

# 避雷器裝設位置與接地引線分析

## Analysis of Installation Position and Grounding Leads for Arresters

王瑋民\*  
Wang, Wei-Min

陳建富\*\*  
Chen, Jiann-Fuh

鄭強\*\*\*  
Cheng, Chiang

范振理\*\*\*  
Fan, Chen-Li

### 摘要

避雷器被廣泛應用於電力系統之雷突波防護，主要應用包括輸電系統及變電所電纜連接站、變電所及配電架空系統之變壓器之保護，本文主要探討一般電力設備與電纜接續處裝設避雷器相關計算，包括設備最大保護距離計算、電纜保護臨界長度計算及避雷器接地引線長度對保護裕度影響，文中同時探討避雷器接地引線選用耐流計算。

### Abstract

Arresters are widely used for lightning protection. Arresters are installed at the cable connection stations of substations and on transmission towers, the transformers of substations and on distribution overhead systems. This paper investigates the effects of arrester separation distance on both protected pieces of equipment and underground cables. The protective effects of arrester grounding lead length on protective margin and the current rating of arrester grounding lead are also studied.

**關鍵詞 (Key Words)：** 避雷器裝設距離 (Arrester Separation Distance)、接地引線 (Grounding Lead)、保護裕度 (Protective Margin)。

## 壹、研究背景

電力系統主要由發電、輸電、配電及負載等四個子系統組成。初期之輸、配電系統以裸導線架空線路為主，因此線路易遭受雷擊之侵襲，直接或間接引起設備過電壓之絕緣破壞，進而影響供電品質。根據國外統計數據顯示，由雷擊造成之輸電線路故障約佔系統故障之 45%~65%。

有鑑於此，電力公司於高雷擊區、重要供電區域之重要設備採用避雷器等相關保護設施進行加強保護，藉以防制雷害並提高供電可靠度及穩定度。由於避雷器之大量使用，使得其特性對供電品質及可靠度影響日益重要，故對其之深入研

究實有其必要。

避雷器為過電壓保護設備，亦為輸配電系統中保護之重要絕緣協調設備。藉由其內之非線性半導體元件之放電特性，於瞬間電壓超過設定值時可行放電並釋放能量，保護設備由於過電壓引發之絕緣破壞。依 IEEE 規範<sup>[1-4]</sup>所提，避雷器可分三種等級：廠用級 (Station)、中間級 (Intermediate) 及配電級 (Distribution)，該規範列有相關之規格、特性、測試等標準規範。

本文主要探討避雷器裝設於(1)一般電力設備(如變壓器)與(2)電纜接續處之考量，同時利用公式計算，提供量化數據供相關設計保護參考。

依據 IEEE Std 1410<sup>[3]</sup>統計，雷突波電流上升

\*崑山科技大學電機系

\*\*成功大學電機系

\*\*\*台電公司綜合研究所

率可採「對數常態分佈」模型描述，其瞬間最大上升率均值(50%累積機率)為 24.3kA/μs，標準差為 0.59，圖 1 為機率分佈及累積機率曲線。若取電流大小由 10%上升至 90%，則均值为 5kA/μs，標準差為 0.645 kA/μs。

上述雷突波電流上升率將於避雷器之引線上產生一額外之感應電壓  $L(di/dt)$ ，對保護設備有負面效應。

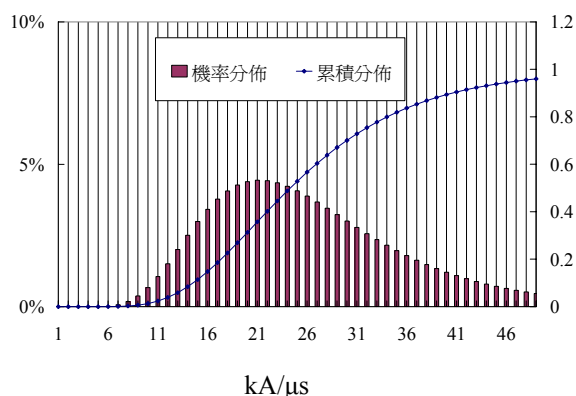


圖 1 雷突波瞬間最大電流上升率機率分佈曲線

## 貳、避雷器裝設相關計算

### 一、一般設備最大裝設距離估算

避雷器之裝設原則上與被保護設備之距離越短越好，假設雷突波侵入系統，避雷器動作，若距離  $D$  過大，可能影響保護效果。參考 IEEE Std C62.22 規範之估算方法，以圖 2 接線示意圖說明，計算主要相關參數為：

- (一) 避雷器最大連續運轉電壓 (Maximum Continuous Operating Voltage, MCOV) 及波前保護準位 (Front of Wave, FOW)
- (二) 被保護設備之衝擊波絕緣基準 (Basic Impulse Insulation Level, BIL)
- (三) 架空線突波阻抗

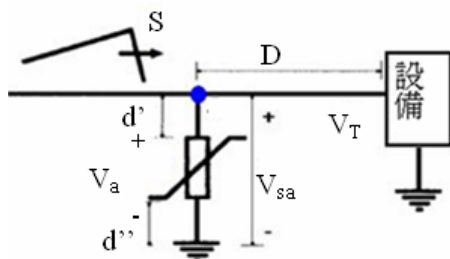


圖 2 被保護設備與避雷器最大距離估算

避雷器與被保護設備距離為  $D$ ，避雷器上、下

引線長度分別為  $d'$  及  $d''$ ，則引線總長度  $d = d' + d''$ 。

假設雷突波  $S$  侵入系統，突波電壓上升至峰值時間為  $t_r$ ，當突波抵  $J$  點後，避雷器動作，其放電電壓為  $V_a$ ，同時引線上感應電壓  $L(di/dt)$ ，則接續處（避雷器本身含引線總）對地電壓為

$$V_{sa} = V_a + L(di/dt), \quad (1)$$

設突波電壓抵達被保護設備端電壓為  $V_T$ ，則設備受保護之臨界條件為

$$V_T = CWW / 1.15 \quad \text{若 } t_r < 2\mu s \quad (2)$$

$$\text{或 } = BIL / 1.15 \quad \text{若 } t_r > 2\mu s,$$

其中  $CWW$  (Chopped Wave Withstand) 為截波耐壓

其中關於雷突波之特性，IEEE 經驗建議值取 11 倍之避雷器  $MCOV$  為突波電壓上升率，即  $S = 11 \times MCOV \text{ kV}/\mu s$ ，最大取至  $2000 \text{ kV}/\mu s$ 。

以  $345 \text{ kV}$  系統為例，設備(以變壓器為例)之  $BIL$  為  $1050 \text{ kV}$ ，則  $CWW = 1050 \times 1.1 = 1155 \text{ kV}$ ；採避雷器責務規格  $288 \text{ kV}$ ，其  $MCOV$  為  $230 \text{ kV}$ ，則  $S = 230 \times 11 = 2530 \text{ kV}/\mu s$ ，最大值取至  $2000 \text{ kV}/\mu s$ 。

則  
 避雷器波前保護準位 ( $0.5\mu s$ )  $V_a$  為  $751 \text{ kV}$  [5]，

$$t_r = 751 / 2000 = 0.376 \mu s < 2 \mu s, \quad (3)$$

$$V_T = 1155 / 1.15 = 1004 \text{ kV}$$

取架空線突波阻抗  $Z$  為  $300 \Omega$ ，則突波電流上升率

$$di/dt = 2 \times S / Z = 2 \times 2000 / 300 = 13.3 \text{ kA}/\mu s,$$

代入下引線總電感  $L = d \times 1.3 \mu H$ ，計算得

$$V_{sa} = V_a + L(di/dt) = (751 + d \times 17.3) \text{ kV},$$

利用圖 3 曲線，首先計算出  $y$  軸對應變數

$$V_T / V_{sa} = 1004 / (751 + d \times 17.3) \quad (4)$$

再由曲線讀出  $x$  軸上對應之  $(D \times S) / (C \times V_{sa})$  比值：

$$R = \frac{D \times S}{C \times V_{sa}} \quad (5)$$

其中  $C$  為架空線之波行速度(一般取  $300 \text{ m}/\mu s$ ) 讀出  $R$  值後再利用公式(5)求出最大距離

$$D = R \times (C \times V_{sa}) / S = 0.15 \times R \times (745 + d \times 17.3) \text{ 米} \quad (6)$$

利用上述公式可求得三電壓等級之計算結果，如表 1 及表 2。結果顯示 345kV 系統中，若引線長度接近 10 米時，最大保護距離約為 2.8 米，大於 15 米後  $V_T / V_{sa}$  小於 1，表示設備端電壓已超過破壞電壓。

一般若避雷器正、負端與設備直接連接，引線感應電壓視為無影響，長度視為 0，保護距離達 9 米以上。

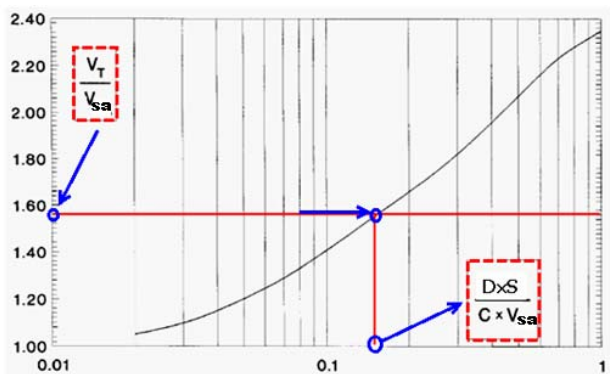


圖 3 避雷器  $(D \times S) / (C \times V_{sa})$  比值

表 1 設備最大保護距離計算結果

	d(米)	$V_T / V_{sa}$	R	D(米)
345 kV	0	1.34	0.08	9.01
	5	1.20	0.04	5.02
	10	1.09	0.02	2.75
	15	0.99	-	-
161 kV	0	1.57	0.14	13.13
	5	1.42	0.1	10.36
	10	1.30	0.07	7.9
	15	1.21	0.05	6.15
69 kV	0	1.58	0.14	13.13
	5	1.44	0.1	10.36
	10	1.32	0.07	7.9
	15	1.22	0.04	5.02

表 2 設備最大保護距離計算相關參數

電壓等級 參數	69kV	161 kV	345 kV
避雷器 MCOV, kV	57	115	230
避雷器 FOW 準位, kV	212	396	751
變壓器 BIL(kV)	350	650	1050
變壓器 CWW (kV)	385	715	1155
$t_f$ ( $\mu$ s)	0.338	0.313	0.376
$V_T$ (kV)	335	622	1004
$di/dt$ kA/ $\mu$ s	3.14	6.3	13.8
$V_{sa}$ (kV)	$212 + d \times 4.1$	$396 + d \times 8.2$	$751 + d \times 17.3$
突波阻抗 Z	400 $\Omega$	400 $\Omega$	300 $\Omega$
D(米)	$0.49R \times (212 + d \times 4.1)$	$0.24R \times (396 + d \times 8.2)$	$0.15R \times (745 + d \times 17.3)$

## 二、電纜接續處裝設分析

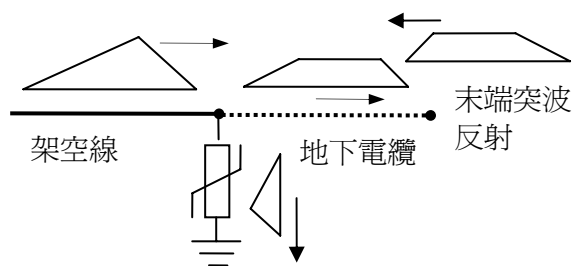


圖 4 架空、地下電纜接續處避雷器保護

參考圖 4，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」為末端處恰產生兩倍放電電壓時之

電纜長度，其計算如下：

定義  $t_r$  為突波電壓上升到避雷器放電電壓  $V_{dis}$  之時間，則其關係可表為

$$V_{dis} = S_v(1+\Gamma)t_r \quad (7)$$

其中

$S_v$  為突波電壓上升率

$\Gamma$  為突波反射係數

由公式(7)可得

$$t_r = \frac{V_{dis}}{S_v(1+\Gamma)} \quad (8)$$

令突波於自電纜接續點行進至終點所需時間為  $\tau$ ，定義「臨界電纜長度」 $l_{cr}$ ，其滿足接點處電壓上升到  $V_{dis}$ （避雷器開始放電）時，突波自電纜恰自末端處反射回到接點處，即  $2\tau = t_r$ ，此時

$$l_{cr} = \tau v = \frac{V_{dis}v}{2S_v(1+\Gamma)}, \text{ m} \quad (9)$$

$v$  為突波於電纜內行進速度。

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 ( $2V_{dis}$ )。

若取架空線之突波阻抗  $Z_l = 400\Omega$ ，電纜之突波阻抗  $Z_c = 40\Omega$ ，波行速度  $v = 200\text{m}/\mu\text{s}$ ，突波電流上升率  $S_i = 20\text{kA}/\mu\text{s}$ ，則  $S_v = \frac{S_i}{2} Z_l = 4000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ，則

$$l_{cr} = \frac{V_{dis}}{2 \times 4000(0.18)} (200) \cong 0.14V_{dis}, \text{ m} \quad (10)$$

表 3 臨界長度計算

避雷器責務 電壓 kV	$V_{dis}$ kV, (10kA)	$l_{cr}$ 米
9	25.5	4
72	188	26
144	350	49
288	665	93

利用公式(10)可計算得表 3 之不同電壓等級結果，顯示配電 11kV 系統之敷設之電纜長度若超過 4 米，則末端開路電壓將為避雷器放電電壓之 2 倍。

除探討末端電壓外，亦可利用圖 5 探討電纜中段位置之電壓值。由圖 5， $t=0$  時突波由電纜啓始端向右進行， $t=\tau$  時突波抵電纜末端，同時產生反射向左傳遞。 $t=2\tau$  時由電纜啓始端產生負值突波向右傳遞。當  $t=3\tau$  時，負值突波自啓始端反射向右抵電纜末端，此時電纜中段上有三電壓突波疊加：入射波恰為避雷器放電電壓 ( $V_{dis}$ )，末端反射波  $= (+3/4)V_{dis}$ ，啓始端反射波  $= (-1/4)V_{dis}$ ，此三電壓突波加成為  $1.5V_{dis}$ ，亦即電纜中段處為放電電壓之 1.5 倍，此電壓亦可能造成設備損害或動作異常。

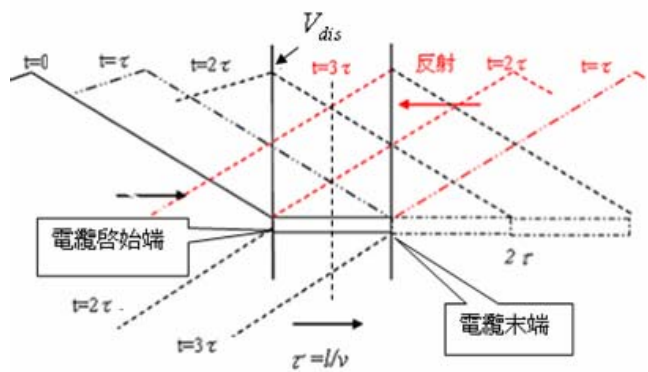


圖 5 電纜內突波電壓之分佈

### 三、避雷器保護裕度及引線長度影響

#### (一) 保護裕度

依不同雷擊響應時間，避雷器保護裕度<sup>[2,4]</sup>可分為

$$PM_{L1} = \left( \frac{CWW}{FOW} - 1 \right) \times 100\%, \text{ (2}\mu\text{sec 內)} \quad (11)$$

$$PM_{L2} = \left( \frac{BIL}{LPL} - 1 \right) \times 100\%, \text{ (2}\mu\text{sec} \sim \text{數十 } \mu\text{sec)} \quad (12)$$

$$PM_S = \left( \frac{BSL}{SPL} - 1 \right) \times 100\%, \text{ (數十 } \mu\text{sec 以上)} \quad (13)$$

其中

LPL(lightning impulse protective level)為雷擊突波保護準位；SPL( switching impulse protective level)為開關突波保護準位

#### (二) 引線長度影響

參考 IEEE C62.22，考慮避雷器引線壓降時，公式(11)修正為

$$PM_{Li} = \left( \frac{CWW}{FOW + L \frac{di}{dt}} - 1 \right) \times 100\%$$

以 345kV 系統為例：

取 BIL 為 1050kV， $CWW = 1.1 \times BIL = 1155kV$ ， $FOW = 751kV$ ，取  $di/dt = 20kA/\mu s$ ， $L = 1.3\mu H/m$ ，設避雷器引線長度為 d 米，若需符合公式(12)  $\geq 15\%$  標準，則

$$PM_{Li} = [1155 / (751 + 1.3 \times d \times 20) - 1] \times 100\% \geq 15\%$$

求得 d 約需小於 10 公尺。圖 6 為保護裕度與下引線長度關係。當引線長度為 15 米時，保護裕度僅約為 2.5%。

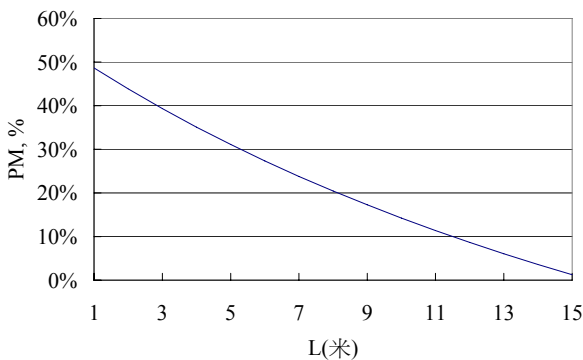


圖 6 保護裕度與下引線長度關係

#### 四、接地引線耐流能力

依 IEEE 規範<sup>[7]</sup>，避雷器下引線截面積規格不得低於 AWG #6 銅線或 #4 鋁線。國內法規則規定不得小於 14mm<sup>2</sup>，亦約為 #6 銅線截面積。因連接站避雷器下引線尚須考量故障電流，本節探討下引線規格對突波電流及故障短路電流影響。

##### (一)對突波電流耐流能力

以 1 米長 14 mm<sup>2</sup> 銅導體為例，重量約 125g，考慮集膚效應( $\delta = 0.66mm$ )時之電阻為 2.6m $\Omega$  (原 1.3 $\mu\Omega$ )；導體由室溫 25 $^{\circ}C$  上升到 125 $^{\circ}C$  所需熱量為  $H = msT = 125 \times 0.385 \times 100 = 4.8 kJ$

考慮下引線注入峰值為  $I_p$ ， $8 \times 20\mu sec$  之突波電流，其能量為

$$\int i^2 dt = 1.67 \times (I_p^2) \times 10^{-5}, \text{Joule} / \Omega \quad (14)$$

則累積能量至 4.8kJ 時

$$1.67 \times (I_p)^2 \times (10^{-5}) \times (2.6 \times 10^{-3}) = 4.8 kJ$$

求得  $I_p = 332 kA$ 。此電流峰值甚大於實際雷電

流值。因此就電流容量而言，14 mm<sup>2</sup> 銅導體對突波電流即有足夠之耐流能力。

##### (二)考慮故障電流之規格分析

參考 IEEE 規範<sup>[7]</sup>所述，引線需同時考量系統故障電流容量。參考台電接地系統設計準則<sup>[8]</sup>：

1. 接地網線 E/S 使用 100mm<sup>2</sup> 裸硬銅線，其他變電所為 80mm<sup>2</sup> 裸硬銅線
2. 接地引線 E/S 使用 250mm<sup>2</sup> 裸軟銅線，其他變電所為 150mm<sup>2</sup> 裸軟銅線

依 IEEE 規範 Std. 837，導線容許電流計算公式，可計算不同截面積之銅及鋁導體容許電流如表 4。計算結果顯示軟抽銅容許電流略大於硬抽銅數百安培(200A~700A)。

表4 導線最大容許電流, kA

導線截面積 mm <sup>2</sup>	硬抽銅	軟抽銅	鋁
80	32.01	32.23	18.08
100	40.02	40.29	22.60
150	60.03	60.44	33.91
200	80.03	80.58	45.21
250	100.04	100.73	56.51
t <sub>c</sub> (容許流過時間) 取 0.5 秒			

就超高壓變電所而言，地上引線(250mm<sup>2</sup> 裸軟銅線) 與接地網線(100mm<sup>2</sup> 裸硬銅線)容許電流分別為 100.73kA 及 40.02kA，由於接地引線需考慮承受所有故障電流，接地網線將引下之故障電流分流，就網格地網而言，接地網線分流為 1/4(25kA)，則網線導線規格可符需求。由表 4 中數據，若避雷器下引線欲以鋁線代替銅導體，則約需採同大小規格之鋁導線 2 條併用。

#### 參、結論

本文結論項目整理如下：

- 一、若避雷器正、負端若可與設備直接並接，則避雷器引線感應電壓則為無影響，長度可視為 0，依計算結果(表 1)，各不同電壓等級之保護距離達 9 米以上(345kV)。
- 二、地下電纜接續處之避雷器裝設，依計算結果(表 3)，各不同電壓等級之臨界長度均不同，其中 11.4kV 系統僅為 4 米，亦即顯示若電纜末端開路，則將產生 2 倍之放電電壓，需考量再加裝避雷器。
- 三、避雷器下引線之規格考慮故障電流承載容量時，參考台電公司接地系統設計準則，E/S 接地引線，採 250 mm<sup>2</sup> 之軟銅線，其承載故障電流達 100kA(0.5 秒)，除可有效釋放雷突波電流外，亦足以承載故障電流。

#### 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 C62.22, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1997.
- [3] IEEE Std 1410, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, 1997.
- [4] IEEE Std 1313.1, IEEE Standards for Insulation Coordination- Definitions, Principles and Rules, 1996.
- [5] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Power System—Analysis and Design, (THOMSON), 2002.
- [6] Juan A. Martinez, Francisco Gonzalez-Molina, “Surge Protection of Underground Distribution Cables,” *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 756-763, April 2000.
- [7] IEEE Std 837, IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding, 2002.
- [8] 變電所接地系統設計準則，台灣電力公司，2001。