

23 kV 電容器啟斷重燃弧暫態分析

台電綜合研究所高壓研究室 鄭強
新桃供電區營運處頂湖超高壓變電所 游象吉

壹、前言

電力系統之架空輸電線路、電力變壓器及其負載，多由電阻-電容-電感元件所組成，在系統運轉於滯後功率因數情況下，虛功率潮流將增加線路損失、壓降、降低系統電力融通能力及系統穩態穩定度等不利因素。因此在區域輸電系統中，無論是否含有發電機組，多採用並聯電容器提供超前虛功率潮流穩定系統電壓控制、提高系統容量、改善線路損失及增加系統靜態穩定度等。研討電容器啟閉暫態現象，如斷路器投入之預擊穿；啟斷後，負載側之直流殘餘電壓、暫態恢復電壓、恢復電壓、重燃弧及再襲等暫態響應，有助於釐清電容器、斷路器事故肇因，以及擬定電容器運轉維護策略。

貳、系統絕緣等級與過電壓

1. 系統絕緣等級制定沿革

系統於正常運轉狀態下，允許電壓變動之最高之線電壓均方根值(rms)，稱為系統最高運轉電壓(maximum system voltage)；於此最高電壓運轉狀態下，各項電力設備不得發生任何型式之絕緣降低弱化情況。系統公稱電壓接近系統正常之運轉電壓，而各項電力設備之公稱運轉電壓值，低於最高運轉電壓設計值5~10%；例如22.8 kV中壓系統之各項電力設備規格之公稱電壓為25 kV，最大系統電壓為26.2 kV。

IEEE STd. 1331.1-1996 標準指出有關變電所絕緣等級之擬定原則：以變電所整體設備之BIL、BSL設計值，決定個別設備之BIL、BSL值；而變電所BIL設計值，亦為擬定空氣絕緣間距之原則。突波試驗之統計值及協商兩項因素，為擬定電力設備之BIL、BSL數值之基礎；協商因素視

系統規畫之可接受的絕緣故障或然性、影響程度、可靠度需求等級、設備使用年限、價格、及運轉需求等條件，選擇電力設備適當之絕緣強度，符合預期可能發生的過電壓及其可接受的故障風險。

2. 過電壓定義

系統相電壓、線電壓峰值超過系統最高運轉電壓者，稱為過電壓(overvoltage)；依波形及持續時間，過電壓可分類為暫時性過電壓及暫態過電壓。以 $V_m(\sqrt{2}/\sqrt{3})$ 之標么值表示過電壓程度；通常具有高阻尼性質之過電壓，持續相對短暫的時間，稱為暫態過電壓；無阻尼或欠阻尼之過電壓，可持續相對較長的時間，稱為暫時性過電壓(temporary overvoltage)。系統於故障、失去負載等不正常運轉狀態下，產生之暫態及暫時性過電壓，不同於系統最高運轉電壓之定義，可能影響電力設備性能，係電力設備絕緣設計考慮因素之一。

3. 虛功率補償電容器之功能

當電容器投入或切離系統時，具有調升或調降系統電壓的功能，一般是將系統電壓幅值限制在2~3%變動範圍中，令系統電壓變動對負載端用戶的影響減至最低。滯後功率因數的負載，加入電容器運轉，可降低負載電流中的滯後分量，因而具有改善線路阻抗之電壓壓降之效益。電容器電壓調整幅值，可藉由電容器裝置容量、系統電抗值及系統運轉電壓之平方值等參數計算而得，其關係式如下：

$$\Delta V = \frac{(k \text{ var})(X_L)}{10(kV)^2} \quad (1)$$

式中

ΔV : 電容器加入後，電壓昇幅值
 kV : 電容器未加入時，系統之線電壓
 $kvar$: 電容器組裝置容量

X_L : 電容裝置地點之系統電抗值，
單位為 Ω

匯流排電壓變動範圍，亦可依電容器裝置容量與系統短路電流計算之；

$$\Delta V = \left(\frac{Mvar}{MVA_{SC}} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

式中

Mvar: 電容器容量

MVA_{SC} : 系統三相短路容量

電容器短時間過電壓之耐壓性能，可藉由電容器交流額定電壓(rms)值之 4.3 p.u. 直流電壓，或是以 2.0 p.u. 交流過電壓試驗予以驗證之；電容器停電後，內部放電裝置，須於 5 分鐘內，將殘餘電壓降至小於 50 V 以下。

4. Y 接線電容器中中性點接地方式

變電所之電容器組以 Y 接線型式為主，以串聯及並聯電容器單元組成每相電容器組，應用斷路器與匯流排直接連接，亦可採用電力變壓器之三次側繞組與線路或匯流排連接；而電容器中中性點接地方式，可為非接地或為有效接地兩者擇一。

若高壓輸電級電容器組中性點採有效接地者，啟斷電容器組之首先啟斷相極間發展的恢復電壓，僅與 60 Hz 系統電壓有關為其優點；其次，中性點接地之電容器組，其對地之低阻抗路徑，可令突波能量轉向，減緩雷擊過電壓之衝擊；再者需針對過電壓與不平衡現象規劃保護結構。

若電容器中中性點屬非接地結構，啟斷電容器組時，在首先啟斷相極間發展的恢復電壓，係由電容器殘餘電壓及 60 Hz 系統電壓合成，過電壓情況較為嚴苛；其次，系統發生接地故障時，可能擴大電容器暫態電壓幅值；再者電弧接地故障之再襲 (restriking) 現象，亦可能導致電容器殘餘電荷 (trapped charge) 驟升，導致過電壓而引起設備絕緣故障。

Y 接線中性點非接地之電容器組，於正常運轉狀態下，不提供三次諧波電流路徑，亦於系統發生接地故障時，不提供接地故障電流；在此運轉條件下，其中性點

須具備全絕緣之性能。

參、電容器加壓之暫態現象

電容性負載包含無載輸電線路、電力電纜、並聯電容器組等；使用於電容性電路之斷路器，可依下列考慮因素檢討其性能：(1) 操作單一線路、地下電纜或電容器組之啟閉責務，(2) 電纜、電容器組之背對背啟閉操作模式之耐受性，(3) 於系統最高運轉電壓情況下，清除故障完成啟斷責務，(4) 使用於 100 kV 以下之三相斷路器，閉合操作電容性電流之暫態過電壓不得大於 2.5 pu，(5) 100 kV 以上的系統，切換電容性電路之暫態電壓不得大於 2.0 pu。

1. 預擊穿

斷路器閉合操作在電容性設備無殘餘電壓情況下，可動接觸子的機械位移作用，提高了接觸子極間場強上升速率，在極間場強急遽升高且電場梯度達到介質崩潰臨界值時，即導致極間介質絕緣瞬間崩潰，產生火花放電，此一暫態現象稱為預擊穿 (prestrike)。

通常在斷路器接觸子間的預擊穿持續時間僅有數毫秒，在兩電極間發生預擊穿瞬間，隨即產生電漿離子通道及衝擊波，而少油量斷路器受到衝擊波的影響，高於氣體絕緣斷路器，其次 SF6 氣體具有可壓縮性，可減緩衝擊波的機械力矩，具有抑制接觸子磨耗及絕緣物劣化之功能。若電容電路中，殘餘電壓為 1 標么，且系統電壓於殘餘電壓相對極性上，兩者波形在疊加合成作用下，將引起預擊穿暫態電壓振盪幅值倍增的結果。

2. 湧流暫態

電容器加壓時，除暫態電壓外，亦含有高頻振盪之湧入電流暫態現象。電容器加壓瞬間，電容電壓與系統瞬時電壓之差值，可用以決定暫態湧入電流峰值；亦即於時變電壓峰值加壓條件下，即可產生湧入電流最大值。暫態湧入電流振盪頻率，與電容性電路上的電感、阻尼電阻有關。一般而言，電容器加壓之暫態湧入電流峰

值，通常小於系統短路電流，可在電路上應用串聯電感限制湧流振幅；若電源線與電容器距離達數百英尺者，即可應用導線電感限制湧入電流幅值，不需額外裝配串聯電感；反之，在匯流排電源毗鄰電容器的配置下，則需要應用串聯電抗器，或是在斷路器接觸子上嵌入串聯電阻器，予以抑制湧入電流幅值。

3. 背對背電容器組之暫態響應

通常變電所於匯流排上配置一組以上的電容器組，可供系統彈性調度，除補償負載虛功率外，調整匯流排電壓亦為其主要功能。電容器加壓時的湧入電流幅值大小，與下述操作狀態有關：(1)匯流排上僅有一組電容器加壓時，稱之為單電容器(isolated capacitor bank switching)操作；(2)匯流排上已有電容器運轉，稱之為背對背電容器(back-to-back capacitor bank switching)操作；在背對背電容器組操作模式中，已加壓的電容器組，將提供湧出電流，加壓中的電容器組之湧入電流，含系統電源及以加壓電容器組兩者之合成，因而其湧入電流及振盪頻率，較其於單電容器運轉模式為高，應用並聯電抗器可抑制電容器湧出電流幅值，減緩背對背電容器加壓湧流對斷路器的衝擊。

湧入電流的幅值與振盪頻率高低，與下列操作狀態有關：(1)加壓瞬間的電壓瞬時值，(2)電路電容，(3)電路電感，(4)斷路器閉合瞬間之電容電荷，(5)電路阻尼(如串聯電阻)等；電容、電感與電阻串聯等效電路，如圖 1 所示。

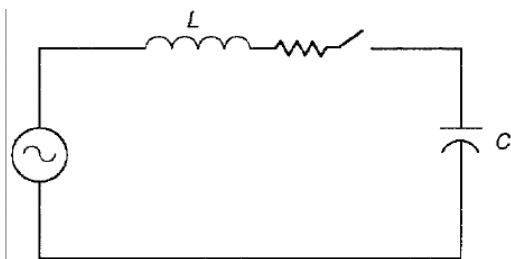


圖 1 電容-電感單線圖及等效電路

電容器在無殘壓情況下，單電容器組加壓之暫態湧入電流，小於電容器額定電

流的 20 倍，亦小於短路故障電流；湧入電流的振盪頻率約略在 1~2 kHz 範圍中，並可於 1 週波時間內衰減至零。因此單一電容器組加壓之湧入電流，並非選擇斷路器規格之主要因素。依斷路器之對稱短路電流容量，可供檢討電容器組的最大裝置容量，並依其湧入電流幅值變化速率、額定短路電流、系統頻率等限制條件計算，如下式：

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \omega_s I_{SC} \sqrt{2} \quad (3)$$

式中

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} : \text{湧入電流最大變化速率}$$

$$I_{SC} : \text{額定斷路電流(rms)}$$

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

電容器組加壓瞬間的電壓瞬時值，與湧入電流呈現正比關係，而振盪頻率與等效電容值、電感值有關，湧入電流值計算如下：

$$i_i = u \sqrt{\frac{C_1}{L_s}} \sin \omega_i t \quad (4)$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_s + L_1)C_1}} \quad (5)$$

式中

$$i_i : \text{湧入電流}$$

$$u : \text{電壓峰值}$$

$$\omega_i = 2\pi f_i : \text{湧入電流角速度與振盪頻率}$$

$$L_s : \text{系統等效電感}$$

$$L_1 : \text{電容器雜散電感}$$

$$C_1 : \text{電容器電容值}$$

當操作背對背電容器組時，暫態湧入電流幅值及振盪頻率兩者均較單一電容器組為高，且此暫態電流將在電容器與斷路器之間流動，而系統電源所提供之低頻電流，其幅值相對地較湧入電流小，因而可將其忽略。背對背電容器組加壓之湧入電流幅值可達數千安培，振盪頻率分布在 2~5 kHz 範圍中，在電容器相關電氣標準中，規範電容器組需可承受額定電流 100 倍湧

入電流之衝擊。

系統線路或是設備發生短路故障時，接近故障點之大型電容器，可提供湧出電流，等效電路圖及故障示意圖，如圖 2~3 所示；湧出電流峰值與振盪頻率，視電容器容量及斷路器在故障情況下的復閉角度而定，湧出電流包含高頻率、高振幅特徵；湧出電流可藉由電容值、電感值及電容器的初始電壓等條件計算；並聯電抗器抑制湧出電流的效能，較串聯電抗器為佳。

湧出電流頻率、峰值計算如下：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_1}}$$

$$I_{pk} = V_0\sqrt{\frac{C_1}{L_{eq}}}$$

$$I_{pk} \cdot f = \frac{V_0}{2\pi L_{eq}}$$
(6)

式中

- V_0 : C_1 之初始電壓
- L_1 : C_1 之自感電感
- L_2 : 電容與故障電之間的電感
- L_{eq} : $L_1 + L_2$

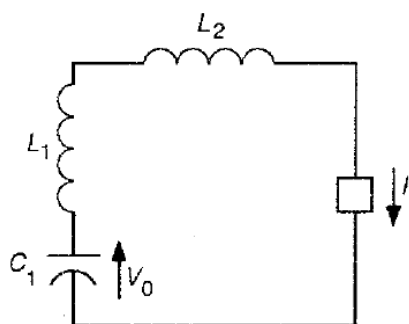


圖 2 電容器湧出電流之等效電路圖

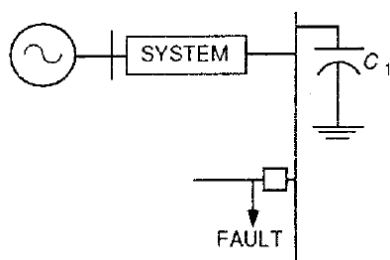


圖 3 系統故障，電容器之湧出電流示意圖

4.23 kV 電容器加壓暫態分析

2011 年 9 月於 W 變電所執行 23 kV 電容器組啟閉試驗，應用暫態分壓器及線性比流器進行量測與分析，電容器加壓暫態分析結果說明如下：23 kV SC 斷路器投入 a-b-c 三相接觸子分別於 -7.45 kV、13.21 kV、4.75 kV 電壓瞬時值完成閉合操作，b 相之暫態電壓最大值為 -24.640 kV，電容器加壓瞬間之暫態電壓頻率響應為 14.1867 kHz；斷路器閉合時，a-b-c 相湧流最大值 -1.042 kA、1.114 kA、722.933 A；電容器加壓穩定後，a-b-c 相電流為 203.5 A、204.1 A、203.9 A；電容器組之 5% 串聯電抗器具有抑制湧流峰值效應，而其波形畸變約持續 200 ms；電容器加壓之三相電壓、電流波形、頻譜，如圖 4~5 所示。

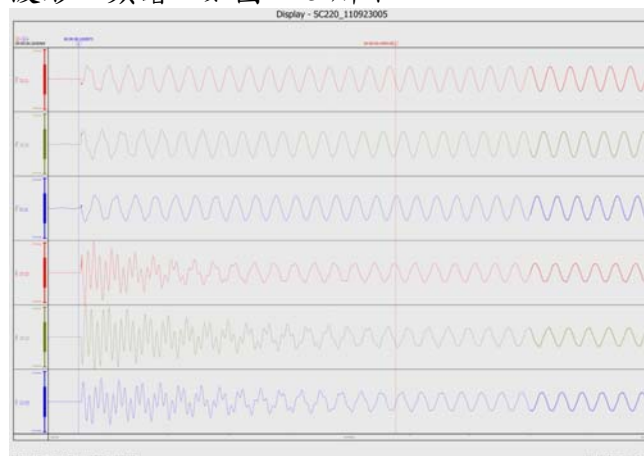
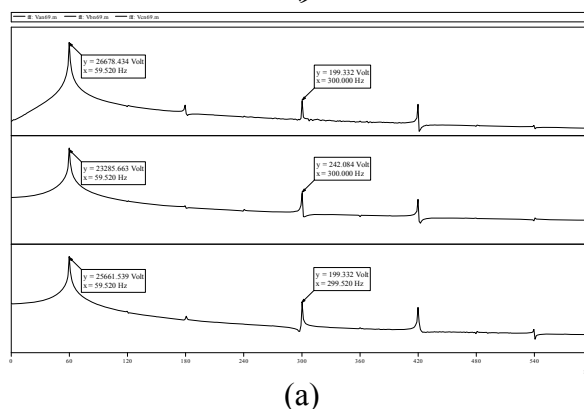


圖 4 23 kV 電容器加壓三相電壓、湧流波形



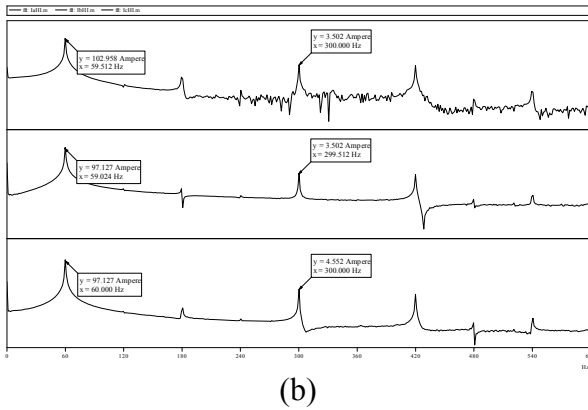


圖 5 電容器加壓之三相電壓、電流頻譜

肆、電容器停電之暫態現象

斷路器開啟電容性電流時，平衡對稱之三相充電電流，將依 60° 相角差時間依序通過零點時，係斷路器截斷電流完成操作責務的時機；斷路器接觸子開啟後，電路電流即轉變為電弧電流，電弧能量受正弦時變趨近零點影響而迅速衰減其導電能量，當電流通過零點數微秒(μs)後，電弧電流將停止於電路中流動，稱為截流；電流截斷後，在斷路器電源側與負載側接觸子極間發展出恢復電壓(recovery voltage)；恢復電壓包含兩個演進過程，於截流瞬間呈現出之暫態電壓，稱為暫態恢復電壓(transient recovery voltage; TRV)；接著恢復電壓，以系統頻率及電容殘餘電壓以 $1-\cosine$ 之合成振幅橫跨於斷路器極間。暫態恢復電壓之自然振盪頻率響應，與一次電路電阻、電容、電感參數有關。

若斷路器截斷電流後，接觸子極間絕緣渡過暫態恢復電壓及系統頻率恢復電壓時期，未發生再襲，稱之為“斷路器啟斷成功”。暫態恢復電壓振盪波形包含：依指數衰減之振盪波、三角波，以及由上述波形合成之複合波形。例如斷路器啟斷三相對稱故障電流，且電流通過零點時，電壓位於峰值處，而首先啟斷相極間之恢復電壓波形，可能呈現出過度的振盪波或指數衰減波形；若線路短路故障點相當靠近斷路器，在短距離線路故障情況下，受到行進波作用，導致線路側的暫態電壓呈現出三角波，而三角波暫態恢復電壓之上升速率，遠高於以系統頻率為主之恢復電壓上

升速率，對斷路器啟斷責務之挑戰亦較為嚴苛。

1. 電容性小電流之啟斷特性

啟斷送電中的電容性電流，在系統電壓正常情況下，中性點接地電容器之啟斷暫態恢復電壓可達 2.0 標么；中性點非接地之電容器，其暫態恢復電壓值達 2.5 標么，而首先啟斷相之恢復電壓小於 3 標么。電容性小電流啟斷後，若斷路器發生再襲，其暫態恢復電壓可達 4.1 標么。啟斷電容性電流斷路器電源側、負載側之系統電壓、殘餘電壓、截流、極間恢復電壓以及發生一次再襲之系統暫態電壓、殘餘電壓、再襲之突入電流、暫態恢復電壓波形，如圖 6 所示。

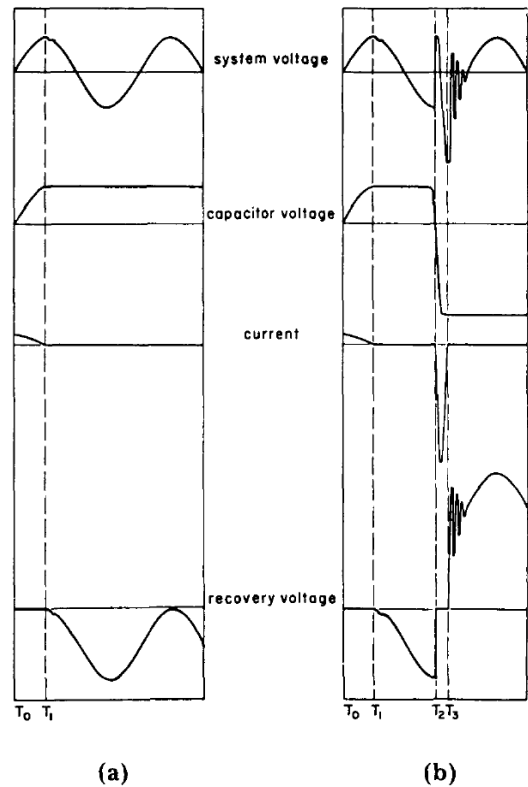


圖 6 啟斷電容小電流之波形，(a)正常啟斷，(b)發生一次再襲

2. 斷路器之恢復電壓與再襲

電容性電路之電壓與電流相差 90° ，因此電流於正半週或負半週通過零點時，電容器之電位亦隨系統電壓到達峰值。當斷路器截斷電流時，系統、負載分離，與過零點電流同極性之系統電壓峰值，瞬間對

電容充電，此時電容電壓不再隨時間變化而轉換為直流電；此殘餘電壓幅值略小於交流 1 p.u. 相電壓峰值位準；而系統之正弦時變電壓連續作用於斷路器電源側，因而極間恢復電壓依 1-cosine 函數而到達 2 標么之最大值，1-cosine 及 cosine 波形，如圖 7 所示。

電力電纜及 Y 型中性點接地之電容器，於斷路器截流 1/2 週波後，系統時變電壓極性反相，並於極間產生近似 2 標么之恢復電壓，亦為斷路器發生再襲(restrike)的時機；若斷路器發生再襲，其電流具有振盪湧流性質，當振盪電流通過零交越點時，斷路器可輕易再次截流，並在電容器上產生 2.8 p.u. 之殘餘電壓，因而可能衍伸出連續性之再襲現象，電容殘壓極性反轉，因而在電容器上建立起更高幅值之過電壓。

斷路器啟斷中性點非接地之電容器，首先啟斷相之恢復電壓受到延遲啟斷相影響而可升高至 2 標么以上，斷路器截流狀態說明如下：(1)斷路器首先啟斷相截流後，延遲啟斷相電流通過零點前，首先啟斷相之恢復電壓可達 2.5 p.u.；(2)斷路器首先啟斷相截流後，若另兩相接觸子延遲開啟，首先啟斷相之恢復電壓可達 3.0 p.u.；(3)斷路器首先啟斷相截流後，若另兩相之一，接觸子延遲開啟，恢復電壓可達 4.1 p.u.。

依斷路器標準選擇規格及要求性能，有助於降低斷路器發生再襲之可能性；若斷路器存在發生再襲的可能性，可依電容器裝置容量，最大儲能條件，謹慎檢討避雷器釋放過電壓能量之適當規格，減緩設備損壞的可能性。若採用避雷器限制電容器之暫態電壓，將其裝置於電容器側可達最大保護效果。

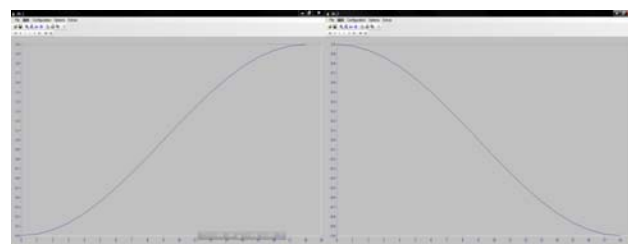


圖 7 1-cosine 及 cosine 波形

伍、23 kV 電容器暫態分析

1. 電容器正常啟斷案例分析

23 kV 中性點非接地之電容器組，應用斷路器啟斷電容電流案例分析說明如下：斷路器 a-b-c 三相接觸子開啟後，b 相電流率先由正半週通過零點並截流，為首先啟斷相。b 相電流截斷時，電壓瞬時值為 19.78 kV，近似相電壓峰值；此刻三相電壓瞬時值為：Van -9.07 kV、Vbn 19.78 kV、Vcn -7.64 kV；b 相電流於通過零點 3.960 ms(85.5°)時間後，a 相電流較原正弦波週期提前 1.534 ms(33.1°)，由正半週通過零點；c 相電流較原正弦波週期延遲 1.256 ms(27.1°)，自負半週通過零點；a-c 相電流通過零點時，首先啟斷相之電壓由停電後殘餘電壓 19.78 kV 初始值，經 4.070 ms(87.9°)時間，遞昇至 31.69 kV，殘餘電壓上升 1.63 p.u.；斷路器截斷 a-c 相電流截斷後，a 相殘餘電壓為 16.949 kV，略低於系統 20.32 kV 峰值電壓；c 相殘餘電壓為 -16.374 kV，亦略低於系統 -18.452 kV 峰值電壓；斷路器啟斷電容性小電流之暫態恢復電壓、恢復電壓、電流等波形，如圖 8~9 所示。

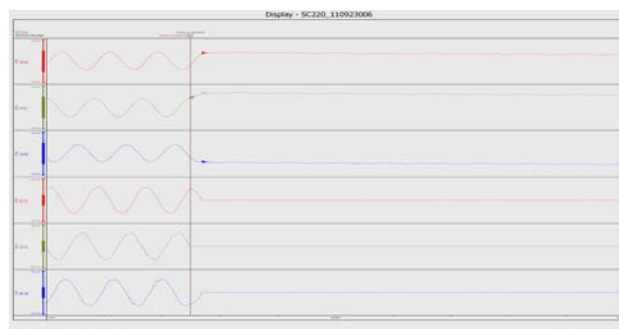
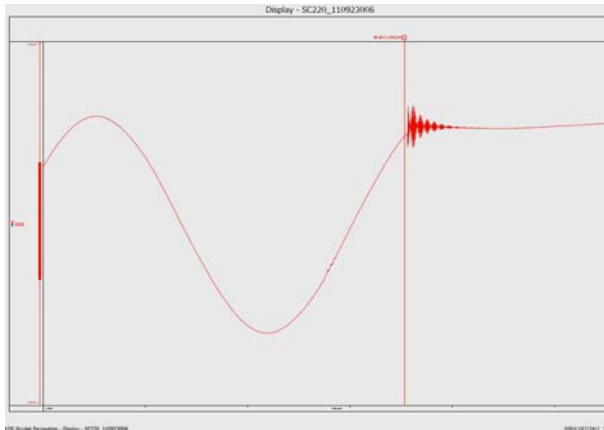
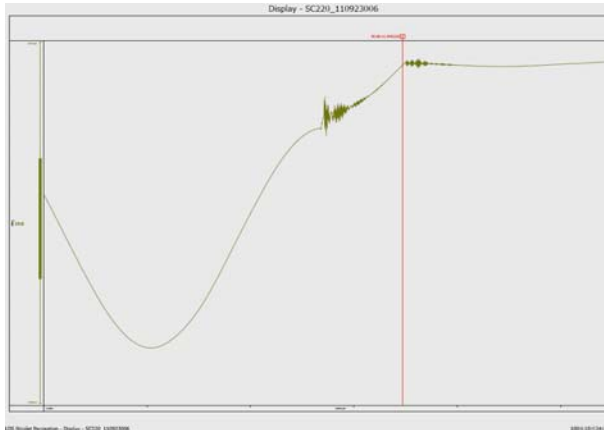


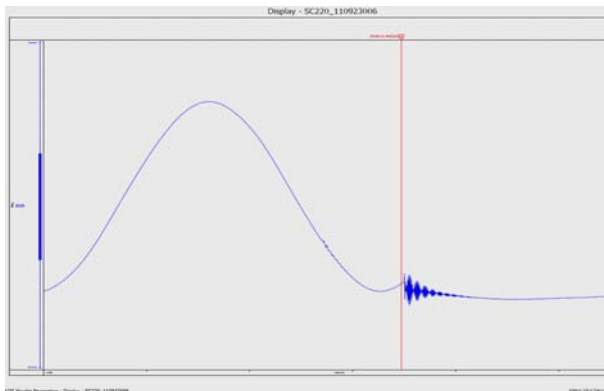
圖 8 啟斷電容性電流之暫態恢復電壓、恢復電壓、電流波形



(a)



(b)



(c)

圖 9 電容器 a-b-c 三相之暫態恢復電壓、恢復電壓及殘餘電壓波形

2. 電容器啟斷後發生重燃弧案例分析

在 23kV 電容器進行三相電流不平衡跳脫試驗項目時，斷路器閉合操作之三相電壓瞬時值為： V_{an} 6.32 kV、 V_{bn} 11.91 kV、 V_{cn} -4.30 kV；電容器突入電流最小值為： I_a -1.091 kA、 I_b -1.084 kA、 I_c -876.133 A；電容器加壓、停電之電壓及電流波形如

圖 10 所示。

電容器保護電驛於三相電流不平衡、中性點電位升高之模擬異常情況下，經 3.756 秒加壓時間後，保護電驛動作跳脫斷路器，斷路器跳脫時，a 相電流由負半週通過零點，為首先啟斷相，其電容之殘餘電壓為負值；b-c 相電流延遲 4.162ms(89.9°) 分別由正半週及負半週通過零點，其殘餘電壓分別為與電流同極性之正值及負值；三相電流截斷順序及波形，如圖 11 所示。

自首先啟斷相至延遲啟斷相電流過零點期間，a 相殘餘電壓自 -17.49 kV 下降至 -30.37 kV，電壓上升幅值達 1.74 p.u.；延遲啟斷相截流後，b-c 相殘餘電壓分別為： V_{bn} 17.35kV、 V_{cn} -14.12kV、 V_{cb} -31.47kV；在斷路器之 b-c 延遲相啟斷電流瞬間，斷路器 a 相電容器側之電壓瞬時值為 -29.849kV，而其電源側電壓瞬時值計算為 -2.728kV，斷路器兩側極間的恢復電壓瞬時值為 -27.121kV，分析結果顯示斷路極間恢復電壓並非最嚴苛狀態，恢復電壓波形，如圖 12 所示。

若 a-b-c 三相電容器各相之阻抗相等，在首先啟斷相(a 相)截流後，b-c 相電容器跨壓轉換為 V_{cb} 線電壓，b-c 相電容器依阻抗分配 1/2 p.u. 之跨壓，跨壓計算值為 15.74kV，與 b-c 相電容器截流後之殘餘電壓量測值相符；電容器受到首先啟斷相與延遲 90° 啟斷相之截流影響，其暫態響應導致首先啟斷相斷路器極間之恢復電壓，在此期間(90°) 逐步遞昇至 2.74p.u.；在此 4.094ms 期間，斷路器暫態響應符合電容性電流之啟斷響應；a 相截流值為 -1.85 A、b 相截流值為 12.62A、c 相截流值為 946.3mA；三相電壓、電流截斷波形，如圖 13 所示。

斷路器三相接觸子間的恢復電壓，亦隨 1-cosine 系統時變電壓函數而遞增、遞減變化，經 1.185145 ms 時間，斷路器 a 相

極間發生重燃弧，斷路器發生重燃弧持續 2.2208232 ms 後，斷路器再次消弧而暫態響應結束；a-b-c 三相電壓幅值初始值為：-30.65 kV、18.63 kV、-17.07 kV；重燃弧振盪值之 a-b-c 相暫態電壓最大值或最小值為：-44.073 kV、49.083 kV、-23.633 kV；重燃弧暫態結束進入一新的穩態值為：-19.70 kV、28.57 kV、-6.28 kV；再弧期間之電壓、電流相關波形，如圖 14 所示。圖中顯示首先啟斷相殘餘電壓初始值為 -18.27 kV，延遲啟斷相過零點時，電壓為 -30.95 kV；延遲啟斷相之 Vcb 電壓初始值為 1.57 kV，電流過零點之電壓值為 -34.05 kV；Vcb 電壓均方根值為 23.486 kV，最大值為 33.407 kV、最小值為 -32.497 kV。

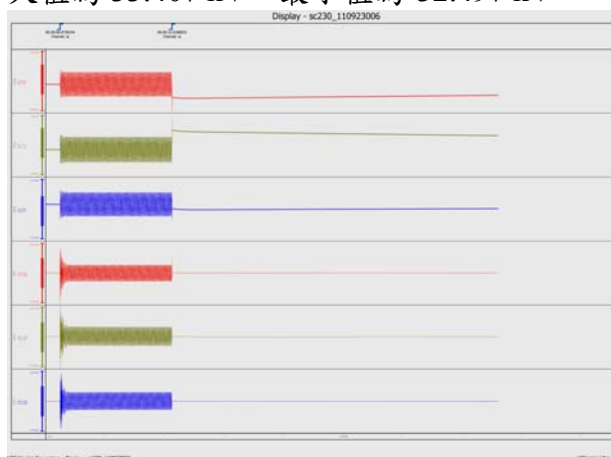


圖 10 電容器三相電流不平衡試驗，投入-跳脫之波形

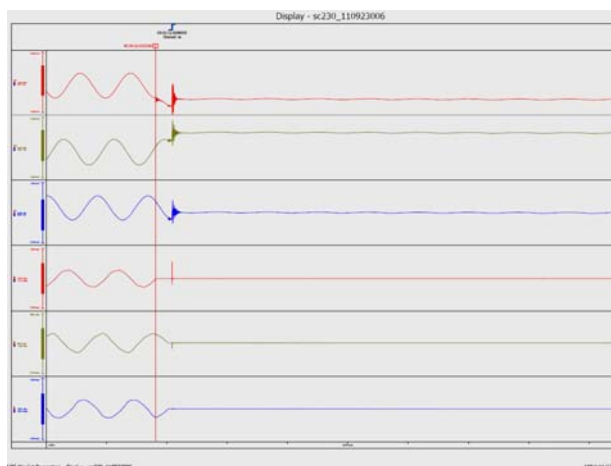


圖 11 電容器三相電流不平衡試驗，a 相為首先啟斷相、b-c 相為延遲啟斷相之波形

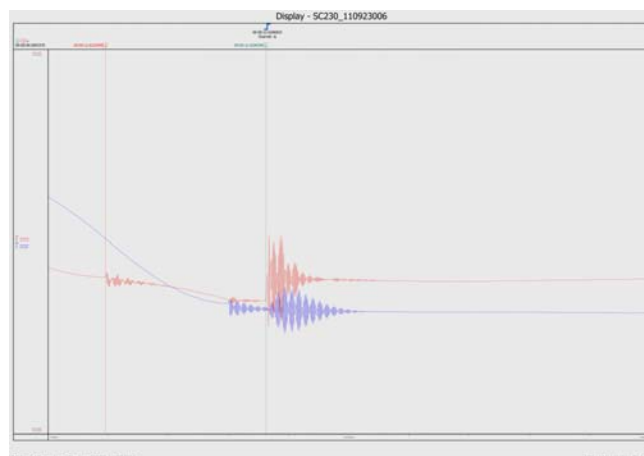


圖 12 電容器之首先啟斷相極間恢復電壓波形 (量測值---、計算值---)

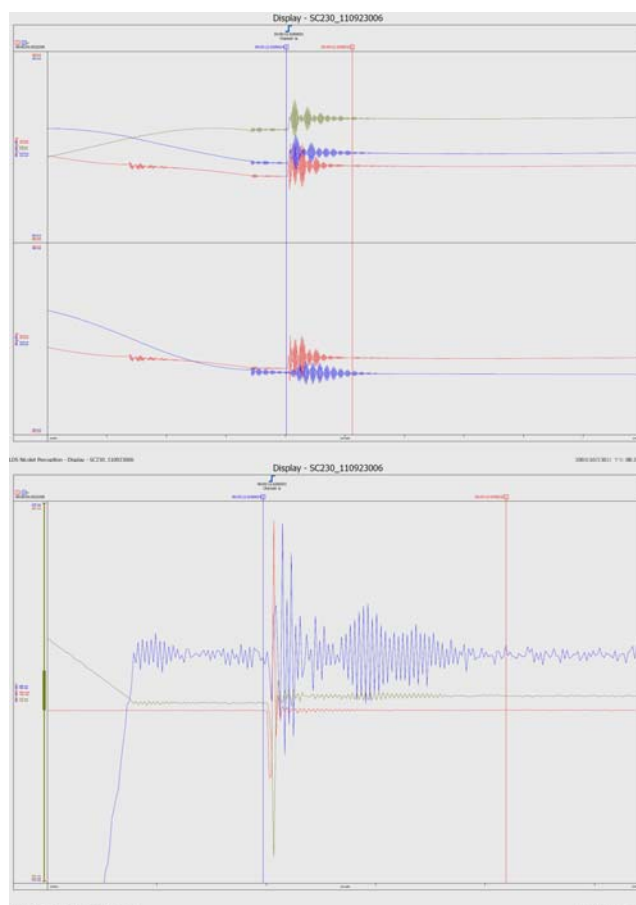


圖 13 斷路器啟斷 SC 重燃弧之三相電壓、電流波形

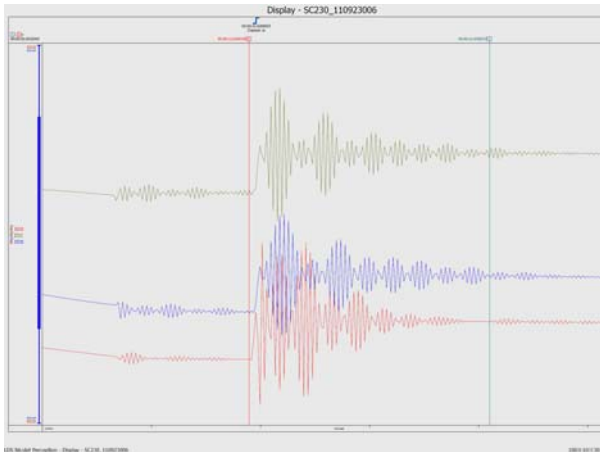


圖14 斷路器啟斷SC重燃弧之三相電壓波形a- ---、b- ---、c- ---

陸、結論

高壓電容器元件依並聯及串聯電路組合條件設計而成，結構中的並聯元件，係為提供所需之電流能力；串聯元件係為提供額定電容值。若電容器組各別熔絲鏈因故熔斷時，即可因阻抗增加而導致串聯組件過電壓，在此情況下，其運轉電流僅些微降低，在運轉電流未顯著降低情況下，電流不平衡靈敏度有所不足，採取電容器中性點電壓幅值增量相對靈敏度較高，因此有助於檢出電容器組阻抗不平衡及各別元件過電壓之異常情況。

斷路器啟閉操作中，三相接觸子機械動作之同步性，攸關電容器首先啟斷相之恢復電壓上升值。首先啟斷相既有 1 p.u. 之殘餘電壓，受到延遲啟斷相偏移電容器中性點電壓影響，而遞昇至 2.5 p.u.，因而在首先啟斷相極間之恢復電壓，較延遲啟斷相嚴苛，易於首先啟斷相極間發生重燃弧或再襲響應。重燃弧或再襲與“非持續性擊穿放電(non-sustained disruptive discharge; NSDD)”之持續時間、能量與過電壓性質不同。

重燃弧因其發生時間小於啟斷後 1/4 週波，因其恢復電壓近似殘餘電壓，產生暫態過電壓的情況並非嚴重；但是啟斷截流 1/4 週波後，若斷路器發生再襲，其過電壓幅值可達 2.8 p.u.；依電容器組出廠時以 4.0 p.u. 過電壓執行耐壓試驗之規格而言，

斷路器啟斷發生一次再襲，電容器組亦須具有充分的耐壓能力不致於發生損壞。

參考 IEEE C37.012-2005 標準，指出斷路器啟閉電容性電流發生再襲的可能性程度，是以 C1、C2 及 C0 三種型式定義斷路器測試模型與性能。斷路器啟閉操作之機械同步性，攸關首先啟斷相極間恢復電壓上升倍率；若斷路器採購規範未具體載明斷路器啟閉之同步性時間時，建議可依 IEEE Std. C37.04-1999 標準，要求竣工、維護試驗之斷路器同步性規範：(1)閉合操作之三相接觸子間的同時性，不得大於 1/4 週波；(2)啟斷時，三相接觸子分離之同時性，不得大於 1/6 週波；如此可令斷路器啟斷之極間恢復電壓特性維持在 2.5 p.u. 範圍內，可降低斷路器啟斷後，發生重燃弧及再襲之可能性。

柒、參考文獻

- [1] IEEE Std. C37.99-2000。
- [2] IEEE Std C37.011™-2005。
- [3] IEEE Std. C37.012-2005。
- [4] IEEE Std. C37.04-1999。
- [5] L.M. Wedepohl, D.A. Woodford, "Impact of Circuit Breaker Pre-Strike on Transmission Line Energization Transients," International Conference on Power Systems Transients IPST'97, Seattle, June 22-26, 1997.
- [6] P. Laszlo, B. Gyorgy, B. Gabor, B. Peter. "Reducing the magnetizing inrush current by means of controlled energization and de-energization of large power transformers". International Conference on Power Systems Transients, 2003, New Orleans USA.
- [7] TPRI-G7.8 2102-0042技術服務報告，鄭強、范振理，2011年11月。