

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

無效電力與並聯電抗器啟閉暫態對高科技園區供電品質影響研究

研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2221-E-168-043-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：崑山科技大學電機工程系

計畫主持人：王瑋民

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：黃建維、蔡智勝

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年08月21日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫

成果報告
 期中進度報告

無效電力與並聯電抗器啟閉暫態對高科技園區
供電品質影響研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2221-E-168-043-

執行期間：2006年8月1日至2007年7月31日

計畫主持人：王瑋民

共同主持人：張忠良

計畫參與人員：黃建維 蔡智勝

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

摘要

因應高科技產業快速發展，為提高供電品質，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，尤其高科技園區內與周邊多已採地下配線方式。由於大量採用地下電纜，電容性無效電力大量增加，牽動了電力系統整體的結構，傳統裝設電容器調整虛功率之架構已逐漸改變，部分區域需裝設電抗器以調節過剩之電容性無效電力，為確保供電品質與可靠度，系統無效電力之控制策略改變已成為一需重視之研究課題。

本計畫首先分析併聯電抗器啟閉時之特性，再利用ATP 電磁暫態分析程式模擬斷路器啟閉動作之過電壓、高湧入電流、產生零序電流或對負載側放大等電氣暫態現象。最後以南科園區為對象，探討供電結構、用戶負載及周邊變電所裝設電抗器對電壓變動之影響，其中模擬部分採用ASPEN套裝軟體。

關鍵詞：無效電力，並聯電抗器，高科技園區

Abstract

Owing to the fast development of the Hi-Tech industry, in order to improve the quality of supplying power, the design of transmission line of high voltage has already been changed from overhead-type into the underground-type, especially for the Hi-Tech Industrial Park. Because a large amount of underground cable is adopted, the reactive power generated by the cable also increases and affect the whole performance of the power system. More and more shunt reactors are installed in order to regulate the excess reactive power. The control strategy of the reactive power has been adjusted and becomes an important research subject.

In this report, the transient characteristic of the opening and closing of reactor was analyzed first, then the ATP package was adopted for the simulation of the voltage、current and other relative phenomenon of the load side. Finally, this project focused on the Southern-Taiwan Industrial Park, the influence on the voltage variation caused by the underground cables、customer's load and the reactor installed by TPC was studied. The ASPEN software package was used for simulation.

Keywords: reactive power, shunt reactor, Hi-Tech Industrial Park

一、前言

近年來電力系統由於外在環境影響如經濟快速發展及高科技產業、中小企業為提升競爭力，以力求企業之永續經營與社會民生、環保體質地快速轉變力求生本島之永續生存，共同追求的可是供電品質可靠度。內在因素在輸電線路之建設以地下電纜或架空線下地規劃設計為導向，使得無效電力大量增加，牽動了電力系統整體的結構，因此為確保供電可靠無效電力運用與運轉電壓控制成系統運轉電壓之穩定為相當重要的技術。無效電力運用必須嚴謹的適時、適地、適量地規劃設計，以抑制可能產生之過電壓及依線上負載變動（離峰、尖峰、系統故障等）線上作業人員作系統的融通容量及無效電力設備調度以抑制系統或區域性可能產生的過電壓問題。

由於近年來高科技園區供電系統地下化，供電線路大量使用地下電纜，因電容值效應，當園區內輕載時，由於線路負載潮流降低，造成系統負載側電壓過高現象。並聯電抗器的補償將可抑制輕載時系統電壓過高現象。實際因並聯電抗器無法均勻的分佈於輸電線上，視其需要性可以裝設在如長線路或充電如何解決因此而產生之過電壓問題，將是無效電力補償之重要課題。

因應系統無效電力需求線上作業人員作無效電力調度作業極為頻繁，因此擔任於此任務之斷路器啟閉過程中需承受並聯電抗器之電氣特性(電感性、小電流)，其啟閉動作期間高頻、高電壓之衝擊，這些暫態現象易造成斷路器內部材質之逐漸劣化，而降低設備承受機械(無載)，電氣(額定電壓、電壓啟斷能力)的壽命。

由於輸電線對地充電電容提供之無效電力量與電壓平方成正比，地下電纜之興建，將使系統無效電力補償產生結構性之改變。並聯電抗器之補償，應接近於無效電力產生地點，以避免無效電力之輸送損失，提升補償效益。目前台電系統並聯電抗器之裝設位置主要有：345kV 自耦變壓器三次側、161kV 匯流排側及 345kV 線路側。就科學園區而言，並聯電抗器則主要裝設於鄰近之變電所內，本計畫亦模擬南科園區內三個變電所，裝設不同容量探討 161kV 電抗器對用戶電壓變動之影響。

二、研究目的

本計畫主要探討 161kV 系統並聯電抗器與斷路器組合運用模式，使用電磁暫態程式 ATP 來模擬，以分析其啟閉動作當中可能產生之過電壓、高湧入電流、產生零序電流或對負載側放大等之電氣暫態現象，而這些暫態是否可能導致設備本身或其他相關電力系統中設備造成損害或產生嚴重的電力品質問題為研究主題。除分析併聯電抗器啟閉時之特性外，計畫以南科園區為對象，探討供電結構、用戶負載及周邊變電所裝設電抗器對電壓變動之影響，其中電壓變動模擬部分採用 ASPEN 套裝軟體。

三、研究方法

主要探討並聯電抗器切、投暫態及地下電纜電容效應對負載側電壓變動之影響，分述如下：

(一)並聯電抗器於投入與啟斷之暫態

並聯電抗器需藉由斷路器進行投入及啟斷。斷路器於投入或啟斷的瞬間，由於系統暫態響應及電弧現象之出現，對於斷路器兩端及負載，均可能產生異於正常穩態下之電壓及電流現象。該暫態電壓及電流與投入或啟斷瞬間狀態及系統參數有極

密切的關係。

斷路器投入電感性負載時，由於剩磁效應，相對於激磁曲線之非線性特性，將可能導致一高於正常負載電流數倍之湧入電流。此外，在斷路器啟斷時，由於系統之儲能現象，導致斷路器兩端會出現數倍於額定電壓之暫態回復電壓，若大於斷路器內部所建立之介質絕緣強度時，則斷路器形成再發弧之現象。

1. 並聯電抗器於投入之激磁電流

當加壓於電抗器或變壓器等激磁線圈元件時，一暫態性的激磁電流，將湧入此電抗器或變壓器元件。此情況之激磁電流，稱為激磁起始湧入電流。在啟斷電抗器或變壓器後，即使系統電壓已被切斷，但其鐵心中的磁通並不降為零，而是依其鐵心的磁滯特性，回降至某一程度的剩磁值。若再次投入加壓於電抗器或變壓器的瞬間，其磁通值發生在磁通波形的(負)最大值處($-\phi_{MAX}$)，若此時之剩磁(ϕ_R)為正值，且不會瞬間立刻消失，則由加壓操作所新建的磁通初始值並非($-\phi_{MAX}$)，而是 ϕ_R 值，在此情況下將對應相當大之激磁湧流。

由於斷路器的投入時間是無法控制的，所以實際系統幾乎均有暫態激磁過程。其波形在最初數週波內衰減甚速，然後逐漸減慢。其衰減速度是與電源系統的時間常數(L/R)值有關，時間常數值愈低衰減愈快。故容量較大的電抗器、變壓器，或距電源側較近時，其激磁湧流衰減較緩慢。由於系統時間常數的電感值並非固定，而是隨電抗器或變壓器的飽和程度而變化，在啟始的數週內飽和程度較高，L較小，故衰減較快。

圖 1~圖 3 為利用 ATP 模擬 161kV, 80MVAR 三相電抗器啟斷(0.045ms)後再投入(0.075ms)之湧入電流及建立之磁通波形。圖 1 顯示 A 及 C 相有高湧入電流；圖 2 為磁通波形。

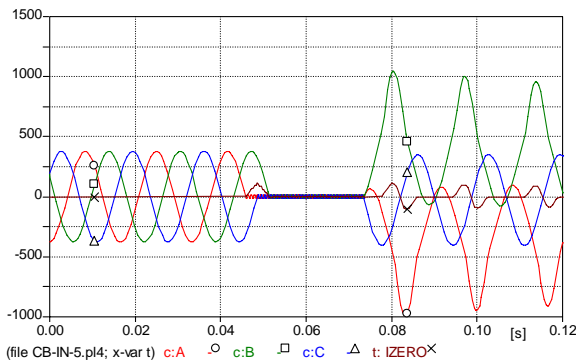


圖 1 並聯電抗器再投入時之湧入電流

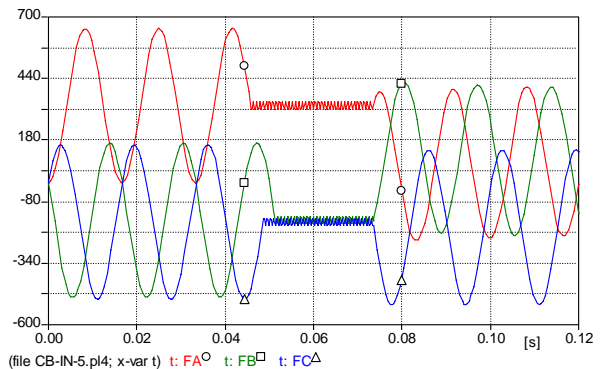


圖 2 並聯電抗器再投入時之磁通量

2. 並聯電抗器於啟斷時之暫態分析

本文不考慮電弧電阻變化，將電弧視為一理想導體元件。但為考慮再弧現象及提高模擬之精確度，本文之斷路器模型以一時控開關並聯 L_p 、 C_p 元件迴路，如圖 3 所示。其中時控開關可依投入時間設定，於斷路器啟斷後之設定時間再次投入，模擬系統再弧，以便觀察相關暫態過電壓現象。圖 3 為併聯電抗器系統之等效電路單線圖[1]，相關參數詳述於下：

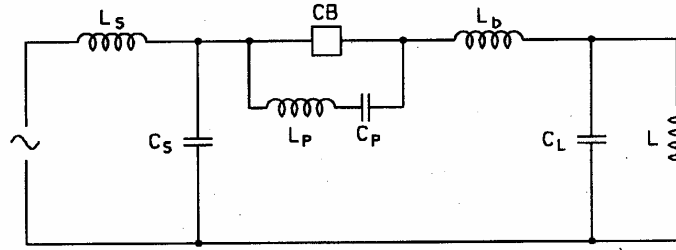


圖 3 併聯電抗器系統之等效電路單線圖(IEEE Std C37.015)

其中：

- L_s ：電源側等效電感值
- C_s ：電源側之等效雜散電容值
- CB：斷路器
- L_p ：斷路器內部之等效電感值
- C_p ：斷路器內部之等效雜散電容值
- L_b ：斷路器與電抗器間的線路電感值
- C_L ：負載端之雜散電容值
- L ：並聯電抗器之電感值

2.1 截斷電流與截止過電壓

斷路器對於啟斷電抗器的電流並不困難。但由於電弧電阻的隨機性，及斷路器消弧介質與消弧能力的不同，往往無法使電弧熄滅時的電流正好為零點，而多半在一小電流(i_{ch})時即發生消弧，即所謂的截斷電流現象，圖 4 為截斷電流與截止過電壓之暫態現象。

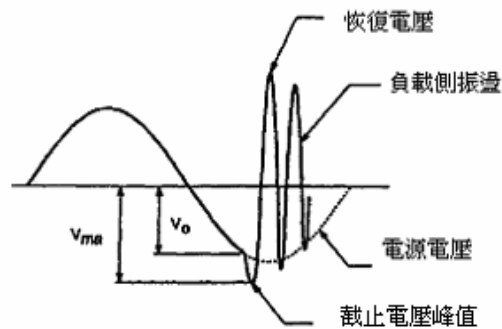


圖 4 截斷電流與截止過電壓之暫態現象

其中：

- V_{ma} ：為電抗器之截斷峰值過電壓
- V_0 ：為斷路器啟斷時電抗器的電壓
- i_{ch} ：為斷路器截斷電流

截斷電流的大小取決於斷路器兩端之等效電容 C_i 、斷流裝置每極啟斷單位數目及

斷流裝置的截流係數 λ ，其與截斷電流 i_{ch} 的關係，如下所示：

$$C_t = C_p + \frac{C_s C_L}{C_s + C_L} \quad (1)$$

$$i_{ch} = \lambda \sqrt{NC_t} \quad (2)$$

公式 (2) 顯示，斷路器兩端等效電容愈大，截斷電流 i_{ch} 也愈大。一般而言， $C_s \gg C_L$ ，忽略公式 (1) 分母 C_L 時， i_{ch} 為最大值，此時截止過電壓最嚴重。 C_t 之最大值如下列所示：

$$C_t = C_p + C_L \quad (3)$$

由於儲存於負載端電感及電容的能量，於截流的瞬間會在電感和電容之間產生振盪。一開始電壓會和系統電壓同極性，第一次峰值時的暫態電壓最嚴重，隨即產生電壓振盪，此暫態過電壓稱為截止峰值過電壓， V_{ma} 。根據能量不減原理。當電流截斷時，儲存於電抗器的磁場能量和 C_L 電場能量會轉變為 C_L 電場能量，此時電容電壓達到最大值 V_{ma} 。

即

$$\frac{1}{2} i_{ch}^2 L + \frac{1}{2} V_0^2 C_L = \frac{1}{2} V_{ma}^2 C_L \quad (4)$$

可推導得

$$V_{ma} = \sqrt{(i_{ch} Z_c)^2 + V_0^2} \quad (5)$$

其中

$$Z_c = \sqrt{L/C_L} \text{，特徵阻抗} \quad (6)$$

取標么值

$$k_a = \frac{V_{ma}}{V_0} \text{，pu} \quad (7)$$

公式(5)、(6)顯示截止過電壓 V_{ma} 與截斷電流 i_{ch} 及特徵阻抗成正比，一般而言，空氣斷路器的截斷電流最大，可達數十安培，油斷路器次之，而六氟化硫斷路器與真空斷路器截斷電流小，一般在二十安培以下。圖 5 為公式 (7) 中 k_a 對 i_{ch} 關係曲線[2]。截斷電流 10 安培時截止過電壓約為 2 pu。

公式 (5) 顯示特徵阻抗越大時截止過電壓越高。將負載側 L 加大，則特徵阻抗減小，但同時截斷電流 i_{ch} 也增加，因而單純增加電容並不能減小電抗器的截流過電壓。

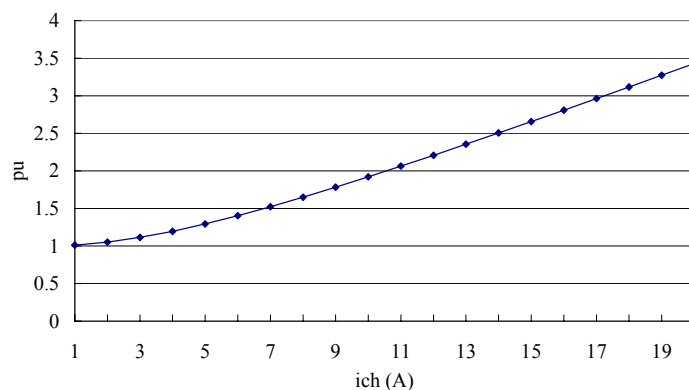


圖 5 k_a 對 i_{ch} 關係曲線

2.2 電抗器截流和再弧過電壓暫態

斷路器啟斷時將產生一交流電弧持續於斷路器的兩接觸子之間，而電弧所具有之高溫物理特性，對於斷路器接觸子會有一定程度之傷害。一般電弧於電流過零點時為最容易熄滅之點，多數的斷路器亦設計於此時消弧。但交流電弧過零後能否熄滅，除與斷路器內部之介質恢復強度過程有關以外，還與消弧瞬間所產生的電壓恢復過程有關。

電流啟斷後，於斷路器上產生的暫態恢復電壓，乃因電源側與負載側電壓的差異。如果沒有發生再弧，暫態恢復電壓之標么值 k_{rv} 如下列所示

$$k_{rv} = 1 + k_a \quad (8)$$

若考慮阻尼的影響，再弧過電壓對地之最大振幅 k_p 如下式所列：

$$k_p = 1 + \beta(1 + k_a) \quad (9)$$

其中 β 為阻尼因素，其值通常小於 0.5。

(二) 南科電壓升模擬分析

主要利用 ASPEN 軟體，模擬三個地下供電環路（如圖 6）因用戶負載變化及投入併聯電抗器容量大小對電壓變動之影響，相關參數如表 1[3]，電纜為 XLPE 2000mm²，靜電容量計算如公式(10)

$$C = \frac{\varepsilon}{\left(18 \times \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)\right)} \quad \frac{\mu F}{km} \quad (10)$$

其中

- d2：為電纜銅導體外徑
- d1：為電纜絕緣遮蔽層外徑
- ε ：XLPE 取 2.3

表 1a 用戶負載 (2006/12 台電公司提供)

用戶	P(MW)	Q(MVAR)	用戶	P(MW)	Q(MVAR)
積六廠	80.96	9.219	聯電二廠	91.696	12.632
積十四廠	80.96	9.219	瀚宇三廠	76.315	0.608
康寧廠	29.019	6.828	南鑫廠	14.509	3.414
奇晶二廠	55.716	11.949	奇晶一廠	55.716	10.927
奇晶四廠	58.036	6.828			

表 1b 線路資料 (2006/12 台電公司提供)

線路名稱	R(pu)	X(pu)	B(pu)	線路名稱	R(pu)	X(pu)	B(pu)
南科東~積六	0.0002	0.001	0.02065	三竹~聯電二	0.0001	0.0005	0.00815
積六積~十四	0.0001	0.0001	0.00235	聯電二~瀚宇三	0	0.0004	0.00695
積十四~康寧	0.0001	0.0011	0.01525	瀚宇三~南鑫	0	0.0004	0.0067
康寧~南科東	0.0001	0.0011	0.0164	南鑫~三竹	0.0002	0.001	0.0154
三竹~奇晶五	0.0001	0.0006	0.01035	豐華~奇晶一	0.0001	0.0008	0.0135
奇晶五~奇晶二	0.0001	0.0005	0.00755	奇晶一~奇晶四	0.0001	0.001	0.01465
奇晶二~三竹	0.0001	0.0005	0.00795	奇晶四~豐華	0	0.0002	0.0031
豐華~奇晶七	0.0001	0.0012	0.0188				

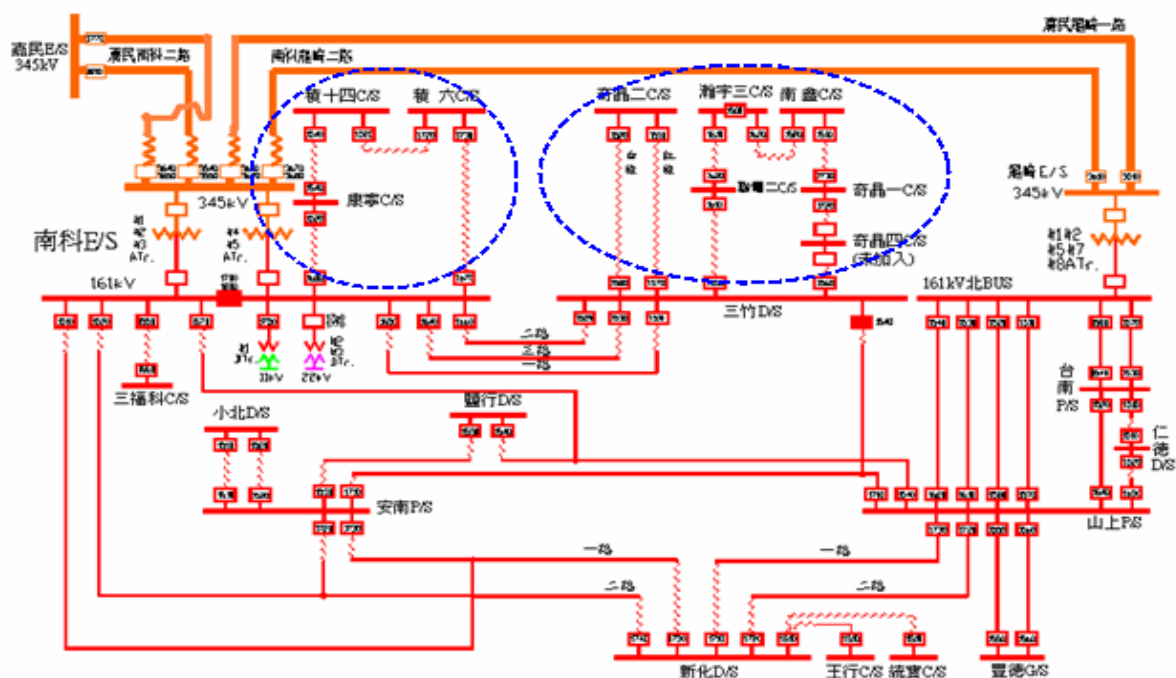


圖 6 南科供電環路示意圖[3]

四、結果與討論

分為 ATP 之電抗器啟斷模擬及 ASPEN 模擬南科用戶端電壓變動情形。

1. ATP 電抗器啟斷模擬

本文以 161kV 系統進行啟斷模擬，分為單相及三相兩部分。電壓源為 131.45kV(單相電壓峰值)， $L_s=9\text{mH}$ ， $C_s=2.89\text{nF}$ ， $L_p=0.001\text{mH}$ ， $C_p=0.15\text{nF}$ ， $L_b=0.0045\text{mH}$ ， $C_L=1.85\text{nF}$ ， $L=839\text{mH}$ 。啟斷時間取 0.0052ms，截斷電流取 10A。

(1)單相：模擬電路如圖 7，其中又分別模擬再弧及無再弧情形。

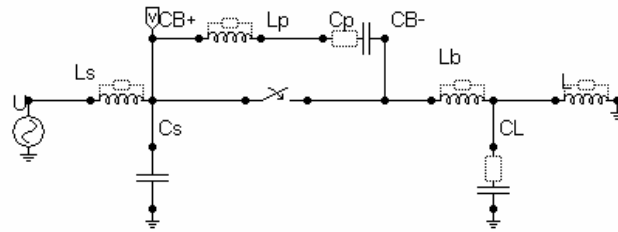


圖 7：單相模擬電路

A. 無再弧：模擬結果如圖 8~圖 10。

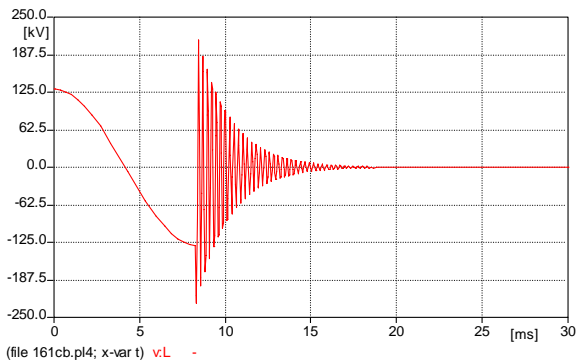


圖 8 電抗器上暫態過電壓(無再弧)

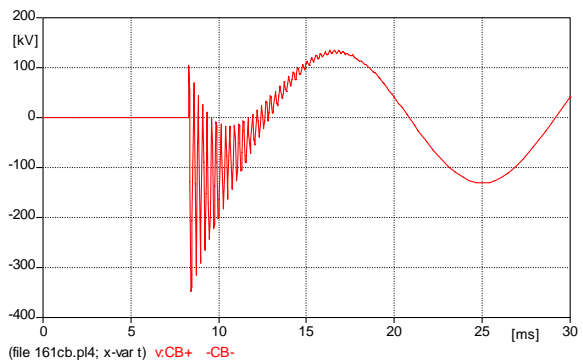


圖 9 斷路器上暫態過電壓(無再弧)

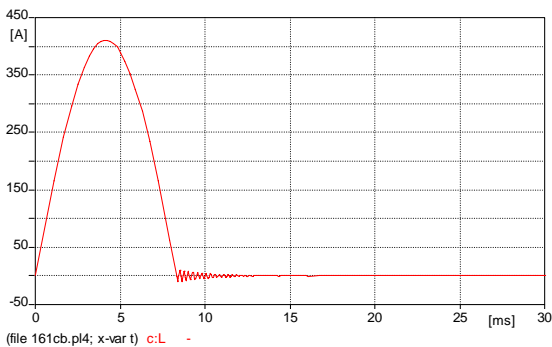


圖 10 電抗器上電流(無再弧)

B. 再弧：模擬結果如圖 11 及圖 12。

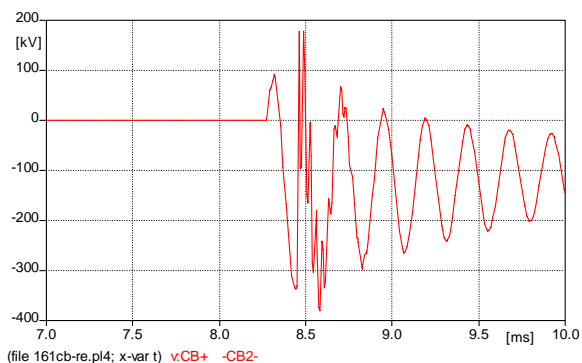


圖 11 再弧時斷路器上暫態過電壓

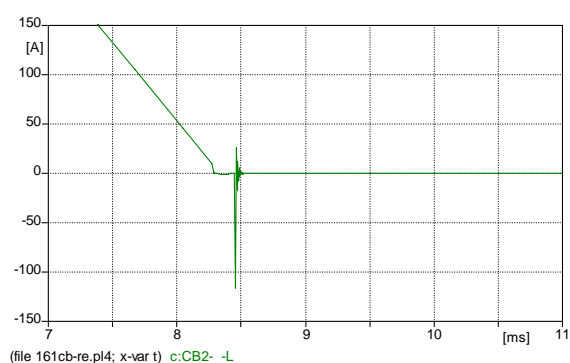


圖 12 再弧時斷路器上電流

(2) 三相模擬

電抗器採 Y 接無接地，未考慮相間電容、電感，電路圖如圖 13。斷路器設定”A”相於 0.0052ms 時啟斷，”B”、”C”相則於 0.012ms 同時啟斷。截斷電流設定為 10A。模擬結果如圖 14~圖 16。

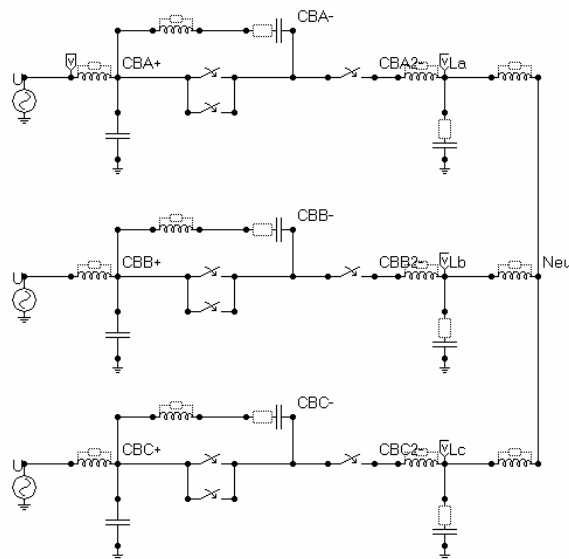


圖 13 三相模擬電路

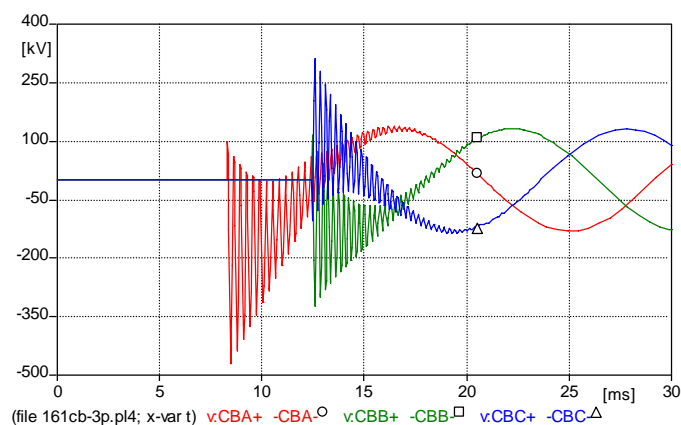


圖 14 並聯電抗器啟斷時斷路器開關接點電壓

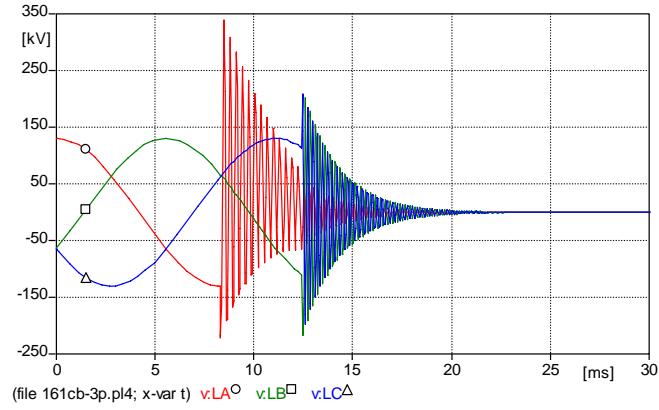


圖 15 並聯電抗器切斷時之電壓

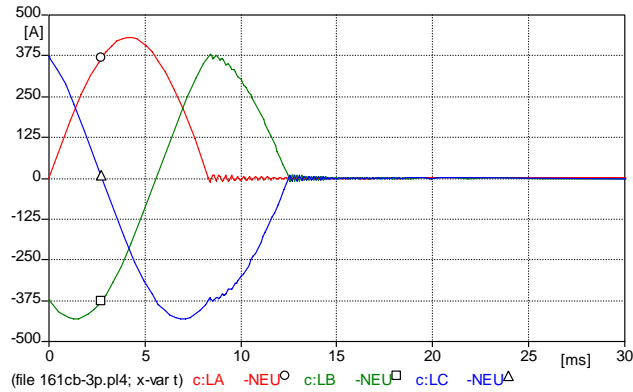


圖 16 並聯電抗器切斷時之電流

2. 南科供電電壓升 ASPEN 模擬分析

A. 改變園區用戶負載，取表 1a 上負載之(1/32)倍~2 倍，電源側電壓固定為 161kV，結果如圖 17。

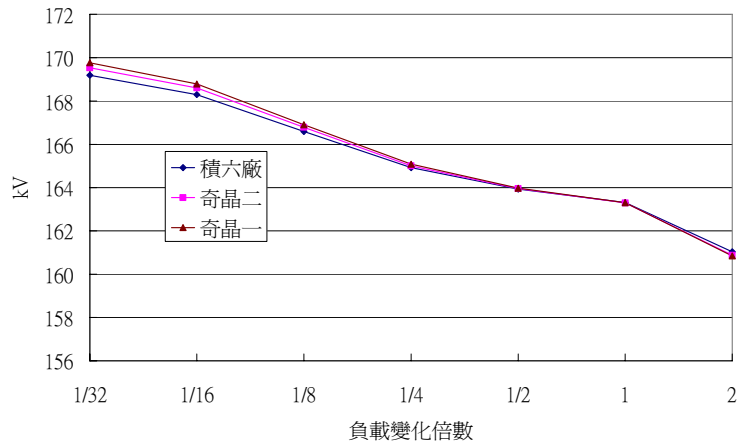


圖 17 改變園區用戶負載對用戶電壓影響

B. 改變投入電抗器容量，用戶負載取(1/32)，電源側電壓固定為 161kV，投入地點分別取南科東、豐華及三竹等變電所，結果如圖 18。

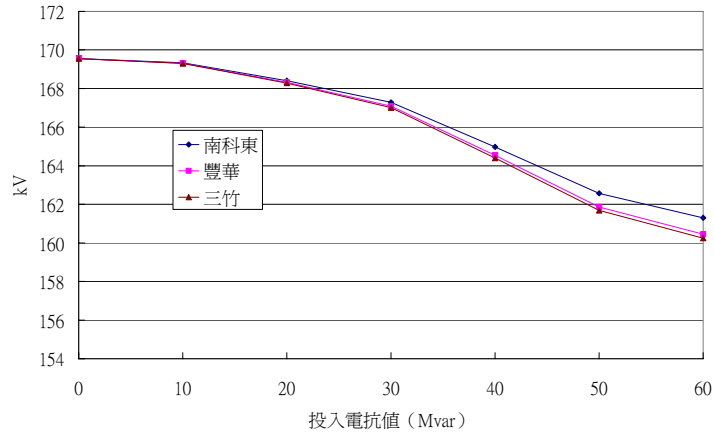


圖 18 投入併聯電抗器對用戶電壓影響

成果自評：

1. 模擬分析併聯電抗器啟、閉時之開關突波大小，提供專用斷路器設計及運轉保養、維護之週期參考。
2. 模擬分析科學園區供電系統地下電纜電容效應、加入併聯電抗器對無效電力及負載側電壓變動之影響，提供未來科學園區供電系統設計參考。
3. 相關成果投稿 96 年電力研討會。

參考文獻

- [1] IEEE application guide for shunt reactor switching, IEEE Std C37.015-1993.
- [2] 王瑋民、莊忠勇、范振理、鄭強，”輸電系統無效電力與並聯電抗器啟閉暫態研究，”電機月刊，2006 年 2 月，pp.242-253。
- [3] 王瑋民、張德福，”南科輸電系統及鄰近線路事故之電壓驟降研究，”台電工程月刊，2004 年 7 月，pp.76~82。