

主題視察報告
核四廠雷擊保護系統之探討

報告人：許明童

行政院原子能委員會核能管制處
中華民國九十四年十一月十六日

目 錄

| | |
|-------------------------|----|
| 壹、前言 | 1 |
| 貳、突波保護之概述 | 1 |
| 參、DG-1137 雷擊保護之概述 | 2 |
| 肆、核四廠接地系統之規畫 | 3 |
| 伍、結論 | 10 |
| 附圖 | 11 |

核四廠雷擊保護系統之探討

壹、前言

台電公司於八十八年三月十七日取得原能會核發之核四建廠執照後，於同年即全面展開核四建廠工程，其後歷經核四再評估、停建及復工。在此期間，並造成核四工程進度落後，使得電氣設備之採購及安裝時程延宕。整體上，主要電氣設備仍在設計、圖說之審查及製造中，預定於明(95)年中陸續交運並展開安裝作業。核島區電氣安裝工程已於今(94)年9月由榮電公司得標，其他廠區(含汽機島區)電氣安裝工程，目前公告招標中。由於電氣設備安裝工程進行安裝前之品保文件審查階段，本次乃就核四廠雷擊保護系統之規劃及設計進行探討。主要就美國核管會(NRC)發行之DG-1137「Guidelines for Lightning Protection for Nuclear Power Plants」與核四廠雷擊保護系統之比較。雷擊保護系統為非安全有關之系統，但其規劃、施作是否周延，潛在影響人員安全及電氣與儀控設備運轉之穩定性，本次主要針對反應器廠房、汽機廠房及開關廠房之建築物雷擊保護，以初期安全分析報告(Preliminary Safety Analysis Report, PSAR)之承諾、設計文件及現場施作之品質文件查證等進行探討。

貳、突波保護概述

電力系統突波(Surge)分為雷擊突波(Lightning Surge)及開關突波(Switching Surge)。

雷擊的發生是由於雷雲與地面之間所建立的電場大於一臨界值時，對大地所作之放電行為，雷之能量非常大，通常被雷電流行經之物體都會遭受嚴重破壞。因此對於設備、人員等之雷擊防護不可輕忽。雷電之閃電形狀最常見者為樹枝狀，此外尚有球狀、片狀和帶狀等。雷電之期間可分為三個階段，即先導放電、主放電、餘光放電，整個過程一般不會超過 60 μ s。雷電侵入方式有直接雷擊(直接擊中輸配電線路上之線路或設備)或側擊(雷擊電流無法完全經由避雷系統迴路流至大地，由接地系統反竄回來)等二種，其常自架空地線、接地線、電源線及信號線等路徑侵入設備。若對於直接擊中任何銅導體線路，常產生高達數十萬伏特的高壓，突然升高的電壓若無法及時將能量釋放或導引至大地，將會通過連接線路傳達至用戶設備而釀成災害。

開關突波的形成係輸配電線路上有許多開關設備，因配合電力調度及設備維護保養，開關設備必須經常性啟、閉。由於電力系統之電容器、變壓器、電抗器等設備，在開關啟、閉時，均會產生很高電壓突波。開關突波所產生電壓突波雖較雷擊突波低，但因期間較長，對於超高壓（345KV 以上）系統之影響遠高於雷擊突波，而且開關突波含有諧波成份，對於儀控、電子及電腦設備等均會造成影響。

電力系統因突波產生高電壓，對於設備及人員可能造成危害。為避免突波危及設備，係在電力設備裝置避雷器 (Lightning Arrester, LA)，以限制突波電壓。避雷器是一種過電壓保護設備，將突波導入大地以限制電壓，它主要是以自動閘的作用，自動將雷擊及開關突波等異常電壓放電，並限制其電壓，以避免設備的絕緣破壞。放電後，又可自動阻止電力系統正常電流通過。上述動作必須在極短時間內完成，以免擾亂電力系統。依不同需求之應用，避雷器區分為廠用級、中間級、配電級等三種型式。

參、DG-1137 雷擊保護之概述

美國NRC為確保雷擊突波對核能電廠之影響降至最低，將發行核能電廠雷擊保護之導則。主要適用於雷擊保護(Lightning Protection Systems, LPS) 之設計、安裝及維護，以避免因雷擊突波所產生之暫態過電壓，造成安全相關設備之誤操作或無法操作，而危及電廠之運轉安全。DG-1137 導則共引用18份IEEE標準，其中有4份為主要引用之標準，另外14份為次要參考引用之標準。所引用之標準如下：

一、主要引用標準

IEEE Std.665 「Guide for Generating Station Grounding」

IEEE Std.666 「Design Guide for Electrical Power Service Systems for Generating Stations」

IEEE Std.1050 「Guide for Instrumentation and Control Equipment Grounding in Generating Stations」

IEEE Std. C62.23 「Application Guide for Surge Protection of Electric Generating Plants」

二、次要引用標準

IEEE Std.80、IEEE Std.81、IEEE Std.81.2、IEEE Std.142、IEEE Std.367、IEEE Std.487、IEEE Std.1100、IEEE Std.C37.101、IEEE Std.C57.13.3、IEEE Std.C62.92.1、IEEE Std.C62.92.2、IEEE Std.C62.92.3、IEEE Std.C62.41及IEEE Std.C62.45等共14件。部份引用之次要標準，係作為主引用標準之細部設計參考。

三、四個主要IEEE工業標準，簡述如下：

- (一) IEEE Std.665：該標準係提供發電廠之接地網設計、發電機中性點接地型式（直接接地、高阻抗接地及低阻抗接地等）選擇、建築物結構與未帶電金屬及設備接地、電廠輔助系統之接地設計、建築物雷擊保護及接地設備材質等之規劃與設計參考，以確保人員及設備之安全。
- (二) IEEE Std.666：主要是提供發電廠內之廠用電力規劃設計之參考，其涵蓋範圍從廠內配電系統、電驛保護至接地系統等相當廣泛，在DG-1137僅引用接地系統與設備突波保護等章節。其主要係對中壓（2.4KV~13.8KV）系統之接地型式選擇及重要設備（變壓器、開關箱、馬達等等）突波保護等之設計參考。
- (三) IEEE Std.1050：該標準提供儀控設備接地方式，以降低電力設備產生之諧波或其他雜訊之干擾。
- (四) IEEE Std.C62.23：該標準係提供對傳輸線、鐵塔、開關場、電廠（包含設備、廠內配電系統、通訊及控制等）及輔助設備（如冷卻水機房）等之突波保護規劃設計參考。並分別對雷擊突波、開關突波、GPR（Ground Potential Rise）及EMI等影響，提供設計參考及保護設備（如避雷器）之選用。

上述四個主要引用之標準，係針對發電廠之接地系統及雷擊保護，故其內容有諸多重複引述。對於細部設計，則引用其他相關標準（如IEEE C57.12.00、NFPA 780等等）。

肆、核四廠接地系統之規劃

一、接地系統 PSAR 之承諾

核四廠接地系統分別由儀控接地、設備接地、避雷接地及接地網所組成，龍門計畫 PSAR 第八章 8.A.1 節中對個別系統之要求敘述如下：

(一) 儀控接地部份

儀控接地系統由一匯流排及電纜構成輻射網路，必須以單點方式連接至廠區接地網，且在未連結至廠區接地網前須與其他接地系統相互絕緣，儀控接地主要提供類比元件（電熱偶、轉換器、RTD）及數位元件（電驛）之接地。

(二) 設備接地部份

設備接地係將主要設備、結構物及貯存槽等非帶電部份進行接地，並使用對角方式接地。至於開關設備、馬達控制中心及控制盤等，必須至少使用二條電纜連結至接地網。另，廠區之電氣管道必須連接至接地網。

(三) 接地網部份

廠區接地網由發電廠區及開關廠區之接地網所組成，接地網則由接地棒及裸銅線以矩形方式埋設於地面深 60 公分處，且必須在廠區發生最大故障電流時，其步間電壓及接觸電壓均能符合安全值。另對廠區接地網外環接地導線必須使用 500MCM (253mm^2) 之裸銅線。

(四) 系統接地部份

系統接地主要有發電機中性點接地、345kV/161kV 系統及中、低壓系統之接地，核四廠發電機中性點採用阻抗接地方式，以限制最大故障之相電流小於三相故障之電流值。345kV/161kV 系統之變壓器則採用避雷器接地方式，中、低壓之變壓器使用低電阻接地或直接接地方式，降低系統之故障電流，以利系統保護協調之設定。

(五) 避雷接地部份

核四廠結構體必須裝置避雷設備以避免電氣及儀控設備遭受雷擊，避雷系統使用避雷針 (Air Terminal) 及接地電極等須與接地系統隔離，儀控電纜連接至戶外需裝設突波吸收器 (Surge Suppression Devices)，以防止雷擊之感應電壓。

(六) 反應器廠房、汽機廠房、控制廠房、開關設備室及廢料廠房接地電阻值之目標值應 $\leq 1\Omega$ ，且電廠接地網、開關場接地網及接地棒等之接地電阻值必須綜合計算，若綜合值未達目標值則須適當改善以符合要求，另須依據 IEEE 81 (接地系統土壤電阻、接地阻抗及接地電位量測指引) 準則，就廠區接地網進行量測接地電阻值。

二、核四廠接地系統之規劃及設計

核四工程接地系統依主建築物分為核島區、汽機島區及開關場等三區。核島區有反應器廠房、控制廠房及輔助燃料廠房等，係由奇異公司規劃設計；汽機島區有汽機廠房及廠區接地網等，係由石威(Stone & Webster)公司規劃設計。另，開關廠區則由主設備(GIS)得標商中興電工公司設計及施工。

奇異公司對於核四廠核島區之接地系統，係依據「31113-0R41-3010 Plant Grounding System Nuclear Island System Design Description」規劃設計，主要引用 IEEE-80、IEEE-81、IEEE-142、IEEE-384、IEEE-518、IEEE-665 及 IEEE-1050 等標準。另，建築物之避雷保護部份，則引用 NFPA-780 之標準。

汽機島區及廠區接地網系統係由石威公司規劃設計，該公司依提送審查核可之「06888-0R41-3000 接地及避雷系統設計準則 (Grounding and Lightning Protection Criteria)」進行接地設計之依據。其主要引用有 IEEE-80、IEEE-81、IEEE-518、IEEE-665 及 IEEE-1050 等標準。另，建築物之避雷保護部份，則引用 NFPA-780 之標準。

開關場區之接地系統，台電依據石威公司提供之「874-E0010 345KV AND 161KV SWITCHYARD」規範發包建造，並由中興電工公司承攬施作。中興電工依據規範要求對開關場區接地網、設備接地及避雷接地等進行設計，並提送台電公司及石威公司審查核可後，據以施作。該規範主要引用 IEEE-80、IEEE-81、IEEE-422、IEEE-518 及 IEEE-1050 等標準。另，建築物之避雷保護部份，則引用國內建築技術規則之避雷保護標準及其他歐非法規(如 NFPA 780、NF C 17-102 等)。

三、核四廠接地系統引用法規與 DG-1137 之差異

核四廠雷擊保護系統引用之法規/標準與 NRC Draft RG DG-1137 之比較如下：

(一) 主要標準之比較

| DG-1137 | PSAR 承諾 | 核四設計引用 | 備註 |
|-----------|---------|--------|----|
| IEEE-665 | | ✓ | |
| IEEE-666 | | | |
| IEEE-1050 | ✓ | ✓ | |

| | | | |
|-------------|--|--|--|
| IEEE-C62.23 | | | |
|-------------|--|--|--|

核四廠接地系統設計雖未引用IEEE-666及IEEE-C62.23之標準，但有引用其他相關之工業標準（IEEE C62.22、IEEE 141等）。IEEE-666主要是對電廠廠內用電之中壓（4.16KV、13.8KV）系統有關係統接地型式（如直接接地、高阻抗接地及低阻抗接地等）選擇、設備接地及重要設備（變壓器、開關箱、馬達等等）突波保護等之設計參考。對於系統接地型式及設備接地部份，核四廠以IEEE-141「Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (ANSI)」、IEEE-142設計參考，該部份有相同類似之敘述；突波保護部份，核四廠則以IEEE C62.1及IEEE 472之設計參考。核四廠設計雖未引用IEEE-C62.23，但對於變壓器、電力電纜等，則依IEEE C62.22規劃突波避雷器（Surge Arrester）保護。查閱石威公司之變壓器絕緣協調設計計算書「Electrical Equipment Insulation Coordination」，核四廠採用氧化鋅避雷器，故使用IEEE C62.22「IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems」規劃設計，並以符合雷擊突波之保護餘裕20%及開關突波之保護餘裕15%，選擇適當之變壓器絕緣等級（[附件一](#)）。

（二）次要標準之比較

| DG-1137 | PSAR 承諾 | 核四設計引用 | 備註 |
|---------------|---------|--------|----|
| IEEE-80 | ✓ | ✓ | |
| IEEE-81 | ✓ | ✓ | |
| IEEE-81.2 | | ✓ | |
| IEEE-142 | ✓ | ✓ | |
| IEEE-367 | | | |
| IEEE-487 | | | |
| IEEE-1100 | | | |
| IEEE-C37.101 | | ✓ | |
| IEEE-C57.13.3 | | | |
| IEEE-C62.92.1 | | ✓ | |
| IEEE-C62.92.2 | | ✓ | |
| IEEE-C62.92.3 | | ✓ | |

| | | | |
|-------------|---|---|--|
| IEEE-C62.41 | ✓ | ✓ | |
| IEEE-C62.45 | ✓ | ✓ | |

四、核四廠接地系統設計之查證

核四接地系統主要工程尚未進行施作，本次針對反應器廠房、汽機廠房及開關場之建築物的避雷保護設計進行查證。避雷系統包含有避雷針、引下電纜及接地電極等組成。對於雷擊保護除了有 NFPA 780 外，國內亦有建築技術規則規範雷擊保護，其內容與 NFPA 780 大同小異。核四工程主建築物區分為反應器廠房、汽機廠房及開關場 GIS 設備室，在反應器廠房及汽機廠房之雷擊保護，係參考 NFPA 780 標準規劃設計；開關場設備室雷擊保護，則以國內建築技術規則之雷擊保護及歐美相關標準規劃設計。

(一) 反應器廠房

奇異公司依據「31113-0R41-3010 Plant Grounding System Nuclear Island System Design Description」規劃反應器廠房建築物之避雷保護，其主要引用 NFPA 780 之要求設計。查閱施工處發包「核島區電氣安裝工程」之反應器廠房避雷系統設計圖說（[附件二](#)），其與 NFPA 780 之要求比較如下：

| NFPA 780 | 建築技術規則 | 核四廠設計 |
|--|---|---|
| 1. 避雷針之突針尖端在裝置完成後不得低於被保護物 10in(25.4cm)以下。 | 相同 | 相同 |
| 2. 建築物屋頂四周每 25ft (7.6m) 有一支避雷針；另屋頂平面中間部份，避雷針間距不得超過於 50ft (15m)。 | 以保護角（區分 45°、60°）方式計算其保護半徑。 | 避雷針建築物四周之間距為 5.92m；與屋頂之轉角處為 6m；屋頂中間部份間距為 14.8m。 |
| 3. 避雷針引下導線數量至少設置二條以上，如建築物外周長超過 250ft(76m)，每超過 100ft(30m) 應增裝一條，並應使各接地導線相互間之距離儘量平均。 | 避雷針導線至少設置二條以上，如建築物外周長超過一百公尺，每超過五十公尺應增裝一條，並應使各接地導線 | 共設計 12 條避雷針引下導線（周長約 230m）。 |

| | | |
|--|-------------|--|
| | 相互間之距離儘量平均。 | |
|--|-------------|--|

上述以外（如接地電極、材料）及安裝方式均為雷同，核四廠反應廠房避雷針佈置符合 NFPA 780 有關之避雷針安裝間距及引下導線數量。

（二）汽機廠房

汽機廠房建築物之避雷系統，石威公司依據「06888-0R41-3000 接地及避雷系統設計準則（Grounding and Lightning Protection Criteria）」進行設計，查閱汽機廠房建築物之頂樓設計平面圖（[附件三](#)），其與 NFPA 780 之要求比較如下：

| NFPA 780 | 核四廠設計 |
|--|---|
| 1. 避雷針之突針尖端在裝置完成後不得低於被保護物 10in(25.4cm)以下。 | 相同 |
| 2. 建築物屋頂四周每 25ft (7.6m) 有一支避雷針；另屋頂平面中間部份，避雷針間距不得超過於 50ft (15m)。 | 避雷針建築物四周之間距為 5.925m；與屋頂之轉角處為 6m；屋頂中間間距部份為 14.85m。 |
| 3. 避雷針引下導線數量至少設置二條以上，如建築物外周長超過 250ft (76m)，每超過 100ft (30m) 應增裝一條，並應使各接地導線相互間之距離儘量平均。 | 共設計 12 條避雷針引下導線（周長約 376m）。 |

上述以外（如接地電極、材料）及安裝方式均為雷同，核四廠汽機廠房避雷針佈置符合 NFPA 780 有關之避雷針安裝間距及引下導線數量。

（三）開關場 GIS 設備室

中興電工依據合約規範要求設計開關場區接地網、設備接地及避雷接地等，並提送台電公司及石威公司審查核可後，據以施作。開關場建築物區分為 345KV GIS 設備室及 161KV GIS 設備室與控制室等二棟建築物，避雷系統之設計，並依建築物不同分開設計。中興電工參考國內建築技術規則及法國避雷針標準 NF C 17-102 設計，NF C 17-102 標準係以提早放電式避雷針設計有效保護半徑之範圍。345KV GIS 設備室以避雷針裝置高度為 3 公尺以上、保護半徑為 64 公尺及 2 條引下導線；161KV GIS 設備室則避雷針裝置高度為 6 公尺以上、保護半徑大於 107 公尺及 2 條引下導線（[如附件四](#)）。另外，建築技術規則中對於高層建築物之避雷設備，建議應考慮雷電側擊之對應措施。所以一般除了高層建築物外，

對於靠山邊或空曠地區之建築物，亦增設消雷器，以降低可能遭受側雷之影響。在核四廠開關場設備室之兩端均裝置消雷器，以降低側雷之影響。

開關場接地網中興電工公司依據合約規範之要求設計，主要以符合 IEEE-80 之接觸電位及步間電位的限制值，以確保人員安全。中興電工提送之開關場接地網計算書及圖面設計（**附件五**），其計算書之設計依據如下：

1. 因開關場區接地網埋設於地下 2.5 公尺，所以大地土壤電阻係數採用 $75\Omega\cdot m$ 。
2. 最大單相故障電流以 43.4kA 設計。
3. 故障清除期間 0.5 秒設計。
4. 接觸電壓及步間電壓，以人體 50 公斤重所能承受之經驗公式設計。

接地網計算書之設計結果如下：

1. 接地網由長 275.2 公尺×寬 60.2 公尺，且分別由 36 根（長邊）導體及 9 根（寬邊）導體以間隔 8 公尺矩形網狀方式組成，接地網導線採用 4/0 AWG（ 107.2 mm^2 ）裸銅線設計。
2. 接地棒使用 324 支，直徑為 19mm、長有 3 公尺及 6 公尺二種型式。
3. 接地電阻為 0.264Ω （符合 PSAR 要求 1Ω 以下）。

中興電工公司之開關場接地電阻值較石威公司設計值（ 0.126Ω ）高，係因採用未考慮接地網目、地棒等影響之經驗公式，其值較為保守。一般接地電網設計，除了接地電阻值需符合要求外，其接觸電位及步間電位必須低於限制值之要求，以確保人員安全。由於配合 161KV 加壓時程及遺址探勘等因素，161KV GIS 設備室與 345KV GIS 設備室無法同時開挖施工。目前主要進行 161KV 設備室興建（**照片一、二**），而且接地網分段開挖施工。由於接地電阻值需符合設計值，且為責任施工（若接地電阻值過高則增設接地棒），所以若需增設接地棒，以降低電阻值時，可能會因接地網幾何配置不均，而造成接地網電位分佈不均勻，該部份中興電工以實際開挖之土壤電阻係數，重新評估中。施工隊對於 345KV GIS 設備室與 161KV GIS 設備室分開施工，日後分段量測接地電值之問題，已請石威公司評估中。

伍、結論

美國 NRC 對於雷擊保護，將發行法規指引（RG）且引用 18 份 IEEE 標準，在核四廠設計雖未全部參考引用，但已引用其他相關之工業標準。對於接地網、

設備接地、儀控接地、設備突波保護及避雷保護等設計，在查閱部份之設計文件，該部份應符合其 DG-1137 引用之標準（除開關場雷擊保護之避雷針未使用 NFPA 780 設計外）。

核四廠接地系統主要工程尚未進行施作，開關場為配合 161KV 加壓時程及遺址探勘等因素，將 161KV GIS 設備室與 345KV GIS 設備室分開施作，無法同時開挖施工。目前主要進行 161KV 設備室興建，而且以分段開挖施工，對於日後接地電阻值之量測，以及 161KV GIS 設備室與 345KV GIS 設備室接地網之銜接，對接地網之完整性是相當重要，該部份施工處並已請石威公司評估中。



照片一：開關場之接地網



照片二：開關場之接地網引出