

架空配電線路避雷器裝設與防護效果探討

Installation of Arresters for Overhead-Line Distribution Systems and their Protective Capabilities

王瑋民*
Wang, Wei-Min

陳建富**
Chen, Jiann-Fuh

范振理***
Fan, Chen-Li

鄭強***
Cheng, Chiang

摘 要

配電系統混合使用架空電纜及地下電纜情形日益增多，為防制雷擊等突波破壞，電力系統廣泛裝設避雷器，保護設備免於突波引起之絕緣破壞。本文主要針對架空配電線路系統，以配電級避雷器為主要研究對象，探討避雷器規格特性及裝設方式於雷擊防制效果，文中利用電磁暫態軟體(Alternative Transient Program, ATP)進行模擬與分析。

Abstract

The practice of installing overhead-line conductors and underground cables in a mixed manner in distribution systems has become commonplace. Arresters are now commonly installed to protect the electric power equipment against instances of transient over-voltage caused by surge. In this paper, the relative standards and characteristics of distribution-class arresters and the protective performance of installation schemes were studied. The ATP (Alternative Transient Program) was used for the purpose of simulations.

關鍵詞 (Key Words)： 配電系統 (Distribution System)、避雷器 (Arrester)、突波(Surge)。

壹、研究背景

避雷器為過電壓保護元件，其主要任務為當突波侵入時（如雷擊過電壓或系統開關過電壓），藉由非線性元件之放電特性，於瞬間電壓超過設定值時可行放電並釋放能量，保護設備免於過電壓引發之絕緣破壞。由於配電級避雷器廣泛應用於配電系統保護，因此其裝置方式及性能將影響供電品質。

就配電系統而言，目前國內避雷器製造廠商規格及保護應用相關規範及裝置方式，大抵與 IEEE^[1-5]之規範相符。其中 IEEE 規範 C62.22^[4]中

列有配電級避雷器之額定、一般應用電壓等級、絕緣耐壓測試規範、電流測試規範及保護電壓等級，其中電流測試規範值將用於 ATP 模擬避雷器中之散逸能量標準。國內 11.4kV 配電系統為多重接地方式，規範^[4]建議採 9kV(MCOV 7.65kV)級之避雷器。另避雷器等級分 3 類，其中廠用級、中間級有較高之耐壓等級。廠用級性能最好，用於變電所內重要設備；配電級價格最低，用於一般配電線路設備保護；中間級則介於廠用級及配電級間，較多使用於一般用戶重要設備。

參考「台電地下配電線路過電壓保護」^[7]所

*崑山科技大學電機系

**國立成功大學電機系

***台電公司綜合研究所

列，為加強突波保護，避雷器引線之感應電壓亦列入設計考量，除一般之 8/20 μs 突波外，本文之模擬同時採用較嚴峻之 1.2/50 μs ，20kA 雷擊突波為保護設計計算。

IEEE 規範^[4]中列有避雷器洩放電流之經驗曲線，利用「對地落雷密度」(Ground Flash Density, GFD) 推估當地避雷器洩放電流。規範中考慮「有/無」遮蔽物狀況，分成兩組曲線，每組四條曲線，分別為 GFD 等於 1、5、10 及 20，分別對應到不同洩放電流與洩放次數。以 GFD 等於 5 為例，無遮蔽環境時，避雷器洩放電流為 10kA 之機率為 0.15 次/年。依台電公司之落雷偵測系統之統計資料，台灣地區落雷密度最大值約為 8.4 (東北部)，若以 GFD=10 曲線推估洩放電流範圍為 5kA~10kA 之次數約 0.4~0.28 次/年；20kA~50kA 之次數約 0.18~0.05 次/年。因此避雷器每 10 年約有 3 次洩放電流達 10kA。

散逸能量為避雷器是否遭破壞之指標，目前國內廠商甚少有避雷器能量規格，本文利用 ATP 軟體，採用 IEEE 規範測試衝擊電流方式，模擬出避雷器上之能量，可做為避雷器遭破壞之參考指標。圖 1 為重責務(10kA)及一般責務(5kA)避雷器之放電特性曲線，依此曲線可模擬出避雷器上之能量，重責務避雷器有較低之放電電壓特性，放電時產生較少之能量。

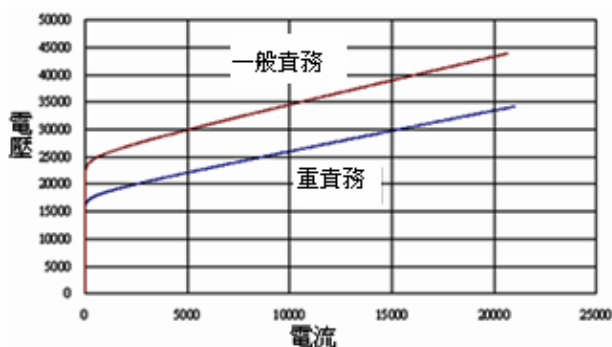


圖 1 9kV 避雷器放電特性曲線

表 1 顯示以「重責務」之標準測試衝擊電流加入「一般責務」規格之避雷器時，將產生較大之能量，例以「重責務」之標準測試電流 100kA，4/10 μs 加至「一般責務」避雷器時，產生能量為值 31kJ；而以「一般責務」規範標準衝擊電流 65kA，4/10 μs 時，能量為 20kJ。另開關突波(75A

及 250A)產生之能量幾乎相同。程式模擬時可依據表 1 能量值推估不同雷擊條件是否造成避雷器之損害。

表 1 模擬衝擊電流於避雷器上之能量

突波電流種類 \ 能量(kJ)	一般責務 (5kA)	重責務 (10kA)
5 kA (8/20 μs)	3*	1.7
10 kA (8/20 μs)	6.1	3.7*
65 kA (4/10 μs)	20*	12
100 kA (4/10 μs)	31	18*
75 A \times 2000 μs **	2.8*	2.8
250 A \times 2000 μs **	10	10*

*：規範標準測試突波電流
**：開關突波測試，兩責務避雷器能量幾乎相同

貳、避雷器裝設防護分析

一、電纜臨界保護長度

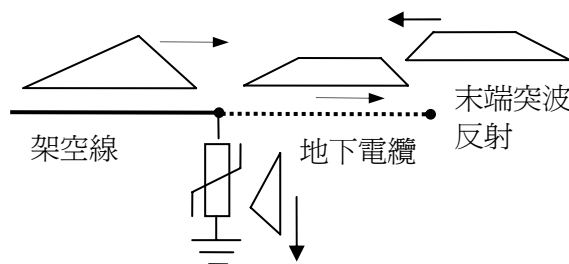


圖 2 架空、地下電纜接續處避雷器保護

參考圖 2，避雷器裝設於架空線與電纜接續點，若突波由架空線側侵入系統，當避雷器動作時，高於放電電壓部分被引入大地，而放電電壓藉由沿電纜傳遞，若電纜末端開路，則末端處可能因突波反射而產生兩倍放電電壓值，因此定義「臨界長度」 l_{cr} 為末端處恰產生兩倍放電電壓時之電纜長度，其計算如下：

$$l_{cr} = \tau v = \frac{V_{dis} v}{2S_v(1+\Gamma)}, m \quad (1)$$

其中

v 為突波於電纜內行進速度

S_v 為突波電壓上升率

Γ 為突波於接續點處反射係數

V_{dis} 為避雷器放電電壓

若電纜長度大於 l_{cr} ，表示接點處避雷器開始放電時，突波尚未自末端反射回接續點，則電纜末端處之開路電壓最大將為避雷器放電電壓之兩倍 ($2V_{dis}$)。

舉例計算，取架空線之突波阻抗 $Z_l=400\Omega$ ，電纜之突波阻抗 $Z_c=40\Omega$ ，電纜中波行速度 $v=200\text{ m}/\mu\text{s}$ ， V_{dis} 取 35kV (約 20kA 之放電電壓)，突波電流上升率取 $S_i=20\text{ kA}/\mu\text{s}$ ，則 $S_v = \frac{S_i}{2} Z_l = 4000\text{ kV}/\mu\text{s}$ ，則

$$l_{cr} = \frac{35}{2 \times 4000(1-0.82)} \times 200 \cong 4.9\text{ m}$$

計算結果顯示，敷設之電纜長度若超過 5 米，則末端開路電壓將為避雷器放電電壓之 2 倍。

二、引線長度對保護裕度影響



圖 3(a)：實際避雷器裝設引線照片

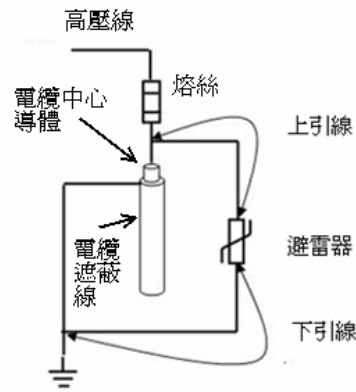


圖 3(b) 避雷器裝設引線示意圖

圖 3(a)及圖 3(b)為避雷器裝設照片及引接線示意圖，當避雷器洩放突波電流時，將在引線產生一感應電壓，此電壓與避雷器之放電電壓加至外受保護設備上，如公式(2)所示：

$$TTV_{TP} = LPL_{TP} + L_{TP} \frac{di}{dt} \quad (2)$$

TTV_{TP} 為受保護設備端電壓

LPL_{TP} 為避雷器放電電壓

L_{TP} 為避雷器引線總電感

若電流上升率過高（即波頭短），則此額外感應電壓將會影響保護裕度。

由 IEEE Std 1299^[3]，考慮電纜末端避雷器裝設之保護裕度估算如下：

(一)電纜末端開路且未裝設避雷器，僅接續處裝設避雷器

$$PM_{TP} = \left(\frac{BIL}{2 \times TTV_{TP}} - 1 \right) \times 100\% \quad (3)$$

(二)接續處及電纜開路端同時裝設避雷器

$$PM_{OP} = \left(\frac{BIL}{TTV_{TP} + (0.5 \times TTV_{OP})} - 1 \right) \times 100 \quad (4)$$

$$TTV_{OP} = LPL_{OP} + L_{OP} \frac{di}{dt} \quad (5)$$

下標符號“OP”表示開路端。

以 11.4kV 系統，取配電級避雷器 9kV，10kA 規格，引線電感取 $1.3 \mu\text{ H}/\text{m}$ ；設備 BIL 取 75kV。利用公式(3)及(4)可求出不同接線長度、突波電流大小及波頭時間之保護裕度，如表 2(a)及表 2(b)。

引線長度低於 3 米而言，電纜末端加裝避雷器時，由表 2(b)可得，若電流小於 20kA，波頭時間 $8 \mu s$ (電流上升率 $2.5kA/\mu s$) 時之保護裕度均大於 21%。

表 2(a) 保護裕度 (電纜末端開路，未裝設避雷器)

接線長度 (m)	1 μ sec		2 μ sec		8 μ sec	
	10 kA	20 kA	10 kA	20 kA	10 kA	20 kA
1	-19%	-41%	0%	-15%	-6%	-8%
2	-37%	-58%	-15%	-34%	3%	-14%
3	-48%	-68%	-26%	-47%	-2%	-20%
4	-56%	-74%	-34%	-55%	-6%	-26%

表 2(b) 保護裕度 (電纜末端開路，裝設避雷器)

接線長度 (m)	1 μ sec		2 μ sec		8 μ sec	
	10 kA	20 kA	10 kA	20 kA	10 kA	20 kA
1	22%	15%	37%	15%	37%	35%
2	1%	-4%	22%	-4%	45%	27%
3	-14%	-18%	10%	-18%	41%	21%
4	-26%	-28%	1%	-28%	37%	15%

利用 ATP 軟體建立圖 4 模擬電路，可對圖 2 之接續處及末端避雷器裝設條件進行模擬，觀察突波反射情形。其中地下電纜突波阻抗 40 歐姆，長度 200m，波行速度為 $200 m/\mu s$ ，末端開路。突波電流源為 20 kA， $1.2 \times 50 \mu sec$ ，直接加於接續點。避雷器下引線電感為 $1.3 \mu H/m$ ，長度取 3 米。

模擬結果如圖 5~圖 8，模擬依末端”有/無”避雷器狀況觀察接續處及末端之電壓。圖 5 為模擬之逆閃絡突波源，圖 5 為接續處接續點電壓，圖中顯示於 $1 \mu s$ 時，避雷器放電電壓約為 30kV，引線壓降約為 80kV，總電壓約為 110kV。圖 6 顯示末端無避雷器時，突波於 $1 \mu s$ 抵末端後反射，約達 220kV。

圖 7 顯示末端裝設避雷器後，末端避雷器放電電壓約為 25kV，接續處放電電壓約為 110kV。圖 8 為「有/無」末端避雷器之末端電壓比較。

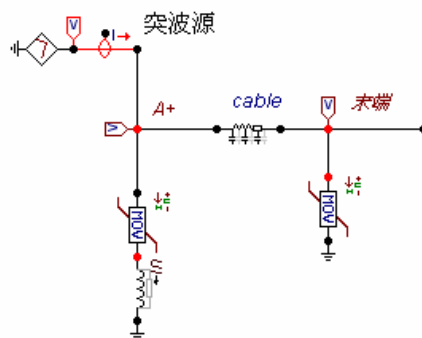


圖 4 ATP 模擬電路

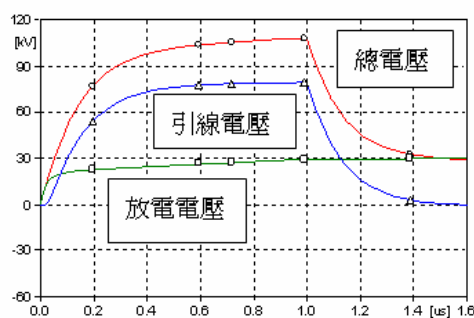


圖 5 接續點電壓(局部放大)

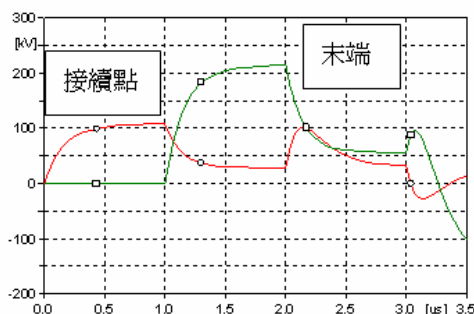


圖 6 接續點及末端電壓(末端無避雷器)

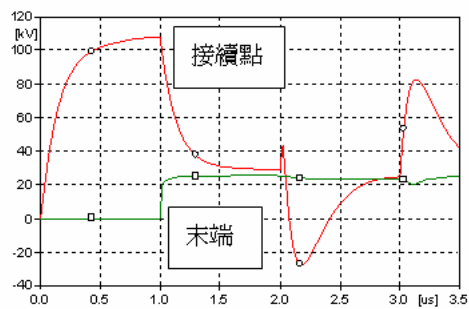


圖 7 接續點及末端電壓(末端有避雷器)

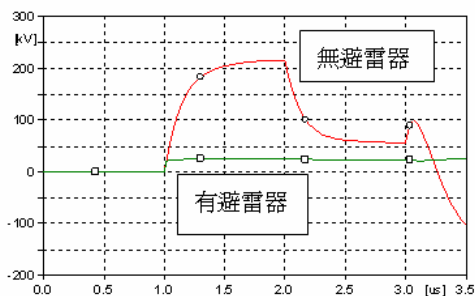


圖 8 末端電壓比較

三、直接雷擊時避雷器裝設間距及避雷器接地電阻影響

參考 IEEE 規範 1410，採用圖 9 探討避雷器裝設間距與接地電阻對雷擊突波影響。今假設直接雷擊（擊中相導體），桿距 L ，導線突波阻抗 Z ；避雷器放電電壓 V_{dis} ，避雷器接地電阻 R_g ；雷擊電流 I ，波前時間 T_f ，雷突波行進速度為光速 C 。以下分別探討不同雷擊位置之情形：

(一) 雷擊點為位置 1（無避雷器）：雷擊電流往左、右流動，位置 2 之避雷器動作，則雷擊點上導線電壓為

$$V = (V_{dis} + \frac{L}{C} \frac{IZ}{2T_f}) \quad (6)$$

公式(6)顯示雷擊點上電壓受線路突波阻抗及雷突波上升率影響較大，避雷器接地電阻之影響較小。

(二) 雷擊點為位置 2（有避雷器）：雷擊電流幾乎直接全由避雷器洩放，電桿上導線電壓約為

$$V = (V_{dis} + IR_g) \quad (7)$$

因雷擊點恰有避雷器，雷擊電流視為瞬間由避雷器洩放，故公式(7)顯示暫態電壓與避雷器接地電阻直接相關。

利用公式(6)及(7)，改變裝設避雷器間距及避雷器接地電阻，若以礙子臨界閃絡電壓 (Critical Flash Overvoltage, CFO) 為閃絡參考基準（圖中分別標示為 150kV 及 350kV），可估算出發生閃絡時之雷擊電流大小，再依雷擊電流大小分佈機率即可估算出閃絡機率，如圖 10。由該圖可歸納得：

- (一) 當雷擊點上未裝設避雷器，若 CFO 為 150kV 且接地電阻為 25Ω，則雷擊閃絡機率為 100%。
- (二) 當 CFO 為 350kV 且接地電阻為 10Ω，避雷器裝設間距為 2（即隔支裝設），閃絡機率仍高達 70%。
- (三) 理論上欲百分之百保護配線系統則每支電線桿均需裝設避雷器，但實際上裝設時需考慮經濟效益。此外，避雷器之品質應一併考慮，文獻[9]以實際系統實驗，發現因避雷器之故障等誤動作反而影響供電品質。

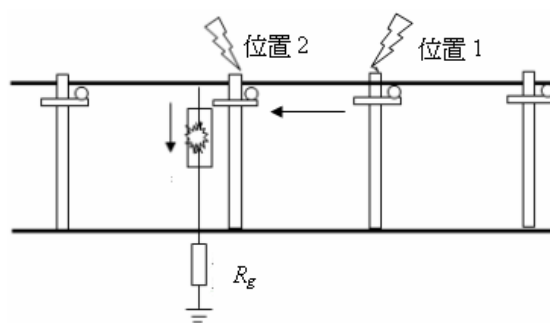


圖 9 不同雷擊點位置

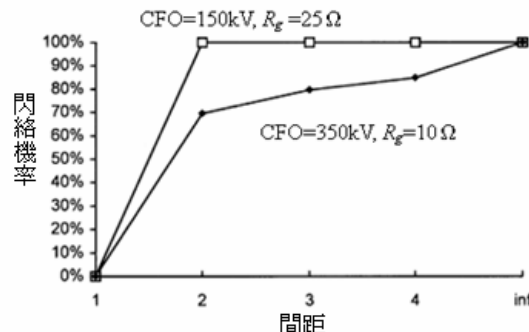


圖 10 避雷器裝設間距及接地電阻對閃絡機率^[5]

四、避雷器隔離器(Disconnect)與熔絲鏈之協調

配電系統之避雷器因受突波衝擊導通後，若產生續流如無法立即切斷，會在套管內部產生高熱與高壓，可能使避雷器受損造成接地故障。隔離器之目的即當有非突波之異常電流通過時，引燃火藥爆炸切斷開元件與接地線連接端，使之將避雷器與系統電源隔離。正常之隔離器於大電流，短時間之突波不應動作，小電流，長時間則動作。

由圖 3(b) 架空線引入地下電纜之避雷器裝設中，其顯示熔絲鏈串於避雷器之前，此方式主要為縮短接線長度。由於採串接方式，故熔絲與避雷器隔離器 I-t 特性有協調之必要。一般避雷器之規格鮮少附隔離器之特性曲線，本文僅由部分廠商提供之參考資料進行比較。

圖 11 為熔絲 15T 與隔離器之 I-t^[10] 曲線，曲線顯示在故障電流大於 250A 後，熔絲可能比隔離器先熔斷。IEEE 規範 C62.22 特別提到對此協調需就各系統特性（如故障電流，熔絲規格等）進行分析。因此在設計規劃時需考慮到此協調問題。

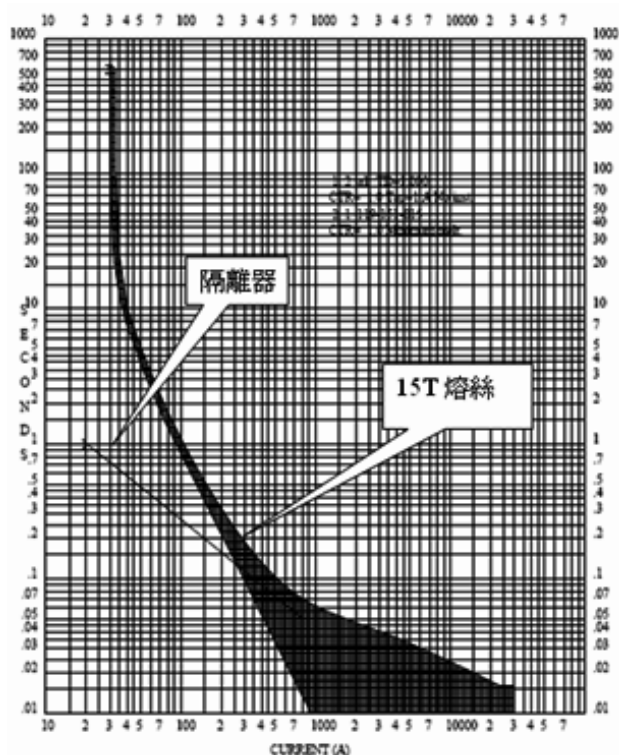


圖 11 避雷器隔離器及熔絲鏈 I-t 曲線^[10]

參、結論

- 一、依 IEEE 經驗曲線，避雷器每 10 年約有 3 次洩放電流達 10kA。
- 二、避雷器引線長度需以最短長度設計，以避免電流變化率造成之額外電壓降。
- 三、架空配電系統採架空地線設計對直接雷擊保護有較佳之效益，若採用線路避雷器則需每支電線桿均需裝設，不符經濟效益，同時若避雷器本身瑕疵故障，可能造成停電事故。

四、地下配電系統之架空引接處裝設避雷器，同時電纜末端若開路則需考慮裝設避雷器防止 2 倍反射電壓破壞。

五、設計規劃時需考慮到避雷器隔離器與熔絲鏈之協調。

肆、參考文獻

- [1]IEEE Std C62.11, IEEE Standards for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (> 1 kV), 1999.
- [2]IEEE Std 1243, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, 1997.
- [3]IEEE Std 1299/C62.22.1, IEEE Guide for the Connection of Surge Arresters to Protect Insulated, Shielded Electric Power Cable Systems, 1996.
- [4]IEEE Std C62.22, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1997.
- [5] IEEE Std 1410, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, 1997.
- [6]「配電線路防雷害裝置原則」，台灣電力公司。
- [7]「台電地下配電線路過電壓保護」，2009年8月19日資料，<http://www.taipower.com.tw>.
- [8]E. B. Shim, "Lightning Characteristics in Korea and Lightning Performance of Power Systems," *International Conference Power System on Technology*, 2002, pp. 534-539
- [9]T. A. Short, "Monitoring Results of the Effectiveness of Surge Arrester Spacings on Distribution Line Protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no.3, pp.1142-1150, July 1999.
- [10]「Time-Current Characteristics of Disconnectors PDV / PVR」，2009年12月，HUBBEL公司，<http://www.hubbellpowersystems.com>.