

## **Application of Electromagnetic Transients Program to Analyze Arrester Installation In Lunchi Extra High Voltage Substation**

Fu-Sheng Pai, Chen-Tong Lin , Ming-Zong Wang

Department of Electrical engineering  
National University of Tainan  
Tainan, Taiwan, R. O. C.

### **Abstract**

Lightning is one of critical concerns in the operation of electric power transmission and distribution systems. It is well known that the lightning strikes may cause the power system outage and even pose hazards to utility personnel. Hence, in this paper an ATP-EMTP (Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program) model for evaluation of lightning strike on a 161 kV transmission line is developed. In the study, lightning arresters are installed at different equipment terminals to analyze the effect of lightning current on each terminal equipment and the suppression status of inrush current. Beside, according to the actual data of the system operation, the current installation location of the arrester is analyzed and compared with the simulation results to determine whether the arrester is a repetitive investment and the maximum efficiency installation point. Different test cases have been carried out for the study considered.

The simulation results show that: (1) the lightning strikes may cause the switchgear to withstand abnormal overcurrent and be damaged. It is necessary to install arresters at the downstream end of the transmission line in the substation. (2) Installation of a series reactor can significantly suppress the lightning surge. (3) Within the substation overhead line and underground cable mixed system, installing underground lightning arrester on both ends can effectively reduce the lightning surge voltage. (4) Consider the protection of cables and transformers, the best place of lightning arrester installation should be near the transformer.

**Keywords:** Lightning surge, Arrester, Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program.

## 電磁暫態模擬程式於龍崎超高壓變電所避雷器安裝模擬研究

白富升, 林建同, 王明宗

國立臺南大學電機工程學系

### 摘要

雷害對電網供電穩定衝擊甚鉅，嚴重時可能會造成停電，甚至是電力設備現場操作人員的工安問題，因此電力公司基於系統穩定供電職責與使命下，戮力於夏日雷害的避雷及防雷之改善措施，惟因雷擊特性難以掌握，常造成變電所避雷器、招弧角等避雷設備重複投資且過度安裝。

因此本文旨在探討雷擊之形成及其突波特性，同時應用電磁暫態程式 ATP-EMTP 依數據建立一 161kV 輸電線路連接至變電所變壓器模型，模型建構包含電纜及架空線路，並模擬在不同設備終端安裝避雷器，利用電腦程式分析雷電流對各終端設備之影響及突入電流抑制狀況。最後依實際收集數據分析目前避雷器安裝位置，比對模擬結果來判斷避雷器是否重複投資以及最大效益安裝點，本文經由模擬結果發現線路出口端安裝避雷器為必要，否則將可能導致開關設備承受異常過電流而受損；安裝串聯電抗器可明顯抑制雷擊突波；在變電所內架空線與地下電纜混接之系統，地下電纜兩端裝設避雷器可有效抑制雷擊突波壓升現象；考慮電纜與變壓器之保護，避雷器安裝應以變壓器側為最具效益之安裝點。

**關鍵詞：**雷擊突波，避雷器，電磁暫態模擬程式

## 一、緒論

長期以來電力公司在防止雷害措施上均有著相當程度的努力與作為，例如：設計高低絕緣不同之輸電線路、線路鐵塔安裝招弧角、建置輸電線路雷擊事故資訊平台、安裝避雷器、建置線上避雷器監測管理系統等，惟避雷器安裝仍需考慮設備環境、絕緣強度及線路種類等，才可達預期功能。目前台電公司針對重點線路及變電所均裝設有避雷器設備，但部分變電所因未考慮雷擊特性而有多裝避雷器之現象，造成資源利用上的浪費。因此本論文特別針對該類變電所建置相關模組，利用 ATP-EMTP 程式分析其遭受雷擊之突波特性，期可從中尋求最佳避雷器安裝點。

### 1. 模擬參數設定

模擬環境係以台電龍崎超高壓變電所(以下簡稱龍崎 E/S)為模擬背景環境，建立 161kV 輸電線-龍崎山上一路至龍崎 E/S 161kV 開關場，由架空線經過開關設備、串聯電抗器到電纜連接站後下地，經地下電纜最後到 345kV #7 自耦變壓器之模型。

參考開關場及輸電鐵塔實際環境，模擬 161kV 架空線鐵塔塔高 26m，塔間距#1、#2 塔分別為 204m 及 124m，架空地線引至大地之線長約 60m，經 12m 之鐵構拉住。架空輸電線進變電所鐵構後經開關及電抗器設備改以地下電纜連接至#7 自耦變壓器，架空輸電線與開關設備處有 PD 及額定 144kV 之避雷器。假設最雷擊嚴厲情況，以 50kA(2x70us)雷電流擊中距變電所鐵構 60 公尺外之#1 鐵塔塔頂，導致第一番線碍子發生逆閃絡，碍子發生閃絡電壓為 680kV，雷電流經架空輸電線進入變電所，如圖 1 所示。

考慮以離#7ATr 最近之 161kV 龍崎山上一路為系統模擬的輸電線路，其連接自龍崎超高壓變電所至山上區隙子口的山上一路變電所(以下簡稱：山上 P/S)，線路全長 17 公里 56 座輸電鐵塔，線路容量為 370MVA，如圖 2 所示。依台電公司「台灣各行政區每年每季雲對地落雷次數統計表」[1]所記載，台南市山上區屬落雷情形較嚴重之區域，因此剛好符合本論文之模擬需求。

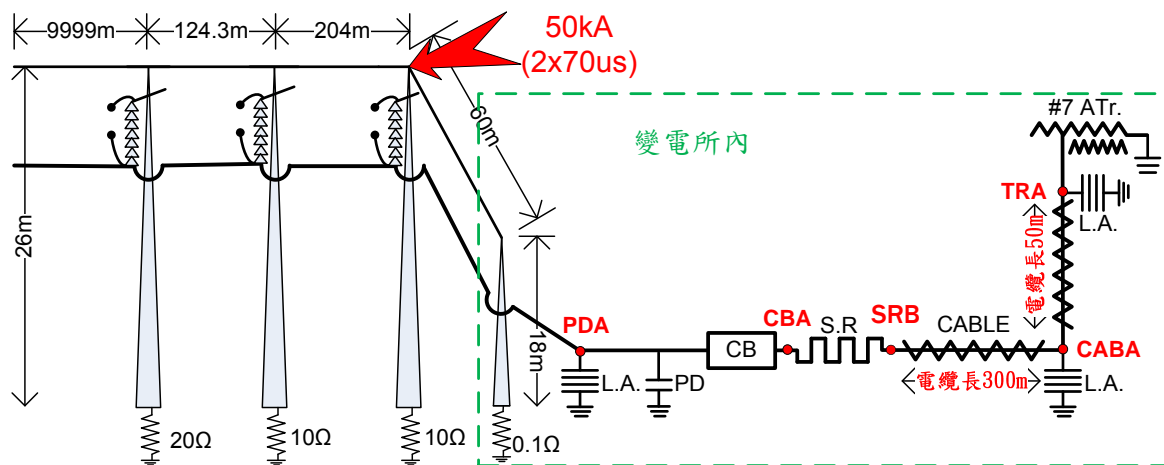


圖 1 模擬雷擊示意圖



圖 2 龍崎山上一路路徑示意圖

因考慮系統最嚴重之狀況，故本線路擇離龍崎 E/S 161kV 開關場出口最近之#1、#2 及#3 鐵塔作為模型的代表區間來進行模擬，相關設定參數如下：

- A. 輸電線路：架空相線線規為 477 MCM ACSR, 26/7 ACSR，其他設定詳下表 1 及表 2 計算結果。
- B. 比壓器：Trench TEVP-161A，100 年 11 月 25 日加入系統，電容值  $8686 \mu\text{F}$ ，BIL：750kV。
- C. 避雷器：Tridelta SB-144，105 年加入系統，總容量為 23pF，Lightning Impulse Withstand Voltage(LIWL)：870kV，I-V 特性值如圖 3。
- D. 串聯電抗器：士林製 SR6，97 年加入系統，容量 25MVA，電感值  $6870 \mu\text{H}$ ，BIL：750kV。
- E. 自耦變壓器：大同製 TR52，88 年加入系統，三相分離總容量 500MVA，345/161/33 Y-Y- $\Delta$ 接，BIL：一次測 1050kV；二次測 750kV，對地電容 4500pF，阻抗標么值詳下表 3：
- F. 斷路器：中興製 OFPTB-140-50L，100 年加入系統，額定電流 2000A，遮斷電流 50kA，BIL：750kV。
- G. 雷擊電流參數：根據台電歷年運轉資料統計，次數頻繁之雷擊電流落在 30kA 以下，其中以 10kA 以下之雷擊電流次數為冠，考慮系統雷擊在較嚴重的狀況下，設定雷擊電流為 50kA；雷擊突波特徵則設為  $2/70 \mu\text{s}$ ，雷道電阻為  $400 \Omega$ 。
- H. 其餘未提及之變電設備，依據 IEEE Std 82.1994[4]所列之各電壓等級試驗 BIL 值判斷，如下表 4。

表 1 輸電線阻參數表

	架空相線	架空地線	鐵塔 / 鐵構	電纜
波速	300m/ $\mu\text{s}$	300m/ $\mu\text{s}$	210m/ $\mu\text{s}$	150m/ $\mu\text{s}$
突波阻抗	450 $\Omega$	350 $\Omega$	100 $\Omega$	60 $\Omega$
波衰減係數	0.96/240m	0.88/240m	0.9/50m	0.9996/1000m
等效電阻值	0.1531 $\Omega$ /m	0.3728 $\Omega$ /m	0.4214 $\Omega$ /m	0.000047 $\Omega$ /m
接地電阻			20 $\Omega$	
碍子 V50 閃絡電壓(161kV 低絕緣)：680kV				

表 2 輸電線塔型距離與接地電阻參數表

塔號	距離(m)	塔型	接地電阻( $\Omega$ )
#1	124.3	Eb1	20
#2	204	Eb1	10
#3	60	Eb1	10
#0(變電所)	0		0.1
#1 電纜	300		
#2 電纜	50		

表 3 變壓器阻抗標么值

System Base:100MVA					
R1-2(p.u.)	X1-2(p.u.)	R2-3(p.u.)	X2-3(p.u.)	R3-1(p.u.)	X3-1(p.u.)
0.00032	0.03391	0.00246	0.15663	0.00218	0.18188

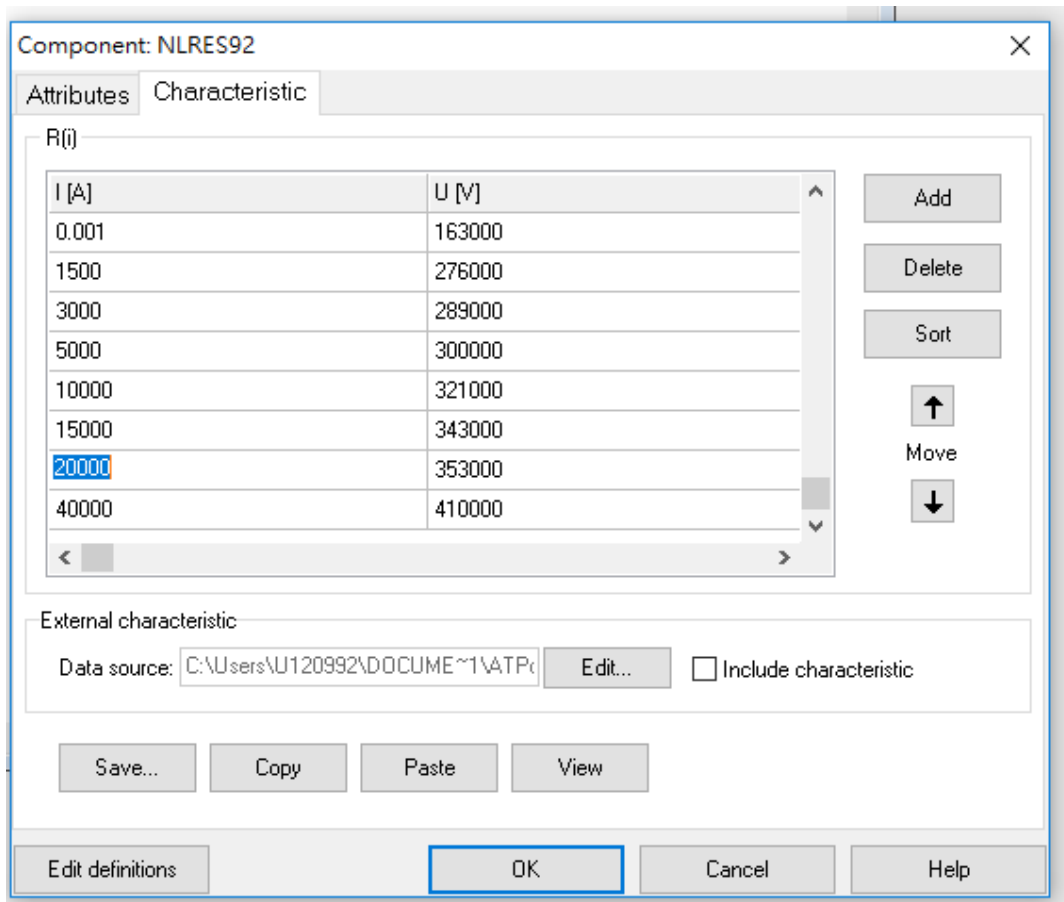


圖 3 避雷器 I-V 特性值

表 4 系統 BIL 等級[4]

Voltage class kV phase-to-phase	(BIL) kV	Voltage class kV phase-to-phase	(BIL) kV
2.5	60	69.0	350
5.0	75	92.0	450
8.0	95	115.0	550
15.0	110	138.0	650
25.0	150	161.0	750
35.0	200	230.0	1050
46.0	250	345.0	1300
		500.0	1550

圖 4 所示為依上述條件所建立之 EMTP 模型[3]，因模擬#1 鐵塔塔頂遭受雷擊，故雷擊電流源置於#1 塔頂，此模型所模擬之各種雷擊狀況以及雷擊時暫態過電壓特性將於下節討論。

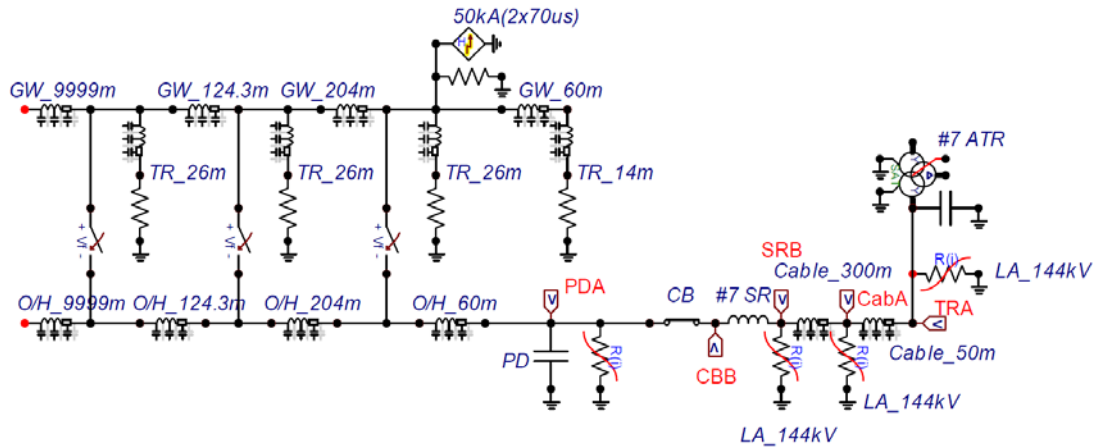


圖 4 EMTP 模擬系統圖

## 二、模擬結果與討論

A. 假設在#1 塔遭受雷擊後，系統安裝電抗器及出口端避雷器前後之變化模擬分析結果如表 5 所示。模擬結果發現如下：

- 在 Case1-1 系統均未安裝電抗器及避雷器時，各節點突波電壓模擬結果如下圖 5，線路出口端 LPD 處(PDA)及斷路器處(CBB)在  $6.63 \mu s$  時量測到最大電壓為 778kV，尚未超過避雷器 LIWL 值；第一段電纜連結站(CabA)在  $8.87 \mu s$  時量測到最大電壓為 778kV；變壓器側出口端(TRA)在  $8.94 \mu s$  時量測到最大電壓為 834kV，可以發現在系統未安裝電抗器及避雷器的狀況下，各節點突波電壓均超過設備本身之 BIL 值(750kV)。
- 在 Case1-2 系統安裝避雷器未安裝電抗器時，各節點突波電壓模擬結果如下圖 6，線路出口端 LPD 處(PDA)及斷路器處(CBB)在  $6.2 \mu s$  時量測到最大電壓為 350kV；第一段電纜連結站(CabA)在  $5.04 \mu s$  時量測到最大電壓為 583kV；變壓器側出口端(TRA)在  $5.35 \mu s$  時量測到最大電壓為 587kV，可以發現在系統安裝避雷器未安裝電抗器的狀況下，各節點突波電壓均未超過設備本身之 BIL 值

(750kV)。

- (c) 在 Case1-3 系統安裝電抗器未安裝避雷器時，各節點突波電壓模擬結果如下圖 7。線路出口端 LPD 處(PDA)及斷路器處(CBB)在  $2.4\mu s$  時量測到最大電壓為 862kV；電抗器電纜側(SRB)在  $4.57\mu s$  時量測到最大電壓為 489kV；第一段電纜連結站(CabA)在  $4.37\mu s$  時量測到最大電壓為 493kV；變壓器側出口端(TRA)在  $4.37\mu s$  時量測到最大電壓為 493kV，可以發現在系統安裝電抗器未安裝避雷器的狀況下，各節點突波電壓除 PDA 外，其餘均未超過設備本身之 BIL 值 (750kV)。
- (d) 在 Case1-4 系統均安裝電抗器及避雷器時，各節點突波電壓模擬結果如下圖 8。線路出口端 LPD 處(PDA)及斷路器處(CBB)在  $1.29\mu s$  時量測到最大電壓為 321kV；電抗器電纜側(SRB)在  $4.55\mu s$  時量測到最大電壓為 457kV；第一段電纜連結站(CabA)在  $4.68\mu s$  時量測到最大電壓為 460kV；變壓器側出口端(TRA)在  $4.68\mu s$  時量測到最大電壓為 460kV，可以發現在系統安裝電抗器及避雷器的狀況下，各節點突波電壓均未超過設備本身之 BIL 值(750kV)。另外，分析 Case1-4 可以發現，在 SRB 到 CabA(300m 電纜)壓升了 3.2kV 左右;CabA 到 TRA(50m 電纜)壓升了 126V 左右，因此可知地下電纜的存在將使突波電壓明顯壓升，且長度越長效應越明顯。

表 5 電抗器與避雷器安裝前後分析結果

		各節點最大電壓(V)			
		PDA	SRB	CabA	TRA
避雷器及電抗器安裝	Case1-1 皆無裝設	778,034		778,688	834,505
	Case1-2 僅安裝避雷器	350,710		583,638	587,483
	Case1-3 僅安裝電抗器	862,073	489,897	493,233	493,743
	Case1-4 均安裝於系統	321,560	457,322	460,549	460,675

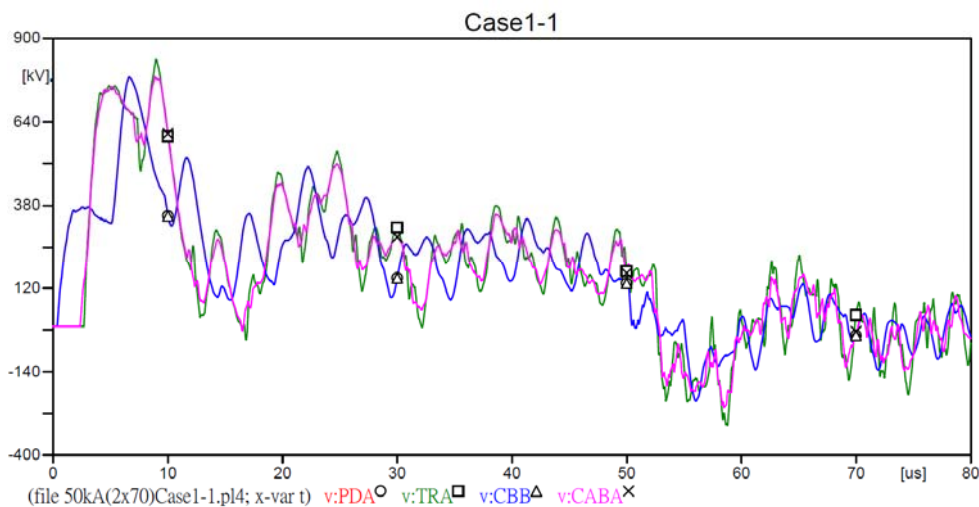


圖 5 Case1-1 突波電壓模擬波型

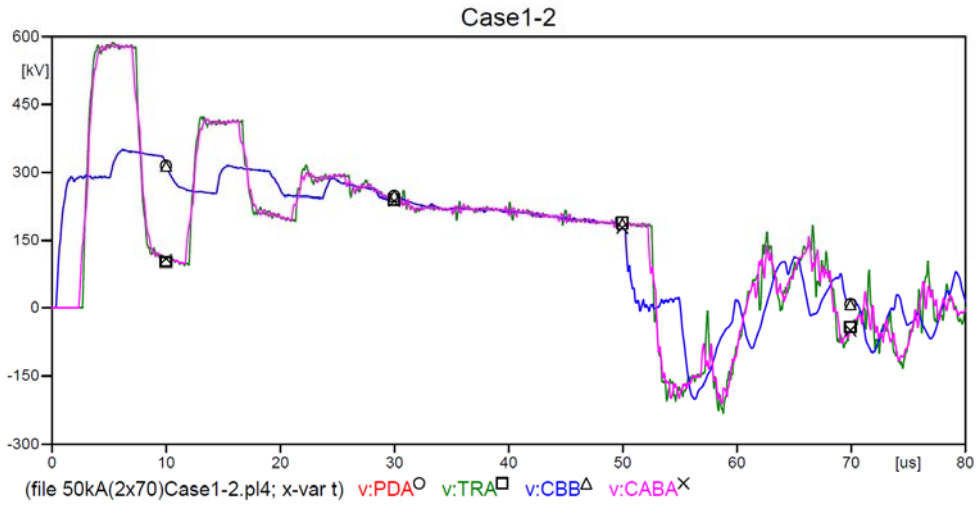


圖 6 Case1-2 突波電壓模擬波型

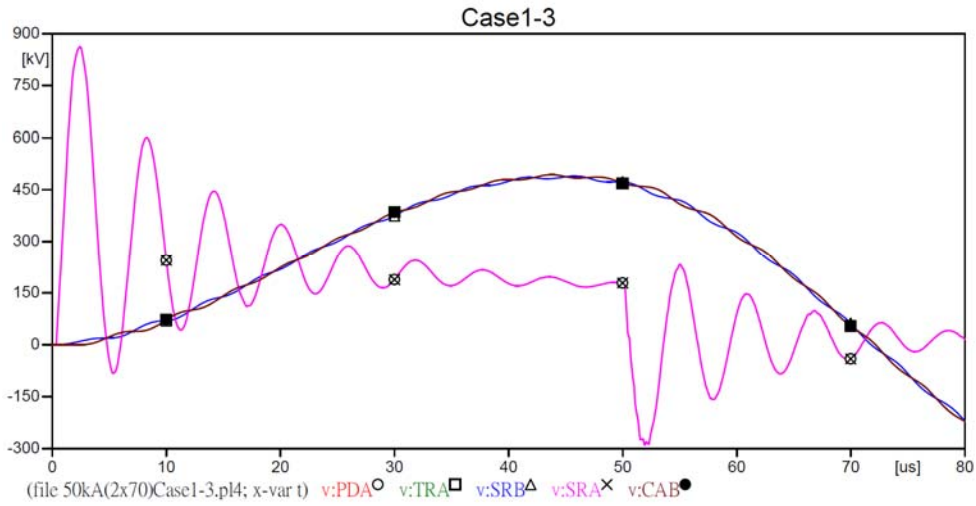


圖 7 Case1-3 突波電壓模擬波型

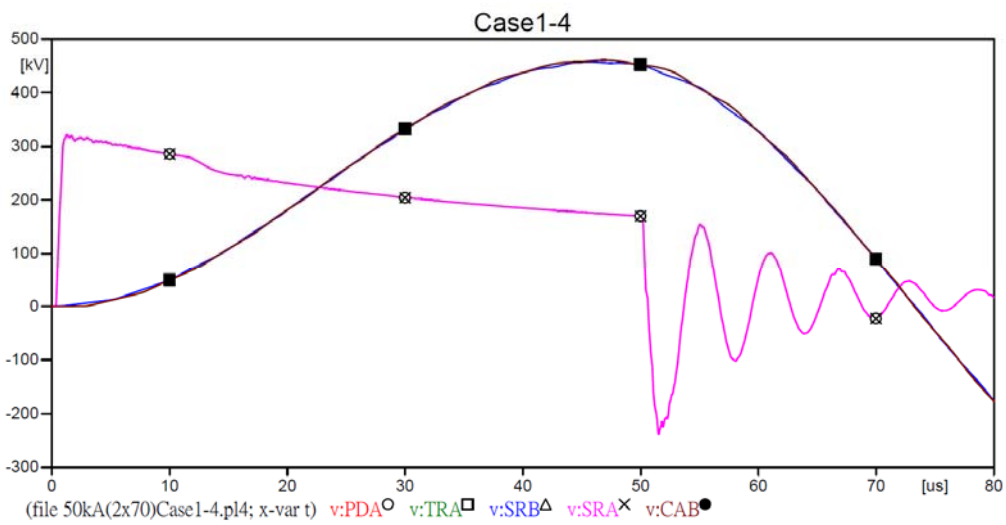


圖 8 Case1-4 突波電壓模擬波型

B. 假設在#1塔遭受雷擊後，系統有安裝電抗器及出口端避雷器(PDA)，其餘節點安裝避雷器之變化模擬分析結果如表6。模擬結果發現，在Case2-7系統SRB、CabA及TRA均安裝避雷器時，各節點突波電壓模擬結果如下圖9。線路出口端LPD處(PDA)及斷路器處(CBB)在 $1.29\mu s$ 時量測到最大電壓為321kV；電抗器電纜側(SRB)在 $2.1\mu s$ 時量測到最大電壓為181kV；第一段電纜連結站(CabA)在 $4.05\mu s$ 時量測到最大電壓為180kV；變壓器側出口端(TRA)在 $4.08\mu s$ 時量測到最大電壓為180kV；另外在Case2-3系統僅於TRA安裝避雷器時，各節點突波電壓模擬結果如下圖10。線路出口端LPD處(PDA)及斷路器處(CBB)在 $1.29\mu s$ 時量測到最大電壓為321kV；電抗器電纜側(SRB)在 $3.04\mu s$ 時量測到最大電壓為210kV；第一段電纜連結站(CabA)在 $3.24\mu s$ 時量測到最大電壓為210kV；變壓器側出口端(TRA)在 $3.27\mu s$ 時量測到最大電壓為210kV。分析Case1-4、Case2-3及Case2-7可發現以下訊息：

- 為解決電纜造成的壓升效應，於SRB、CabA及TRA(電纜兩側)均安裝避雷器可將變壓器側突壓大幅度抑制至180kV左右。
- 比較避雷器的安裝投資，增加SRB及CabA避雷器的安裝僅實現抑制突波電壓增加30kV左右之差距，因出口端(PDA)已安裝避雷器，考慮電纜、變壓器突壓保護及安裝效益，應於變壓器側(TRA)安裝避雷器可實現最大效益。

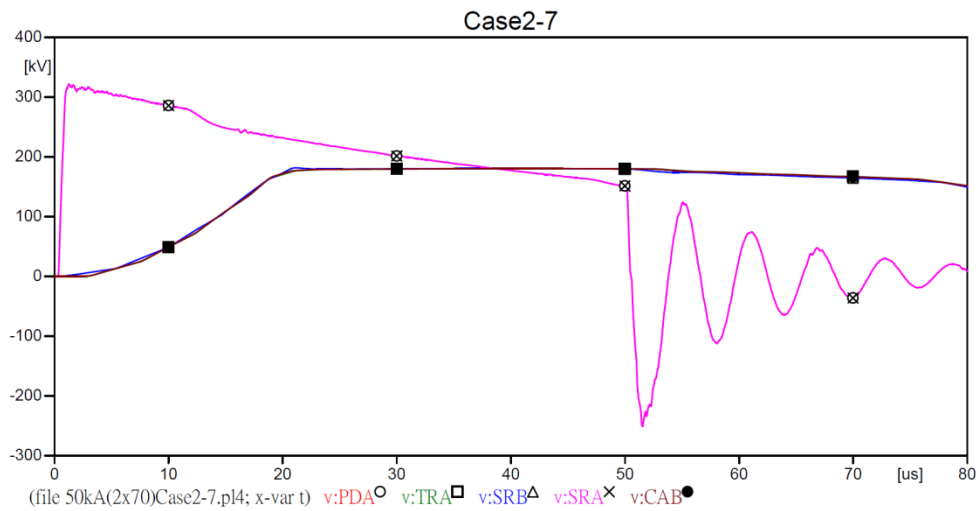


圖9 SRB、CabA及TRA均安裝避雷器特性曲線圖

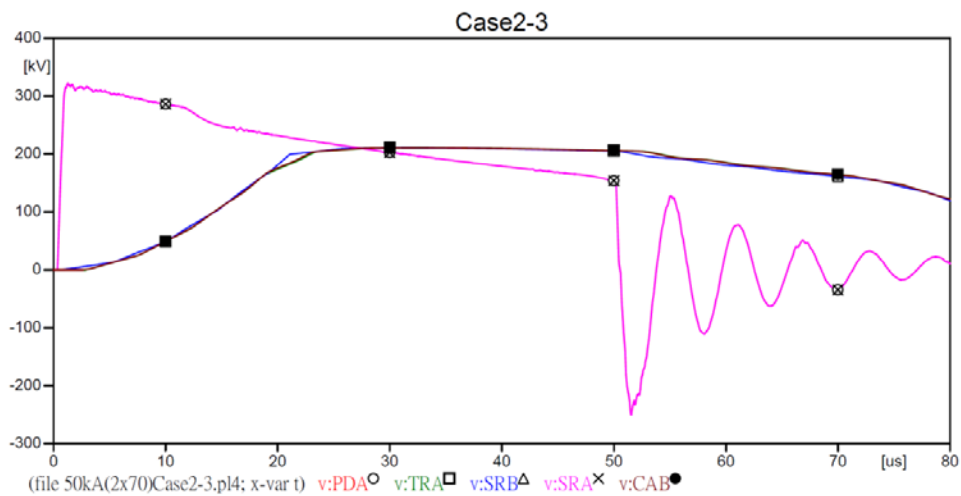


圖10 TRA處安裝避雷器特性曲線圖

表 6 避雷器設置處所前後分析結果

	各節點最大電壓(V)			
	PDA	SRB	CabA	TRA
Case2-1 SRB 處安裝，CabA 及 TRA 處不安裝	321,560	211,150	211,271	211,272
Case2-2 CabA 處安裝，SRB 及 TRA 處不安裝	321,560	210,999	210,989	211,004
Case2-3 TRA 處安裝，SRB 及 CabA 處不安裝	321.560	210,735	210,804	210,809
Case2-4 SRB 及 CabA 處安裝，TRA 處不安裝	321.560	188,285	188,302	188,303
Case2-5 CabA 及 TRA 處安裝，SRB 處不安裝	321.560	196,240	190,127	190,495
Case2-6 SRB 及 TRA 處安裝，CabA 處不安裝	321.560	188,278	188,289	188,289
Case2-7 SRB、CabA 及 TRA 均安裝避雷器	321.560	181,905	180,300	180,300

- C. 假設系統已於 PDA 處安裝避雷器，在#1 塔遭受雷擊後，系統其餘避雷器安裝處所對應之變壓器節點電壓(TRA)之變化，該模擬雷擊電流分別由 60kA、70kA、80kA、90kA 至 100kA，模擬分析結果如下表 7。模擬結果發現，在 Case3-1 系統於 SRB、CabA 及 TRA 處安裝避雷器時，各節點突波電壓模擬結果如下圖 11。60kA 雷擊電流時在  $5.06 \mu s$  時量測到最大電壓為 185kV；70kA 雷擊電流時在  $5.25 \mu s$  時量測到最大電壓為 189kV；80kA 雷擊電流時在  $5.25 \mu s$  時量測到最大電壓為 193kV；90kA 雷擊電流時在  $5.25 \mu s$  時量測到最大電壓為 196kV；100kA 雷擊電流時在  $5.25 \mu s$  時量測到最大電壓為 215kV；另外在 Case3-7 系統於 TRA 處安裝避雷器，SRB 及 CabA 處不安裝避雷器時，各節點突波電壓模擬結果如下圖 12。60kA 雷擊電流時在  $3.86 \mu s$  時量測到最大電壓為 220kV；70kA 雷擊電流時在  $4.53 \mu s$  時量測到最大電壓為 230kV；80kA 雷擊電流時在  $5.15 \mu s$  時量測到最大電壓為 239kV；90kA 雷擊電流時在  $5.25 \mu s$  時量測到最大電壓為 248kV；100kA 雷擊電流時在  $5.25 \mu s$  時量測到最大電壓為 254kV。在雷擊電流 100kA 狀態下，增加 SRB 及 CabA 的避雷器投資，僅實現抑制突波電壓約 40kV 左右之差距，且各突壓均未超過設備 BIL 值。

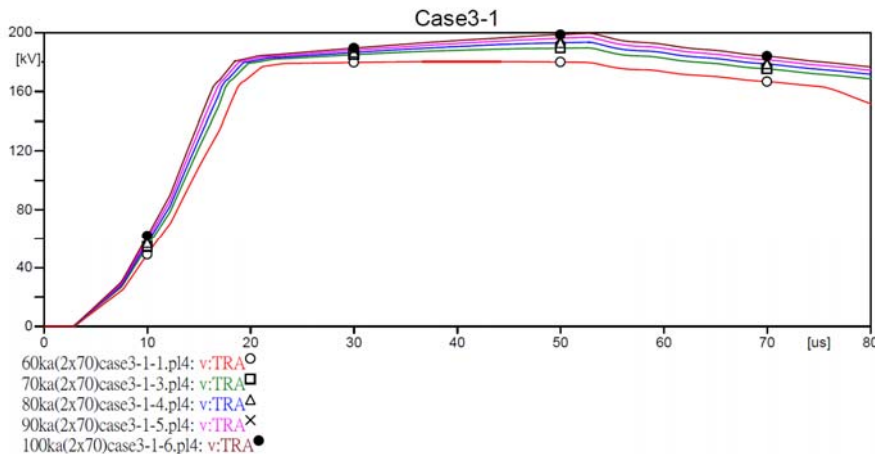


圖 11 SRB、CabA 及 TRA 均安裝避雷器特性曲線圖

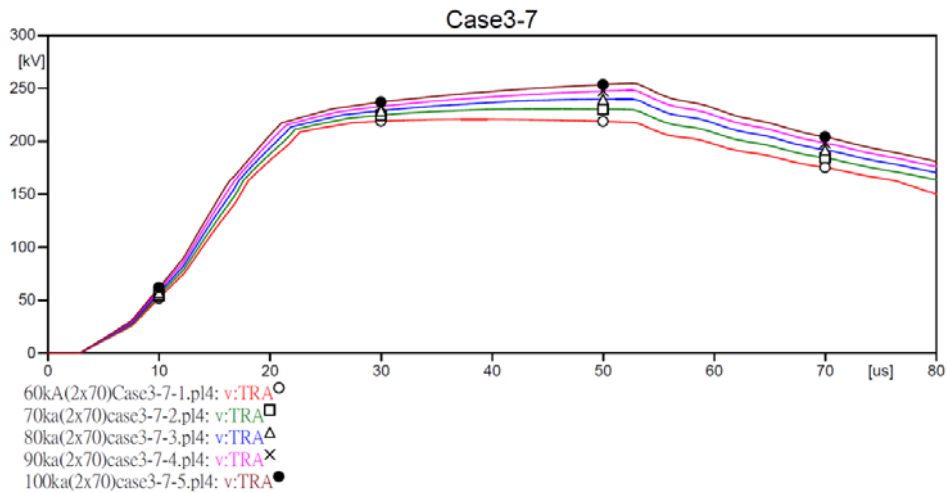


圖 12 TRA 處安裝避雷器特性曲線圖

表 7 雷擊電流大小對避雷器設置處所前後分析結果

	雷擊電流大小(kA/kV)				
	60	70	80	90	100
Case3-1 SRB、CabA 及 TRA 均安裝避雷器	185	189	193	196	215
Case3-2 SRB 及 CabA 處安裝，TRA 處不安裝	194	201	206	211	215
Case3-3 CabA 及 TRA 處安裝，SRB 處不安裝	194	200	206	211	215
Case3-4 SRB 及 TRA 處安裝，CabA 處不安裝	194	201	206	211	215
Case3-5 SRB 處安裝，CabA 及 TRA 處不安裝	221	231	240	249	255
Case3-6 CabA 處安裝，SRB 及 TRA 處不安裝	221	230	240	248	254
Case3-7 TRA 處安裝，SRB 及 CabA 處不安裝	220	230	239	248	254
Case3-8 SRB、CabA 及 TRA 均不安裝避雷器	530	586	628	661	692

### 三、結論與未來展望

雷害屬台灣地區最常見之天然災害，台電公司一直以來均致力於降低雷害對設備所造成之衝擊，包含輸電線、變電設備…等重點設備的避雷措施可謂不遺餘力。本論文利用電磁暫態程式 ATP-EMTP 根據實際資料建構一輸電線路及變電所模型，模擬各階段雷擊對變電所避雷器安裝位置之影響，分析與模擬結果可得以下結論：

1. 在不考慮線路是否裝設避雷器及非位於雷區的狀況下，變電所出口端應加設避雷器，可避免雷擊突波對出口端設備造成損壞。

2. 安裝電抗器可有效抑制雷擊突波，但前提須在雷擊突波電壓未超過設備 BIL 值，且此非為防雷措施中的主流做法，目前台電公司仍以有效安裝避雷器為主要精進作為。
3. 雷擊突波經過電纜時會有壓升現象，隨著電纜長度增加壓升現象越明顯，而在電纜兩側加裝避雷器可明顯抑制雷擊的突波電壓。
4. 考慮該線路出口端已裝設有避雷器，依照模擬結果應於變壓器側(TRA)安裝避雷器為最有效益之處，現行 SRB 及 CabA 安裝之避雷器雖仍有其作用，但投資報酬率相形拙劣。

#### 四、參考文獻

- [1] 台電公司綜研所電力研究室, 落雷資訊管理系統網站。
- [2] 蕭勝任、陳明堂、蕭勝文,"345kV 架空線路引接地地下電纜連接站接地系統對雷擊暫態研究",電力工程研討會,2010 年 12 月,pp.1843-1844。
- [3] L. Prikler, H. Hoidalen, **ATPDraw for windows version 1.0**, Release No.1, November 1998.
- [4] IEEE Std 82-1994, "**IEEE standard test procedure for impulse voltage tests on insulated conductors**".