等突波端電壓約下降 106.24kV；下層弧角或礙子連等突波端電壓約下降 122.61kV。由此可看出鐵塔下層導線鐵塔之增設四條耦合地線比增設三條耦合地線對降低弧角或礙子連突波端電壓來得理想。
- 由表 4 得知，在雷擊電流 40kA 時，在鐵塔頂部增

設一條架空地線及下層導線增設二條耦合地線，則低絕緣側全相弧角及高絕緣側全相礙子，皆未大於 50% 衝擊閃絡電壓，故不會發生閃絡。但當雷擊電流 50kA 時，低絕緣側上層弧角間隙暫態突波端電壓大於 50% 衝擊閃絡電壓，弧角而發生閃絡。另高絕緣側須在雷擊電流 70kA 時，礙子連上層暫態突波端電壓才會大於 50% 衝擊閃絡電壓，上層礙子連發生閃絡。

- 8.) 從圖 12 可看出在#13 塔頂部遭受雷擊電流 50kA 時，從 CASE1 到 CASE7 之比較，可發現以鐵塔頂部增設一條架空地線及下層導線增設二條耦合地線對抑制弧角或礙子連等突波端電壓最有效。比在 CASE1 其上層弧角或礙子連等突波端電壓約降為 662.1kV；中層弧角或礙子連等突波端電壓約降為 751.8kV；下層弧角或礙子連等突波端電壓約降為 820.1kV，平均約降 35%~45% 左右。

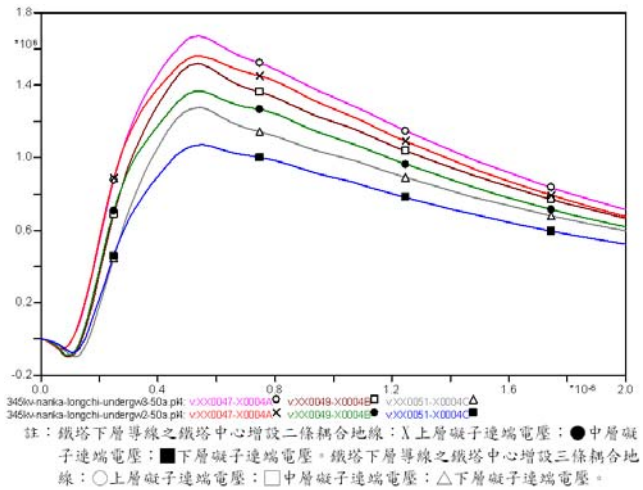


圖 11 #13 塔頂部遭受雷擊電流 50kA 時，CASE5 對各相礙子連端電壓比較

表 2 遭受不同雷擊電流時，CASE1 礙子連端電壓突波大小

雷擊電流大小 (kA)	礙子連端電壓(kV)					
	低絕緣側 (二路)			高絕緣側 (一路)		
	上層	中層	下層	上層	中層	下層
30	1129.26	1098.29	999.36	1129.26	1098.29	999.36
40	1166.9	1134.9	1032.68	1166.9	1134.9	1032.68
50	1505.68	1464.39	1332.49	1505.68	1464.39	1332.49
60	1882.09	1830.48	1665.61	1882.09	1830.48	1665.61
70	2634.93	2562.68	2331.85	2634.93	2562.68	2331.85
80	3011.35	2928.77	2664.97	3011.35	2928.77	2664.97
100	3764.19	3660.97	3331.21	3764.19	3660.97	3331.21

表 3 遭受不同雷擊電流時，CASE6 礙子連端電壓突波大小

雷擊電流大小 (kA)	礙子連端電壓(kV)					
	低絕緣側 (二路)			高絕緣側 (一路)		
	上層	中層	下層	上層	中層	下層
30	955.88	847.65	692.28	955.88	847.65	692.28
40	1274.51	1130.2	923.04	1274.51	1130.2	923.04
50	1593.14	1412.75	1153.81	1593.14	1412.75	1153.81
60	1911.77	1695.31	1384.57	1911.77	1695.31	1384.57
70	2230.39	1977.86	1615.33	2230.39	1977.86	1615.33
80	2549.02	2260.41	1846.09	2549.02	2260.41	1846.09
100	3186.28	2825.51	2307.61	3186.28	2825.51	2307.61

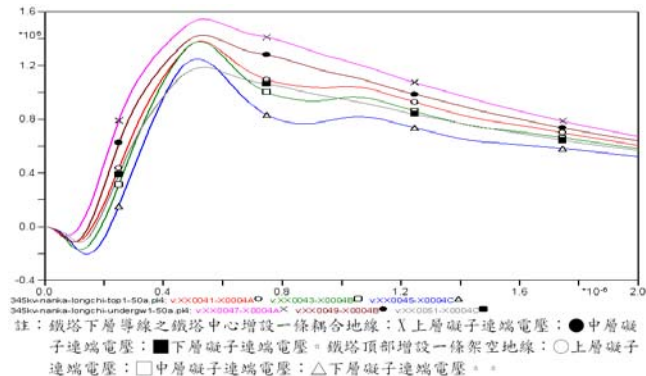


圖 9 #13 塔頂部遭受雷擊電流 50kA 時，CASE3 對各相礙子連端電壓比較

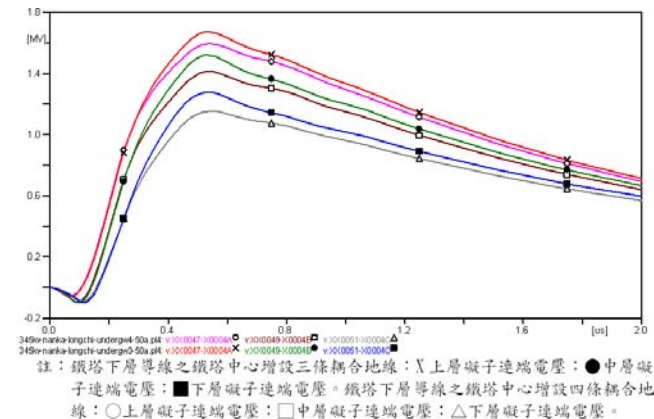


圖 12 #13 塔頂部遭受雷擊電流 50kA 時，CASE6 對各相礙子連端電壓比較

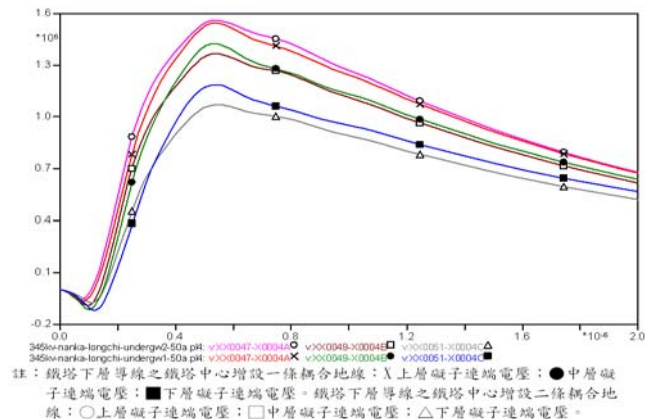


圖 10 #13 塔頂部遭受雷擊電流 50kA 時，CASE4 對各相礙子連端電壓比較

表 4 遭受不同雷擊電流時，CASE7 礙子連端電壓突波大小

雷擊電流大小 (kA)	礙子連端電壓(kV)					
	低絕緣側 (二路)			高絕緣側 (一路)		
	上層	中層	下層	上層	中層	下層
30	731.95	647.19	506.97	731.95	647.19	506.97
40	975.94	862.93	657.97	975.94	862.93	657.97
50	1219.93	1078.66	844.96	1219.93	1078.66	844.96
60	1463.92	1294.4	1013.96	1463.92	1294.4	1013.96
70	1707.9	1510.13	1182.95	1707.9	1510.13	1182.95
80	1951.89	1725.86	1351.94	1951.89	1725.86	1351.94
100	2439.86	2157.33	1689.93	2439.86	2157.33	1689.93

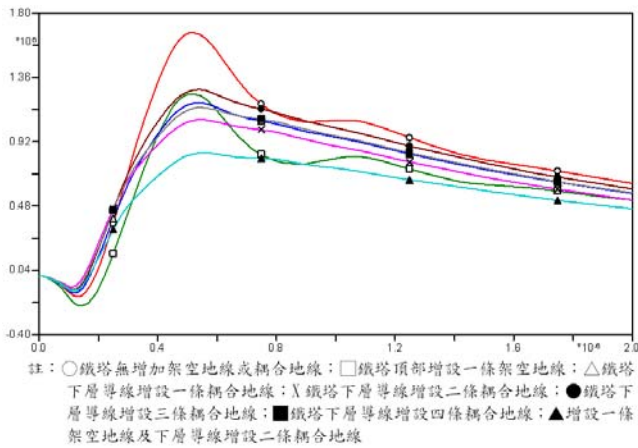


圖13 #13塔頂部遭受雷擊電流50kA時，CASE1~CASE7等情形對下層弧角或礙子連突波端電壓之比較

#### IV. 結論

台電自 1993 年至 2007 年選擇落雷密度較高區域 8 條 96kV 線路裝設耦合地線，歷經 14 年評估防雷擊成效，其降低雷擊事故約為 82%，顯現採裝設耦合地線方式亦可提高耐雷程度，且投資成本較少，本論文針對既設線路中雷擊頻率較大的區段(天輪到龍崎)，其經過地區 IKL 值高達 60 至 70 之間，探討 345kV 線路遭受到雷擊的可能原因。同時也以 EMTP-ATP 進行模擬，深入瞭解輸電線路遭受不同特徵雷擊時，在不同系統參數下之效應。這些分析與模擬所獲得之重要成果如下：

本論文探討台電 161kV 海纜遭受開關突波可能原因，並以電磁暫態程式(ATP-EMTP)進行模擬，以瞭解海纜遮蔽層遭受開關突波時，對海纜遮蔽層之突波效應，這些分析與模擬所獲得之重要成果如下：

- 1.) 鐵塔或架空地線遭受擊時，則該座鐵塔塔頂電壓為最高，然後往兩側鐵塔方向逐漸降低，雷突波上升率固定(2/70us)，在 40kA 以上之雷電流會造成山線弧角閃絡；但海線礙子連則可耐 60kA 雷擊電流。鐵塔遭受不同雷擊電流時，相對臨近兩側鐵塔山線弧角可耐 80kA 雷擊電流，而海線礙子連可耐 100kA 雷擊電流。
- 2.) 雷突波上升率愈大或雷擊通道阻抗愈大，愈容易使弧角或礙子連閃絡。鐵塔高度愈高或跨距區間愈長遭受雷擊機率愈大。鐵塔不同型式會影響保護角範圍。
- 3.) 在導線下方架設耦合地線對於增大耦合係數與分流效果都有顯著的表現，並可提昇桿塔的耐雷擊電壓，減少因桿塔接地電阻過高而發生逆閃絡的可能性，大幅降低雷擊跳脫事故。
- 4.) 在鐵塔頂部增設一條架空地線及下層導線增設二條耦合地線時，對抑制礙子連暫態突波端電壓效果最為顯著，並可高線路遮蔽範圍，防止線路遭受直接雷擊。

#### 參考文獻

- [1] IEEE std. 1243-1997, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Power Engineering Society, 26 June, 1997.
- [2] 台電公司, "台電機電事故統計資料 (75~95年)", 台電公司電力調度處與供電處, 95年。

- [3] 台電公司, 落雷資訊管理系統, 台電公司綜研所電力研究室網站。
- [4] 張宏展、吳瑞南、范振理, "輸電線路避雷器特性及濟效益評估", 計畫編號TPC-546-93-4105-03, 台電公司綜合研究所, 94年7月。
- [5] 台電公司, "台電345KV系統圖", 台電公司電力調度處。
- [6] 台電公司, "台電345kV各型鐵塔應力圖", 台電公司輸變電工程處。
- [7] 松山彰, "送電線雷害防止對策", 電氣評論, 97年7月, PP.16-19。
- [8] T. Hara, O. Yamamoto, "Modelling of a Transmission Tower for Lightning-Surge Analysis," IEE Proceeding - Generation, Transmission, and Distribution, Vol.143, No.3, May 1996, pp. 283 - 289.
- [9] 顏世雄, "避雷工程理論與實務", 90年2月。
- [10] M.E. Almeida and M.T. Correia de Barros, "Tower modeling for lightning surge analysis using Electro-Magnetic Transient Program," IEE Proceeding-Generation Transmission Distribution, Vol.141, No.6 November 1994, pp.637 - 639.
- [11] W. Durbak, "Surge Arrester Modeling" Proceedings of IEEE, 2001. Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, Vol. 2, 28 Jan.- 1 Feb. 2001, pp.728 - 730.
- [12] J. A. Martinez, F. C. Aranda, student member, IEEE, "Tower Modeling for Lightning Analysis of Overhead Transmission", 2005.