

洞道中超高壓地下電力系統之設計 Design of Extra High Voltage Underground Power Systems in Tunnel

國立台灣科技大學電機工程系 張宏展 郭政謙 連裕豐

摘要

超高壓電力電纜佈設於洞道時，電纜因送電運轉而產生大量的熱損失，正常運轉下對電纜送電容量之影響，本文的展望旨在開發一套具有各種地下電纜洞道型式架構之地下電力系統應用程式，能計算電纜熱損失、熱量轉移排出能力及被套感應電壓與距離限制，提供電力工程師在規劃洞道中之地下電力系統決定適當的形式及空間需求時，重要的參考資料。為驗證本文所開發應用程式之實用性，以數個台電實際規劃案例進行徹底檢查及驗證，經由這些案例結果得知該建議程式確實能提供正確的分析結果，輔助電力工程師快速又正確的完成洞道中地下電力系統設計。

關鍵詞 (Keywords)

送電容量 (Ampacity)

熱損失 (heat energy loss)

熱量轉移排出能力 (energy transfer ability)

感應電壓 (induction voltage)

被覆套 (shielding)

洞道中地下電力系統 (underground power systems in tunnel)。

Abstract

This thesis explores the various lay-out schemes for the extra-high-voltage underground cables in tunnel. Since massive heat will be generated by energy losses during power transmission of power cables, it is crucial to determine the ampacity of continuous current rating of power cables for safe system operation. In view of this, this

thesis aims to develop an application program for underground power systems with different topological configurations which can calculate the heat energy loss, energy transfer ability of the power cables, and the induction voltage of the shielding with distance limit. The developed application program can be a valuable reference for power engineers in planning power system in underground tunnel to determine the suitable types and the spaces required for the tunnel. To verify the practicability of the application program, several real planning cases of Taipower Company are thoroughly examined. Results obtained from the case studies show that the proposed program can provide correct analysis results and effectively assist the power engineers in designing underground power systems in tunnel..

1. 簡介

自從台電第六輸變電工程於民國九十年奉政府核定後，除原野、鄉間及山區等人煙稀少區域外，新建輸電線路所需經過土地的路權，往往受當地民眾抗爭及影響都市景觀等因素，而無法順利取得，為了輸變電工程能如期完成，部分超高壓電力電纜佈設方式，必須改採地下洞道方式設計施工。再者，近年來民眾對架空輸電線路，產生電磁波對身體健康造成傷害的疑慮與日俱增，輸電線路沿線民眾，要求輸

電線路地下化的聲浪升高，未來佈設於洞道的超高壓輸電電纜，在輸電系統的比例將會逐漸增加。

目前台電系統中，345kV輸電線地下電纜已經完工運轉的有南科[1]、台中火力九號及十號機至開關場與台電中寮超高壓變電所聯絡線，已完成設計者有汐止—松湖[2]、頂湖—仙渡[3~4]與高港—五甲—高雄地下電纜線路工程[5]；而正在著手規劃設計為松湖—大安—古亭—深美地下電纜工程[6]。鑒於地下電纜日益增多其相對環境因素與外在條件越來越複雜，且事故日益增加，例如南科345kV電纜事故及接續匣事故、大潭興國161kV電纜事故及接續匣事故等，其結果往往導致供電系統之電力品質降低、電力損失增加及保護電驛誤動作等問題，甚至使電力系統無法正常運轉。而這些問題對於用電品質要求極高之都會區、科技園區、工業區，造成相當嚴重之威脅。

電力工程師在進行超高壓電纜地下洞道方式設計時，大都參考IEC[7~11]標準及JCS[12]標準作為規範，對進行地下洞道型式、空間需求、電纜線配置方式及冷卻方式等進行設計。而在設計過程中，電力工程師需收集大量的資料，並經過繁複的計算程序，需花費大量的時間，並且容易發生錯誤。基於此，本研究主要發展一套應用程式，計算電纜回路於洞道配置時所需數據資料。並依計算資料完整規劃地下洞道型式，設計出最適當之洞道，提供完善電纜配置空間，改善地下電纜事故發生，確保供電正常與供電品質。

本文的主要目的分成三部分，第一個是在微軟視窗(Microsoft Windows NT)作業系統上，以Visual Basic軟體及Microsoft Office應用程式，開發一套具有良好人機介面及完整功能的應用程式；第二個是研究分析台電及國際上對超高壓地下電纜設計規範、文獻[13~19]及案例，建構出最合宜的電纜熱損失、熱量轉移排出能力及被套管感應電壓與距離限制等計算式，撰寫成應用程式；第三個是開發一個洞道通風及冷卻方式分析程式，根據洞道結構不同評估

洞道內產生總熱量，以及各種通風冷卻方式對洞道熱量轉移排出能力，提供電機工程師在洞道設計時，決定洞道型式、尺寸及冷卻方式之重要參考資料。

II. 超高壓地下電纜於洞道工程說明

1. 地下電纜洞道說明：

輸電線(Transmission line)架設方式，主要分為架空(Overhead)架設與地下(Underground)敷設兩種方式，台電於電力網路中345kV級之發電、輸電、變電等設備稱超高壓系統[20]，本文僅對輸電線地下敷設所用之地下電纜分類與構造，及地下電纜於洞道中之特性加以檢討，各種類型電纜實在無法簡單斷言孰優孰劣，一般僅能針對使用環境與條件選擇適用者。在國內台電公司常用之地下電纜共有兩種，第一種為：充油電纜(Oil-filled cable, O.F)，第二種為：交連聚乙烯電纜(XLPE cable)，台電為配合工業局國產化政策，現在新設之輸配電電纜大都採用國內可生產之XLPE電纜，故本文僅針對第二種電纜進行研究，研究的電壓等級範圍除了345kV XLPE電纜外，亦包含161kV XLPE電纜。

XLPE電纜具有以下優點[18、19、21]：

- A. 連續使用時，導體溫度最高容許至90°C，具良好耐熱性。
- B. 同一導體之最大容許電流及短路時間容許電流較大。
- C. 過負荷或發生短路時，損壞率減少。
- D. 耐化學藥品及耐大氣腐蝕性良好、具良好耐熱、耐水等特性。
- E. 具優秀之耐磨、耐龜裂性能、保養維護容易。
- F. 電纜絕緣外徑較小、重量輕，易於敷設及搬運。
- G. 電纜接續和終端處理安全簡單。
- H. 乾式絕緣體，不需供油系統，降低火災產生可能性。

一般常用地下電纜敷設方式，大都採用直接敷設方式或洞道敷設方式，而超高壓地下電纜大都採用洞道敷設方式設計建

造。超高壓電纜地下電纜洞道敷設種類，大略可分為推管、潛盾、涵洞、電纜溝等方式敷設，洞道種類的選擇需考慮經濟性、可行性、擴充性、安全性及維護保養之便利性的因素。除上述主要考慮因素外尚應考慮社會成本及營運成本。各種洞道佈設方式將一一介紹如下：

推管主要用於回路數少，空間需求較小，穿越交通繁忙之道路，施工井容易取得或土地面積狹小場合，其地下電纜於推管配置方式，如圖 2.1 所示，一般為洞道直徑 3.0m 以下使用，經常使用者為直徑 2.0m 及直徑 2.4m。

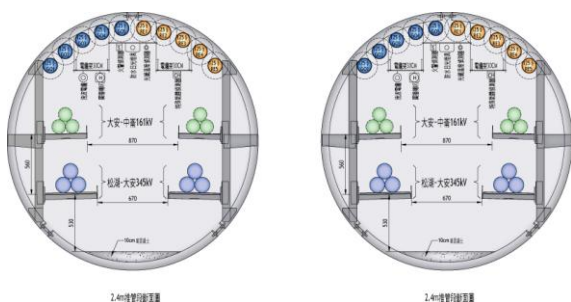


圖 2.1 推管 2.4m 地下電纜配置剖面說明[6]

潛盾主要用於回路數多，空間需求大，穿越交通繁忙道路之下方，無法以明挖施工或為避免引起抗爭場合使用，其地下電纜於潛盾配置方式，如圖 2.2 所示，一般為洞道直徑均為 3.2m 以上使用，常使用之直徑依需求量設置該尺寸。

涵洞主要用於變電所連外至分界電處，通常空間需求大，電纜回路於此處作相互穿越、轉折或接續，尚需考慮配電線路加入需求，一般以明挖施工，其地下電纜於涵洞配置方式，如圖 2.3 所示，一般為涵洞採長方形設置，一般寬度為 2.2m、2.4m 至 3.0m，高度則依需求設置，最少為 2.4m，目前為設計案最高為 4.9m。



洞道中超高壓地下電力系統之設計

圖 2.2 潛盾 4.6m 地下電纜配置剖面說明[6]

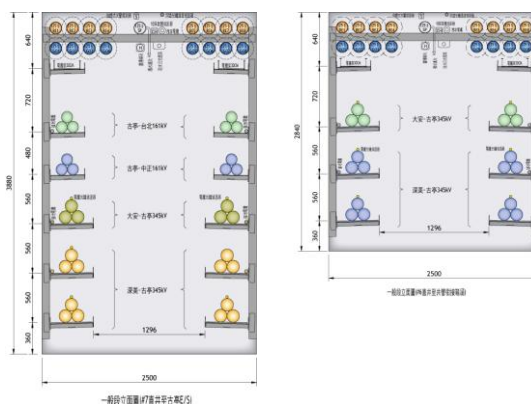


圖 2.3 涵洞 2.5m×3.9m 地下電纜配置剖面說明[6]

地下電纜洞道之直井（潛盾、推管之到達井或發進井）、中間直井（通風井或人員逃生）內結構型式配置，需根據電纜及附屬設備佈設需求檢討結果[22~23]，一般規劃矩型直井，直井之主要空間需求，除作為推管到達工作井或推管發進井外，亦包括電纜轉向、爬昇等配置、通風機械設備、人員進出及其它附屬設備配置。有關直井內電纜之配置，通常需就下列事項加以考量：

- 確保電纜之容許彎曲半徑 R （161kV 200mm² 時， $R=2m$ 、345kV 2500mm² 時， $R=3m$ ）空間。
- 防止電纜芯線滑落之形狀（採用水平蛇形佈設）。
- 電纜熱移動時所發生軸向力抑制形狀（採用垂直蛇形佈設）。
- 考慮垂直部的佈設作業時之佈設形狀（採用各回線水平排列）。

地下電纜洞道區分為：一般段洞道斷面及接續段洞道斷面。一般洞道斷面規劃需提供電纜延線、進入直井時之轉向或蛇行及附屬機電人員作業所需空間，故綜合評估作業維修空間，避難及逃生動線、施工經費與工期等因素，洞道直徑越小越好。

2. 超高壓地下電纜分類與規範說明：

161kV 及 345kV 長距離地下輸電電纜，台電公司以往採用充油電纜，其構造如圖 2.7 所示[18]，台電為配合國產化逐漸以 XLPE 取代，各種規格 XLPE 電纜之分類如圖 2.8~2.9 所示[26~27]。

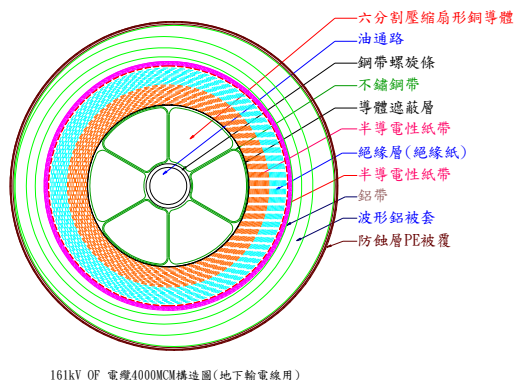


圖 2.7 O.F 電纜構造圖 4000MCM[18]

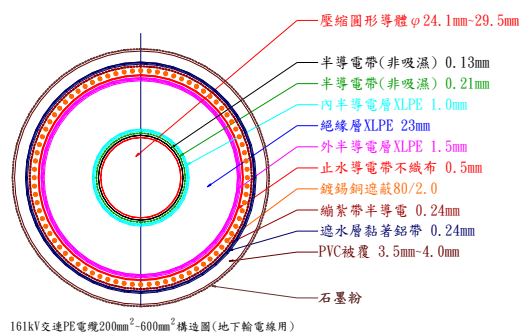


圖 2.8 XLPE 電纜構造圖 600mm² 以下

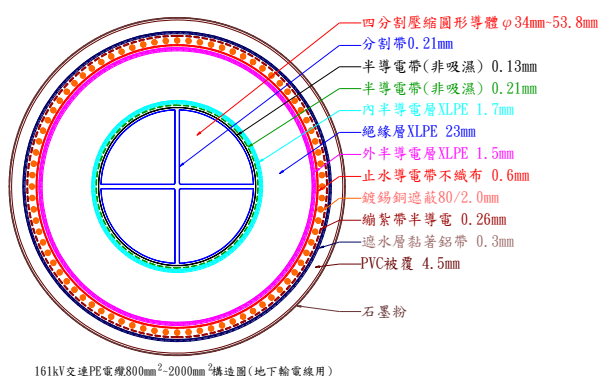


圖 2.9 XLPE 地下電纜構造圖 800mm² 以上[19][26]

161kV 與 345kV XLPE 地下電纜，如圖 2.10 所示，主要構造及材質分述如下[19、21、26]：

A. 導體 (Conductor)：材質主要為電氣用

無鍍錫軟銅線，以單線或絞線組成，公稱截面積分為 200、250、325、400、500、600、800、1000、1200、1400、1600、1800、2000、2500、3000mm² 等。其形狀分公稱截面積在 200~600 mm² 者為壓縮圓形，公稱截面積大於或等於 800 mm² 者為四分割或五分割壓縮圓形。

B. 導體遮蔽 (Conductor shielding)：含導體上之半導電性帶及黑色押出型半導電性 XLPE 層，稱內部半導電層。使用厚度約 0.2mm 之不吸濕半導電性帶，除可避免內導之原料滲入導體而不易剝除，另可使內導與導體之界面平滑避免電場分佈不平均，而造成放電效應。

C. 絕緣體 (Insulation)：需為無添加劑押出型交連聚乙烯，絕緣體適用於導體運轉容許最高溫，於正常時可達 90°C；緊急時可達 105°C；短路時可達 230°C。

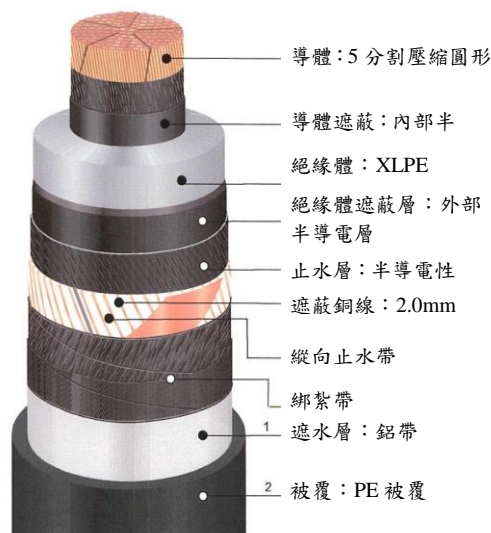


圖 2.10 345kV XLPE 地下電纜構造圖 2500mm²-ABB[1][27]

D. 絕緣體遮蔽 (Insulation shielding)：係為絕緣體上之一層黑色押出型半導電性 XLPE 層，稱外部半導電層。需與銅導體有良好之相容性，且其具有光滑表面之特性，使得遮蔽層與絕緣層之間介面能緊密貼合，因此能提高電纜之特性。

E. 止水層 (Water-block swelling layer)：於外部半導電層纏繞一厚度約 0.4mm 之半導電性不織布止水帶，作為縱向止水保護。功能為電纜受縱向滲水時能及時

將水阻擋，以防止水進入電纜中，故此材料需有良好的膨脹係數及吸水功能

- F. 遮蔽銅線 (Concentric shielding copper wire)：於止水層上纏繞一層同心鍍錫軟銅線作為遮蔽層，遮蔽層銅線之絞向須向右轉，絞距需為該遮蔽體外徑 8 倍以下。遮蔽銅線之截面積需能承受系統單相故障電流 50kA，持續時間為 0.4 秒。一般用單線 2.0mm 80 條，需平均分佈纏繞，不得過於集中。
- G. 綁紮帶 (Binder tape)：於遮蔽銅線上纏繞厚度約 0.2mm 之半導體性布帶。
- H. 遮水層 (Water impervious layer)：於綁紮帶層上縱向連續包捲一層厚度約 0.2mm 之金屬積層帶，座逕向遮水保護，包捲後重疊處需密封。其金屬箔與 PVC 被覆接觸表面需塗非導電性膠處理，此金屬帶之結構為半導體層、鉛帶、補強層及粘著層所組成，此帶需能符合徑向滲水試驗，能防止水進入電纜內層以確保其電纜品質。
- I. 被覆 (Jacket)：遮水層包捲後，其上需有一層押出型黑色聚氯乙炔為被覆，外層需添加一層導電石墨作為電纜被覆完整性高壓測驗之電極。

XLPE 地下電纜，其金屬被覆套主要分類說明如下[2~4][24~26]：

- A. 鋁簡易遮水層電纜 (CV Cable)：主要是由遮水層 (鋁，塑膠膜合成膠布) 與銅線遮蔽層所構成。
- B. 不鏽鋼被套電纜 (CSZV Cable)：主要是由不鏽鋼被覆與銅線遮蔽層所構成。
- C. 鋁被套電纜 (CAZV Cable)：主要由鋁質被套所構成。
- D. 鉛被套電纜 (CLZV Cable)：主要是由鉛被覆與銅線遮蔽層所構成。

CV 電纜具有低成本及較高可靠度，而 CLZV 或 CAZV 電纜之發熱損失高，需有較大容量之冷卻設備，整體建設費用將比 CV 電纜為高。另一方面 CV 電纜單價較 CSZV 電纜便宜，因此綜合評比各種不同電纜被套之比較，一般建議採用 CV 電纜。

III. 超高壓地下電纜供電回路與送電容量需求

1. 台電一般供電回路與送電容量：

台電輸電系統一般電纜送電容量依電壓等級分為[28]：

- A. 在台電輸電系統一般 345kV 級，採 XLPE 電纜 2500mm² 兩回路複導體，送電容量每回路為 2187MVA (3660A)。
- B. 161kV XLPE 電纜，在台電輸電系統一般採 2000mm² 兩回路複導體，送電容量每回路為 538MVA (1930A)。
- C. 161kV O.F 電纜，在台電輸電系統一般採 4000MCM 一回路單導體，送電容量每回路為 269MVA (965A)。

另考慮負載需求或轉供時，以松湖一大安—古亭—深美為例，其考慮因素有：

- A. 345kV XLPE 電纜配合超高壓變電所變壓器容量為 500MVA×4 台，345kV XLPE 2500mm² 送電容量每回為 2000MVA。
- B. 161kV XLPE 電纜配合配電變電所變壓器容量為 60MVA×6 台，161kV XLPE 2000mm² 送電容量每回為 360MVA。

2. 161kV及345kV XLPE 電纜參數計算與說明：

電纜發熱量計算一般採用國際電工委員會 (IEC)，國際標準編號 60287 容許電流計算[7~11][29]，或採用日本電線工業會規格 (JCS) 編號 168 號等[12、17、30]，兩種計算結果相近，但 IEC 計算結果較保守，JCS 計算在國內相關設計應用較為常見，亦為國內一般電纜廠家設計計算所使用。上述兩者標準均適用台灣地區電力電纜等相關資料計算，但採用 IEC 計算所得電纜送電容量較小，系統相對也比較安全。

3. 161kV及345kV XLPE電纜導體於最高溫度時之交流電阻

電纜規格依台電標準，並依據前言所述之電纜通道佈設規劃原則，參考 IEC 60287，計算求得電纜發熱量，首先，需計算電纜導體於最高溫度時之交流電阻 [29~30]。

A. 導體之容許最高溫度， θ (°C)

XLPE 電纜之容許溫度規定如下：

常時容許溫度為	90°C
短時間容許溫度為	105°C
瞬時容許溫度為	230°C

B. 基底溫度， θ_e 或 T_b (°C)

電纜於通道、直井、電纜溝佈設時，不分季節一律以 40°C 計算。

C. 導體於最高溫度時之交流電阻， $R(\Omega/m)$

$$R = R' (1 + Y_s + Y_p) \quad (2-1)$$

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (2-2)$$

$$Y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \quad (2-3)$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} K_s$$

通常 x_s 值不超過 2.8 (2-4)

接著考慮電纜型式為 3 條單芯電纜時，其接近效應係數 (Proximity effect factor) Y_p 為

$$Y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right] \quad (2-5)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} K_p$$

通常 x_p 值不得超過 2.8 (2-6)

D. 考慮電纜介質損失 W_d (W/m)

$$W_d = \omega C E_0^2 \tan \delta \quad (2-7)$$

$$\text{其中 } \omega = 2\pi f \quad (2-8)$$

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} 10^{-9}$$

單位長度之電容 (F/m) (2-9)

4. 161kV 及 345kV XLPE 電纜被套損失

$$\text{電纜被套損失 } W_s = \lambda_1 \times W_c \quad (2-10)$$

A. 電纜被套損失係數 λ_1

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \times F \quad (2-11)$$

被套損失包含由循環電流產生之回路損失 λ_1' ，及渦電流產生之渦流損失 λ_1'' ，在單芯電纜被套採用單端接地或交錯接地 (Cross bonding) 時， $\lambda_1' = 0$

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left[\frac{R_s}{X} \right]^2} \quad (2-12)$$

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right] \quad (2-13)$$

其中

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1.74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1.6) \quad (2-14)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}} \quad (2-15)$$

$$\lambda_0 = 3 \cdot \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad \text{正三角形排列} \quad (2-16)$$

$$\Delta_1 = (1.14m^{2.45} + 0.33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0.92m+1.66)} \quad \text{正三角形排列} \quad (2-17)$$

$$\Delta_2 = 0 \quad \text{正三角形排列} \quad (2-18)$$

$$m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7} \quad (2-19)$$

若被套採銅線遮蔽則

$$R_s = \frac{40\rho_s [1 + \alpha_{20}(T_s - 20)] \cdot 10^{-5} \sqrt{\left(\frac{\pi}{P_s} \right)^2 + 1}}{n_s \cdot \pi \cdot d_s^2} \quad (2-20)$$

XLPE 電纜若無金屬裝甲， $\lambda_2 = 0$

B. 導體截面積較大，且為分割導體時，其分割組合係數為 F

$$F = \frac{4M^2 N^2 + (M + N)^2}{4(M^2 + 1)(N^2 + 1)} \quad (2-21)$$

其中

$$M = N = \frac{R_s}{x} \quad (\text{電纜以正三角形排列}) \quad (2-22)$$

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \ell n \left(\frac{2s}{d} \right) \quad (2-23)$$

5. 161kV 及 345kV XLPE 電纜熱阻抗計算

電纜熱阻抗分為被套間、充墊物、防蝕層外被覆及外在熱阻抗等部份，其熱阻抗等效，如圖 2.11 所示，各部份熱阻抗計算說明如下：

A. 熱阻抗計算

(1) 絕緣體熱阻抗為導體至被套管間之熱阻抗 $T_1(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}/\text{W})$

單芯電纜時

$$T_1 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left[1 + \frac{2t_1}{d_c}\right] \quad (2-24)$$

(2) 充墊物熱阻抗為被套管與金屬裝甲間充墊物 $T_2(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}/\text{W})$

$$T_2 = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_2}{D_s}\right) \quad (2-25)$$

XLPE 電纜若無金屬裝甲 $T_2=0$

(3) 防蝕層外被覆之熱阻抗 $T_3(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}/\text{W})$

$$T_3 = \frac{\rho_p}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D_a}\right) \quad (2-26)$$

(4) 電纜於洞道佈設時，其外在熱阻抗 $T_4(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}/\text{W})$

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e h (\Delta\theta_s)^{1/4}} \quad (2-27)$$

$$h = \frac{Z}{(D_c)^g} + E \quad (2-28)$$

B. 介質引起之溫昇 ($^{\circ}\text{C}$) $\Delta\theta_d$

電纜表面高於周圍之溫度 $\Delta\theta_s$ ，其求法如下：

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + K_A (\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right]^{0.25} \quad (2-29)$$

$$\begin{aligned} & (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s) \\ &= \pi D_e h (\Delta\theta_s)^{5/4} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right] \end{aligned} \quad (2-30)$$

$$K_A = \frac{\pi D_e h}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right] \quad (2-31)$$

介質引起之溫昇為

$$\Delta\theta_d = W_d \left[\left(\frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{n\lambda_2 T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right] \quad (2-32)$$

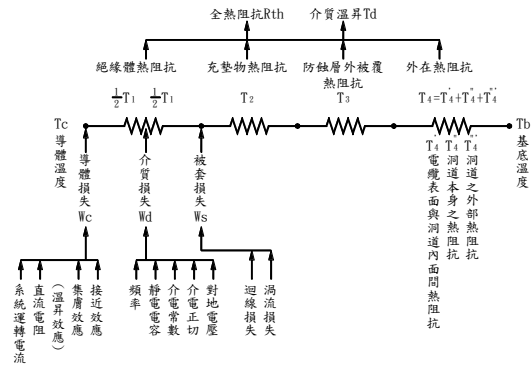


圖 2.11 XLPE 電纜熱阻抗等效圖

6. 161kV及345kV XLPE 電纜容許電流量與電纜綜合損失計算

電纜之容許電流量，代表電纜額定送電容量，與電纜結構材料、環境條件、安全裕度和運轉狀況有關，可由導體高於周圍容許溫升 $\Delta\theta$ 計算獲得，其中可由下式獲得

$$\begin{aligned} \Delta\theta = & (I^2 R + \frac{1}{2} W_d) \cdot T_1 + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] \cdot n T_2 \\ & + [I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] \cdot n(T_3 + T_4) \end{aligned} \quad (2-33)$$

將 $\Delta\theta$ 帶入下式，即可計算出容許安全電流 I

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \left[\frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R T_1 + nR(1 + \lambda_1) T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{1/2} \quad (2-34)$$

161kV 及 345kV XLPE 電纜綜合損失計算，一般單條電纜發熱量計算 $W_1 = W_c + W_d + W_s$ ，洞道內總發熱量是單條發熱量乘以回路數，單位以 W/m 表示，例如兩回路複導體總發熱量為 $W_t = W_1 \times 2 \times 3 \times 2 = W_1 \times 12$ ，依台電標準計算結果 161kV XLPE 單條發熱量約為 18.2 W/cm、345kV XLPE 約為 60 W/cm。

$$\text{系統損失 } W_c = I c^2 \times R \quad (2-35)$$

$$\text{被套管損失 } W_s = \lambda_1 \times W_c \quad (2-36)$$

$$\text{介質損失 } W_d = \omega C E_0^2 \tan \delta \quad (2-7)$$

7. 161kV 及 345kV XLPE 電纜最大供電容量計算

電纜送電容量是依據電纜容許電流大小決定，通常分常時、短時間及短路（故障瞬時）三種，常時是由 2-34 式，導體高於周圍容許溫升公式導出。短時間過載容許電流，為電纜導體於容許最高溫度下短時間之運轉容量，通常運用於線路發生事故時（正常為兩回路同時供電運轉），其中一線路不正常無法供電，另一正常線路則需超載供電，以供應正常負載容量。電纜短路容量為電力系統故障時，電纜導體所能承受流過故障點電流之容量。電纜短時間電流及短路容量計算方式為

A. 短時間過載電流 I_S 為

$$\Delta T = T_6 - T_1 = \Delta W \left[R_{int} (1 - e^{-\alpha t_0}) + R_{out} (1 - e^{-\alpha t_0}) \right] \quad (2-37)$$

$$\Delta W = (I_S^2 r_2 - I_1^2 r) n$$

$$I_S = \sqrt{\frac{T_6 - T_1}{n r_2 \left[R_{int} (1 - e^{-\alpha t_0}) + R_{out} (1 - e^{-\alpha t_0}) \right]}} + I_1^2 \frac{r}{r_2} \quad (2-38)$$

B. 短路容量時電流 I_I 為

$$I_I = \sqrt{\frac{J(Q_1 A_1 + Q_2 A_2)}{\alpha r_1 t_2} \ell n \frac{\frac{1}{\alpha_{20}} - 20 + T_5}{\frac{1}{\alpha_{20}} - 20 + T_4}} \quad (2-39)$$

8. 超高壓地下電纜於洞道內容許溫度及周溫條件

電纜多回路設置於洞道中時，因單位長度發熱甚高，通常無法靠自然散熱的方式，將熱量經空氣傳遞至洞道外壁，再經由外壁傳導至大地，將電纜發熱量排除，故須靠其他強迫方式將熱量轉移排除，一般設計通風或冷卻系統排除熱量，冷卻系統的目的就是要保證達成下列需求：

(1) 接點的溫度必須低於設計值。

(2) 洞道內的溫度必須低於設計值。

電纜洞道容許溫度與周溫條件，一般要求如下：

- (1) 進氣孔外氣溫度為 33°C，洞道、直井、電纜溝佈設，不分季節周溫均以 40°C 計算，洞道內最高溫不超過 43°C。
- (2) 通風井出入風口風速為 5m/sec 以下，洞道內風速為 3m/sec 以下，新設計案因土地取得及土木施工困難，僅能一次施作無法分多次或大規模。且新設計案輸送迴路增多，故斷面尺寸越來越大造成施工亦越來越困難，因此洞道內風速亦提高至 5m/sec。

161kV 及 345kV XLPE 電纜導體溫度 T_C (°C) 可以用下式計算：

$$T_C = (W_C \times R_{th}) + T_d + T_o \quad (2-40)$$

$$R_{th} = T_1 + (1 + \lambda_1) T_2 + [(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \times (T_3 + T_4)] \quad (2-41)$$

佈設於洞道內電纜損失率 (L_f)，一般輸配電線路損失率為 0.6~0.8，送至配電變電所 (Distribution substation, D/S)，一般取 0.8，特殊輸電線路為 1.0 (一般 345kV 輸電採用 1.0)，電纜損失率計算式為

$$L_f = \frac{\sum_{n=1}^m I_n^2 t_n}{I_{max} \sum_{n=1}^m t_n} \quad (2-42) \text{ 或}$$

$$L_f = 0.3 \times (\text{Load factor}) + 0.7 \times (\text{Load factor})^2 \quad (2-43)$$

電纜佈設於洞道內電纜周溫 (T_5)，一般受到輸配電線路洞道內溫度與土壤熱阻抗 (R_e)、洞道內總損失 (W_t) 與土壤基底溫度 (T_e) 有關，其公式如下：

$$T_5 = (W_t \times R_e) + T_e \quad (2-44)$$

$$R_e = \frac{g \eta_3}{2\pi} \ell n \left(\frac{2L}{D} + \sqrt{\left(\left(\frac{2L}{D} \right)^2 - 1 \right)} \right) \quad (2-45)$$

IV. 通風與冷卻系統設計

1. 通風冷卻系統說明：

電纜洞道附屬通風或冷卻系統之設置，旨在提高電纜額定輸電容量，並提供洞道內之安全防護與管理之必要設施。其規劃之基本原則如下：

- A. 能有效去除電纜發熱量，降低電纜溫度，確保輸電容量。
- B. 通風或冷卻系統最佳化設計，降低初設成本及操作成本，確保系統之可靠度，並考慮系統故障時備用性及設備保養維修便利性。
- C. 儘量減輕維修人員之工作負荷，有效管理降低維護成本。
- D. 運轉操作費用要便宜，並考慮經濟性、耐久性、擴充性、可靠性等因素，及容易維護保養，避免產生事故及公害。
- E. 通風或冷卻系統具有擴充性且增設容易及方便。

2. 通風冷卻系統分類比較與說明：

佈設地下電纜之洞道大都為密閉式空間，無論平時或維修時，均需維持良好通風狀態，以利整體線路供電運轉及作業人員安全。另外，電纜所散發之熱量，必須予以適當冷卻，方可確保期望之電纜輸電容量，並提高供電可靠度，一般電纜洞道冷卻方式有下列三種系統：

A. 機械通風冷卻系統：為一常用的通風冷卻方式，此方法係利用進氣井之送風機送入冷風與新鮮空氣，流通於洞道內部，再利用設於洞道另一端之排風機，將洞道內之熱空氣與廢氣經由排氣通風井排至洞道外，其通風流程如圖 3.1 所示。

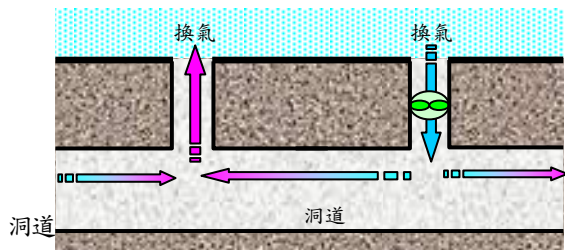


圖 3.1 機械通風冷卻系統流程示意

B. 冷風機冷卻系統：國內南科案即採用此一冷卻方式[1]，此方式係在電纜洞道內設置多部冷風機，一般約每 12 米至 20 米設置一台，利用冷風機之風扇產生之風力，經冷卻盤管而產生冷氣，來冷卻洞道內之空氣，其冷卻流程如圖 3.2 所示；但該系統需配合設置冰水主機、冰水泵浦、冷卻水泵浦、冷卻水塔、冰水管、控制器及閥門等設備，以供應冷風機所需之冰水及節能控制功能。

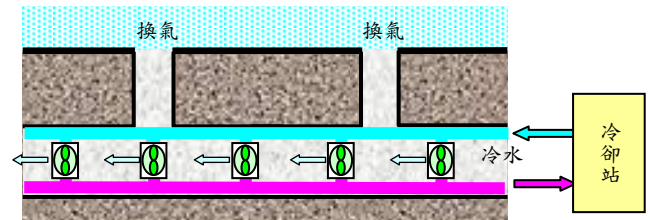


圖 3.2 冷風機冷卻系統流程示意

C 冰水管冷卻系統：為目前超高壓電纜洞道佈設所使用之冷卻方法，此方法係在電纜洞道內設置多組與電纜平行之冰水管，冰水管可為 PE 管或不鏽鋼管，利用冰水與管路作第一次熱交換，再經由管路與洞道空氣作第二次熱交換，來冷卻洞道內之空氣，其冷卻流程如圖 3.3 所示；但需於洞道外設置冰水主機、冷凍主機、儲冰槽、冰水泵浦、冷卻水泵浦、冷卻水塔、多組平行洞道冰水管、控制器及閥門等設備，以供應冰水管所需之冰水。

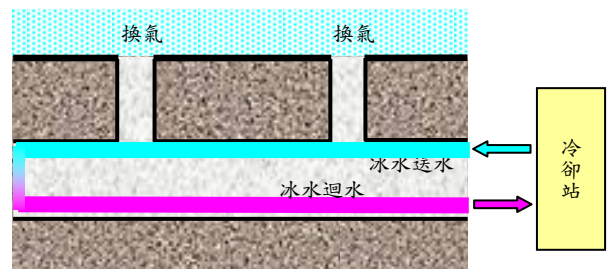


圖 3.3 冰水管冷卻系統流程示意

3. 通風系統：

地下電纜洞道通風設施設置目的主要為：

- A. 用於電纜洞道內空氣之抽排與交換，以保持管道內作業環境的安全與空氣品質。
- B. 用於電力輸配電幹線發生災害事故時之緊急排煙用。
- C. 電力洞道內由於電纜產生較大熱量，必須施以適當的通風，增機空氣循環效率，以降低洞道內的溫度，提高冷卻系統功效。

洞道內施設通風設施除將部份有毒氣體（甲烷、硫化氫及一氧化碳等）抽排外，必可利用於外氣溫度較低時，引入外氣來冷卻電纜所產生的熱量。

台電電纜洞道通風系統一般設計條件，以及通風系統設計準則，可歸納為下列五點：

- A. 洞道內風速一般應保持 3 m/sec 以下，目前新設計案風速已放寬至 5 m/sec，其限制為運轉為 5 m/sec，但保養維修時得降為 3m/sec。
- B. 通風口進出風速應保持在 5 m/sec 以下。
- C. 洞道內溫度應保持在 40°C 以下。
- D. 通風機之操作運轉方式應為自動/手動及遙控方式。
- E. 通風孔之噪音管制標準，必須依據環保署所定標準為設計之基準，並做適當防治對策，以不影響附近居民為主。

4. 通風需求量計算與設置標準：

通風系統一般採機械通風系統，通風量計算係以洞道內定風速計算，並考慮平時人員工作環境工安之需求，加以單位長度電纜總發熱量為計算條件（兩者一般取大者），依日本勞工作息標準第五條規定在洞道內溫度高於 30.6°C 應啟動風機，一般來說將較低溫之外氣引入，把管道內較

高溫的熱量排出。因此在通風設計條件皆以外氣最高為 34°C 來考量，若管道內溫度高於此 5°C（亦可調整為 4°C 或 3°C）時，便立即啟動風機實施洞道通風動作，並於降低至接近外氣溫度時停止風機之運轉，亦可規定在每天固定時間藉定時器來實施通風。通風量計算一般採用下述方法：

- A. 電纜洞道及通風井通風量計算，引用下列公式：

$$\Delta H = m \times C_p \times \Delta t = Q \times D \times C_p \times \Delta T$$

（能量平衡方程式） (3.1)

$$\Delta H = W \times L$$

(3.2)

CP：物質定壓比熱，乾空氣為

$$1KJ / (kg \times k) = \frac{1}{4.186} \text{ kcal } / (kg \cdot ^\circ C)$$

綜合上述整理得

$$W \times \frac{1}{4.186} \times L = Q \times 1.2 \times \frac{1}{4.186} \times \Delta T$$

$$Q = \frac{WL}{1.2\Delta T}$$

(3.3)

- B. 電纜洞道基本資料：

- (1) 先計算電纜回路數及電纜條數，依供電系統需求計算。
- (2) 總計每條電纜發熱量，依各區段之電纜供應數，分別計算每區段電纜總發熱量 W (kW)，並計算每區段每單位長度總發熱量 WT (kW/m)
- (3) 計算電纜洞道有效通風面積

- A. 計算各種電纜面積

$$AC(m^2) = \text{條數} \times \left(\frac{\pi \times \text{電纜直徑}^2}{4} \right)$$

(3.4)

- B. 計算固定架面積 AS(m²) = 環型角鋼支柱 (π/4 × (潛盾洞道角鋼外徑 - 潛盾洞道角鋼內徑)²) + 角鋼支柱 (長 × 寬) × 支數 + 支臂 (長 × 寬) × 組數 + 托盤 (長 × 寬) × 組數 + 電纜架 (長 × 寬) × 組數 (3.5)

(4)計算洞道通風面積

$$A1(m^2) = \frac{(\pi)}{4}d^2 \quad (3.6)$$

(5)計算有效通風面積

$$E1(m^2) = A1 - AC - AS \quad (3.7)$$

$$(6)計算有效通風率 EF(\%) = \frac{E1}{A} \quad (3.8)$$

$$(7)計算通風量 Q = \frac{(L \times W_T)}{1.2 \times \Delta T} \quad (3.9)$$

C.計算風機靜壓：

$$\text{風機靜壓 } Ha = \frac{(\lambda_a \times L_a \times V_1^2 \times \gamma)}{D \times 2g} \quad (3.10)$$

洞道風速 V1 (m/sec)

$$V_1 = \left(\frac{La}{C_p \times E_1 \times Re \times \ln \left[\frac{l}{1 - \frac{\Delta t}{(W_T \times Re + T_b - T_f)}} \right]} \right) \quad (3.11)$$

D.選用風機：

風機馬力數

$$(HP) H_p = \frac{(K \times Q \times Ha)}{75\eta \times 60} \quad (3.12)$$

5. 風機選用與噪音標準及防治：

環境噪音標準，依據環保署所頒佈之噪音管制標準如下。

A.住宅區：50dB (A)

B.工、商、住宅混合區：55dB (A)

C.工業區：65dB (A)

冷卻機房噪音震動源為：設備運轉產生、共振頻率產生、旋轉摩擦產生等。為克服噪音需依各噪音發生源，進行探討與分析，並採行適當之防治方法。

A.土木建築方面：建築結構需符合設備運轉條件需求、土木結構需夠強壯、設計時以減少共振源產生計算，門窗需採氣密防噪音外洩、牆壁天花板加設吸音板

或裝消音棉、設備基座加強或與建築斷開。

B.運轉設備加裝隔震墊、避震器、減震器、管路銜接部分加裝防震接頭、伸縮接頭降低震動源外傳。

C.管路經管道間或與外界接觸部分加消音箱、旋轉體加裝消音外罩。

D.管路線路吊架採軟性或彈簧式、接頭採彈性式非剛性。

E.設備選用採低噪音低震動型。

F.設備機器固定需牢靠。

G.設備位置與配置需仔細考慮降低低頻共振。

V. 超高壓地下電纜遮蔽系統與接地設計

1. 電纜遮蔽系統說明：

地下電纜安裝送電後，為安全起見金屬被套管應予以接地。尤其是單條電纜會發生以下問題：

A.因電流通過後產生電磁感應，則外層金屬被覆套將產生感應電壓。

B.外層金屬被覆套會產生感應電流造成較大的熱損失。

因此，被覆套接地之設計應從改善安全-減少外層金屬被覆套感應電壓及減少損失-減少外層金屬被覆套感應電流等問題著手解決，找出超高壓地下電纜最好的屏蔽及接地方式。一般電纜外層金屬被覆套接地方式，大都採用接續匣交錯接地(Cross bonding)方式，為一克服過高感應電壓及降低電纜發熱的理想方法；而接續匣另一非接地端則加裝電纜被覆套保護裝置(Cable Cross bonding Protection Unit)簡稱(C.C.P.U)，以抑制異常電壓，保護電纜被覆層[18][34]。

2. 電纜遮蔽層接地系統分類與感應電壓限制條件：

地下線路電纜遮蔽層之接地方式須視

使用電纜接續匣之數量而定，且須依下列情況設計之：

- A. 無電纜接續匣時，採用單端接地。
- B. 電纜接續匣為一個時，採用單端連接。
- C. 電纜接續匣為兩個時，採用交錯連接
- D. 電纜接續匣為三個以上時，採用接續匣交錯連接及單端接地（區間為非三之倍數時採用）混合。

台電地下線路電纜遮蔽及接地系統之接地設計要點[18]，因被覆套材質不同如表 4.1，造成被套感應電壓亦不同，接地系統要求如下：

- A. 每區間電纜遮蔽層之最大感應電壓不得大於安全容許電壓 65 伏特，但新設計案已容許放寬至 100 伏特；日本則為 300 伏特。
- B. 於線路終端側電纜遮蔽層之開路端須加裝電纜被覆保護裝置（SB-1 或 SB-S 型），其接連線採用普通接地電纜。
- C. 於線路中間電纜接續匣之型式，如為普通型，其接地線採用普通電纜；如為絕緣型，須加裝電纜被覆保護裝置（SB 或 SB-2 型），其接連線採用同心電纜，保護裝置之接地線採用普通電纜。
- D. 變電所外之電纜線路其遮蔽層如採單端接地設計，則此區間須放置補助接地線，其使用普通電纜與兩端之接地系統連接。
- E. 普通及同心接地電纜線徑為：161kV 用 200mm²、345kV 用 325mm²。

3. 電纜遮蔽層及終端匣接地方式與線路系統設計：

電纜金屬被覆套種類與其特性如下，不同材質引起感應電壓亦不同，設計時另

需配合接續匣間距，利用 $L = \frac{Em}{jXI}$ 求出距離 (m)。

護套電位依電纜之排列與間隔，會有顯著的變化。若將 3 條電纜做三角形排列配置，且盡量縮小電纜間隔，亦即以三角形密接排列方式配置，即可將護套電位降至最低。

長距離電纜之規劃設計方式可大大節省電纜接續組數，對洞道之成本減少及縮短施工期限有助益，因為可配合洞道接續段位置安排電纜於該處接續，但需注意因長距離接續電纜設計方式，其外被套感應電壓超過 65V 限制之事實，在日本 300V 仍是符合當地勞動安全衛生法規之要求，但當維護人員施行工作時，應要求配戴絕緣手套以防感電。

特別舉一竹工～湖北電纜兩回線複導體系統案例[35]，如圖 4.5 所示，此系統採用前述兩種電纜接續方式，進行分析與檢討，如表 4.6 所示，其中採一般正常長度（400m~500m）接續方式，需 10 處接續點及 120 個接續匣；採用長尺化電纜（900m~1500m）則只需 5 處接續點及 60 個接續匣，由以上結果得知，採用長尺化電纜接續方式較採一般正常長度電纜接續方式為佳。

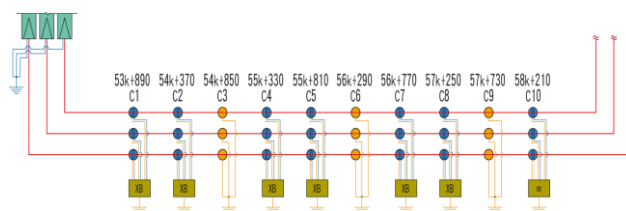


圖 4.5 電纜外被接地配置圖 (長距離接續電纜)

VI. 應用程式開發與執行

1. 應用程式說明：

經過上述研究案例分析，發現電纜洞道設計過程，需經歷繁瑣計算與分析，針對此綜整出設計方向邏輯，詳如圖 5.1 所示，首先對超高壓輸電系統準備初步資料，一般參考台電六輸工程計劃書，接著依釐

清電纜洞道路線位置及設置迴路數，並詳細分析每迴路送電容量及送電時程。

接著至路線位置現地執行地理資訊研判，瞭解線形狀況（主要注意轉彎與路口）與可執行之建地，找出可設直井、中間井、通風井或機房位置，並調閱相關地下管線與障礙物或將來計劃地下建物。準備好上述資料接著進行平面線形規劃與定線，繪出最佳平面位置包含路線、曲線段、轉彎段、直井、中間井、通風井、機房等位置，跟著繪出線型之縱坡、距離與各型障礙物位置。

土建設計完成後進行電纜系統規劃，考慮電纜捲軸供應長度，盡量減少接續匣，注意電纜終端銜接型式（屋內 G.I.S.或屋外連接站），依此找出最佳電纜系統圖並規劃設計出該圖面。依此系統逐步規劃各區段洞道斷面配置（分一般段與接續段），配置需包含所有送電迴路電纜、低壓機電、冷卻系統、監控系統等，斷面配置尚需考慮電纜配置間距、感應電壓、維修空間、走道等。此時並計算各區段之電纜發熱量、冷卻需求量、冷卻主機（冰凍主機）噸數、儲冰槽噸數、機房空間尺寸，並計算各區段電纜導體溫度、洞道內溫度、冷卻系統加入後洞道溫度，並比較各方案。完成後繼續配置電纜、機電系統於各直井、中間井、通風井、機房、特殊部、分歧部等，並計算電纜被覆套感應電壓，並決定區間長度。

2. 應用程式開發：

- A. 送電容量程式。
- B. 通風冷卻程式分析及洞道溫度計算。
- C. 冰水管冷卻系統需求與電纜洞道溫度計算。
- D. 感應電壓程式及洞道內電壓模擬。

3. 實例分析及計算結果：

- A. 實例分析一：中壢—五權青埔及中壢—松樹案。
- B. 實例分析二：竹工 E/S 出口 161kV 電纜

線路。

- C. 實例分析三：鎮北—中島 161kV 電纜線路。
- D. 實例分析四：高港—五甲—高雄案。
- E. 實例分析五：松湖—大安—古亭案。

4. 各案計算結果比較：

經上述各案分析可綜整出一些規劃方向與邏輯，首先對超高壓輸電系統準備初步資料，一般參考台電六輸工程計劃書，接著依招標文件內容，釐清電纜洞道路線位置及設置迴路數，並詳細分析每迴路送電容量及送電時程，工作服務範圍與內容。

接著至路線位置現地執行線勘，瞭解線形狀況（主要注意轉彎與路口）與可執行之建地，找出可設直井、中間井、通風井或機房位置，並調閱相關地下管線與障礙物或將來計劃地下建物。準備好上述資料接著進行平面線形規劃與定線，繪出最佳平面位置包含路線、曲線段、轉彎段、直井、中間井、通風井、機房等位置，跟著繪出線型之縱坡、距離與各型障礙物位置。

土建規劃完成後進行電纜系統規劃，考慮電纜捲軸供應長度，盡量減少接續匣，注意電纜終端銜接型式（屋內 G.I.S.或屋外連接站），依此找出最佳電纜系統圖並規劃設計出該圖面。依此系統逐步規劃各區段洞道斷面配置（分一般段與接續段），配置需包含所有送電迴路電纜、低壓機電、冷卻系統、監控系統等，斷面配置尚需考慮電纜配置間距、感應電壓、維修空間、走道等。此時應計算各區段之電纜發熱量、冷卻需求量、冷卻主機（冰凍主機）噸數、儲冰槽噸數、機房空間尺寸，並計算各區段電纜導體溫度、洞道內溫度、冷卻系統加入後洞道溫度、運轉節能策略，並比較各方案。完成後繼續配置電纜、機電系統於各直井、中間井、通風井、機房、特殊部、分歧部等。

電纜及機電規劃完成後進行電纜繪圖作業，綜整完成圖面進行討論，土建及機

電工程施工預定進度，工程數量與工程經費概估，達到如期完工送電時程。

VII. 參考文獻

- [1]台灣電力公司「嘉民、龍崎～南科～七股 345kV 地下輸電電纜線路工程設計技術服務建議書」，中興工程顧問股份有限公司，民國 87 年 10 月。
- [2]台灣電力公司「核一、汐止～松湖 345kV 地下電纜線路工程規劃設計及監造技術服務工作服務建議書」(正文及附錄)，萬鼎工程服務有限公司，民國 90 年 3 月。
- [3]台灣電力公司「頂湖～仙渡 345kV 線地下電纜輸電線路工程規劃設計服務建議書」，萬鼎工程服務有限公司，民國 89 年 3 月。
- [4]台灣電力公司「345kV 頂湖～仙渡及核二、汐止～仙渡 161kV 仙渡～投捷及仙渡～竹圍地下輸電電纜線路工程基本規劃及初步設計報告」，財團法人中華顧問工程司，民國 91 年 9 月。
- [5]台灣電力公司「高港～五甲 345kV 地下電纜線路工程規劃設計及監造技術服務工作服務建議書」(正文及附錄)，萬鼎工程服務有限公司，民國 93 年 6 月。
- [6]台灣電力公司「松湖～大安～古亭～深美 345kV 地下電纜線路工程規劃設計及監造技術服務工作服務建議書」(正文及附錄)，萬鼎工程服務有限公司，民國 93 年 11 月。
- [7]IEC 60287-1-1 : 2001-11 Electric cables - Calculation of the current rating-Part 1-1 : Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses-General.
- [8]IEC 60287-1-2 : 1993-12 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1 : Current rating equations (100% load factor) and calculations of losses - Section 2 : Sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation.
- [9]IEC 60287-1-3 : 2002-05 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-3 : Current rating equations (100% load factor) and calculations of losses - Current Sharing between parallel single-core cable and calculation of circulating current.
- [10]IEC 60287-2-1 : 2001-3 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal-resistance. Calculation of thermal resistance
- [11]IEC 60287-3-1 : 1999-05 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 3-1: Sections on operating conditions-Reference operating conditions and selection of cable type.
- [12]社團法人日本電線工業規格，「電力電纜最高容許電流」，日本電線工業會 JCS 第 168 號 E，1995 (平成 7 年 4 月)。
- [13]IEC 60853-3 : 2002-02 Calculation of the Cyclic and Emergency Current Rating of Cables Part 3: Cyclic Rating Factor for Cables of all Voltages, with Partial Drying of the Soil-First Edition.
- [14]IEC 62067 : 2001-10 Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages Above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) - Test Methods and Requirements-First Edition.
- [15]IEEE, Standard Power Cable Ampacity

- Tables (hard copy version), IEEE Std, 835-1994.
- [16] J.S.Barrett and G.J.Anders, "Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths and armour of electric power cable-mathematical models and comparison with IEC Standard 287" IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 144, No. 3, May 1997
- [17] 日本電氣協同研究, 第 53 卷第 3 號, 「地中送電線之送電容量設計」, 1998 (平成 10 年 1 月), 社團法人電氣協同研究會。
- [18] 「輸電工程作業手冊—上下冊」, 台灣電力公司 輸配電工程處。
- [19] 張憲章, 「輸電線路電纜工程技術」, 台灣電力公司 輸配電工程處, 民國 91 年七月。
- [20] 「電力調度規則彙編(自動化版)」, 台灣電力公司, 民國 86 年 6 月。
- [21] 楊成發、楊金石、林舜天, 「輸電地下電纜多迴線管路共設時之送電容量研究期末報告」台灣電力公司期末報告, 國立台灣科技大學電機工程系, 民國 93 年 3 月。
- [22] 陳世強, 「潛盾工法埋設輸電電纜線路」行政院所屬各機關人員共同報告」, 民國 79 年
- [23] 彭傑正, 「共同管道與輸電線路地下化」電機技師 79 期, 民國 89 年 2 月, P.72~94。
- [24] 「Underground transmission lines technical information」, 日本關西電力公司提供, 2001 年。
- [25] 「Underground transmission lines technical information」, 日本中部電力公司提供, 2002~2004 年。
- [26] 「地下輸電線用 161kV 交連 PE 電纜器材規範」編號: TSCD-165-02B, 台灣電力公司 輸配電工程處, 民國 90 年 4 月。
- [27] 「XLPE Cable Systems Users Guide」— ABB.
- [28] 「大安變電所相關 345KV 電纜線路工程規劃設計及監造技術服務工作契約補則」, 台灣電力公司 輸配電工程處, 民國 93 年 9 月。
- [29] 蕭裕倉, 「地下輸電電纜線路熱損失探討」電機技師 80 期, 民國 89 年 4 月, P.45~50。
- [30] 張福元, 「161kV XLPE 地下電纜送電容量分析」, 碩士論文, 國立中山大學電機工程學系, 民國 90 年 6 月
- [31] 江明德, 「地下輸電電纜隧道冷卻系統暨氣流模擬研究」, 碩士論文, 國立台北科技大學電機工程系, 民國 93 年 6 月
- [32] 李四川, 共同管道及電力輸電線冷卻節能系統之研究, 碩士論文, 國立台北科技大學電機工程系, 民國 90 年 6 月
- [33] 劉昱儀, 「345kV 地下電纜隧道用冷卻機房與變電所樓層共設規劃」行政院及所屬各機關出國報告, 民國 92 年。
- [34] 葉輝雄, 「台電地下輸電線路系統接地設計」電機技師 62 期, 民國 86 年 4 月, P.36~58。
- [35] 台灣電力公司「竹工E/S 出口 161kV 地下電纜線路工程規劃設計及監造技術服務工作服務建議書」(正文及附錄), 萬鼎工程服務有限公司, 民國 93 年 11 月。
- [36] 台灣電力公司「中壢~青埔~松樹 161kV 地下電纜線路工程規劃設計及監造技術服務工作服務建議書」(正文及附

錄)，萬鼎工程服務有限公司，民國 92 年 11 月。

[37]台灣電力公司「鎮北～中島 161kV 地下電纜線路工程規劃設計及監造技術服務工作服務建議書」(正文及附錄)，萬鼎工程服務有限公司，民國 93 年 8 月。