

南科E/S GIS外殼感應電流與暫態電壓之探討

■ 王偉民·謝建賢·洪瑤·蕭勝任

摘要

大環境變遷與因應高科技產業快速發展，為提高科學園區供電品質，高壓輸電線路之規劃設計已逐漸由架空方式轉變為地下化，同時採用氣封絕緣開關設備(GIS)之室內變電所設計方式日益普及。由於電力系統開關操作時，GIS外殼易發生感應暫態電壓，除威脅人員安全外，對電產品質亦成爲一潛在影響因素。本文以南科超高压變電所345kV GIS爲研究對象，模擬分析雜散感應電流，同時探討開關突波對GIS外殼感應電壓影響；文中利用EMTP軟體進行模擬。

關鍵字：氣封絕緣開關設備、暫態過電壓、雜散感應電流

前言

近年社會環境變遷，傳統開放式變電所需逐漸改換為佔地較小之室內型變電所^[1]。GIS遂成爲開關設備運用主流，其使用六氟化硫爲絕緣材質，擁有優良之絕緣特性以及消弧能力，GIS主要優點爲：

一、佔地空間小，適合多種地區環境

GIS需求佔地空間約爲傳統開放式開關5%~10%，有效解決設置空間取得不易問題。同時其適用環境包括屋內或屋外，特別對其他條件較差之環境，如鹽害之海邊、寒冷之高山或者雪地區域均能適用。

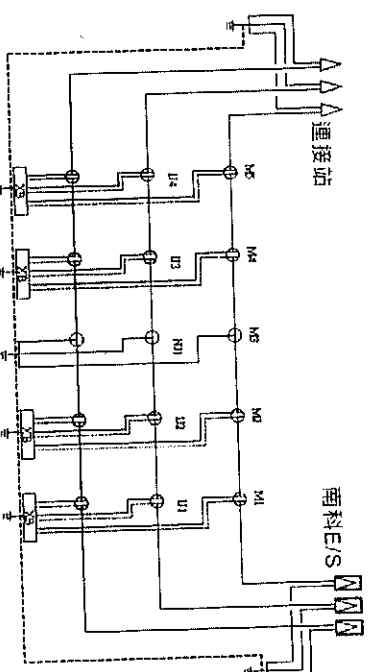


圖1 南科345kV地下電纜接續示意圖

二、安全裕度高、高可靠性以及維護週期長

由於導體部分均密封於金屬包封容器內，感電機率較低，受環境、外在因素影響也較少。同時因密封結構之特性，絕緣特性較能維持良好，維護需求較少。

儘管如此，因GIS密閉式之特性，較不易預先由外觀檢測而發現異常，同時若發生故障亦不易判定故障點，修復時間亦較一般傳統開放式開關設備長。

南科E/S 為一室內型變電所，345kV主電源由鄰近超高压變電所345kV架空輸電線引接，再於曾文溪口採地下河道系統利用電力電纜引入變電所^[2]。為提高供電品質，相關電纜相關研究包括：電纜破壞、終端匣破壞、接續匣破壞與GIS電纜油槽。維護監測項目主要包括GIS外殼循環電流、高頻暫態放電現象及鐵構接地系統雜散電流分佈。

圖1為南科345kV地下電纜接續示意圖，圖示共有5個人孔(M1-M5)為接續匣之相對位置，其中M3為普通接續匣(Normal Junction, NJ)，其餘各人孔為絕緣接續匣(Insulated Junction, IJ)，採用絕緣接續匣提供3相電纜之遮蔽層换位(圖中XB)，再利用普通接續匣作區間接地，使每三條電纜形成一個完整换位區間，整個345kV地下電纜共有兩個完整换位區間。换位主要目的在於降低遮蔽層感應電壓，使换位後電纜遮蔽層之循環電流降至最低。圖中黑色虛線為輔助接地線，連結兩接地網。

GIS外殼分成數段，各段之間主要靠螺絲連接，各段GIS內的相導體對外殼有分佈電容存在，PT高壓側中性點



(a) GIS外殼三相相連接螺絲



(b) 安裝於GIS遮蔽層(金屬)之SVL

圖2

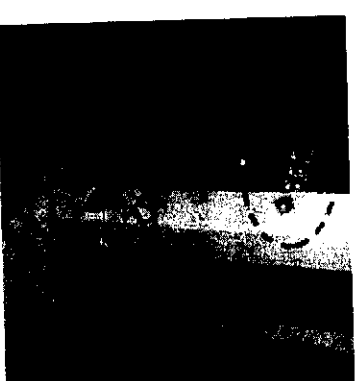


圖3 設備接地(實線)與遮蔽層接地引線(虛線)

一般接於GIS外殼，而低壓側中性點則連接至設備接地匯流排，避雷器接地線是單獨引接至地網，未共接於設備接地^[2]。

南科運轉初期於GIS外殼與電纜遮蔽層所發生之現象及改善方式敘述如下：

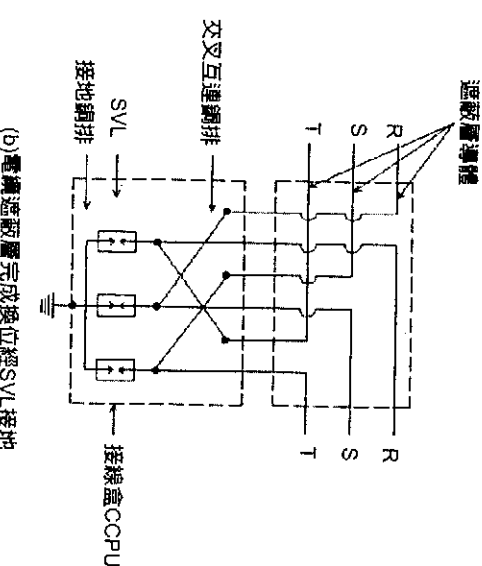
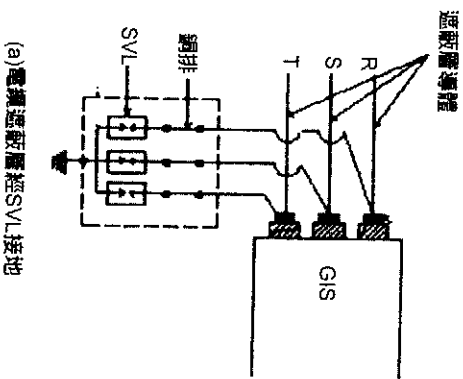


圖4

1. 安裝初期，GIS外殼三相未短接，三相個別以銅板與支撐台架短接，此時存在相當大的雜散電流，紀錄值約為200A(負載電流為330A)，造成電纜金具溫度達攝氏50度以上。

• 改善措施：將GIS外殼三相短接後再與接地如圖2虛線處，使三相之雜散電流平衡抵消後再由S相引接支撐台架(設備接地)。
2. 為避免GIS外殼(同支撐台架)與電纜遮蔽層(同下部金具)兩接地系統形成迴路，通常利用絕緣套管將GIS外殼與電纜遮蔽層分隔以保持足夠沿面距離，但因開關切換時兩金屬間產生暫態電位差，導致閃絡現象。

• 改善措施：

- (1) 將GIS外殼和電纜遮蔽層採用軟銅導線短接藉以消除電位差，但短接後發現GIS外殼感應電流由此迴路進入大地，而使得軟銅導線有發熱現象。
- (2) 或於兩金屬系統利用突波電壓限制元件(Surge Voltage Limiter, SVL)隔離，如圖2(b)，以抑制循環電流。

研究內容

本文研究內容主要包括GIS外殼、電纜遮蔽層接地方式及開關暫態，同時利用EMTP模擬應雜散循環電流及開關投入時造成之GIS外殼與電纜遮蔽層之暫態電壓。

(一)GIS外殼與電纜遮蔽層接地方式

南科E/S 345kV電纜遮蔽層導體在連接站與變電所間，其電纜與電纜之間需做接續時，其接頭處理除內導體的接續及絕緣處理外，遮蔽層導體的連接方式及接地方式通常依循下列方式實施^[1]：

1. 連接站與變電所之GIS外殼絕緣處理後直接接地或以SVL接地，如圖4(a)所示。
2. GIS外殼與金具之間所連接的電纜，若只有一段，則僅一端接地，另一端以SVL接地。
3. 連接站與變電所之間所有連接的電纜是由六段電纜接續而成，則三相電纜的遮蔽層在接續處實行换位，换位處以SVL接地，如圖4(b)所示。

圖5所示為南科345kV電纜連接站及所內

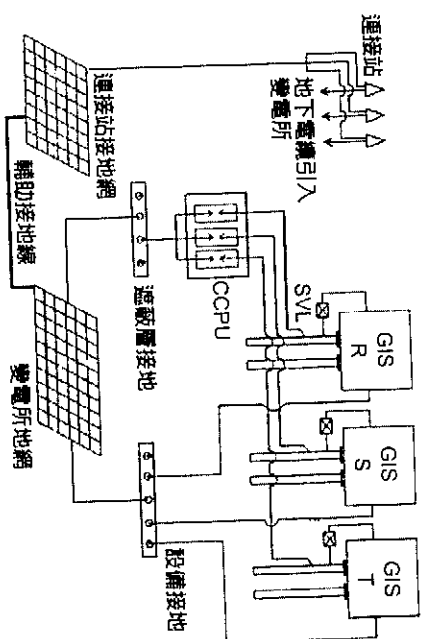


圖5 變電所及GIS相關接地

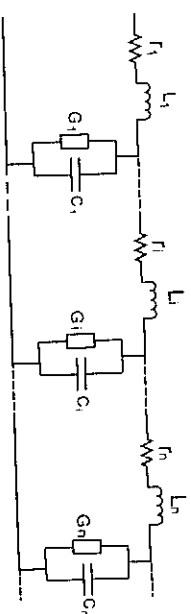


圖6 高頻地網導體模型

GIS外殼及電纜遮蔽層相關互連及接地方式，其中連接站地網另有輔助接地線沿地下洞道引接於所內地網。變電所內各種設備之接地，所使用的接地導體相當多且複雜，接地導體將各種設備接至地網，包括接地線、接地電纜及接地銅排等。

運轉初期，電纜遮蔽層接地原與支撐台架共接後再引接入地網，後為改善開關突波火花放電問題，遂將電纜遮蔽層接地與支撐台架隔離，獨立引入地網。圖中GIS外殼與電纜遮蔽層(下部金具)為絕緣處理，為防止暫態電壓(開關突波)於兩層金屬間引起火花放電，加裝SVL做為暫態突波洩放路徑。圖中電纜被覆保護裝置(Cable Cover Protective Unit, CCPU)為變阻體元件，裝於電纜遮蔽層與地網間，可避免環流產生，同時避免火花放電。此外支撐台架亦可能因感應電壓而形成雜散環流，由於較為複雜，本文未考慮此項影響。

(二)高頻地網模型

參考資料[4-6]，針對網格式地網建立高頻分佈模型，如圖6，主要元件為串聯阻抗(電阻及電感L)、併聯導納(電導G及電容c)，計算公式如(1)~(4)，可求得EMTP地網模型參數。

$$L_i \approx \frac{u_{0i} l_i}{2\pi} \times (\ln \frac{2l_i}{a} - 1) H \dots (1)$$

$$r_i = \frac{\rho}{2\pi l_i} \times \left[\frac{2h+a}{l_i} + \ln \frac{l_i + \sqrt{a^2 + l_i^2}}{a} - \sqrt{\left(\frac{a}{l_i}\right)^2 + 1} \right] \dots (2)$$

$$- \ln \frac{l_i + \sqrt{4h^2 + l_i^2}}{2h} - \sqrt{\frac{3h}{l_i} + 1} \dots (3)$$

$$C_i(a_i) = 2\pi \epsilon l_i \times \left[\frac{b_i + \ln \frac{l_i + \sqrt{a_i^2 + l_i^2}}{a_i}}{\sqrt{\left(\frac{a_i}{l_i}\right)^2 + 1} \right] \dots (4)$$

$$G_i = \frac{C_i}{\epsilon_p \rho} \dots (4)$$

其中

l：每段網目地網導體線長度(取20米)

a：地網導體半徑(約0.0056 m)

p：土壤電阻係數(約100 Ω·m)

h：地網埋設深度(約80cm)

(三)開關突波暫態

圖7為GIS外殼之簡化EMTP電路模型，在開關投入時，相導體對外殼間電容與接地線電感將形成振盪電路。由於機械特性不同步，假設R相接點先投入，後S、T相再投入，則R相投入時形成一單相RLC二階電路^[9]，於GIS外殼對地電壓方程式可簡

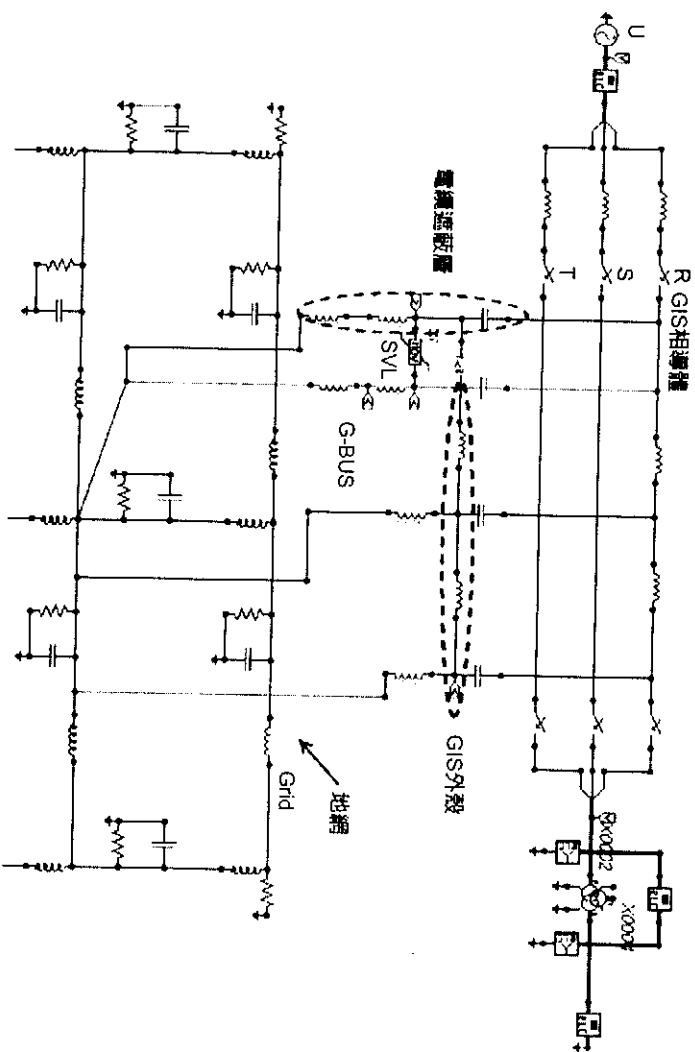


圖7 GIS之暫態開關突波模擬電路

化為公式(5)：

$$V_{ms-d} = \frac{-0.6}{0.3 - \omega} V_m [\cos(\omega t) - \cos(\omega_0 t)] \dots (5)$$

其中 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ， V_m 為電壓峰值

GIS相導體電感L及對外殼電容個C可利用簡化公式(6)及(7)估算：

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(\frac{b}{a})} \text{ F/m} \dots (6)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(\frac{b}{a}) \text{ H/m} \dots (7)$$

其中

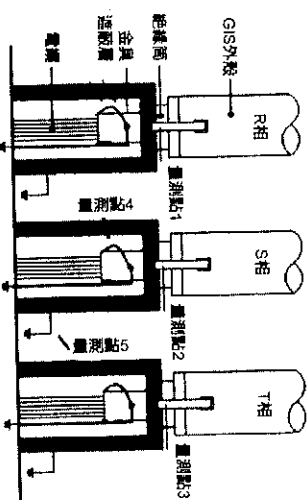
- a：GIS相導體半徑
- b：GIS外殼內半徑

模擬結果

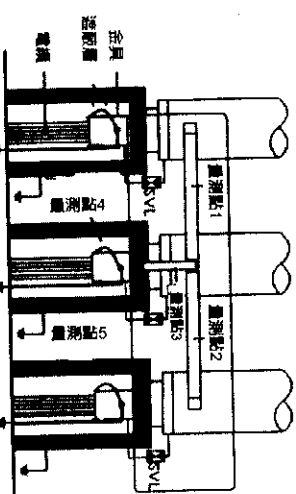
(一) 雜散電流模擬

主要利用EMTP之LCC模組建立電纜及GIS模型，圖8(a)(b)為模擬量測點示意圖，其中電纜遮蔽層為直接接地(無CCPU)。模擬共有5量測點，1~3量測點分別為GIS三相(R、S、T)外殼處電流，第4量測點為電纜遮蔽層對地電流，第5量測點為支撐台架對地電流。模擬分別依三相外殼利用銅棒短接前(圖8(a))、後(圖8(b))之狀況。圖8(c)為345kV GIS雜散電流模擬電路，虛線處為三相外殼短接處。三相負載電流分別約為893A、856A及789A，如圖6。

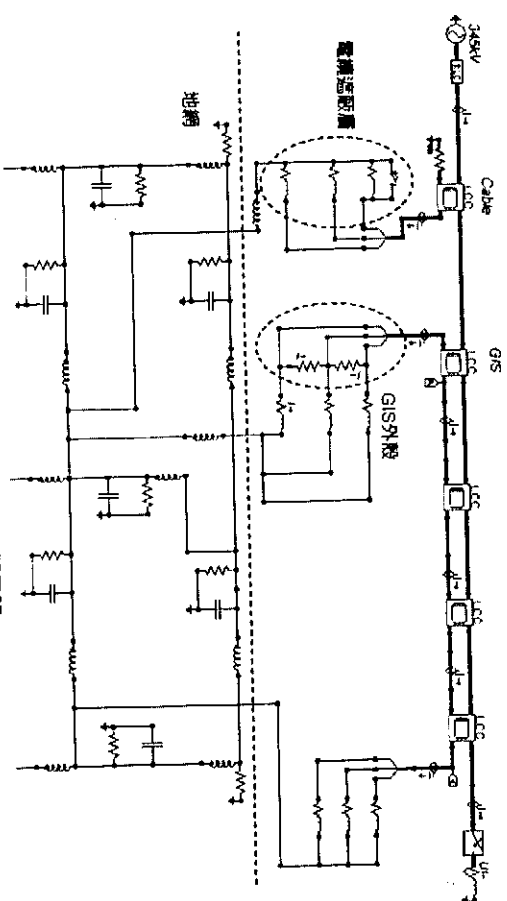
模擬結果如圖10及表1、表2。短接前GIS外殼對地電流三相實測記錄值分別約為214A、232A及225A；圖10(a)模擬結果顯示電流約為210A、254A及220A。短接後實測記錄值「R-S」約為224A、「S-地」降為約40A、「R-S」約為252A；圖10(b)模擬結果顯示短接後「R-S」間電流及「S-T」間電流約為211A，S對地電流則降為35A。由表1、表2顯示電纜遮蔽層對地電流與三相外殼短接關係不大。



(a) 三相短接前量測點示意圖



(b) 三相短接後量測點示意圖



(c) GIS外殼感應電流模擬電路

表1 GIS外殼三相短接前電流(安培)

量測點	實測	模擬
1(R-地)	214	210
2(S-地)	232	254
3(T-地)	225	220
4(S相遮蔽層-地)	64	61
5(S相台架-地)	201	210

表2 GIS外殼三相短接後電流(安培)

量測點	量測	模擬
1(R-S)	224	237
2(T-S)	252	270
3(S-地)	40	35
4(S相遮蔽層-地)	64	61
5(S相台架-地)	42	35

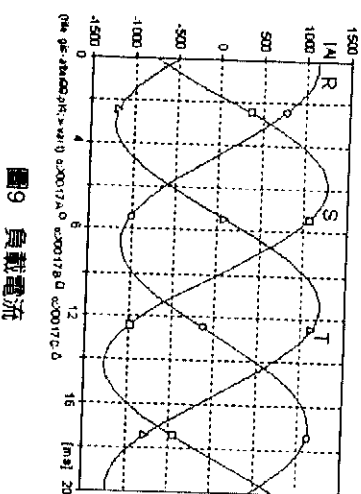
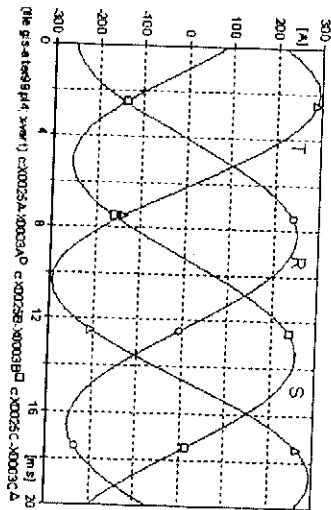
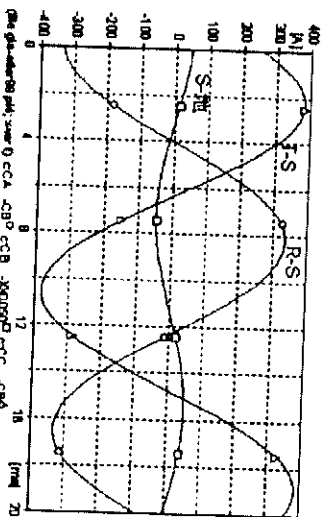


圖9 負載電流

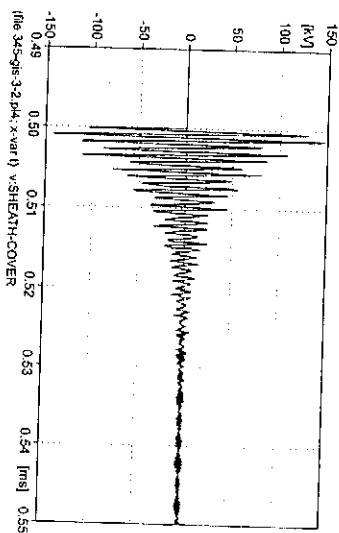


(a)短接前GIS外殼對地電流(同安裝台架對地電流)

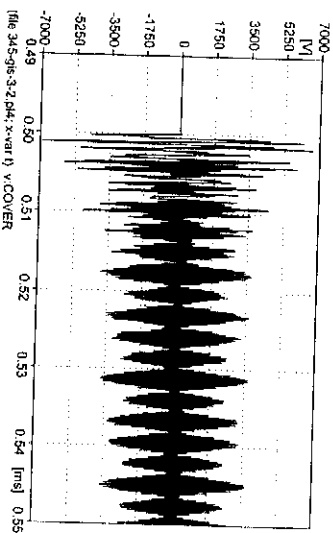


(b)短接後GIS外殼電流

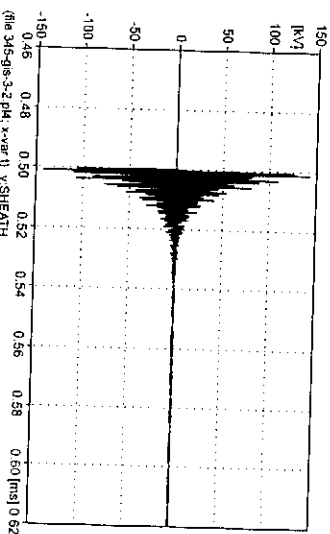
圖 10



(a)GIS外殼與電纜遮蔽層間暫態電壓



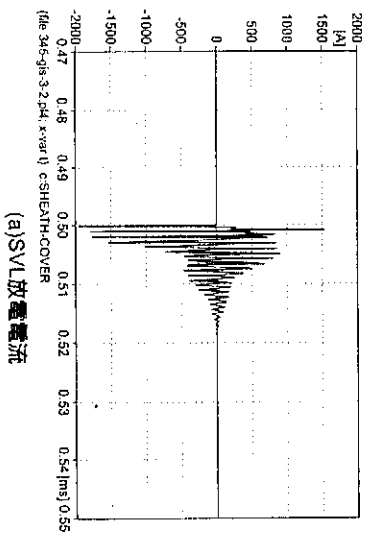
(b)GIS外殼對地暫態電壓



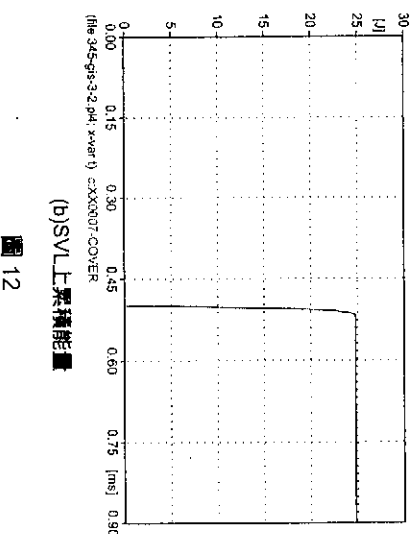
(a)SVL上累積能量

圖 11

(b)電纜遮蔽層對地暫態電壓



(a)SVL放電電流



(b)SVL上累積能量

圖 12

圖 12(a)顯示SVL放電電流峰值約1500A，圖 12(b)顯示SVL洩放能量約25J。

結語

一、GIS外殼三相經銅板短接後，透過單相(S相)接一銅板至電纜終端匣鐵構台架接地，可有效降低外金具流經支撐台架之雜散電流，降低熱失，間接提升供電環境安全；但此時需防R及T相因開關突波引起與金具與電纜遮蔽層間之火花放電。

二、由於GIS斷路器三相接點投入時之時間差，若單相接點先接合，由模擬結果發現可能在GIS外殼與電纜遮蔽層間產生數百kV之暫態電壓，能危及現場工作人員安全及引起火花放電而影響供電品質。藉由加裝SVL方式可供放電路徑，避免外部之火花放電。由模擬顯示SVL放電能量約數十焦耳，此能儘視系統實際參數而異。

三、透過EMTP模擬，可觀察GIS開關突波暫態響應，提供參考數據。

參考資料

- [1] 陳建賢，「氣封絕緣開關運用與維護實務」，電機月刊，第十七卷，第四期，pp.204~218，2002。
- [2] 洪瑤，「優質的台南科學園區供電-兼簡介南科超高壓變電所」，台灣電力股份有限公司，供電通訊，175期，2003。
- [3] 蕭勝任，「南科出口345kV XLPE電纜遮蔽層接地系統改善探討與分析」，台灣電力股份有限公司研究報告，2009。
- [4] M. Ramamoorthy, "Transient Performance

(二)開關突波模擬

模擬電路如前節之圖7，主要建立GIS外殼及接地引線等效RLC電路，模擬單相(R)開關投入瞬間暫態。參考一般經驗值 (7^{-10}) ，GIS相導體對外殼分佈電容取100pF，電纜對遮蔽層電容取0.3μF；連接接地網之接地線電感取1.3μH/m，接地匯流排至地網距離取6米；電源為單相199kV $(345kV/\sqrt{3})$ ，接地探前節之高頻地網模型。另SVL放電電壓取4kV (1) 。

模擬結果如圖11(a)~圖12(b)。圖11(a)顯示GIS外殼與電纜遮蔽層間暫態電壓峰值達150kV，震盪頻率約為5MHz，若絕緣距離不足可能引起火花放電。圖11(a)~圖11(b)分別為GIS外殼與電纜遮蔽層對地電壓，圖中顯示電纜遮蔽層對地電壓遠大於GIS外殼電壓。