

IED 保護電驛之抗突波干擾分析

台電綜合研究所 鄭強、范振理

國立台灣科技大學 蕭弘清

摘要

超高壓變電所於線路加壓運轉操作時，斷路器動作瞬間之電磁暫態雜訊，可能引起 IED 保護裝置誤動作。本文應用保護電驛電磁相容性之突波干擾測試標準及其量測檢驗測試方法，驗證 IED 保護裝置抗突波干擾與電磁相容性之效能，有助於減緩電磁暫態現象對電控裝置之影響，並提升保護裝置之保護、監視、量測與通訊設備之運轉穩定性。

關鍵詞：二次電控設備、人工智慧型電子裝置、氣封開關、電磁相容性、暫態過電壓、電壓崩潰、波阻抗

Abstract

It is often malfunction triggered the IED protect relay when overhead line, power cables energize or circuit breaker switching operations at ultra-high voltage substation. According the test procedures of test standards is helpful for examine the IED surge protection capability. We hope this study may promote the protection performance on the IED and increase the operation stability of the electronics devise using in power system.

Keywords : secondary control equipment, intelligence electrical device; IED, gas-insulated switchgear; GIS, electromagnetic compatibility, transient over voltage,

voltage breakdown, wave impedance.

一、前言

電力系統中的突波過電壓與大自然中的雷擊、系統輸配電線路及電力設備之短路接地故障、及斷路器、隔離開關、接地開關啟閉操作暫態特性有關，係電力系統發變電開關場中常見的突波過電壓發生源。在系統擾動發展初期如電弧性故障之暫態響應，以及斷路器完成截流清除故障瞬間，具有高頻及過電壓振幅之暫態突波電壓，對於連接在一次電路上各個電力設備之絕緣性能造成直接性的威脅外，暫態干擾雜訊攜帶著電磁能量，亦可透過輻射與感應耦合等傳導路徑斷二次電控設備 (secondary control equipment) 形成干擾作用。就運轉維護立場而言，裝設於變電所中的二次電控設備，必須具有相當程度的電磁相容性能，藉以抵擋源自空間輻射傳導或是導體耦合傳導路徑之電磁雜訊，如此可保證與提升電控設備之運轉可靠性。

二次電控設備泛指發變電系統中的電機控制與設備保護電驛，在西元 1900 年代，電力系統發展初期，二次電控設備的主要元件是以 R-C-L 電路組成之動鐵式或動圈式元件所構成，西元 1970 年起電磁感應型保護電驛逐漸被電晶體電路組成之固態電控裝置所取代；1990 年起，在半導體製造技術及軟體工業快速發展之下，二次電控設備充分利用積體電路體積小、運算速度快及整合性功能便捷的韌體

元件，配合特定演算法，而逐漸構建成一全新的保護控制系統，稱為“人工智慧型電子裝置(intelligence electrical device; IED)”，簡稱 IED 保護電驛。

裝置於變電所中的二次電控設備，在服役年限中，不可避免地需承受多次雷擊突波、短路接地事故與開關啟閉暫態突波過電壓衝擊。評估二次電控設備於電磁干擾環境下之抗突波干擾能力，可應用電磁干擾雜訊量測技術，調查存在運轉環境中的暫態現象，如雷擊突波過電壓、開關場中主斷路器、氣封開關(gas-insulated switchgear; GIS)、空氣隔離開關(air break switch; ABS)啟閉操作之暫態特性等影響因素；應用變電所暫態過電壓之調查數據，輔以保護電驛抗突波耐受性標準測試資訊，可比對分析出 IED 保護電驛抗暫態突波過電壓之限制條件及其具體改善對策，可提升及保障電控設備在變電所電磁環境中的電磁相容性(electromagnetic compatibility)。

二、調查變電所突波干擾源

調查變電所中二次電控設備發生故障、誤動作或是輸出假警報訊號的發生時機，多與系統運轉操作在下述三種運轉狀態有關，如(1)在隔離開關、斷路器投入設備加壓瞬間；(2)線路發生事故，斷路器於跳脫行程截斷短路電流瞬間；(3)在雷雨天候下，變電所鄰近線路遭受雷擊時之過電壓；開關突波過電壓具有持續時間長、振盪頻率高穿透性強的性質，而雷擊突波過電壓受到雷擊電流幅值、上升斜率及塔腳突波阻抗影響，其過電壓幅值較高及持續時間短的特性；比較分析開關操作與雷擊突波過電壓之兩者發生頻度及持續時間等因素，結果顯示開關突波過電壓與雷擊暫態過電壓對 IED 保護電驛電磁干

擾之影響並不相同，特別是在超高壓系統中，開關突波過電壓對電控設備的影響較雷擊突波為嚴重。因此本文針對斷路器啟閉暫態過電壓，對 IED 保護電驛的電磁相容性的影響及其承受電磁暫態過電壓之耐受能力進行分析。

三、LC 電路閉合之暫態電壓 (closing transient voltage)

斷路器之閉合操作，係先將閉合彈簧機構壓縮儲能後，瞬間釋放機械能量驅使斷路器可動觸頭產生直線運動，至與固定觸頭完成機械接觸為止。在可動觸頭與固定觸頭在完成機械性接觸前，因場強變化導致觸頭間發生預擊穿(pre-arcing)電弧電流，因而完成電氣電路之連接，電氣能量在 LC 電路元件作用下，產生具有高頻振盪特徵的暫態過電壓(transient overvoltage)。

本文應用一簡單的電容-電感性電路加壓過程，說明暫態突波電壓發生現象，討論高電壓電路於斷路器投入瞬間之暫態響應。假設系統是由電源、斷路器、連接電纜及電感性負載組成，其電路與結構如圖 1 所示；系統傳輸線路之負載側電容 c_l ，係電力電纜單位長度之電容 c' 與電纜實際長度 l 之乘積；電感性負載如電力變壓器、感應電動機等以 L_n 表示；在電路中忽略電路之阻尼(damping)效應，及負載組成元件中的雜散電容值；圖中顯示其他饋線與負載，是以電力電纜與匯流排電源連接，故在網路上的電容值 c_n 可以無限大視之；因此，在投入斷路器之負載側出現之暫態電壓，具有阻尼振盪波形特徵；圖 2 顯示 L-C 等效電路。

以三相連動閉合操作之斷路器為例，斷路器三相觸頭之閉合時間差小於 4 毫秒，在斷路器閉合操作中，於 a 相電極

(pole)間，率先發生電壓崩潰(voltage breakdown)產生預擊穿電弧電流，在空間中的電弧電流導致電氣性的連接，因而驟然改變待加壓電路上的電壓位準。在電氣特性上，作用在觸頭兩端的電弧電流，可視為穩定的電氣連接(galvanic contact)行為；在場中驟然改變的電壓以行進波(traveling wave)的速度，經電纜線路傳輸傳遞至負載端。若負載端屬於電感性負載，如變壓器、感應電動機等，其波阻抗(wave impedance; Z_{load})約在 1000~5000 Ω 之間，而地下電纜突波阻抗約為 10 Ω ；因此變壓器或是感應電電動機之波阻抗，遠大於電力電纜之波阻抗，故可將電纜之波阻抗視為零；而前進波抵達電感性負載端時，可將其視為開路；因此當行進波抵達負載端時，大部分的波將反射回電源端；在傳輸電路上與電纜阻抗特性有關的自然振盪頻率(natural frequency)，可建立一具具有高頻成分的振盪電壓(oscillating voltage)，在較嚴苛的條件下，此時振盪過電壓係數可達到兩倍高(k=2)。

廣義的說，在導電性媒介中波速度近似光速，而在非導電性(nonconductive medium)媒介中，波速度可應用傳輸媒介之介電常數(permittivity) “ ϵ_0 ”以及導磁率(permeability) “ μ_0 ”導出；在自由空間中，介電常數及導磁率計算如下：

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} F/m \quad \text{近似值} \dots\dots\dots (1)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m \quad \text{精確值} \dots\dots\dots (2)$$

因此，在自由空間中，波的傳遞速度 v_0 可由介電常數與導磁率兩者導出之近似值表示如下：

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 m/s \quad \text{近似值} \dots\dots\dots (3)$$

其他傳波媒體中的介電常數與導磁率，以“ ϵ_r ”及“ μ_r ”表之；因此，可將不同的傳波媒體及其介電常數與導磁率以 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 、 $\mu = \mu_r \mu_0$ 關係式表示；以聚氯乙稀(polyvinyl chloride; PVC)絕緣材料之地下電纜為例，其介電係數 $\epsilon_r = 4$ 、導磁率 $\mu_r = 1$ ，則波速度 v 為：

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{3 \times 10^8 m/s}{\sqrt{4 \times 1}} = 150 m/\mu s \dots\dots\dots (4)$$

另傳波媒體之介電常數與導磁率乘以電纜長度，可導出電感(L)及電容(C)，另可由電感與電容乘積平方根之倒數，求得波速度：

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (5)$$

若於無損失之線路上，則利用速度與距離 l 之關係，求出頻率之近似值

$$f_k = \frac{v}{2l} \dots\dots\dots (6)$$

在圖 2 中， C_l 為電纜之總電容，L 為總電感，電源與電纜之電阻值忽略不計，則可寫出斷路器閉合時的電容電壓方程式：

$$LC_l \frac{d^2 v_c}{dt^2} + v_c = v_m \sin(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (7)$$

解式 7

$$v_c = v_m \sin(\omega t + \phi) \frac{1}{\frac{\omega C_l}{1} - \omega L} + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \sin \omega_0 t \dots\dots\dots (8)$$

式中

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}$ 為自然振盪頻率、 a_1, a_2 為積分常數，由初始條件決定其值。

通常，電路中的 $\omega L \ll \frac{1}{\omega C_1}$ ，因此可將

式 8 簡化為

$$v_C = v_m \sin(\omega t + \phi) + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \sin \omega_0 t \dots\dots\dots (9)$$

式 9 的初始條件為：

- (1) 若斷路器閉合前，電纜上有殘餘電荷，電壓為 v_0 ，則 $t=0$ 時， $v_0 = v_c$ ；
- (2) 因為電路上含有電感，電流不能瞬時變化，因此 $t=0$ 時， $i_c = 0$ ，則可導出 a_1, a_2 之積分常數及電容電壓方程式：

$$a_1 = v_0 - v_m \sin \phi$$

$$a_2 = \frac{-\omega v_m \cos \phi}{\omega_0}$$

$$v_C = v_m \sin(\omega t + \phi) + (v_0 - v_m) \cos \omega_0 t - \frac{\omega v_m \cos \phi}{\omega_0} \sin \omega t \dots\dots\dots (10)$$

若 $\omega_0 \gg \omega$ ，於 $\omega_0 t = \pi, \omega t = 0$ 時，出現電容電壓最大值 v_{Cm} ，則

$$v_{Cm} = 2v_m \sin \phi - v_0 \dots\dots\dots (11)$$

在斷路器 a 相觸頭完成接觸的同時，在稍後閉合之 b、c 兩相電路上，電流可經由 b、c 兩相固定與可動觸頭之間的間隙(contact gaps)，建立一相等的振盪頻率(equalizing oscillation of frequency; f_a)，如圖 3 所示； f_a 振盪頻率以一規則性在電纜之自然振盪頻率中振盪，其振盪頻率可以 $f_a = \frac{1}{2\pi \sqrt{1.5L_a C_a}}$ 表示；當振盪頻率進入自然頻率線對地電壓 1/2 位準時，將產生 $k=3$ 的過電壓因素。

三相斷路器第一個率先閉合之觸頭，將產生 $k=2$ 之相對地過電壓峰值因素，其後兩相觸投閉合時，將分別的產生 $k=3$

或 $k'=5$ (雙極性; bipolar)之過電壓峰值因素。理論上，斷路器於閉合過程中，最後完成閉合動作之觸頭，亦可能產生 $k=6$ 的過電壓峰值因素。經由波速度及自然振盪頻率之分析，得知於操作斷路器閉合操作瞬間，斷路器負載側的暫態電壓峰值與電源電壓 $v_m \sin \phi$ 及線路殘餘電壓 v_0 有關；若線路上殘餘電壓等於零，則 v_{Cm} 等於兩倍的電源電壓峰值；反之，線路上若存有殘餘電壓，則暫態過電壓峰值將受到殘餘電壓極性影響：(1) 殘餘電壓與電源電壓極性相同，則 $v_{Cm} < 2v_m$ ；(2) 殘餘電壓與電源電壓極性相反，則 $v_{Cm} > 2v_m$ ；例如 $v_0 = -v_m$ 時，斷路器於負載側將出現三倍的暫態電壓；本節描述之三相斷路器閉合操作之過程，無關斷路器之消弧方法，動態響應之說明，已充分涵蓋斷路器之暫態響應特性及其現象。

若停電之電纜已完全放電不存在任何殘餘電荷，則斷路器每一次投入動作，線對地暫態電壓並非如理論值般嚴苛。例如參考裝置於變電所之斷路器側之暫態記錄器實測記錄，斷路器在投入瞬間，過電壓峰值因素小於理論值，相關暫態記錄如圖 4 所示；圖 5 顯示斷路器在投入操作瞬間，波穿透 XLPE 介質後，在電力電纜屏蔽層導體上之暫態電壓波形，其暫態電壓對地峰值達 3.7 kV，此一突波電壓若是經由傳導迴路進入電控裝置中，可能引起設備損壞或是發生誤動作等異常情況。

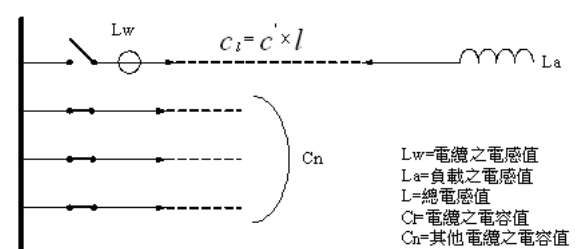


圖 1 斷路器閉合電容性負載電路示意圖

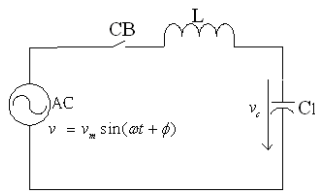


圖 2 等效電路

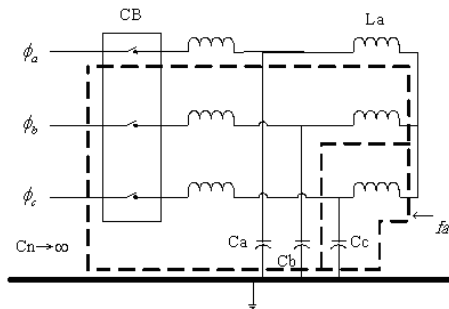


圖 3 斷路器 ϕ_b 、 ϕ_c 電極閉合接觸前之振盪電路

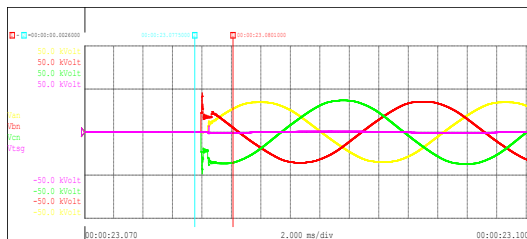


圖 4 斷路器(VCB)投入暫態電壓波形

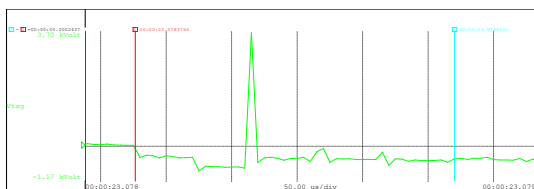


圖 5 斷路器(VCB)投入在屏蔽導體之暫態突波電壓

四、IED 及其系統連接介面

IED 電驛系統(relay system)通常是一種由電流與電壓電路、量測單元、邏輯、以及電源供應單元所構成的一種裝置，並藉此一裝置提供特殊地保護電驛規劃；如輸電線路、變壓器、匯流排以及發電機之保護。電驛系統亦包含系統中各分相單元之連接介面，如資料記錄、警報、通訊等介面，電驛單體亦可與其他電驛單體互聯成為一電驛系統[3, 4,5]，系統介面如圖 6 所示；

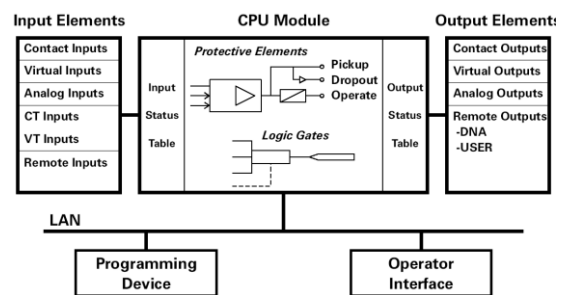


圖 6 IED 電驛基本方塊圖

IED 保護電驛依其結構及輸入、輸出電壓或是電流高低位準，可將其區分為電壓電路、電流電路以及訊號電路三種電路型式。而訊號電路中，則包含通訊、量測、控制等等單元項目：

1. 電壓電路(voltage circuit)：一個提供電壓或是電流之輸入電路，用以量測一次側電壓，若是電壓輸入值小於 50 伏特，則可將其是為訊號電路(signal circuit)。
2. 電流迴路(current circuit)：一種輸入電路可提供電壓或是電流訊號藉以量測一次側電流，若是輸入電流小於 100 毫安，則須將其歸類於訊號電路(signal circuit)討論。
3. 訊號電路：並未包含電源供應電路及輸出電路之外的電路，其最大電

壓小於 50 伏特，最大電流小於 100 毫安者，稱之為訊號電路。

4. 電源供應電路 (power supply circuit)：是電驛系統輸入電路之一，用以提供電驛系統之工作電源。
5. 保護電路：突波接地(surge ground)之保護裝置，是保護電驛及電驛系統之主要保護電路，突波保護電路利用與電驛系統連接之外部參考點或是共同匯流排，可將突波電壓及電流釋放至大地，具有疏導突波暫態電壓與電流之功用，

五、IED 抗突波測試

IED 保護電驛系統，裝置於電磁突波干擾環境惡劣之變電所或是開關場中，設備本身須具備優異之抗突波干擾與保護性能。IEEE Std C37.90.1-2002™、IEC 60255-22-1 (1988-05)、IEC 60255-22-4 (1992-03)、IEC 61000-4-4 (1995-01)等標準，係規範電力系統中的保護電驛及電驛系統之抗突波檢測試驗標準，藉由測試條件驗證 IED 保護裝置之抗突波能力。

建立抗突波測試標準，係以一具有共同性以及可重現測試訊號之測試方法為基準，測試標準藉由反覆測試結果，評估電磁雜訊存在於電驛及電驛系統之電源、電壓、電流、訊號、控制及通訊線等輸入、輸出端上時，其單體或系統之抗突波雜訊能力。抗突波標準亦可用以評估在突波干擾環境中，保護電驛於正常(normal)情況下，應能抑制電驛動作(non-trip)，或是保護電驛於此環境中發生異常跳脫動作(abnormal triped)，亦即可利用突波測試確定保護電驛系統之各組成元件，抵擋突波環境衝擊之能力。振盪突波過電壓及包

絡線波形，如圖 7 所示；

1. 振盪波形突波測試

訊號產生器在開路情況下，振盪型之突波測試電壓參數，必須保持下列狀態：

- a. 包絡線波形(waveform envelope)可視為一個阻尼震盪波，在其包絡線第三週波至第六週波之間，需衰減至峰值之 50%；振盪波的頻率需維持在 1 MHz±10%的誤差範圍中。
- b. 第一個峰值的上升時間，須於 75 ns 的時間中完成；量測值介於此一峰值之 10%~90%之間，容許誤差在± 20%範圍中。
- c. 測試電壓之初始峰值，須滿足 2.5 kV 之條件，用於共模測試以及差模(橫向模; transverse)測試中，其容許誤差範圍在+ 0 / - 10%之間。
- d. 重複率(repetition rate)是指於電力系統頻率每一週波上，產生 6~10 次之突波，突波與電力系統頻率屬非同步訊號。
- e. 突波持續時間於兩秒鐘的時間，須保持其波形容許誤差在+10%/-0%的範圍中，施加於電驛的一次試驗時間需大於 2 秒鐘，此屬最小之試驗時間。
- f. 試驗電源阻抗(source impedance)以 1 MHz，200 Ω 之電阻為基準，容許誤差± 20%。

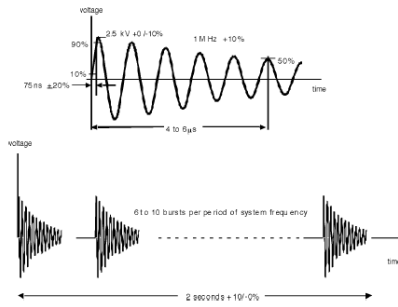


圖 7 暫態突波電壓之測試波形

2. 快速暫態突波試驗波形(fast transient test waveform)

訊號產生器在開路的情況下，快速暫態突波試驗波形如圖 8 所示，其試驗電壓參數之要求如下：

- 波形之極性係要求產生器可輸出正極性與負極性兩種波形；波峰之上升時間：5 ns，容許誤差 $\pm 30\%$ 。
- 波形之振幅：到達頂點之數值為 4 kV，容許誤差 $\pm 10\%$ 。脈波持續時間(pulse duration)：50 ns，容許誤差 $\pm 30\%$ ，並以波頭之 50% 以及波尾之 50% 計算時間。
- 重複率(repetition rate)：係電壓脈衝(bursts of pulses)所組成，可以週期性重複出現；快速暫態突波之重複率(repetition rate during bursts)是以 2.5kHz 為基準，並以 300 ms 時間作為快速暫態突波重複出現之週期(burst period)，每一次出現之快速暫態突波電壓之持續時間為 15 ms，每一極性之試驗時間不小於一分鐘，是為測試持續時間之要求。
- 電源阻抗：50 Ω ，試驗頻率在 1 MHz 及 100 MHz 時，容許誤差為 $\pm 20\%$ 。

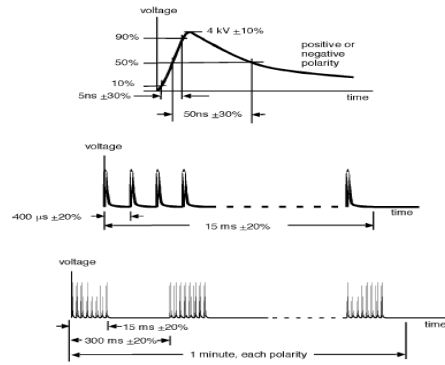


圖 8 快速暫態突波測試波形

3. 接收標準(criteria for acceptance)

若是被試設備採用上述測試標準進行測試，被試設備中可能包含直接或是遠端連接的裝置；例如直流(dc)、音頻(audio)、載波(carrier)或是微波(microwave)等電流迴路或是電壓電路；利用串聯、並聯、光學的光纖或紅外線、以及無線電頻率等通訊設備，須於執行 SWC 測試時，被試電驛以及連接裝置，未發生異常情況，則屬接收標準之範疇，例如：

- 設備具體指定的性能，包含其動作時間，不得超出指定範圍中。
- 硬體未發生故障。
- 已校正之正常誤差值未做改變。
- 現行的或是儲存的設定值、儲存的記憶或是資料，未發生遺失或毀壞。
- 未發生系統重置(reset)及不需要手動重置系統。
- 假設通訊發生中斷，是否在製造廠訂定之時間週期內恢復通訊，確定通訊不影響保護功能。
- 若發生通訊錯誤(error)，必需不影響保護功能。
- 未遺失數位同步脈衝訊號，若遺失數位脈衝同步訊號，必需小於容許誤差。

- i. 未改變電氣性、機械性或是通訊之輸出狀態，例如警報、輸出狀態、動作指示器之狀態並未因測試改變。
- j. 光學的、音頻的及通信訊息(message)等輸出，未發生錯誤及永久性的狀態改變；但在測試期間，上述輸出在測試期間發生瞬間(momentary)改變，是被允許的情況。
- k. 通訊資料訊號未發生大於正常公差之異常情況，如 SCADA 類比(analogs)訊號。
- l. 通過 SWC 測試之設備，於測試中及測試後，被測試之電驛及其連接設備各項功能，必須保持如設計般正確及完整的功能。

六、結論

裝設於超高壓變電所中的各類型斷路器，在運轉調度規劃中，負有啟閉電阻性，電感性及電容性等負載電路之功能；於系統於不穩定狀態下，亦須肩負著清除對稱與非對稱短路電流之保護任務，以及在故障未清除隔離情況下，閉合短路故障電流。就斷路器啟斷特性而言，啟斷負載電流及故障電流之瞬間，在一、二次電路上，將先後發生振幅、頻率特性不同的暫態過電壓；例如在隔離開關、主開關之運轉操作期間，存在著非常快速及快速暫態突波過電壓，暫態過電壓若與二次電路之 R-L-C 參數形成振盪，將升高電磁干擾的影響程度與範圍。因此，裝置於變電所環境中的電子性設備，於電源、電壓、電流、訊號、控制及通訊線等輸入、輸出端點上，可能單獨或是同時存在電磁雜訊，

應用 IEC、ANSI/IEEE 等相關抗突波測試標準，可藉以評估驗證電驛及電驛系統之抗突波過電壓之性能。若變電所中的電磁干擾雜訊幅值，及持續時間較設備突波耐受能力更為嚴苛時，則須利用暫態過電壓量測分析技術，建立排放或吸收暫態突波過電壓的抑制對策，強化電控設備的突波耐受性。

參考文獻

- [1] Amir Mansour Miri, Zlatan Stojkovic, “Transient Electromagnetic Phenomena in the Secondary Circuits of Voltage- and Current Transformers in GIS”, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 16, No. 4, October 2001.
- [2] Lou van der Sluis, “Transients in Power Systems” John Willy & Sons. LTD, 2001, pp. 31~56, 107~119.
- [3] IEEE Std C37.90.1-2002. (Revision of IEEE Std C37.90.1-1989.), “IEEE Standard for Surge Withstand Capability (SWC) Tests for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus”.
- [4] IEC 60255-22-1 (1988-05), Electrical relays—Part 22: Electrical Disturbance Tests For Measuring Relays And Protection Equipment—Part 1: 1 Mhz Burst Disturbance Tests.
- [5] IEC 60255-22-4 (1992-03), Electrical relays—Part 22: Electrical Disturbance Tests For Measuring Relays And Protection Equipment—Section 4: Fast Transient Disturbance Test.