

圖2 台澎海纜+陸纜161kV輸電接地系統圖

根據電纜的架構排列模式等原始參數直接建立的電纜線路的阻抗矩陣為原始參數矩陣將單回路三相電纜線路看作6根各以大地為回路的金屬導線如圖3所示[9-11]，其中三根為電纜的線芯用a、b、c表示另外三根為電纜的金屬護套用x、y、z表示各相線芯及金屬護套以大地為回路的自阻抗為 Z_{aa} 、 Z_{bb} 、 Z_{cc} 、 Z_{xx} 、 Z_{yy} 、 Z_{zz} ；線芯與金屬護套間的互阻抗為 Z_{ax} 、 Z_{ay} ，於是可以得到電纜線路上F點與G點間的電壓方程式：

$$\begin{aligned} V_{aG} - V_{aF} &= Z_{aa} I_a + Z_{ab} I_b + Z_{ax} I_x + Z_{ay} I_y + Z_{az} I_z \\ V_{bG} - V_{bF} &= Z_{ba} I_a + Z_{bb} I_b + Z_{bx} I_x + Z_{by} I_y + Z_{bz} I_z \\ V_{cG} - V_{cF} &= Z_{ca} I_a + Z_{cb} I_b + Z_{cx} I_x + Z_{cy} I_y + Z_{cz} I_z \\ V_{xG} - V_{xF} &= Z_{xa} I_a + Z_{xb} I_b + Z_{xx} I_x + Z_{xy} I_y + Z_{xz} I_z \\ V_{yG} - V_{yF} &= Z_{ya} I_a + Z_{yb} I_b + Z_{yx} I_x + Z_{yy} I_y + Z_{yz} I_z \\ V_{zG} - V_{zF} &= Z_{za} I_a + Z_{zb} I_b + Z_{zx} I_x + Z_{zy} I_y + Z_{zz} I_z \end{aligned} \quad (1)$$

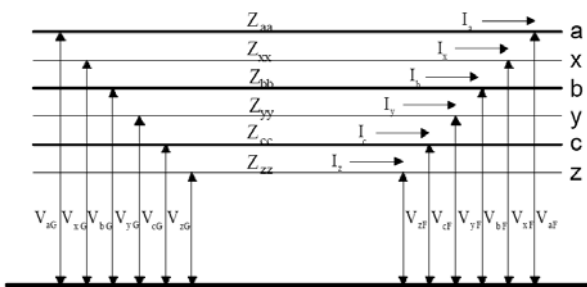


圖3 單回電纜線路的等效圖

將公式(1)轉化為：

$$[V_c] = [Z_{cs}] [I_c] \quad (2)$$

$[Z_{cs}]$ 為實用的相參數矩陣，下面針對幾種電纜遮蔽層常見的接地模式進行討論[3-9]：

1.) 遮蔽層單端接地：長度較短的電纜線路通常採用這種聯結模式，其金屬護套內無電流流過即 I_s 為零矩陣，由公式(2)得到：

$$[Z_{cs}] = [Z_c] \quad (3)$$

2.) 遮蔽層採兩端直接接地：當電纜敷設於水底或海底而其長度又不是很短時，通常採用金屬護套兩端接地的聯結模式，這種模式在金屬護套和大地中均有電流流過，電纜兩端電位趨近為零，因此有 V_s 為

零矩陣可得出公式(4)的結果：

$$[Z_{cs}] = [Z_c] - [Z_M]^T [Z_s]^{-1} [Z_M] \quad (4)$$

3.) 遮蔽層採交錯接地：對於較長的電纜線路，通常將電纜遮蔽層採交錯接地互聯後，再將兩端電纜遮蔽層接地如圖4所示，其依公式(1)同樣可得到6個方程式[12-14]。

$$\begin{aligned} V_{aG} - V_{aF} &= Z_{aa}^1 I_a + Z_{ab}^1 I_b + Z_{ac}^1 I_c + Z_{ax}^1 I_x + Z_{ay}^1 I_y + Z_{az}^1 I_z \\ &\quad + Z_{aa}^2 I_a + Z_{ab}^2 I_b + Z_{ac}^2 I_c + Z_{ax}^2 I_x + Z_{ay}^2 I_y + Z_{az}^2 I_z \\ &\quad + Z_{aa}^3 I_a + Z_{ab}^3 I_b + Z_{ac}^3 I_c + Z_{ax}^3 I_x + Z_{ay}^3 I_y + Z_{az}^3 I_z \\ V_{bG} - V_{bF} &= Z_{ba}^1 I_a + Z_{bb}^1 I_b + Z_{bc}^1 I_c + Z_{bx}^1 I_x + Z_{by}^1 I_y + Z_{bz}^1 I_z \\ &\quad + Z_{ba}^2 I_a + Z_{bb}^2 I_b + Z_{bc}^2 I_c + Z_{bx}^2 I_x + Z_{by}^2 I_y + Z_{bz}^2 I_z \\ &\quad + Z_{ba}^3 I_a + Z_{bb}^3 I_b + Z_{bc}^3 I_c + Z_{bx}^3 I_x + Z_{by}^3 I_y + Z_{bz}^3 I_z \\ V_{cG} - V_{cF} &= Z_{ca}^1 I_a + Z_{cb}^1 I_b + Z_{cc}^1 I_c + Z_{cx}^1 I_x + Z_{cy}^1 I_y + Z_{cz}^1 I_z \\ &\quad + Z_{ca}^2 I_a + Z_{cb}^2 I_b + Z_{cc}^2 I_c + Z_{cx}^2 I_x + Z_{cy}^2 I_y + Z_{cz}^2 I_z \\ &\quad + Z_{ca}^3 I_a + Z_{cb}^3 I_b + Z_{cc}^3 I_c + Z_{cx}^3 I_x + Z_{cy}^3 I_y + Z_{cz}^3 I_z \\ V_{xG} - V_{xF} &= Z_{xa}^1 I_a + Z_{xb}^1 I_b + Z_{xc}^1 I_c + Z_{xx}^1 I_x + Z_{xy}^1 I_y + Z_{xz}^1 I_z \\ &\quad + Z_{xa}^2 I_a + Z_{xb}^2 I_b + Z_{xc}^2 I_c + Z_{xx}^2 I_x + Z_{xy}^2 I_y + Z_{xz}^2 I_z \\ &\quad + Z_{xa}^3 I_a + Z_{xb}^3 I_b + Z_{xc}^3 I_c + Z_{xx}^3 I_x + Z_{xy}^3 I_y + Z_{xz}^3 I_z \\ V_{yG} - V_{yF} &= Z_{ya}^1 I_a + Z_{yb}^1 I_b + Z_{yc}^1 I_c + Z_{yx}^1 I_x + Z_{yy}^1 I_y + Z_{yz}^1 I_z \\ &\quad + Z_{ya}^2 I_a + Z_{yb}^2 I_b + Z_{yc}^2 I_c + Z_{yx}^2 I_x + Z_{yy}^2 I_y + Z_{yz}^2 I_z \\ &\quad + Z_{ya}^3 I_a + Z_{yb}^3 I_b + Z_{yc}^3 I_c + Z_{yx}^3 I_x + Z_{yy}^3 I_y + Z_{yz}^3 I_z \\ V_{zG} - V_{zF} &= Z_{za}^1 I_a + Z_{zb}^1 I_b + Z_{zc}^1 I_c + Z_{zx}^1 I_x + Z_{zy}^1 I_y + Z_{zz}^1 I_z \\ &\quad + Z_{za}^2 I_a + Z_{zb}^2 I_b + Z_{zc}^2 I_c + Z_{zx}^2 I_x + Z_{zy}^2 I_y + Z_{zz}^2 I_z \\ &\quad + Z_{za}^3 I_a + Z_{zb}^3 I_b + Z_{zc}^3 I_c + Z_{zx}^3 I_x + Z_{zy}^3 I_y + Z_{zz}^3 I_z \end{aligned} \quad (5)$$

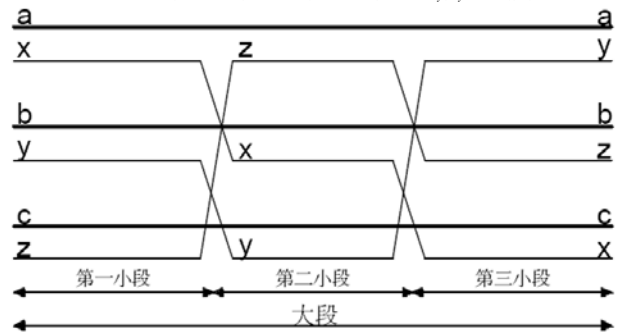


圖4 電纜遮蔽層交錯接地互聯圖

以上方程中阻抗的上角標1、2、3分別表示第一、二、三小段的阻抗。假設三小段的長度是相同的，所以各小段導体的自阻抗分別相等，所以省去了上角標。另外電纜線路兩端仍是接地因此可得出公式(6)的結果：

$$[Z_{cs}] = [Z_c] - [Z_M]^T [Z_s]^{-1} [Z_M] \quad (6)$$

其餘的接線方式可根據不同的邊界條件進行相應的矩陣簡化求取 $[Z_{cs}]$ ，可見矩陣法不但物理概念很清晰而且可以根據實際的接線情況進行變化非常方便。

III. 不同接地方式之實際模擬與分析

A 建構模擬電路及條件

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，台澎海纜+陸纜全長路徑總長約65.5公里，其各電纜區間長度如表1所示則做為建立模擬電路之依據。為瞭解電纜遮蔽層不同接地方式之暫態特性，本文以EMTP-ATP建立全線模組如圖5所示，變電所斷路器啟閉時對電纜銅導體、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 10Ω、變電所為 0.1Ω；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1 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		

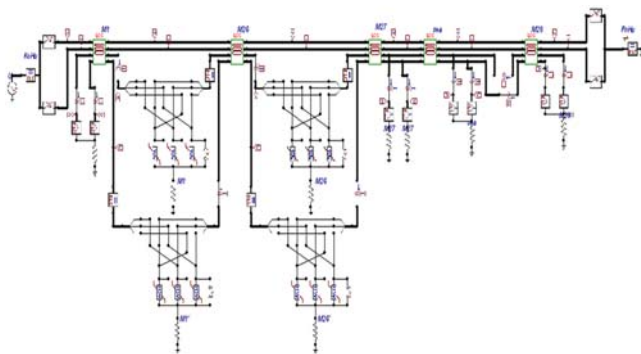


圖5 口湖至澎湖海纜+陸纜電磁暫態分析模型

B 海底電纜遮蔽層不同接地引接方式暫態突波分析

依表 2 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：

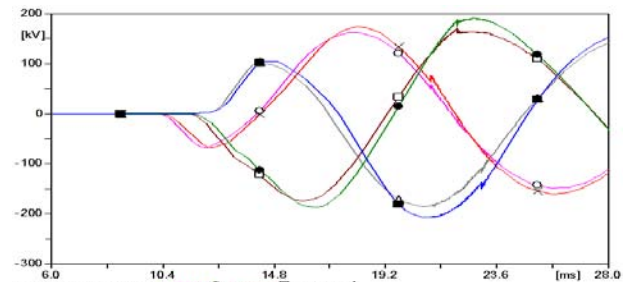
- 1.) 當海纜鉛被覆與外導體分開接地時，對電纜各部位銅導體對地突波電壓比海纜鉛被覆與外導體未分開共同接地之各部位銅導體對地突波電壓來得小，如圖 6 所示。另由圖 7 得知，海纜鉛被覆與外導體分開接地確實可降低循環電流，即 R 相由 13.7kA 降為 2.88kA、S 相由 3.55kA 降為 1.05kA、T 相由 10.7kA 降為 2.84kA，約降為 73%。
- 2.) 由表 3 得知，海纜遮蔽層二層兩端共同接地情況對口湖 D/S GIS 端電纜遮蔽層暫態突波電壓約降為 51%。海纜遮蔽層二層兩端共同接地情況對海纜遮蔽層暫態突波電流約降為最小。海纜遮蔽層二層兩端共同接地情況對海纜遮蔽層暫態循環電流最小。以 T 相而言，從 23.3kA 降為 2.5kA。
- 3.) 由表 4 得知，不論海纜遮蔽層為一層接地、二層分開接地、二層兩端共同接地，且澎湖陸纜採兩端接地、二層兩端共同接地，且澎湖陸纜採單端接地點等情況，可發現各種模擬情況對電纜銅導體之暫態

電壓突波值變化較小，皆小於開關突波 517kV。以海纜遮蔽層為二層兩端共同接地，且澎湖陸纜採單端接地點情況，對電纜遮蔽層突波電壓值最小。

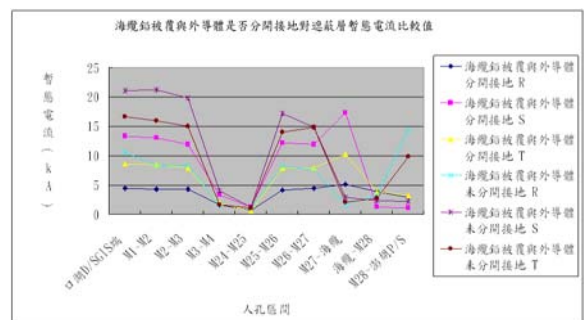
- 4.) 當海纜及澎湖端陸纜遮蔽層採不同接地方式時，從圖 8 可知遮蔽層暫態突波電壓最高值在 Case1，口湖 D/S 端 S 相 32.6kV。整體而言以 Case 5 為最理想，其口湖 D/S 端 S 相降至 17.6kV，故 CCPU 內 SVL 規格必須由動作電壓 4.5KV 提高至 17.6kV，另海纜遮蔽層暫態突波電壓皆在 4.5kV 以下。
- 5.) 海纜及澎湖端陸纜遮蔽層採不同接地方式時，從表 6 及圖 9 可知，遮蔽層暫態突波電流最高值發生在 Case1，口湖 D/S 端 S 相 21.1kA。整體而言以 Case 5 為最理想，其口湖 D/S 端 S 相降至 9.8kA 海纜遮蔽層暫態突波電流皆在 1.3kA 以下。

表2 對海纜遮蔽層接地方式之各種狀況模擬

接地方式		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
口湖端陸纜	並聯電抗器	X	X	X	X	○
	遮蔽層採交錯接地	○	○	○	○	○
海纜遮蔽層	鉛被覆層或外導體層僅一層兩端接地	○	X	X	X	X
	之鉛被覆層與外導體層等二層兩端不同接地點	X	○	X	X	X
	鉛被覆層與外導體層等二層兩端共同接地點	X	X	○	○	○
澎湖端陸纜	採遮蔽層兩端接地	○	○	○	X	X
	採遮蔽層單端接地	X	X	X	○	○
	並聯電抗器	X	X	X	X	○



註：海纜鉛被覆與外導體分開接地○為 R 相；□為 S 相；藍色為△相
海纜鉛被覆與外導體未分開共同接地 X 為 R 相；●為 S 相；藍色為■相
圖6 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7 澎湖本島陸纜+海纜處遮蔽層正常運轉暫態電壓波形

表3 海纜不同接地方式對遮蔽層暫態突波電流最高值(kA)

區段	海纜遮蔽層僅一層兩端接地			海纜遮蔽層二層兩端不同接地點			海纜遮蔽層二層兩端共同接地點		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
口湖 D/SGIS 端	10.5	21.1	16.6	4.4	13.3	8.6	9.7	9.2	5.5
M1-M2	8.3	21.3	16.0	4.3	13.1	8.5	9.4	8.9	5.4
M2-M3	8.3	19.9	15.0	4.3	11.9	7.9	8.9	8.1	5.3
M3-M4	1.7	4.0	1.7	1.7	3.3	1.9	1.5	2.0	1.4
M24-M25	8.8	17.0	14.4	0.7	1.2	0.6	1.8	1.7	1.7
M25-M26	1.1	1.3	1.1	4.2	12.2	7.9	8.7	7.5	2.9
M26-M27	8.2	17.2	14.0	4.4	11.9	7.9	8.9	7.8	2.6
M27-海纜	7.7	14.8	14.9	5.1	17.4	10.3	1.0	1.2 ⁸	1.3 ⁸
海纜-M28	1.7	2.9	2.1	3.9	1.3	3.9	0.2	2 ⁻¹⁰	2 ⁻¹⁰
M28-澎湖 P/S	3.3	2.3	2.8	2.9	1.1	3.2	8.9	8.8	2.4

表4 海纜不同接地方式，澎湖端陸纜採單端接地，對各相電纜導體暫態電壓突波最高值(kV)

區段	海纜遮蔽層僅一層兩端接地			海纜遮蔽層二層兩端不同接地點			海纜遮蔽層二層兩端共同接地點，且澎湖陸纜採兩端接地			海纜遮蔽層二層兩端共同接地點，且澎湖陸纜採單端接地		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T
口湖 D/SGIS 端	153.2	163.6	194.1	140.5	153.8	158.0	161.2	184.1	182.2	151.7	162.0	193.7
M1-M2	142.0	164.9	192.0	144.0	151.7	160.3	161.5	185.1	198.5	151.2	166.2	188.3
M2-M3	142.5	162.2	183.3	140.8	153.9	158.4	155.7	182.2	193.3	151.9	166.0	182.0
M3-M4	149.6	176.1	182.2	143.2	153.2	160.4	164.0	184.9	193.2	153.0	157.7	184.2
M24-M25	143.8	183.4	180.4	142.4	157.3	161.6	164.5	188.3	198.2	151.9	181.9	183.2
M25-M26	153.4	186.4	184.8	142.2	154.5	150.9	164.8	190.6	197.9	151.3	183.4	181.1
M26-M27	144.1	186	184.7	141.8	155.9	149.5	161.8	185.7	196.8	154.0	183.9	184.4
M27-海纜	143.9	183.8	181.7	142.1	158.9	149.3	163.8	188.3	194.3	151.0	184.6	179.9
海纜-M28	172.9	189.8	207.8	161.7	167.5	184.5	151.8	160.9	163.6	171.1	177.7	195.6
M28-澎湖 P/S	159.3	180.1	207.6	161.4	163.5	184.5	151.5	161.2	164.3	171.4	178.1	195.0

所示各種狀況，模擬其對電纜銅導體、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.) 當海纜遮蔽層接地電阻從 30Ω 降至 0.1Ω 時，由圖 10 得知，在台灣本島端海纜 S 相遮蔽層暫態突波電壓值約由 16.3kV 降至 5.5kV。在澎湖端海纜 S 相遮蔽層暫態突波電壓值約由 4.9kV 降至 0.09kV。
- 2.) 當海纜遮蔽層從 30Ω 降至 0.1Ω 時，在台灣本島端海纜 S 相遮蔽層對地暫態突波電流值約由 0.2kA 上升至 8kA，如圖 11 所示。在澎湖端海纜 S 相遮蔽層對地暫態突波電流值約由 0.2kA 上升至 0.8kA，如圖 12 所示。
- 3.) 當海纜遮蔽層從 30Ω 降至 0.1Ω 時，由圖 13 得知，其海纜遮蔽層循環電流由 0.25kA 降至 0.02kA。

表5 海纜與陸纜兩端連接處遮蔽層不同接地電阻

類別	模擬狀況
CASE 1	海纜兩端接地電阻為 30Ω。
CASE 2	海纜兩端接地電阻為 10Ω。
CASE 3	海纜兩端接地電阻為 1Ω。
CASE 4	海纜兩端接地電阻為 0.1Ω。
相同條件	口湖及澎湖端並聯電抗器為 40MVA。 口湖 D/S 端接地電阻為 0.1Ω。 台灣端陸纜接地電阻為 10Ω。 澎湖 P/S 端接地電阻為 0.1Ω。

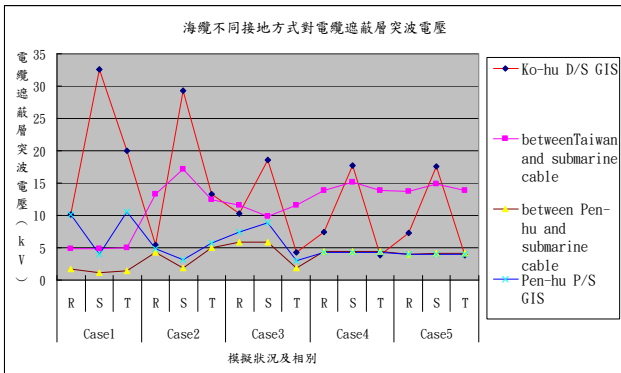


圖8 口湖D/S端GIS電纜遮蔽層對地暫態電流波形

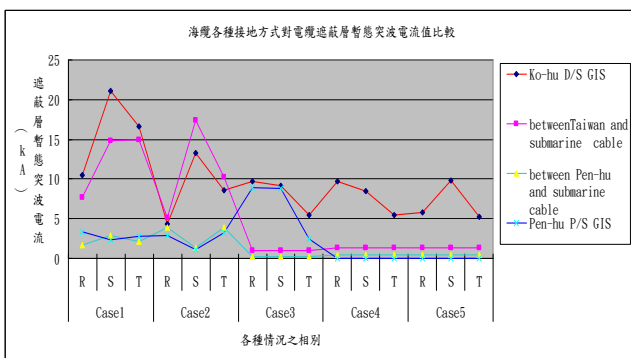


圖9 海纜電纜遮蔽層平常運轉暫態循環電流波形

C 海纜與陸纜兩端相接處遮蔽層不同接地電阻模擬分析

從海纜及澎湖端遮蔽層不同引接方式，再進一步探討當海纜與陸纜兩端相接處遮蔽層不同接地電阻如表 5

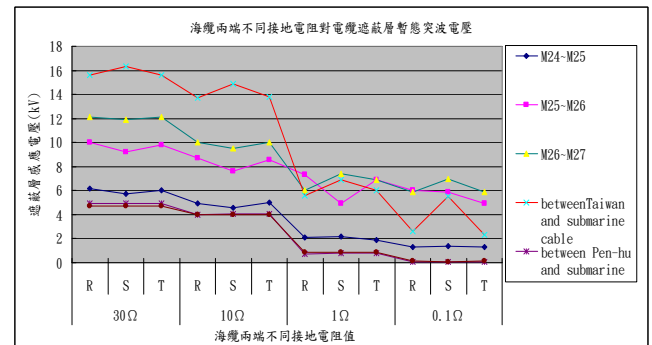
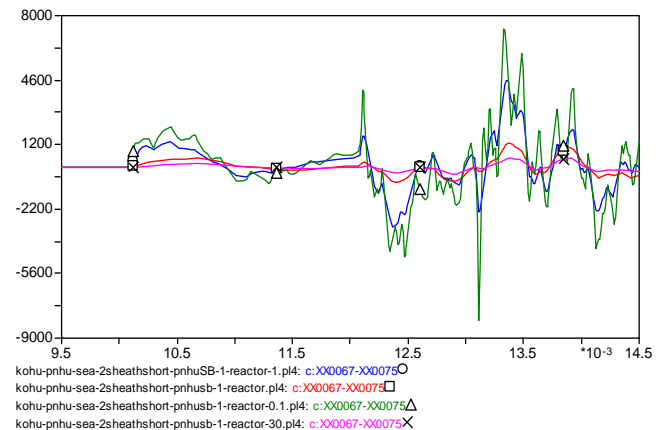
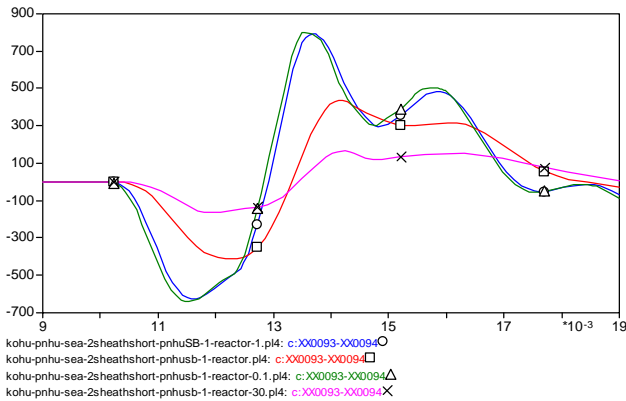


圖10 海纜遮蔽層採不同接地電阻，對遮蔽層暫態突波電壓最高值比較

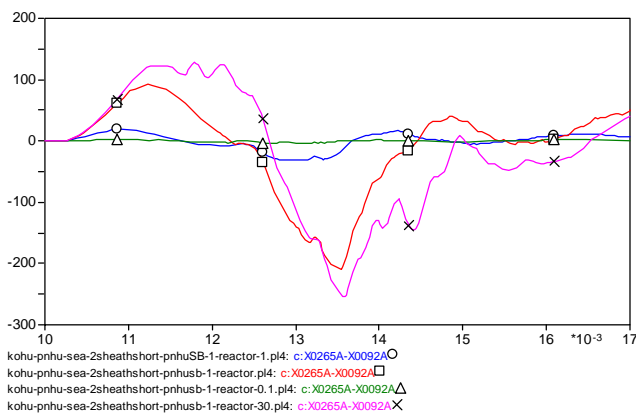


註：△為 0.1Ω；□為 1Ω；○為 10Ω；X 為 30Ω

圖11 台灣本島端海纜遮蔽層採不同接地電阻，對遮蔽層對地暫態突波電流值比較



註：△為 0.1Ω；□為 1Ω；○為 10Ω；X 為 30Ω
圖 12 台灣本島端海纜遮蔽層採不同接地電阻，
對遮蔽層對地暫態突波電流值比較



註：△為 0.1Ω；□為 1Ω；○為 10Ω；X 為 30Ω
圖 13 海纜遮蔽層兩端不同接地電阻，對海纜遮蔽層
循環暫態電流比較

IV. 結論

本論文探討台電澎湖海纜+陸纜遮蔽層接地方式之暫態特性，並以電磁暫態程式(ATP-EMTP)進行模擬，以瞭解海纜遮蔽層被覆保護裝置之容量及海纜兩端接地電阻等，以瞭解不同海纜遮蔽層接地方式對降低突波之成效，這些分析與模擬所獲得之重要成果如下：

- 1.) 海纜遮蔽層不同引接方式顯示：在二端變電所斷路器並聯 40MVA 電抗器、海纜遮蔽層二層並聯接地及且澎湖端陸纜採單點接地為最佳引接方式①海纜銅導體突波端電壓約從 177.3kV 降為 137.4kV，不超過電纜的額定耐開過電壓 517kV，②遮蔽層暫態突波電壓最高在口湖 D/S 端由 32.6kV 降至 17.6kV，另海纜遮蔽層暫態突波電壓皆在 4.5kV，③遮蔽層暫態突波電流最高在口湖 D/S 端由 21.1kA 降至 9.8kA，另海纜遮蔽層暫態突波電流皆在 1.3kA 以下，④海纜遮蔽層暫態循環電流可由 23.3kA 降為 0.2kA。
- 2.) 本文也在二端變電所斷路器並聯 40MVA 電抗器、海纜遮蔽層二層並聯不同接地電阻及且澎湖端陸纜採單點接地顯示當海纜遮蔽層接地電阻從 30Ω 降至 0.1Ω 時，在台灣本島端海纜遮蔽層暫態突波電壓值約由 16.3kV 降至 5.5kV；在澎湖端海纜 S 相遮蔽層暫態突波電壓值約由 4.9kV 降至 0.09kV。②台灣本島端海纜遮蔽層對地暫態突波電

流值約由 0.2kA 上升至 8kA；在澎湖端海纜 S 相遮蔽層對地暫態突波電流值約由 0.2kA 上升至 0.8kA。代表接地電阻越低由海纜遮蔽層通過大地暫態突波電流越大，越能降低暫態突波電壓。③海纜遮蔽層循環電流由 0.25kA 降至 0.02kA。

- 3.) 綜合可見：當二端變電所斷路器並聯 40MVA 電抗器、海纜遮蔽層二層並聯接地電阻 0.1Ω 及且澎湖端陸纜採單點接地(安裝電纜被覆保護裝置 SB-1)，所得效果最顯著。

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] 「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」, 經濟部能源委員會, 研究發展計畫, 2003年7月。
- [3] Z.I. 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] 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。
- [7] Zhang Xiushan; Cao Shui; Fang Kun, "Design and Implementation of Visual Management System for Submarine Cable Installation Based on 3D GIS", Computer Science and Information Engineering, 2009 WRI World Congress on Vol.2, Publication Year: 2009, PP 322-325.
- [8] 台灣電力公司, "輸電工程作業手冊", 台北, 2004年1月。
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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。
- [13] 陳凌云, 朱熙樵, 李泰軍, "海南聯網工程海底電纜的選擇", 高電壓技術, 2006年7期。
- [14] 朱志芳, "高壓交流海纜電氣參數對線路對稱性的影響", 高電壓技術, 2007年6期。