

# 345kV 架空線路引接地下電纜連接站接地系統對雷擊暫態研究

## Lightning Transient Study of a Hybrid Overhead and Underground 345kV System for Different Arrester Junctions Grounding Modes

蕭勝任                      陳明堂                      蕭勝文  
Sheng-Jen Hsiao      Ming-Tang Chen              Sheng-Wen Hsiao

高雄應用科技大學電機系  
台灣 高雄市

Department of Electrical Engineering National Kaohsiung University of Applied Sciences  
Kaohsiung, Taiwan  
[hsiau.seng@msa.hinet.net](mailto:hsiau.seng@msa.hinet.net)

### 摘要

暫態過電壓會威脅電力系統可分成三種型態：雷擊突波；開關突波及電源頻率過電壓，345kV 架空線路與地下電纜混接時供應高科技園區，在連接站必須裝設避雷器，以防止雷突波暫態過電壓侵入系統設備。本文主要使用 EMTP-ATP 軟體模擬避雷器、台架、電纜遮蔽層及接地網等相互間介面最佳接地引接方式，作為電力公司設計避雷器下引線接地方式之參考。

關鍵詞：雷擊突波、台架、電磁暫態模擬程式、避雷器、連接站，混合輸電系統

### Abstract

Transient over-voltages encountered by the power system equipment are mainly divided into three types: lightning surges, switch surges, and power frequency over-voltages. Arrester is required to prevent a hybrid overhead and underground 345kV transmission system from transient over-voltage damage the system equipment that serves a high-tech industrial park. This paper focus is used EMTP-ATP software package simulation studying present adopted interface between arrester and platform and cable sheath and ground network. Besides, a staged lightning impulse test is performed to validate the reality of the simulations. The simulation and test results are reported, and they could be employed to find an effective design of the grounding modes for arrester at the junctions.

Keywords: Lightning Surge, Platform, EMTP-ATP, Arrester, Junctions, Hybrid Transmission System.

## I. 前言

電力系統暫態過電壓有雷擊及開關突波等，而 345kV 電力系統而言，以雷擊對電力設備衝擊最大。特別是架空輸電線路因暴露在大氣中，每年在雷雨季常遭受雷擊侵襲。當 345kV 屬架空線路連接地下電纜系統時，架空線路之雷擊突波，因架空部份之突波阻抗高於地下電纜突波阻抗(約 13 倍)。因此，雷進行波進入電纜時會被分解成折射波與反射波。折射波電壓為入射波與反射波之電壓和，其強度往往高於入射波[1-2]。所以在架空線路與地下電纜連接界面會裝設避雷器，以保護系統設備之絕緣。由於避雷器裝在台架上，其底座採絕緣與台架鋼鐵隔離。本論文採用實際系統資料，以 ATP-EMTP [3] 及參照 IEEE 及 IEC 絕緣協調標準[4-5]，建立 345kV 架空線路連接地下電纜

系統模型，分析目前連接站避雷器接地端引線連接計數器後之接地線直接利用電纜台架做為接地或直接引入連接站地網方式對雷突波暫態特性，各項分析分別敘述如下：

## II. 建立避雷器台架及接地下引線電氣參數模型

為建立 345kV 電纜連接站避雷器台架參數及 ATP 模型，故需先計算出連接站接地線引接方式及地網電氣參數，並分析如下：

### A. 建立台架角鐵參數

1. 電阻計算： $R = \rho \left( \frac{l}{A} \right)$  (1)

其中  $\rho$  為電阻率， $A$  為截面積， $l$  為長度

2. 電感計算公式

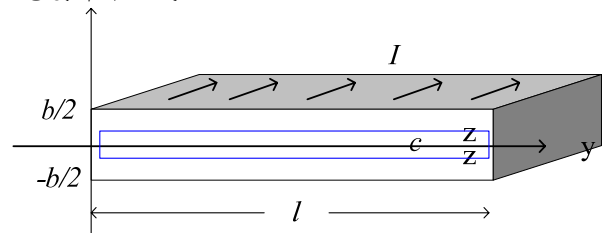


圖 1 金屬片電感計算

由圖 1 所示，導體金屬片，寬度  $l$ ，厚度  $b$ ，電流( $I$ )方向為  $+x$  方向，則可推得電感公式：

$$L_{int} = \frac{\Lambda}{i} = \frac{\mu_r \mu_0}{6} \left( \frac{b}{l} \right), \text{ H/m} \quad (2)$$

由於角鐵片為良導磁材料，故外部(空氣)漏磁通予以忽略不計，即外部電感為零。

### B. 接地引線電感

考慮半徑為  $r$  之圓導線如圖 2 所示，分別計算內部及外部電感。

1. 內電感：

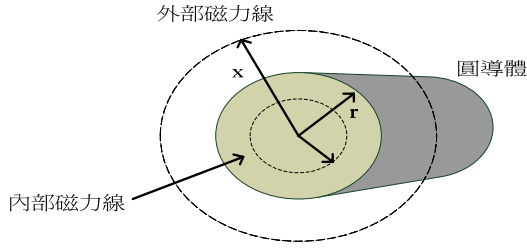


圖 2 圓導線電感推導

$$\text{則內電感 } L_{int} = \frac{\Lambda}{i} = \frac{\mu_r}{2} \times 10^{-7}, \text{ H/m} \quad (3)$$

2. 外部電感：考慮距離導線外  $x$  處，磁通密度

$$\text{外部電感：} L_{ext} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r}\right), \text{ H/m} \quad (4)$$

由公式(4)，線徑較大有較低之外部電感。圖 3 為四種不同線徑導線，改變距離  $D$  時之外部電感變化，圖中顯示外部電感大於內電感甚多，故總電感幾乎均為外部電感，IEEE 建議值一般取  $1.3 \mu\text{H/m}$ 。

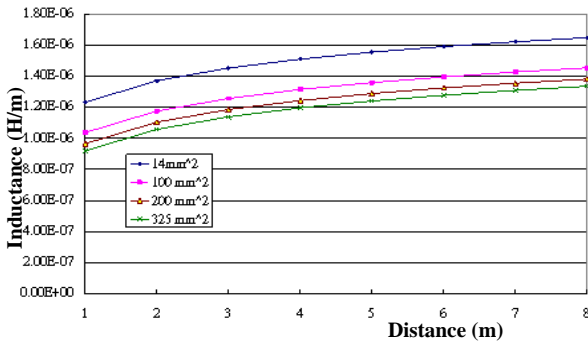


圖 3 不同線徑導線外部電感變化

### C. 避雷器下引線與台架位置之電感效應

由於現場施工環境不同，避雷器下引線可能沿台架外側或內側佈放，當下引線位於側邊時，將對平行部分環路產生互感；若置於內側時則又同時對垂直角鐵環路產生磁通環路而增加自感。本節推導下引線對台架角鐵環路之電感公式，再以 ATP-EMTP 進行模擬[2-22]。

#### a) 下引線與台架角鐵環路平行

如圖 4 所示，下引線與角鐵環路平行(台架垂直部分角鐵)，引線上電流  $i$  將於角鐵環路產生磁通交鏈  $\lambda_p$ ，產生互感及感應電壓。圖 4 中，設角鐵片方形環路寬度為  $w$ ，高度為  $h$ ，導線與環路距離為  $d$ ，則導線上電流於環路面積內之磁通鏈為

$$\lambda_p = \frac{\mu_0 i d}{2\pi} \int_d^{d+w} \frac{1}{x} dx = \frac{\mu_0 i h}{2\pi} \ln\left(\frac{w+d}{d}\right) \quad (5)$$

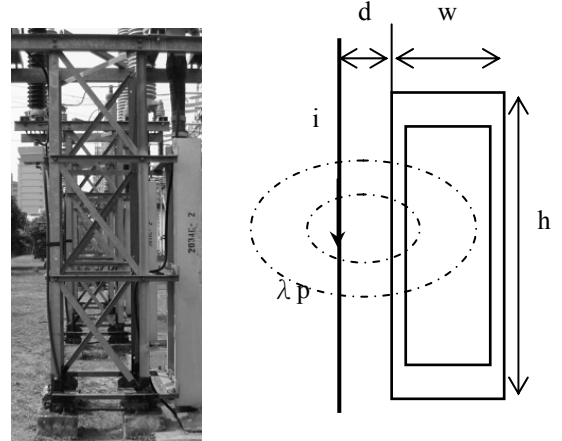


圖 4 避雷器下引線於台架平行環路

$$\text{與環路互感為 } M = \frac{\lambda_p}{i} = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln\left(\frac{w+d}{d}\right), \text{ H} \quad (6)$$

$$\text{於環路上感應電壓為 } V_{ind} = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln\left(\frac{w+d}{d}\right) \times \frac{di}{dt} \quad (7)$$

由台架上角鋼電阻、電感參數可模擬此感應電壓於台架之上響應。以 345kV 避雷器台架為例，取  $d=8\text{cm}$ ， $w=40\text{cm}$  可求得單位長度互感為

$$M = 2 \times 10^{-7} \times \ln\left(\frac{48}{8}\right) = 0.36 \mu\text{H/m} \quad (8)$$

#### b) 下引線穿過垂直角鐵環路之電感計算

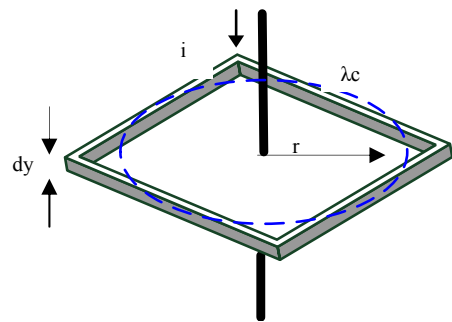


圖 5 導線位於鐵片環路中間之電感計算

如圖 5 所示，若引線穿入台架內，下引線電流將與引線垂直角鐵環路產生磁通，產生電感效應，增加引線自感。設鐵片厚度  $d_{fe}$ ，為求簡化，假設引線置於中心點且將角鐵環路近似為半徑  $r$  圓形，則於圓形鐵片上磁通鏈為

$$\lambda_c = \int_0^{d_{fe}} B_{ext} dy = \int_0^{d_{fe}} \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} dx = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi} d_{fe} \quad (9)$$

$$\text{電感為 } L = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} d_{fe}, \text{ H/m} \quad (10)$$

以 345kV 避雷器台架為例，取  $r=20\text{cm}$ ， $d=0.5\text{cm}$ ， $\mu_r=1000$ ，鐵片高度為  $7\text{cm}$ ，則可計算得一環路電感為

$$L = 2 \times 1000 \times \ln\left(\frac{20+0.5}{20}\right) \times 10^{-7} \times 0.07 = 0.035 \mu H$$

由計算結果顯示因台架水平角鐵環路增加之導線自感不大，較平行角鐵互感小，故採下引線與台架角鐵環路平行做模擬。

#### D. 345kV 避雷器台架 ATP 模型建立

圖 6(a) 為 345kV 避雷器台架側視圖，台架四邊斜向角鐵片連接方式及環路路徑如圖 6(b)~(c) 所示，其中斜向角鐵片計 12 段。經過各角鋼計算後，其電阻及電感如表 1，並建立 ATP 模型如圖 7，電壓量測點同樣設為 F1~N 四點。

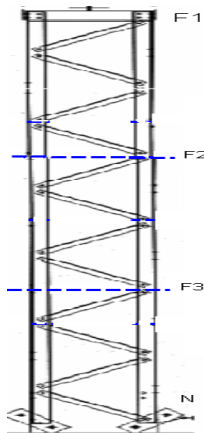
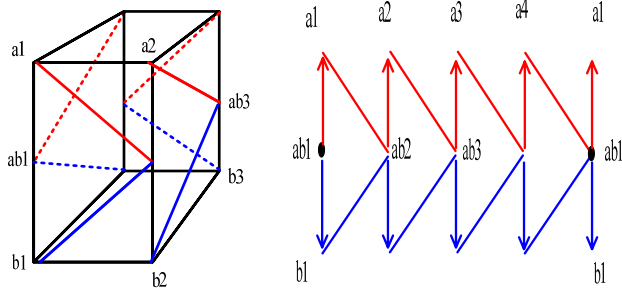


圖 6 (a)：345 kV 避雷器台架側視圖



(b) (c)

圖 6(b)：台架角鐵連接；(c) 角鐵環路展開

表 1 345 kV 避雷器台架角鐵片參數估算

	垂直角鐵片	水平角鐵片	備註
厚度	0.7cm	0.4cm	1. $\rho$ 取 $10^{-7}$
寬度	9cm	5cm	$\Omega$ -m
長度	433.5cm	45cm	2. $\mu_r$ 取 1000
電阻 (每小段)	$0.57 \times 10^{-3} \Omega$	$0.23 \times 10^{-3} \Omega$	3. 垂直角鐵片每小段為 433.5/12=36.125cm
電感 (每小段)	$5.91 \times 10^{-6} H$	$7.54 \times 10^{-6} H$	

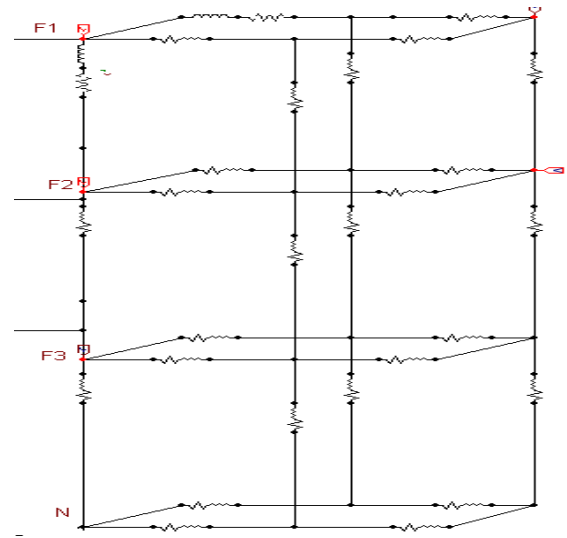


圖 7 345 kV 避雷器台架 ATP 模型

#### E. 高頻地網模型建立

為考慮地網對高頻率開關突波響應影響，參考文獻 [22-24] 地網高頻分佈模型如圖 8，參數計算如公式 (3.1)~(3.4)。參考南科 345kV 連接站，地網大小約為 35m x 125m，分為 2x4 網格，每格大小約為 18m x 32m，如圖 9。地網採 200 mm<sup>2</sup> 裸硬銅線。接地棒接地電阻取 1 歐姆。

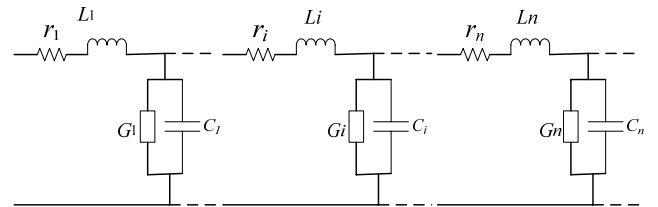


圖 8 高頻地網導體模型 [1]

$$L_i \approx \frac{\mu_0 l_i}{2\pi} \times \left( \ln \frac{2l_i}{a} - 1 \right) \quad H \quad (11)$$

$$r_i = \frac{\rho}{2\pi l_i} \times \left[ \frac{2h+a}{l_i} + \ln \frac{l_i + \sqrt{a^2 + l_i^2}}{a} - \sqrt{\left(\frac{a}{l_i}\right)^2 + 1} + \ln \frac{l_i + \sqrt{4h^2 + l_i^2}}{2h} - \sqrt{\left(\frac{2h}{l_i}\right)^2 + 1} \right]^{-1} \quad (12)$$

$$C_i(a_i) = 2\pi\epsilon l_i \times \left[ \frac{a_i}{l_i} + \ln \frac{l_i + \sqrt{a_i^2 + l_i^2}}{a_i} - \sqrt{\left(\frac{a_i}{l_i}\right)^2 + 1} \right]^{-1} \quad (13)$$

$$G_i = \frac{C_i}{\epsilon\rho} \quad \Omega^{-1} \quad (14)$$

其中

$l$ ：為每段網目地網導體線長度(長、寬各取 18 及 32 米)

$a$ ：為地網導體半徑(約 0.008 m)

$\rho$ ：為土壤電阻係數(約 100  $\Omega$ -m)

$h$  : 為地網埋設深度 (約 50cm)

$\epsilon$  : 為土壤相對介電常數 (取 9)

可計算得

18m 邊之  $C=5.3\text{pF}$ ,  $G=0.67(1/\Omega)$ ,  $r=0.075\Omega$ ,  
 $L=0.027\text{mH}$ ;

32m 邊之  $C=7.8\text{pF}$ ,  $G=0.98(1/\Omega)$ ,  $r=0.133\Omega$ ,  
 $L=0.051\text{mH}$ 。

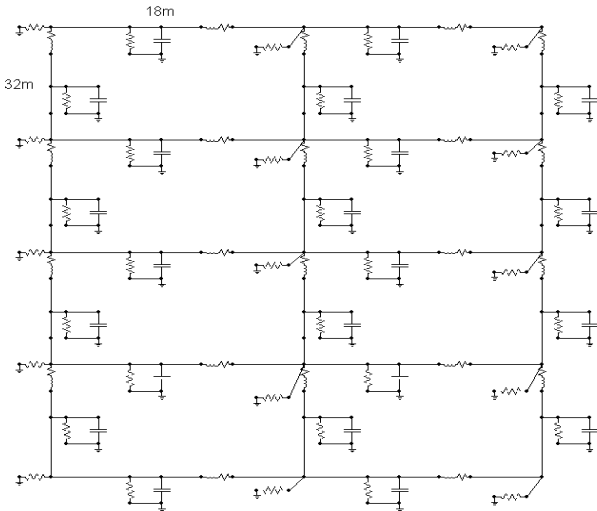


圖 9 345kV 連接站 ATP 高頻地網導體模型

### III. 實際模擬與分析

主要供應南部科學園區台電 345kV 架空線路與地下電纜連接系統詳如圖 10 所示, 其輸電線路參數為: (a) 輸電線導體: 線規 795MCM(26/7) ACSR 之直徑為 28.143mm, 20°C 直流電阻為 0.06834Ω/km, (b) 架空地線: 線規 19NO.8 ACW 之直徑為 16.3mm, 20°C 直流電阻為 0.276Ω/km, (c) 礙子連 (19 只/串): 50% 衝擊閃絡值高絕緣為 1605kV, 低絕緣在弧角間隙 2150mm 時, 50% 衝擊閃絡值為 1155kV, (d) 鐵塔: 雷突波傳遞速率採用光速、阻尼係數取 1、衰減係數取 0.7, (e) 鐵塔接地電阻取 10 歐姆, (f) 地下電纜每回線採用 2500mm<sup>2</sup>XLPE 複導體, 其中, 地下電纜系統遮蔽層每 450m 交錯換位 [2-4]。

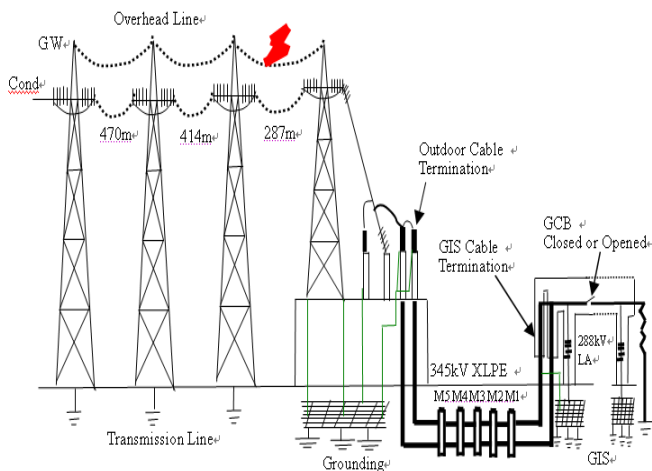


圖 10 345kV 電纜連接站雷擊過電壓分析系統

### A. 避雷器下引線、平台及電纜遮蔽至地網各種不同接地模式分析

根據上述參數, 為驗證避雷器接地引接線、台架接地及地下電纜接地系統等相互間對雷擊突波暫態響應, 並參考台電公司落雷偵測系統等參數, 取雷擊電流 150 kA (2x50μs), 雷擊點離連接站出口架空線路約 500m 處第 1 座與第 2 座鐵塔間架空地線, 建立 ATP-EMTP 模擬電路如附圖 11 所示 [2-22]。則發生在架空線路 A 相雷擊暫態突波電壓最高約 5377kV 如圖 12 所示, 因此, 本篇模擬觀察主要以 A 相為主。並依表 2 所列各種情況進行模擬所得結果如下:

- 由表 3 得知: 如圖 7 所示在台架底部 N 點接地處, 接地處電位湧昇及電流洩放變化中, 下引線與台架共接地之電位湧昇高於獨立接地之情況 (分別為 500kV 及 2.6kV)。
- 由表 3 得知: 觀察連接站電纜相導體與遮蔽層電位差 (即避雷器放電電壓加引線壓降), 其中電纜遮蔽層接地與下引線接地共接於台架時, 兩端暫態突波電壓為 886kV 至 1091kV; 獨立接地時暫態突波電壓為 1258kV 至 1394kV, 將高於電纜 BIL 值 1300kV, 不利於接續處電纜保護。接地端共接於台架時, 因併接引線較短, 電纜與避雷器併接端有較低之電位差。
- 從表 3 中之比較 Case 3 及 Case 4 得知: 避雷器底座與台架隔離, 且避雷器下引接地線與電纜遮蔽層共同引接至台架後再行連接至接地網, 雖然對台架基礎角鐵位置暫態突波電壓 Case 3 比 Case 4 高, 但相對連接站電纜相導體與遮蔽層電壓差約可降 33.1%。
- 從表 3 中之 Case 5 及 Case 6 得知: 避雷器不用接地線, 以台架為接地路徑, 因受制於台架之阻抗效應, 故避雷器洩放電流比其他模擬情況較小, 則台架到地網電流變大。
- 若地下電纜兩末端無併接避雷器時, 由圖 13 得知, 避雷器底座與台架隔離, 在 Case 3 情況下, 則在連接站處電纜導體與遮蔽層電壓差高達 1777kV; 在 Case 4 情況下, 則在連接站處電纜導體與遮蔽層電壓差為 1570kV。此情況皆超過電纜 BIL 值, 由此可見, 架空線路引接地下電纜兩端須裝設避雷器。

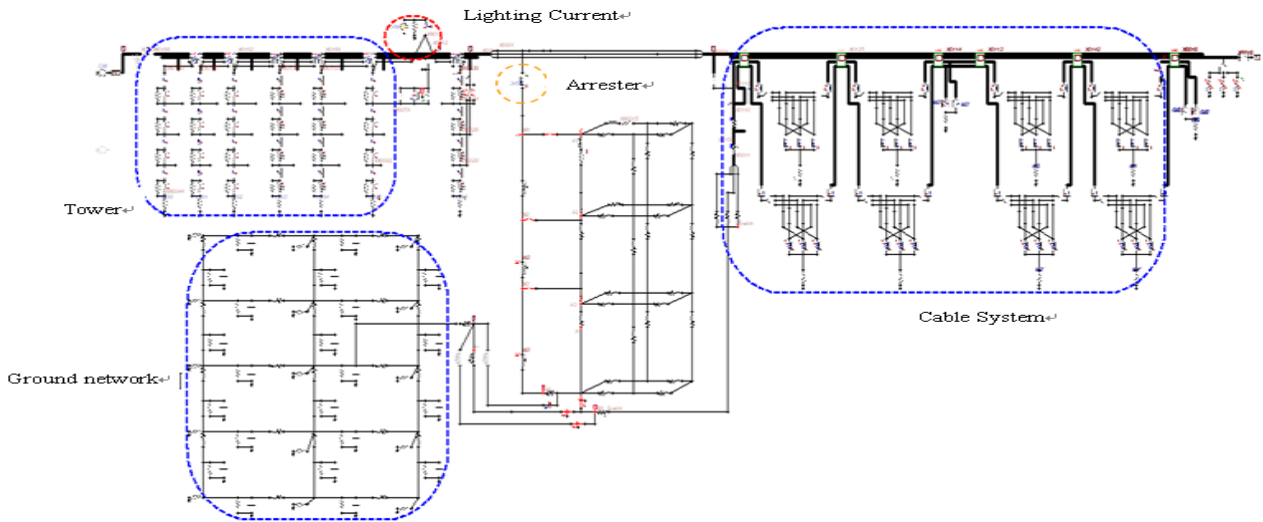


圖 11 345kV 電纜系統電路 EMTD 模型

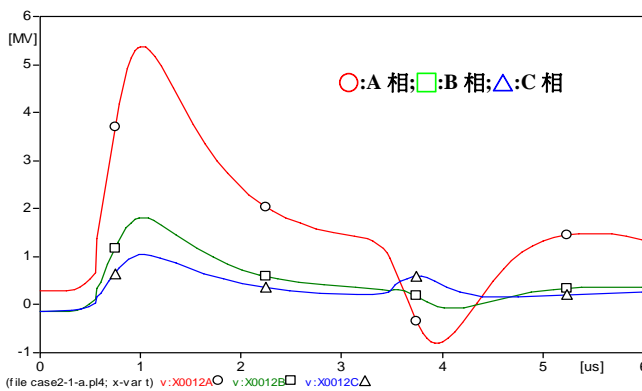


圖 12 雷擊點架空線路相導體突波電壓

表 3 模擬避雷器與台架各種接地情況

模擬項目	模擬情況					
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
觀測點						
台架底部 N 點電壓, kV	525	400	500	2.6	412	341
連接站電纜相導體與遮蔽層電壓差, kV	886	1258	897	1342	1091	1394
避雷器洩放電流 (kA)	7.3	9	7.3	7.3	6.1	5.9
台架到地網的電流 (kA)	1.1	3.8	0	0	6.1	5.9
避雷器引線電流 (kA)	6.3	5.2	7.3	7.3	無引線	無引線
遮蔽層接地電流 (kA)	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9

表 2 345kV 模擬項目狀況及說明

模擬項目及編號		模擬情況
接地線連接方式	避雷器底座與台架短接	Case 1
	下引線與電纜遮蔽層共同引接台架後接地網	Case 2
避雷器底座與台架隔離	下引線、電纜遮蔽層及台架均獨立接地網	Case 3
	下引線與電纜遮蔽層共同引接台架後接地網	Case 4
避雷器不用接地線，以台架為接地路徑	下引線、電纜遮蔽層及台架均獨立接地網	Case 5
	電纜遮蔽層引接台架後接地網	Case 6

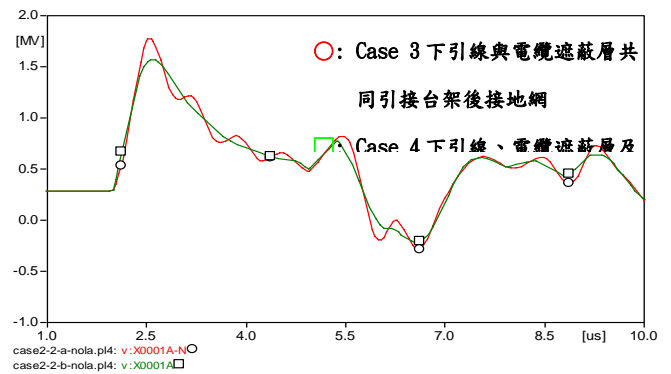


圖 13 在 Case 3 與 Case 4 條件之下電纜前端及末端無併接避雷器，在連接站處電纜導體與遮蔽層電壓差

### B. 平台至地網連接地線不同長度模擬

此部分利用避雷器底座與台架隔離，即 Case 3 及 Case 4 兩種情形，模擬不同連接地線的長度，觀察對於系統電位湧升之影響。模擬中取 8m、12m 和 25m 之三種連接導線長度，模擬結果如下：

- 由表 4 得知，接地引線越長(即電感越大)，台架接地點的電位湧升越高，同時使雷電流洩放能力降低。當雷擊電流 150 kA (2x50 μs)，加於架空地線，雷擊點距離連接站約 500m 處顯示，接地引線在 25m 時，則在 Case 4 (下引線、電纜遮蔽層及台架均獨立接地網) 連接站處電纜相導體與遮蔽層電壓已超過電纜 BIL 值 1300kV；而在 Case 3 (下引線與電纜遮蔽層共同引接台架後接地網) 則未超過 1000kV。因此以 Case 4 裝設情況，則避雷器接地引線必須小於 25m 以下。
- 由表 4，以 Case 4 裝設情況，台架接點電壓隨避雷器接地引線長度越短其電壓值越低。

表 4 不同接地引線長度模擬結果

接地引線 長度	case 3			case 4		
	8m	12m	25m	8m	12m	25m
模擬項目						
避雷器洩放電 流(kA)	9.6	8.9	7.2	9.8	9.2	7.2
台架接地點電 壓(kV)	308	425	500	2.6	3.4	3.6
連接站電纜相 導體與遮蔽層 電壓差, kV	896	912	932	1212	1262	1342

### C. 避雷器接地系統人工脈衝試驗與模擬比較

為了驗證前述模擬結果的真實性，本文利用責務電壓 72kV (10kA) 級避雷器，分別以下列不同方式連接地網：(1)下引線約 10 米長之 100mm<sup>2</sup> PVC 線，(2)台架，觀察 8x20us、10kA 衝擊電流之響應。所獲得的結果如下：

- 避雷器底座直接引入地網：圖 14(a)顯示無下引線時之電壓突波峰值為 174.4kV 與圖 15(a)有下引線時之峰值 189.9kV 比較，兩者之差為引線等效電感之壓降：

$$L \times \frac{di}{dt} = 189.959 - 174.405 = 15.554 \text{ kV} \quad (20)$$

其中  $\frac{di}{dt} = \frac{10 \text{ kA}}{8 \mu\text{s}} = 1.25 \text{ kA}/\mu\text{s}$ ，代入式(20)可得

$L = 1.244 \mu\text{H}/\text{m}$  與 IEEE Std 1299/C62.22.1 建議值  $1.3 \mu\text{H}/\text{m}$  相近。

- 避雷器底座與台架短接後再引入地網接地：放電電流波形如圖 16 所示，可見放電電流峰值約由 10kA 降至 4.8 kA，洩放能力約為單獨使用下引線之 48%。圖 17(a)所示為實測衝擊電壓，其峰值為 188.4kV，而 ATP 模擬結果如圖 17(b)，衝擊電壓為 188kV。

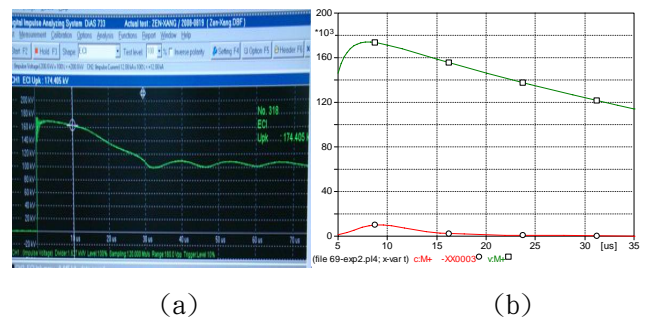


圖 14 避雷器無串接下引線時之衝擊電流響應，(a)實測電壓突波波形；(b) ATP 模擬電壓突波波形

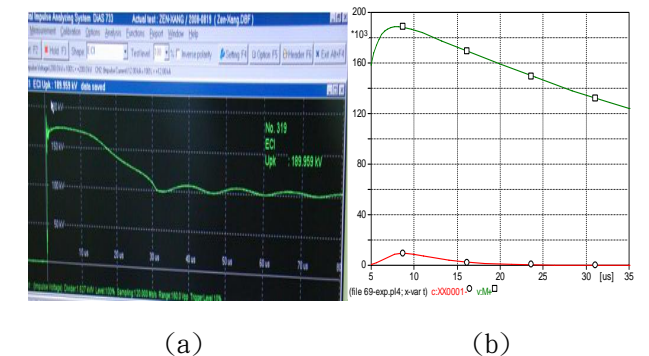


圖 15 避雷器有串接下引線時之衝擊電流響應，(a)實測電壓突波波形；(b) ATP 模擬電壓突波波形

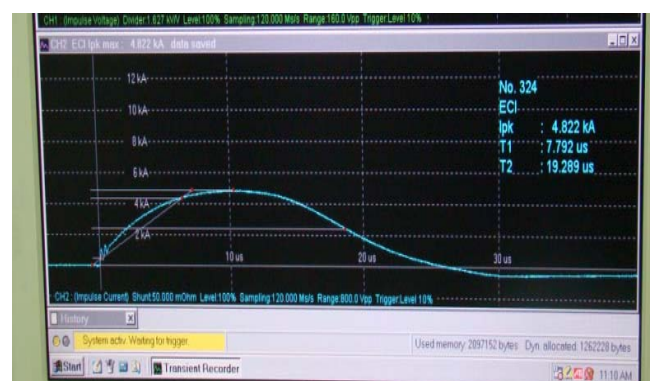


圖 16 避雷器底座與台架短接後再引入地網時放電電流波形

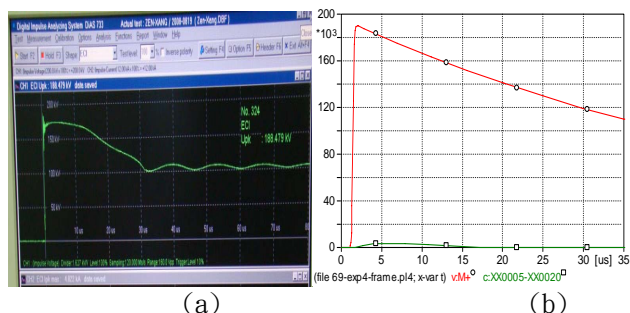


圖 17 避雷器底座與台架短接後再引入地網之衝擊電流響應，(a) 電壓突波波形；(b) ATP 模擬電壓突波波形

## VI. 結論

當架空地線遭受雷擊電流 150 kA ( $2 \times 50 \mu s$ )，雷擊點離連接站出口架空線路約 500m 處第 1 座與第 2 座鐵塔間架空地線，經模擬與分析有關連接站接地方式，獲得重要結果如下：

- 1) 對於連接站接地系統，將避雷器底座與台架隔離及將避雷器下引接地線與電纜遮蔽層接地線共同於台架接地後再引接至接地網接地為最佳接地方式連接站電纜相導體與遮蔽層電壓差約可降 33.1%。
- 2) 345kV 架空線路與地下電纜混接之系統，地下電纜兩末端須裝設避雷器，在雷擊時可降低電纜銅導體與遮蔽層間暫態突波電壓。
- 3) 當接地引線越長(即電感越大)，台架接地點的電位湧升越高，使避雷器洩放雷電流能力降低，因此，應儘量降低引線電感，可採多條並聯方式。
- 4) 建議電纜遮蔽層接地與避雷器下引線儘量置放於台架外側，可減少台架鐵構之磁力線交連引起額外自感值。

## 參考文獻

- [1] Electric Power Research Institute (EPRI), "Chapter 10 - Transmission Line," Underground transmission systems Reference Book, 1992, pp.401-437.
- [2] S.J. Hsiao and M.T. Chen," Simulation and Analysis of Lightning Performance for 345kV XLPE Cable," International Conference on Power Systems Transients (IPST2009) in Kyoto, Japan June 3-6, 2009.
- [3] S.J. Hsiao and M.T. Chen," Simulation and Analysis of Lightning Transient Performance for Different Arrester Platform Grounding Models," The 30<sup>th</sup> symposium on electrical power engineering in Taiwan, November 283-29, 2009.
- [4] *Alternative Transients Program Rule Book*, Canadian/American ATP

User Group, 1995.

- [5] G. W. Chang, and H. M. Huang, "Lightning Transient Study of a Hybrid Overhead and Underground High-Voltage System," IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [6] Insulation Coordination – Part 1: Application guide, Standard, IEC 60071-1-2006.
- [7] IEEE Standards for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (> 1 kV), IEEE Std C62.11a - 2008.
- [8] IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, IEEE Std C62.22-1997.
- [9] IEEE Design Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Std. 1243-1997.
- [10] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std. 1410-2004.
- [11] IEEE Guide for the Connection of Surge Arresters to Protect Insulated, Shielded Electric Power Cable Systems, IEEE Std 1299/C62.22.1-1996,
- [12] Impulse Tests on Cables and Their Accessories, IEC Std. 60230-1996.
- [13] W. Watson, "Surge Potentials on Underground Cable Sheath and Joint Insulation," IEEE Tran. PAS-78, pp.239-249, 1963.
- [14] A. R. HILEMAN, "Insulation Coordination in APS 500-kV Stations," IEEE Tran. PAS-87, pp.154-162, 1967.
- [15] S. L. Du, "Insulation Coordination Study of a 220 kV Cable Line," IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp.2082-2086, 2000.
- [16] G. CARRARA, "Switching Surge Insulation Coordination: Lightning Arresters," IEEE Tran. PAS-86, pp.655-665, 1967.
- [17] J. C. Cronin, "Transient Lightning Overage Protection Requirements for a 500 kV Gas-Insulated Substation," IEEE Tran. PAS-97, pp.68-78, 1978
- [18] E. W. Boehne, "Basic Switching Surge Insulation Levels: A Proposed Philosophy for EHV Insulation Coordination," IEEE Tran. PAS-88, pp.492-500, 1969.
- [19] T. Yamada, "Experimental Evaluation of A UHV Tower Model for Lightning Surge Analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, pp. 393-402, No.1, January 1987.
- [20] Masaru Ishii, "Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis," IEEE Transactions on Power Delivery,

vol. 6, pp. 1327-1335, No.3, July 1991.

- [21] M.Ramamoorthy, "Transient Performance of Grounding Grids,"  
IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October  
1989, pp. 2053-2059.
- [22] S. Karaki, "Transient Impedance of GIS Grounding Grid," IEEE  
Transactions On Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995, pp.  
723-731.
- [23] Rong Zeng, "Lightning Impulse Performances of Grounding Grids  
for Substations Considering Soil Ionization," IEEE Transactions  
On Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October 1989, pp. 2053-2059.