

# 台澎海底電纜輸電系統開關突波特性之研究

## A Study on the Switching Surge Characteristics for Taiwan-Penghu Submarine Cable Transmission System

蕭勝文  
Hsiao, Sheng-Wen

卓明遠  
Cho, Ming-Yuan  
高雄應用科技大學電機工程系  
Department of Electrical Engineering  
National Kaohsiung University of Applied Sciences  
Kaohsiung, Taiwan, R.O.C.  
Tel: +886-7-3814526#5565  
Fax: +886-7-3923241

蕭勝任  
Hsiao, Sheng-Jen

E-mail: shenwen@cht.com.tw

mycho@mail.ee.kuas.edu.tw

u897746@taipower.com.tw

### 摘要

澎湖近年來配合政府「觀光倍增計畫」、「離島建設條例」及「澎湖縣發展建設計畫」等發展建設規劃，使得澎湖地區用電成長不斷提高。台電新建海底電纜長達58.8km及陸纜為7.5km，電纜總長度高達66.3km，並採用161kV二回路交流送電，其電纜本身送電容值非常大。本文透過電磁暫態模擬分析，探討台澎海纜+陸纜對開關突波是否會造成過電壓現象，從模擬結果發現海底輸電電纜突波吸收器容量須提升，依據模擬結果建議台電參考，以確保台澎海纜+陸纜供電可靠度。  
關鍵字：海底輸電電纜、開關突波、突波保護、暫態過電壓。

建立海纜傳輸線路之等效電路模式，探討此海纜遮蔽層之開關突波特性，以瞭解其過電壓現象。

### II. 海底電纜設計及選用

雲林口湖至澎湖海纜+陸纜輸電系統，如圖 1 所示，主要包括 161kV 交連 PE 電纜、GIS 電纜終端匣、被覆保護裝置及接地系統等。

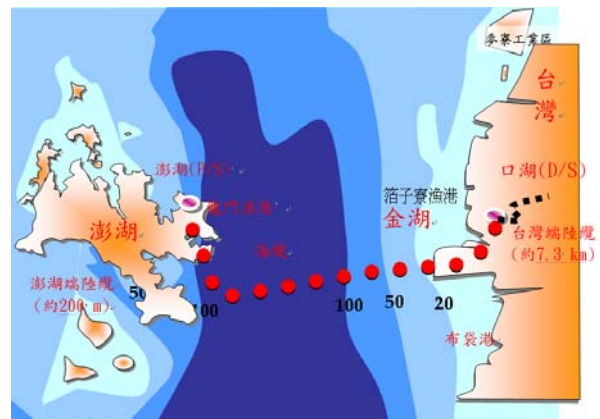


圖 1 161kV 口湖至澎湖海纜+陸纜輸電系統概要圖

### Abstract

Penghu in recent years with the government "Pan to Double Tourism", "Offshore Islands Development Act" and "The Development and Construction of Penghu County" project development and construction planning, making electricity Penghu growth rising. Taipower new submarine cable's length has been up to 58.8km and land cable's is 7.5km, all the cable length are up to 66.3km, and the second loop by 161kV AC transmission, the cable itself to send a very large capacitance values. This article aims to analyze electromagnetic transient simulation to explore the land of Taiwan-Penghu submarine cable and land cable on the switch will result in over-voltage surge phenomenon. From the simulation results show that undersea power transmission cable Surge absorber capacity to improve, according to simulation results suggest that Taipower Company is ensuring that the mainland of Taiwan-Penghu submarine cable and land cable power supply reliability.

Keywords: Submarine Transmission Cable, Switching Surge, Surge Protection, Transient Overvoltage.

### I. 簡介

隨著全球及亞洲經濟成長，台灣經濟景氣已逐漸復甦，預期未來各種產業用電量將顯著增加，而位於台灣海峽中線附近之澎湖群島，具有眾多天然觀光資源，近年來配合政府觀光倍增計畫發展建設規劃，整個澎湖群島就成為台灣地區當季最重要之觀光景點，但也使得澎湖地區用電成長不斷提高。依據台電對澎湖地區用電負載之統計，民國 81 年至 90 年尖峰用電量由 3.2 萬瓩增加至 5.9 萬瓩，尖峰用電量年平均成長率為 8.2% [1]，已成為當前經濟建設重要課題之一。

因此，遂計畫於台灣與澎湖之間新建海纜長達 58.8km，而陸纜為 7.5km，電纜總長度高達 66.3km，並採用交流電送電，預定 102 年完成，以滿足澎湖地區之用電需求 [2]。本論文將透過 EMTP-ATP 軟體模擬分析，

### A 海底電纜設計條件

電纜傳輸容量與佈設條件(埋設深度、佈設間隔)、環境條件(基礎溫度、土壤熱阻抗)等有關，海底電纜須進行兩端接地，但因被覆層內含金屬，故電纜傳輸容量損失非常大。因成本考量，各區段確保送電容量達至 200MW 之電纜尺寸，經研討並考慮外部導體(return conductor)之影響，海底電纜尺寸採  $600\text{mm}^2$  [1,3]。系統電壓為 3 相 3 線式、60HZ、中性點接地；常時運轉電壓為 161kV；最高運轉電壓為 169kV。額定絕緣基準(Rated Insulation Level)雷擊突波(Lightning Impulse)耐電壓為 750kV；開關突波為 517kV。

### B 海底電纜排列

海纜全長約 58.8km，其海床共分為 A 至 E 段，在靠近澎湖端 A 段其最大水深為 133m 每條電纜佈設間距約為 200m；B 段其最大水深為 90m 每條電纜佈設間距約為 140m；C 段其最大水深為 15m 每條電纜佈設間距約為 60m；D 段其最大水深為 3m 每條電纜佈設間距約為 20m；E 海堤段每條電纜佈設間距約為 5m 等。陸上電纜導體尺寸與送電容量、佈放場合及被套接地方式有

關，佈設採管路式，其電纜之尺寸大小採用  $2000\text{mm}^2$ [3-5]。

### C 海底電纜構造

海纜構造如圖 2 所示[1]。

- 1.) 為防護因錨而造成之外傷，在電纜外側設置一層鍍鋅鐵線之鎧裝構造。
- 2.) 為了減輕鉛被覆之熱損失，在鉛被覆之外側設置外部導體，抵消循環電流之構造。
- 3.) 電纜採用低介電損失及具遮水性佳之交連 (XLPE) 電纜，其特點因外徑較小且重量輕，易於延放及施工，其正常容許最高溫度可達  $90^\circ\text{C}$ ，故其送電容量較充油(oil-filled)電纜為高[3-6]。

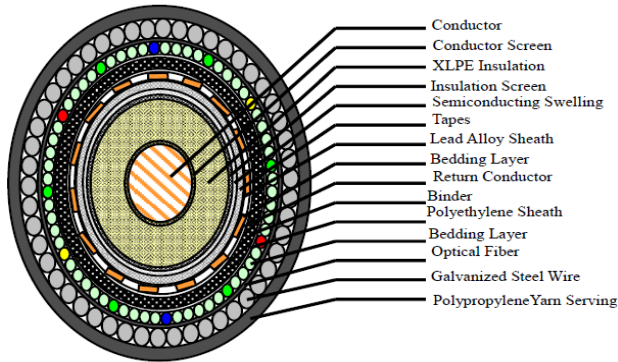


圖 2 161kV XLPE 單層鐵線鎧裝海底電纜構造圖

XLPE 電纜之氣孔、異物、半導體層尖突，係電纜設計之電纜方面要因的第一要項，由於其為電纜製造品質之最重要的因素，故電纜若發生類似的缺陷，則縮小絕緣厚度之夢想，將遙不可及[7-10]。

氣孔的容許水準以在氣孔內不發生放電為原則，可以下式表示：

$$2a \leq \frac{710}{\frac{1.74V \times 1.2}{r_0 I_n (R_0/r_0)} - 3.76} \quad (1)$$

其中：

a：氣孔半徑( $\mu\text{m}$ )。

V：對地電壓(kV)。

$r_0$ ：內部半導體層半徑(mm)。

$R_0$ ：外部半導體層下半徑(mm)。

氣孔是電場最嚴重的缺陷。假定就在內導體上方發生氣孔，則可由氣孔中放電之發生電壓與間隙長度的關係，由國外廠家實驗式導出來。(1)式中之係數「1.2」為放電發生電壓與消滅電壓之比，也就是『即使在電壓發生放電也必須在常規電壓下消滅』的理念。以(1)式之關係式而言，161kV XLPE 電纜的氣孔容許半徑必須在  $50\mu\text{m}$  以下，如表 1 所示[1.3]，目前之交連 PE 三層押出乾式加硫製程可以達到這樣的要求。

表1 161kV XLPE電纜的氣孔容許半徑

公稱電壓 (kV)	導體公稱截面積 ( $\text{mm}^2$ )	絕緣厚度	氣孔容許半徑( $\mu\text{m}$ )	
			計算值	規格值例
161	200	23	55	50

異物及半導體層尖突的容許水準以從尖端的電場集中部份不發生電樹為原則，可以下式表示：

$$E_c \geq E_{\max} \times K_T \times K_n \times K_f \quad (2)$$

其中， $E_c$ ：電樹發生電場( $220\text{kV}/\text{mm}$ )； $E_{\max}$ ：最大使用電場( $\text{kV}/\text{mm}$ )； $K_T$ ：溫度補償係數(1.1)； $K_n$ ：壽命換算係數(1.87)； $K_f$ ：電場增加率。又

$$K_f = 1 - \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{\lambda_0 + 1}{\lambda_0 - 1} - \frac{\lambda_0}{\lambda_0^2 - 1} \right] \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \ln \frac{\lambda_0 + 1}{\lambda_0 - 1} - \frac{1}{\lambda_0} \quad (4)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{R}{a}}} \quad (5)$$

其中， $\alpha$  為長軸半徑( $\mu\text{m}$ )； $R$  為尖端曲率( $\mu\text{m}$ )。

對於 XLPE 地下電纜之耐電壓強度通常以韋伯分配函數(Weibull distribution function)來評估，所得之典型的 XLPE 電纜耐電壓強度如圖 3 所示[1,10]，其中之 AC 表示交流耐電壓試驗；Imp 表示衝擊波耐電壓試驗； $E$  為外加的電壓強度，單位為  $\text{kV}/\text{mm}$ ； $E_0$  為線間最高電壓； $m$  為試驗次數；至於韋伯分佈的位置參數(Location parameter)EL 則是一個非常重要的數值，通常以其值決定超高壓 XLPE 絕緣厚度設計的數據。圖 3 中之另一參數  $P$  為電壓強度失敗機率(Probability of failure of an electrical stress)[11-12]，可由下式求得：

$$P = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left[\frac{E - E_L}{E_0}\right]^m\right\} & (E \geq E_L) \\ 0 & (E \leq E_L) \end{cases} \quad (6)$$

目前依各廠家的實力，交流耐電壓值  $E_L(\text{ac})$  約為  $35\text{kV}/\text{mm}$ ，衝擊波耐電壓值  $E_L(\text{imp})$  約為  $70\text{kV}/\text{mm}$ 。

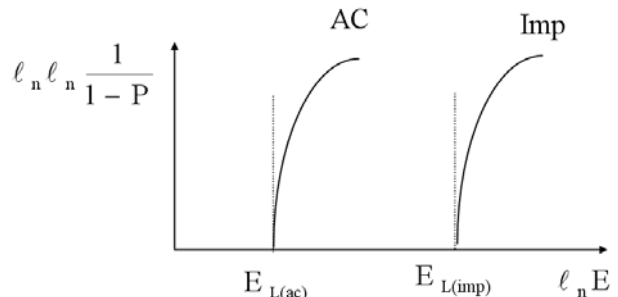


圖 3 XLPE 電纜的耐電壓強度

### III. 開關切換暫態突波模擬與分析

#### A 台澎海纜+陸纜模型之建立與模擬條件

台澎海纜+陸纜全長路徑總長約 65.5 公里，且台灣本島陸纜部份長達 7.3 公里，共計 27 個人孔區間電纜接續匣，而海纜為 58.8 公里，澎湖端為 200 公尺，各電纜區間長度如表 2 所示，則做為建立模擬電路圖如圖 4 所示之依據。對變電所斷路器啟閉時之暫態電壓與電流，是否造成海纜過電壓影響，有必要對電纜銅導體、遮蔽層暫態突波作分析。

其模擬的條件①系統電壓：161kV；②口湖 D/S 端開關投入時間：R 相為 0.01 秒、S 相為 0.011 秒、T 相為 0.012 秒；③澎湖 P/S 端開關投入時間：R 相為 0.021 秒、S 相為 0.022 秒、T 相為 0.023 秒；④接地電阻：人孔為  $10\Omega$ 、變電所為  $0.1\Omega$ ；⑤電纜的額定耐開關過電壓：517kV；⑥並聯電抗器採用 40MVA 容量。

表2 口湖至澎湖海纜區間長度

人孔區間	間距(m)	人孔區間	間距(m)
口湖 D/S-M1	120	M15~ M16	256.77
M1~ M2	134.17	M16~ M17	281.48
M2~ M3	281.20	M17~ M18	280.00
M3~ M4	240.69	M18~ M19	280.00
M4~ M5	257.25	M19~ M20	256.95
M5~ M6	300.55	M20~ M21	297.01
M6~ M7	295.19	M21~ M22	281.82
M7~ M8	286.75	M22~ M23	279.95
M8~ M9	283.78	M23~ M24	280.00
M9~ M10	275.28	M24~ M25	292.24
M10~ M11	281.79	M25~M26	268.38
M11~ M12	278.20	M26~M27	313.00
M12~ M13	288.61	海纜	58500
M13~ M14	279.98	M28~澎湖P/S	200
M14~ M15	295.51		

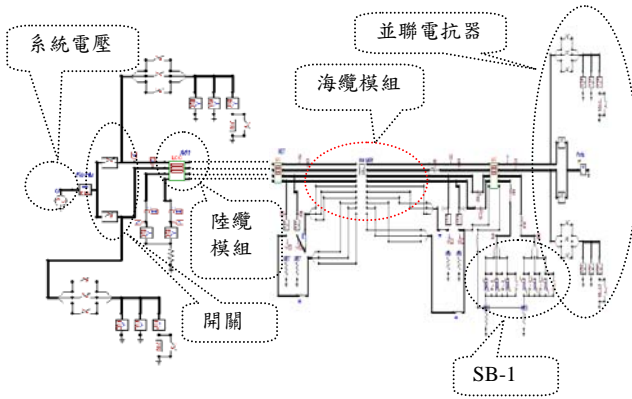


圖4 口湖至澎湖海纜+陸纜電磁暫態分析模型

**B 口湖 D/S 及澎湖 P/S 斷路器投入電纜暫態突波分析**

依表 3 各種狀況模擬各相電纜銅導體、電纜遮蔽層等的電壓與電流突波，並研究分析，模擬所得結果如下：

- 1.) 電纜銅導體對地最大暫態突波電壓發生在海纜 T 相最大為 207.8kV，其次為澎湖 P/S GIS 端之 T 相最大為 207.6kV，但仍小於 BSL 值 517kV。
- 2.) 口湖 D/S 端以 S 相電纜遮蔽層突波電壓為最高，高達 32.6kV 如圖 5 所示；澎湖 P/S 端以 T 相電纜遮蔽層突波電壓為最高高達 10.6kV。若設計安裝 SVL（突波吸收器）動作電壓及容量須考慮耐此電纜遮蔽層突波電壓。
- 3.) 在台灣本島海纜+陸纜處最大突波電壓發生在 S 相為 4.7kV，而平常運轉中遮蔽層電壓發生在 R 相 275V；在澎湖本島海纜+陸纜處最大突波電壓發生在 R、S 相為 1.9kV，而平常運轉中遮蔽層電壓發生在 S 相 900V 如圖 6 所示，故需妥善做好防止感電及隔離措施。
- 4.) 口湖 D/S 端以 S 相電纜遮蔽層暫態突波電流高達 21.1kA 如圖 7 所示；澎湖 P/S 端以 R 相電纜遮蔽層暫態突波電流高達 14.1kA，故設計時需考慮普通接地電纜所承受之瞬時電流。
- 5.) 因海纜兩端採直接接地，其電纜遮蔽層暫態循環電流 R 相為 13.7kA、S 相為 13.9kA、T 相為 23.3kA。而平常運轉中電纜遮蔽層暫態循環電流 R 相為

291A、S 相為 600A、T 相為 463A，其波形如圖 8 所示，故需妥善重新研討降低電纜遮蔽層暫態循環電流方式。

- 6.) 由表 4 得知，以 M1 絕緣接續匣之 CCPU 三相 SVL 發生動作暫態端電壓值為最高，分別在 R 相為 5.9kV、S 相為 6.4kV、T 相為 5.6kV，且每個 CCPU 之 SVL 皆發生動作。已超過 161kV CCPU 所訂額定動作電壓 4.5kV，故需提高 CCPU 額定動作電壓。

表3 口湖D/S及澎湖P/S斷路器投入之各種狀況模擬

類別	模擬狀況
CASE 1	對海纜+陸纜電纜銅導體暫態突波電壓模擬分析
CASE 2	對海纜+陸纜電纜遮蔽層暫態突波電壓模擬分析
CASE 3	對海纜+陸纜電纜遮蔽層暫態突波電流模擬分析
CASE 4	對電纜被覆保護裝置內 SVL 暫態突波電壓模擬分析

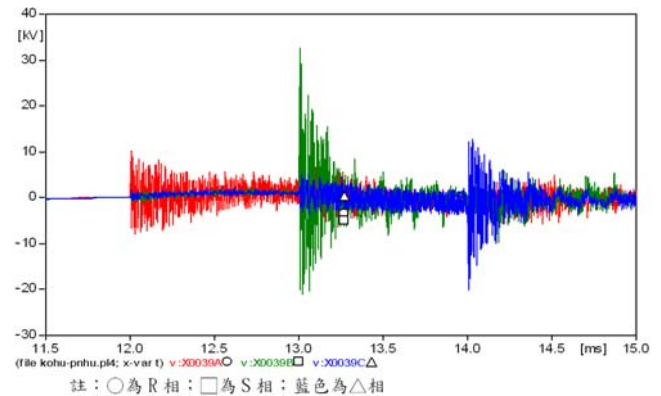


圖5 口湖D/S端GIS遮蔽層暫態電壓波形

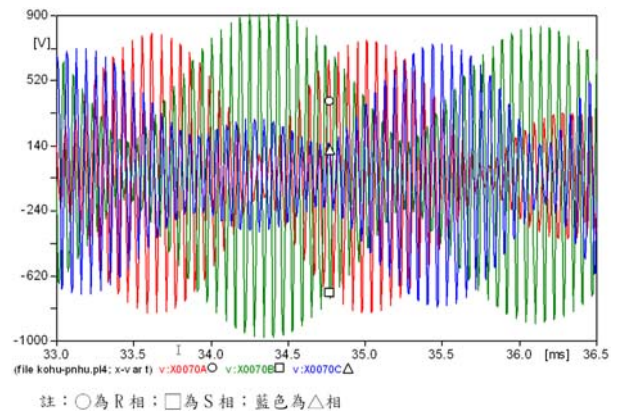


圖6澎湖本島陸纜+海纜處遮蔽層正常運轉暫態電壓波形

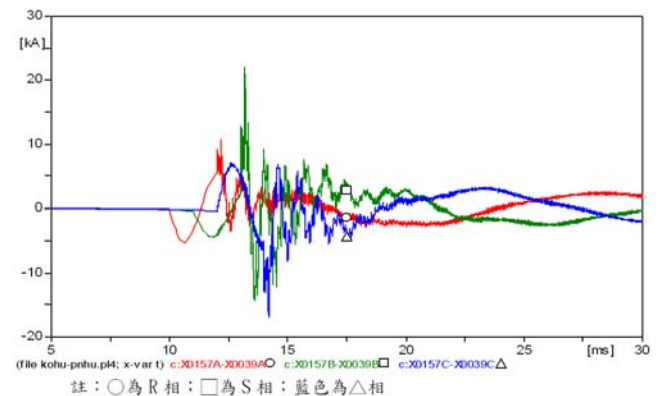
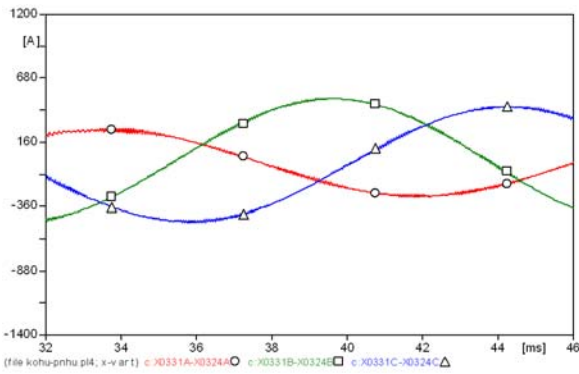


圖7 口湖D/S端GIS電纜遮蔽層對地暫態電流波形



註：○為 R 相；□為 S 相；藍色為△相

圖8 海纜電纜遮蔽層平常運轉暫態循環電流波形

表4 電纜CCPU三相SVL發生動作暫態端電壓值(kV)

區段	一路			區段	二路		
	R	S	T		R'	S'	T'
M1	5.9	6.4	5.6	M1	5.7	6.2	4.7
M2	4.8	5.6	4.7	M2	4.7	5.6	4.8
M4	4.7	4.8	4.6	M4	4.7	4.7	4.6
M5	4.4	4.6	4.8	M5	4.4	4.6	4.7
M7	4.3	4.7	4.5	M7	4.2	4.8	4.5
M8	4.4	4.6	4.7	M8	4.6	4.6	4.7
M10	4.6	4.8	4.8	M10	4.7	4.7	4.7
M11	4.7	4.8	4.7	M11	4.5	4.8	4.9
M13	4.5	4.7	4.9	M13	4.3	4.6	4.7
M14	4.6	4.6	4.6	M14	4.6	4.6	4.5
M16	4.7	4.6	4.7	M16	4.7	4.7	4.8
M17	4.5	4.8	4.8	M17	4.5	4.9	4.9
M19	4.8	4.5	4.8	M19	4.5	4.7	4.8
M20	4.7	4.7	4.7	M20	4.7	4.8	4.6
M22	4.8	4.9	4.9	M22	4.6	5.2	4.7
M23	4.9	4.6	4.6	M23	4.6	4.7	4.7
M25	4.9	4.7	4.9	M25	4.7	4.8	4.9
M26	4.4	4.5	4.4	M26	4.6	4.6	4.7

### C 電纜一回路送電與另一回路停電暫態突波分析

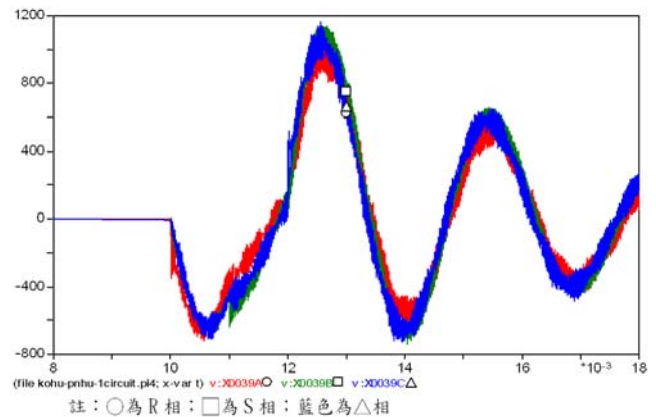
依表5各種狀況模擬台澎海纜+陸纜各區間各相電纜銅導體、電纜遮蔽層等的電壓與電流突波，並研究分析，模擬所得結果如下：

- 1.) 各區間在停電回路電纜銅導體對地最大暫態突波電壓發生在澎湖 P/S GIS 端 R 相為 15kV。其次為海纜與澎湖端陸纜相接處 R 相最大為 14.9kV，但仍小於 BSL 值 517kV。在台灣陸纜與海纜相接處停電回路電纜銅導體暫態電壓波形，以 R 相為最大值 10.7kV。
- 2.) 送電回路電纜，各區間以澎湖 P/S 端 GIS 遮蔽層暫態電壓發生在澎湖 P/S GIS 端 S 相最高為 5.7kV。而在口湖 D/S 端 GIS 遮蔽層暫態電壓以 T 相最高為 1.2kV，如圖 9 所示。另台灣陸纜與海纜相接處電纜銅導體暫態電壓波形，三相為最大值 1.9kV，而海纜與澎湖端陸纜相接處三相為 0.4kV。但仍小於 BSL 值 517kV。
- 3.) 送電回路電纜，台灣本島陸纜+海纜處遮蔽層平常暫態電壓 R 相為 308V、S 相為 306V、T 相為 314V，其波形如圖 10 所示，澎湖本島陸纜+海纜處遮蔽層

- 正常運轉暫態電壓 R 相為 120V、S 相為 175V、T 相為 115V。而停電回路電纜遮蔽層暫態電壓突波最高值，發生在澎湖 P/S GIS 端且 R 相最高為 1.8kV、S 相最高為 2.3kV、T 相最高為 1.6kV。
- 4.) 送電回路口湖 D/S 端電纜遮蔽層暫態突波電流比各區間遮蔽層暫態突波電流來得很大，且 R 相最高為 5.6kA、S 相最高為 4.4kA、T 相最高為 6.5kA。而澎湖 P/S 端 R 相最高為 0.8kA、S 相最高為 1.6kA、T 相最高為 1.9kA，如圖 11 所示。
  - 5.) 因海纜兩端採直接接地，其電纜遮蔽層暫態循環電流 R 相為 0.9kA、S 相為 2.5kA、T 相為 1.8kA，其波形如圖 12 所示。而平常運轉中電纜遮蔽層暫態循環電流 R 相為 291A、S 相為 670A、T 相為 463A，故需妥善重新研討降低電纜遮蔽層暫態循環電流方式。
  - 6.) 由表 6 得知，當一回路送電另一回路停電，則靠近海纜之 M25 及 M26 人孔之電纜被覆保護裝置三相 SVL 端電壓高於任何人孔之被覆保護裝置三相 SVL 端電壓。

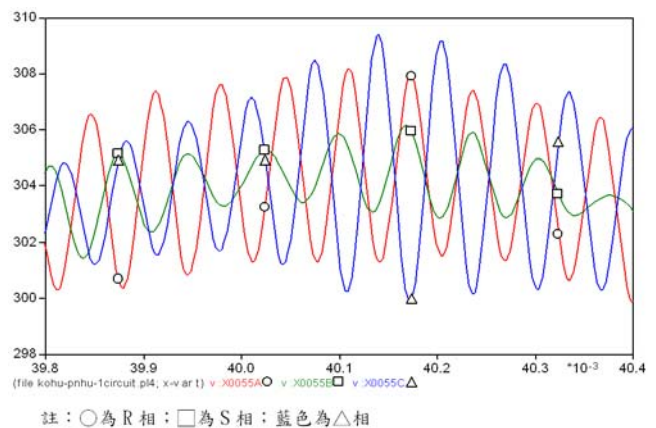
表5 電纜一回路送電與另一回路停電之各種狀況模擬

類別	模擬狀況
CASE 1	對海纜+陸纜電纜銅導體暫態突波電壓模擬分析
CASE 2	對海纜+陸纜電纜遮蔽層暫態突波電壓模擬分析
CASE 3	對海纜+陸纜電纜遮蔽層暫態突波電流模擬分析
CASE 4	對電纜被覆保護裝置內 SVL 暫態突波電壓模擬分析



註：○為 R 相；□為 S 相；藍色為△相

圖9 電纜一回路送電，另一回路停電，在口湖D/S端GIS遮蔽層暫態電壓波形



註：○為 R 相；□為 S 相；藍色為△相

圖10 電纜一回路送電，台灣本島陸纜+海纜處遮蔽層平常暫態電壓波形

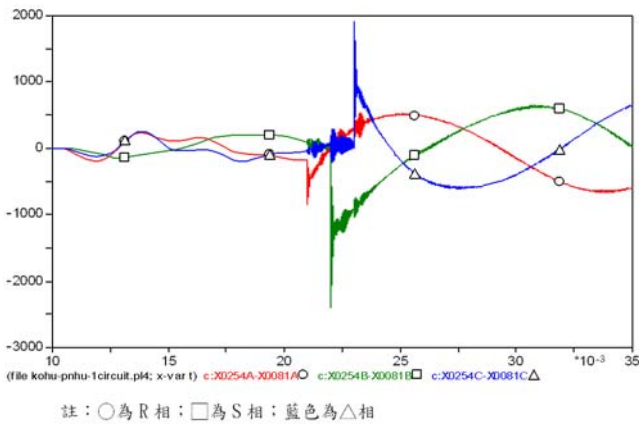


圖11 澎湖P/S端送電回路GIS電纜遮蔽層對地暫態電流波形

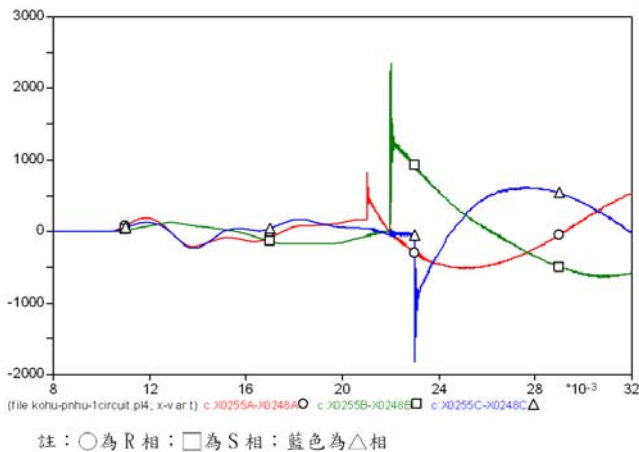


圖12 海纜送電回路電纜遮蔽層暫態突波循環電流波形

表 6 電纜 CCPU 三相 SVL 發生動作暫態端電壓值(kV)

區段	一路			區段	二路		
	R	S	T		R'	S'	T'
M1	1.22	1.13	1.10	M1	1.10	1.1	1.1
M2	1.05	1.04	1.09	M2	1.1	1.0	1.0
M4	0.91	0.72	0.73	M4	0.79	0.8	0.8
M5	0.84	0.73	0.85	M5	0.78	0.76	0.78
M22	1.44	1.36	1.49	M22	1.37	1.34	1.34
M23	1.31	1.20	1.35	M23	1.52	1.38	1.38
M25	1.95	1.82	1.90	M25	1.89	1.82	1.82
M26	1.65	1.71	1.82	M26	1.91	1.94	1.96

#### IV. 結論

本論文探討台電 161kV 海纜遭受開關突波可能原因，並以電磁暫態程式(ATP-EMTP)進行模擬，以瞭解海纜遮蔽層遭受開關突波時，對海纜遮蔽層之突波效應，這些分析與模擬所獲得之重要成果如下：

- 1.) 電纜銅導體對地最大暫態突波電壓都小於 BSL 值 517kV。但台澎海底電纜若設計安裝 SVL (突波吸收器) 動作電壓及容量，須考慮耐此海底電纜遮蔽層之突波電壓最高值，避免 SVL 被燒損。
- 2.) 在台灣本島海纜+陸纜處最大突波電壓發生在 S 相為 4.7kV，而平常運轉中遮蔽層電壓發生在 R 相 275V，而在澎湖本島海纜+陸纜處最大突波電壓發生在 R、S 相為 1.9kV，而平常運轉中遮蔽層電壓發生在 S 相 900V。因此，需妥善做好防止感電及

隔離措施。

- 3.) 口湖 D/S 端以 S 相電纜遮蔽層暫態突波電流高達 21.1kA，而澎湖 P/S 端以 R 相電纜遮蔽層暫態突波電流高達 14.1kA，故設計時需考慮普通接地電纜所承受之瞬時電流。
- 4.) 因海纜兩端採直接接地，其電纜遮蔽層暫態循環電流 R 相為 13.7kA；S 相為 13.9kA；T 相為 23.3kA。而平常運轉中電纜遮蔽層暫態循環電流 R 相為 291A；S 相為 600A；T 相為 463A，故需妥善重新研討降低電纜遮蔽層暫態循環電流方式。
- 5.) 各接續點以 M1 絕緣接續匣之 CCPU 三相 SVL 發生動作暫態端電壓值為最高，且每個 CCPU 之 SVL 皆發生動作，並已超過 161kV CCPU 所訂額定動作電壓 4.5kV，故需提高 CCPU 額定動作電壓。

#### 參考文獻

- [1] 台灣電力公司，"台澎161kV海底電纜線路工程規劃設計和製造技術監督服務報告"，台北，2006年3月。
- [2] 經濟部能源委員會，"台灣與澎湖間鋪設海底輸電線路及應用再生能源以解決澎湖用電成長之可行性計畫"，研究發展計畫，2003年7月。
- [3] Z.l. sheng and Q.r. Wu, "Transient analysis of the 161kV Taiwan Penhu submarine power cable system", Association's proceedings of electric post, Vol.26, Feb 2006. PP 14-31
- [4] 台灣電力公司，"輸變電工程手冊"，台北，1984年。
- [5] 台灣電力公司，"輸電線路維護手冊"，台電公司供電處，台北，1996年4月。
- [6] 台灣電力公司，"輸電工程作業手冊"，台北，2004年1月。
- [7] 吳滄堯、洪永輝、郭宗益、陳永田，"台澎海底電纜之初步評估"，中華民國第二十六屆電力工程研討會論文集，2005年，pp. 706-711。
- [8] N.Theethayi, Z.Mazloom, R.Thottappillil, "Technique for Reducing Transient Voltages in Multiconductor-Shielded Cables", IEEE Trans On Electromagnetic Compatibility, VOL. 49, NO. 2, May 2007,pp 434-440.
- [9] Valenza, D.; Cipollini, G, "HVDC submarine power cable systems-state of the art and future developments", Energy Management and Power Delivery, Vol.1, 1995, PP 283-287.
- [10] X.L. Chen and Y.H Cheng, "Analysis of current flowing in the ground wire of XLPE cable and modification of grounding mode", High Voltage Engineering, Vol.32, No.2, Feb 2006. PP 87-94.
- [11] 王曉彤，林集明，陳葛松，黃慶宜，陳志剛，左鄭敏，李峰，"廣東-海南500 kV海底電纜輸電系統電磁暫態研究"，電網技術，2008年12期。
- [12] 鄭偉，趙全江，李健，李翔，王鋼，"500kV交流海底電纜線路設計簡介"，中國電機工程學會輸電電氣五屆一次學術年會，會議論文，2006年。