

提前放電式避雷針保護效果之性能評估

林開政

南臺科技大學機械工程系

kjlin@stust.edu.tw

摘要

本文報告一種新穎的提前放電避雷針（early streamer emission air terminal, ESEAT）在高壓實驗室進行模擬雷擊測試其效能，並且與傳統避雷針（classical air terminal, CAT）進行實驗對照。經由測試結果，ESEAT 在實驗室中所能攔截的人工閃電的效果明顯優於 CAT 閃電防護裝置，在實驗室模擬的雷擊閃電接閃的數據說明了 ESEAT 失效的機會僅有 CAT 的 1/10。ESEAT 雷擊防護裝置在實驗室環境下的測試表明其有效性優於 CAT。

關鍵詞：避雷針、提前放電式避雷針

Protection Performance Evaluation of an Early Streamer Air Terminal

KaiJan Lin

Department of Mechanic Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

In this article, the performance of a novel early streamer emission air terminal (ESEAT) used as lightning protection device has been tested under laboratory conditions simulating lightning strikes and compared with a classical air terminal. (CAT) The test results show that the ESEAT has a greater ability to capture artificial lightning in the laboratory than the CAT. Based on the data on failed artificial lightning captures, the failure rate of the ESEAT is approximately 1/10 of that of the CAT. These findings confirm the effectiveness of the new ESEAT in a controlled laboratory environment.

Keywords: Air terminal, Early streamer emission air terminal

壹、前言

NASA (National Aeronautics and Space Administration, 美國國家太空總署) 紀錄自公元 1998 年 1 月到 2003 年 2 月, 全球閃電頻率圖如圖 1 所示[1], 圖中顯示在適合人類生存地區, 平均每年每一平方公里發生的閃電次數分布由數次達到近 70 次規模, 幾乎有人類居住的環境便有雷擊發生的機率。雷擊造成生命危害與財產損失, 必須安裝防護裝置以減低災害發生。

最早發明的防雷擊裝置為傳統避雷針 CAT, 其原理首次由佛蘭克林在公元 1749 年詳細闡述。在隨後的幾年中進行了改進, 並於 1753 年發表, 並在 1760 年左右進一步改進為可靠的系統[2-3]。CAT 作為避雷保護系統中的一個元件, 必須以導線與地球連接, 將大地作為雷擊電能的釋放目的地, 才能發揮其保護功能。

現代在各種科技進步, 建築物高度愈形增加, 各種地面無線通訊技術例如發射訊號與接收訊號設備之高度也必須提高以便避免通訊死角及高效能傳送無線電訊號, 防雷擊益形重要。安置防雷擊系統需要依據避雷針安規進行架設以防失效, 否則可能發生如圖 2 的保護失效情況發生[4]。世界各地政府均有避雷針安裝規範, 例如在臺灣, 建築法規中規範了「為保護建築物遭受雷擊, 應裝設避雷設備。建築物高度在二十公尺以上者必須裝設符合法規之避雷設備。」這樣的措施能提供對生命財產的防護。

對於安裝於室外的防雷擊裝置規範, 是由保護範圍大小訂定室外避雷針安裝, 法規制定:「如果建築物採用傳統富蘭克林避雷針進行雷擊防護, 其針體尖端與受保護地面周邊所形成之圓錐體即為避雷針之保護範圍, 此圓錐體之頂角之一半即為保護角, 並要求建築物之保護角不得超過六十度。」

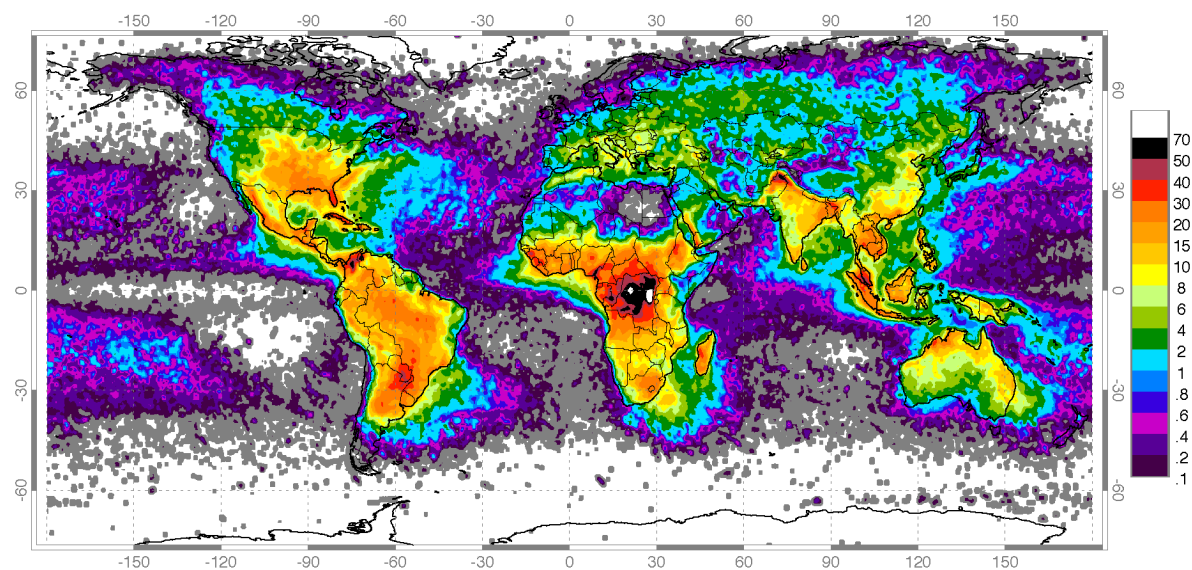


圖 1 全球閃電頻率圖



圖 2 雷擊保護失效之紀錄[4]

新式的現代避雷針[5]為了能夠提高效能擴大保護範圍，因此設計了提前放電式避雷針(early streamer air terminal, ESEAT)，避雷系統的安置經費與保護面積有關，保護半徑越大，所需的架設成本增加，採用 ESEAT 可擴大保護範圍，提高防雷效果以及減少安裝成本。

在本文章中，將 CAT 與 ESEAT 在高壓實驗室中進行雷擊捕獲測試以進行其效能評估與比較。

貳、原理

雷擊現象泛指地球表面大氣層發生閃電到達地面即稱為雷擊，好發生的高度距地面約數公里，人眼可視的雷擊現象為數公里長的高亮度放電閃光，因閃電高溫致使外觀呈現亮白色。一般閃電現象始發於雲層之底部，距離地面約 1 至 2 公里，當閃光落至地面，稱為雷擊現象。

觀察大氣中距離地面約 12 公里分類屬於對流層範圍。由地表升高高度大氣層溫度降低，每升高 1 公里氣溫下降 6.5°C ，因此高度達 4 公里處，已降至冰點溫度以下，繼續增加高度時氣溫可降至 -50°C 以下，由於對流層蘊含了幾乎大氣層所有的水氣，因此在水氣、風速、氣壓、溫度各種條件配合下，地表上空足以形成雷暴，其形成原理可簡化敘述如下：(1) 由於上升水氣遭受低溫形成小冰晶，且碰撞產生電荷轉移過程，帶正電的小冰晶在上升氣流中被進一步向上帶到雷雨雲頂部，可達海拔近 10 公里的高度；(2) 小冰晶結合後形成重量足以在雷暴的上升氣流中下落或保持靜止冰雹顆粒，並於海拔高度 6-8 公里處形成帶負電的冰雹，形成雷雲分布；(3) 閃電發生前，在雲層底部帶充足的負電以形成電暈現象，在適當的條件下，電暈產生向地面的下行先導，此即為閃電起始；(4) 下行先導接近地面時，地面受到強大電場也產生向上的上行先導將，最終與下行先導連接，如此便形成雷擊。下行先導與上行先導原理可參考 [6] 文獻。

當閃電接近地面，傳統避雷針 CAT 提供上行先導以捕獲下行先導，因而防護了地面建物免受雷擊現象。可以說 CAT 是一種雷擊捕獲裝置。相比於 CAT，新設計的 ESEAT 可在較高的高度捕獲下行先導[7]，此提前時間約為數十微秒。ESEAT 的保護範圍較大，防雷擊效能較佳。

參、實驗

驗證避雷針接閃電模擬系統是依據 NFC 17-102 標準[8]的指導規範進行設備配置與實驗測試。系統配置圖如圖 3 所示。此高電壓系統能夠產生兩個次系統的高電壓輸出，(1) 直流偏壓次系統產生模擬雷擊時大自然生成電暈現象的高電壓，(2) 脈充電壓次系統產生模擬大自然觸發雷擊的高電壓。大自然閃電雲層是帶負電的現象，因此直流偏壓與脈充電壓均為負向高壓。

模擬雷擊現象的電壓產生步驟為：(1) 直流本體產生固定偏壓，經由限流電阻，送至雷雲板，雷雲板與接地之間產生電場，雷雲板附近空氣分子被游離成帶電分子，其充放電過程形成電暈現象；(2) 衝擊本體產生 10 倍高壓脈波，經由隔離放電間隙送至雷雲板以觸發模擬雷擊，衝擊測量次系統負責監測脈波高壓；(3) 直流測量次系統監測雷雲板與接地電壓訊號並紀錄之。

雷雲板與接地線之間如果沒有雷擊捕獲裝置，則直流量測部分會量測到負的高電壓；當有雷擊捕獲裝置並且捕獲雷擊模擬訊號時，直流量測將會因放電而回復到接地電壓。雷雲板與接地之間安裝雷擊捕獲裝置，可透過導電以釋放電荷，相當於在大自然情況下，安裝避雷針能夠吸引閃電以保護其附近的物體或人員。

本文採用的測試方法符合法國提前放電式防雷擊裝置測試標準 NFC 17-102 (09/2011)，將 CAT 固定於接地端進行測試後再以 ESEAT 取代 CAT 進行相同的測試。

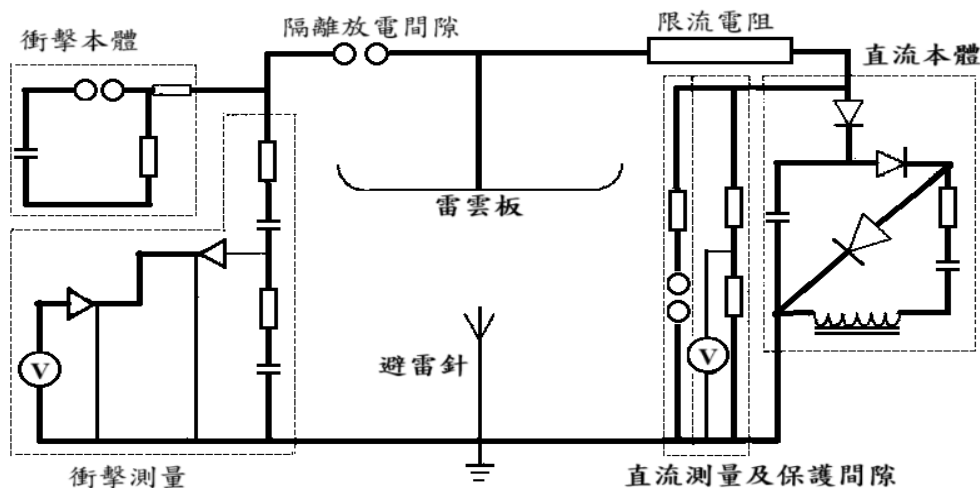


圖 3 避雷針接閃電模擬系統

本系統的場地布置條件如表 1 所列。

表 1 場地布置列表

項次	名稱	符號	量測值
1	雷雲板直徑	D	2200 mm
2	雷雲板到地面距離	H	2545 mm
3	避雷針高度	h	1289 mm
4	避雷針與雷雲板之間距離	H - h	1256 mm
5	高度比	h/H	0.5065

實驗測試所使用的 ESEAT 可參考文獻[3]，為不銹鋼 SUS-304 製成，其高度為 170 cm，使用了絕緣材質作為隔板（抗 UV 塑膠），以提供提前放電效果。其裝置如圖 4 所示。作為比較的 CAT 則是直徑 1 in. 的純銅製圓棒製成，長度亦為 170 cm。

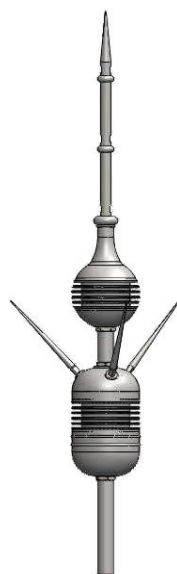


圖 4 新式提前放電式避雷針 (ESEAT)

避雷針測試的環境條件與電壓參數如表 2 所示。

表 2 避雷針測試參數

項次	測試條件項目	量測值
1	溫度	15.6 °C
2	濕度	18.9%
3	測試條件大氣壓力為	103.30 kPa
4	雷雲板至地面之間電場強度	-20.2 kV/m
5	對雷雲板施加直流高壓	-51.4 kV
6	衝擊電壓發生器產生衝擊電壓波形	前沿 650 us 峰值 550 kV

試驗參考圖 3，CAT 置放於接地端，距離雷雲板 1256 mm，系統產生高壓進行雷擊捕獲測試，並錄其電壓波形。完成後，以 ESEAT 取代 CAT 進行相同條件下的測試。測試參數如表 1 與表 2 所示。

雷擊捕獲測試，是以高壓脈沖模擬閃電，並且設定避雷針能夠接收到閃電共計 100 次，記錄其成功與失敗次數，相鄰兩次測試的時間間隔為 2 分鐘。

肆、結果與討論

雷雲板產生高壓脈衝以模擬雷擊的電壓量測實驗結果如圖 5，圖 6 與圖 8 所示。雷雲板放電並且被避雷針捕獲現象的紀錄如圖 7 與圖 9 所示。對於 CAT 與 ESEAT 測試完成後整理如圖 10 與圖 11 所示。

圖 5 為未安裝雷擊捕獲裝置的測試，雷雲板的電壓波形紀錄，紀錄時間 800 μs ，由於無安裝補雷擊裝置，雷雲板電壓在高壓維持，緩慢放電電壓逐漸回升。

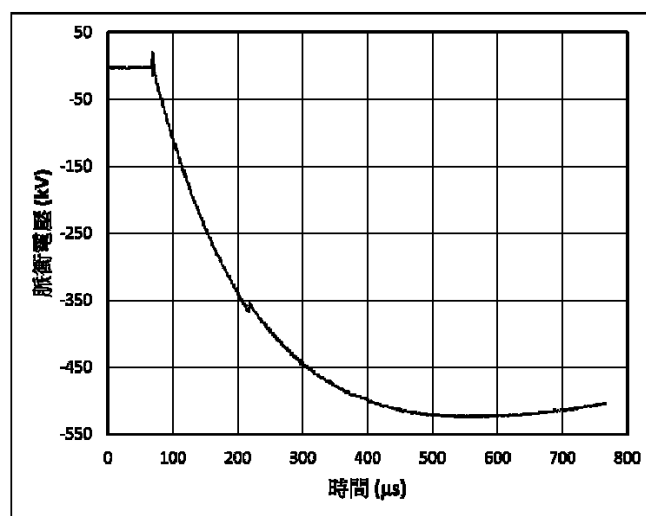


圖 5 模擬雷擊產生之脈衝高壓

圖 6 為安裝 CAT 為補雷裝置於接地端，雷雲板的電壓波形紀錄，時間在 670 μs 附近電壓快速回到 0（接地）電壓，表示模擬雷擊已經由 CAT 捕獲，雷雲板的高電壓被消除。圖 7 為 CAT 成功接收模擬雷擊之記錄。

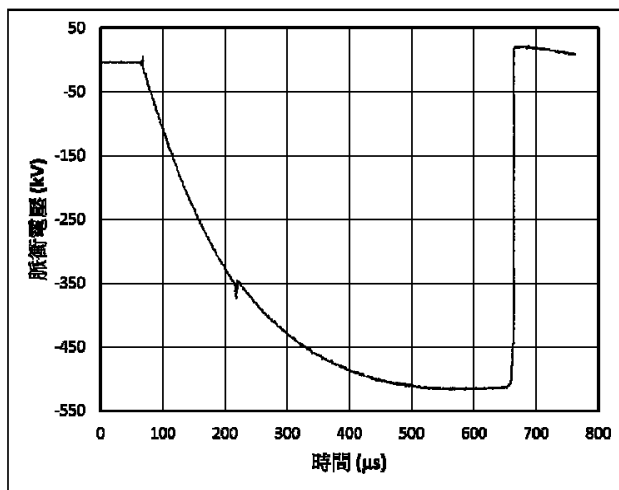


圖 6 模擬雷擊產生之脈衝被 CAT 捕獲之量測電壓曲線圖

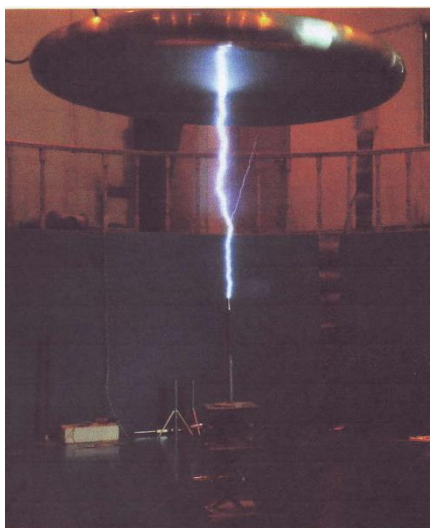


圖 7 CAT 成功捕獲模擬雷擊

圖 8 為安裝 ESEAT 補雷裝置於接地端，雷雲板的電壓波形紀錄，時間在 620 μs 附近電壓快速回到 0 電壓，表示模擬雷擊已經由 ESEAT 捕獲，雷雲板的高電壓被消除。圖 9 為 ESEAT 成功接收模擬雷擊之記錄。

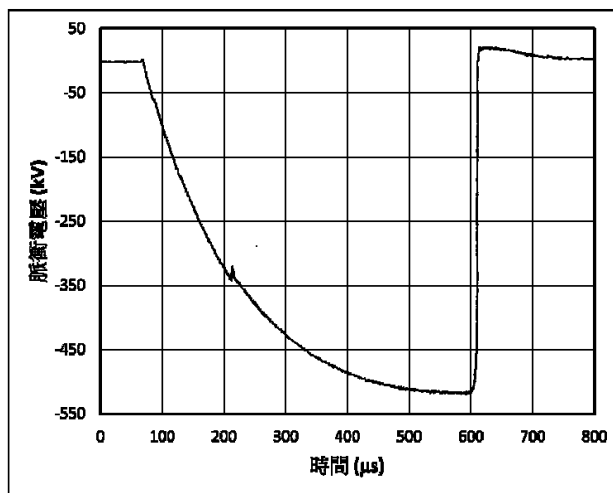


圖 8 模擬雷擊產生之脈衝被 ESEAT 捕獲之量測電壓曲線圖



圖 9 ESEAT 成功捕獲模擬雷擊

補獲雷擊裝置的有效性驗證是將補雷擊裝置安裝於接地端，進行多次雷擊測試，重複進行直到補雷擊裝置成功捕獲 100 次模擬雷擊便停止。

圖 10 為 CAT 捕獲雷擊測試結果，成功捕獲 100 次模擬雷擊，模擬雷擊共產生 145 次，其中 45 次無法接收到模擬雷擊。定義捕雷擊裝置失效率為未捕獲模擬雷擊與成功捕獲模擬雷擊的比值，CAT 失效率 0.45 (45/100)。

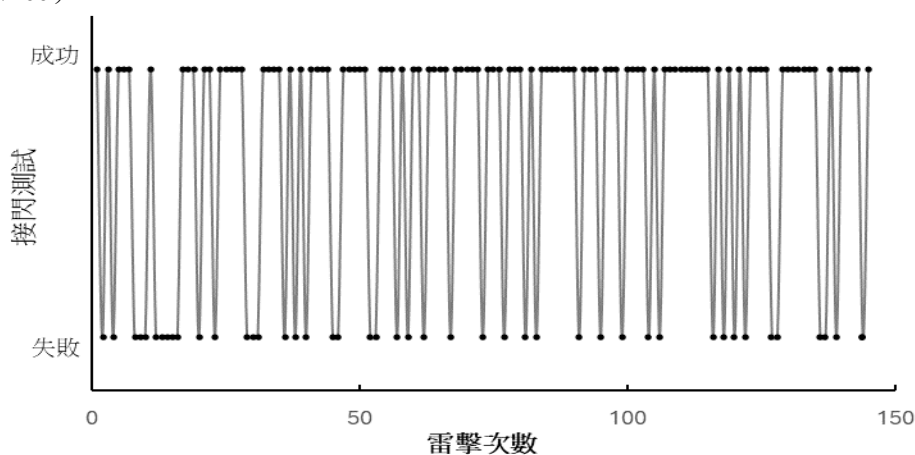


圖 10 CAT 成功捕獲 100 次擬雷擊測試結果

圖 11 所示，ESEAT 成功捕獲 100 次模擬雷擊的紀錄，模擬雷擊共產生 104 次，失效率 0.04 (4/100)。

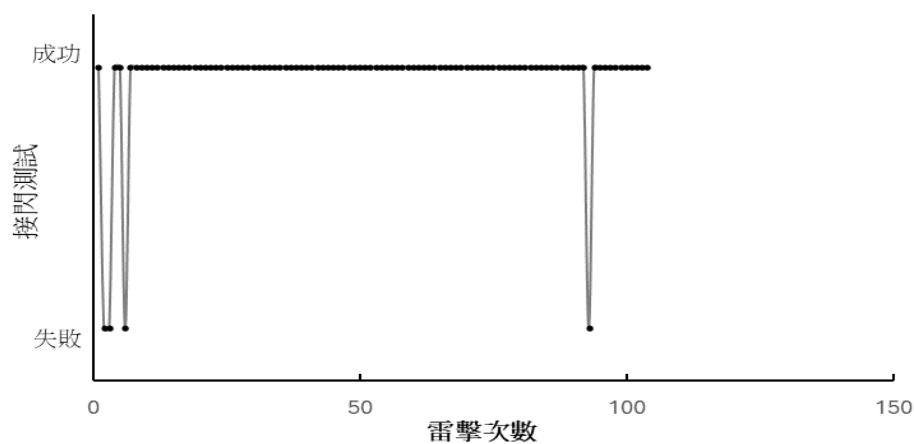


圖 11 ESEAT 成功捕獲 100 次擬雷擊測試結果

依據高壓實驗測試條件（NFC 17-102 規範），在給定的負向高壓脈衝（-550 kV）之衝擊下，對 CAT 與 ESEAT 進行接模擬雷擊測試後的實驗結果整理成圖 10，圖 11。結果顯示兩者均能成功接收模擬雷擊，也均有未接獲模擬雷擊的情況發生。相同條件下 ESEAT 的失敗接收較少，這表示在戶外相近似的條件下，ESEAT 的性能優於 CAT。

本研究的測試方法是以個別的 CAT 與 ESEAT 進行測試，當達到成功接獲模擬雷擊 100 次條件下，紀錄高壓電系統所產生的模擬雷擊總數，之後引入失效指數（失效率）表示其性能。參考文獻[3]測試方法為在高電壓系統下同時架設 CAT 與 ESEAT，它們與高電壓產生源的距離是相等的，測試 ESEAT 與 CAT 兩者接收閃電的比趨近於 25:15，也顯示 ESEAT 的攔截模擬高壓雷擊性能優於 CAT。

伍、結論

本研究以高壓脈波產生器產生短脈衝電壓進行模擬大自然的雷擊閃電現象，在實驗室中對 CAT 與 ESEAT 進行效能評估。測試方法依循 2011 年 9 月的 NFC 17-102 規範進行。測試的結果明顯說明 ESEAT 具有的優勢，雖然不能推論在戶外環境以及不同的天氣狀況有相同結果，ESEAT 的補雷擊失效率僅為 CAT 的 1/10。驗證 ESEAT 裝置防雷擊效能是優於 CAT 裝置。

參考文獻

- [1] Agustinus CH, K., & Iskandar, I. (2019). Lightning protection according NFC 17-102. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 10(1), 1312–1317.
- [2] Jernegan, M.W. (1928). Benjamin Franklin's "electrical kite" and lightning rod. *N. Engl. Q.*, 1(2), 180–196.
- [3] Chen, Y.H.A., Lin, K.J., & Li, Y.C.M. (2017). Assessment to effectiveness of the new early streamer emission lightning protection system. *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, 10(1), 1–26.
- [4] 香港新聞網：香港一單位遭雷擊中女戶主憶述驚險一刻【線上新聞】取自：<http://www.hkcna.hk/docDetail.jsp?id=100374467&channel=2803> 2023.
- [5] Hartono, Z.A., & Robiah, I. (2004). Conventional and un-conventional lightning air terminals: An overview. *In Forum on Lightning Protection, Hilton Petaling Jaya*.
- [6] Dwyer, J.R., & Uman, M.A. (2014). The physics of lightning. *Physics Reports*, 534(4), 147–241.
- [7] Van Brunt, R.J., Nelson, T.L., & Stricklett, K.L. (2000). Early streamer emission lightning protection systems: An overview. *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 16(1), 5–24.
- [8] NF-C 17-102 : 2011, Protection against lightning, Early Streamer emission lightning protection systems. 1st printing 2012. <https://www.tecnorayo.com/ficha/NF%20C%2017-102.pdf>