

保護電驛動態試驗綜論

台電綜合研究所 吳立成

一、前言

談到電力系統之設備保護電驛功能檢驗、事故分析、標置最佳化、新型電驛開發及電驛選用等等，是一項極為重要且專業之課題；尤以電驛試驗方式之良窳，更是攸關保護電驛於電力系統故障時，能否達成確實保護電力系統之目標。過去我們所熟知之電力系統模擬軟體如 EMTF、PSS/E、ETAP、NETOMAC 及 PSCAD 等 [3]，大多僅只停留於離線(Off Line)之模擬方式，且模擬速度亦跟不上實際電力系統之暫態變化，所以無法直接與實況相提並論，即模仿電力系統控制設備、自動化商品及保護電驛之動態模擬試驗。因此，保護電驛動態試驗問題長久以來，皆用縮小(Scale Down)之電力系統實體模擬取代，直到電力系統即時(Real Time)動態模擬器出現以來，此問題才獲致更佳之解決方案。保護電驛之動態試驗，主要用於模擬高壓系統保護設備性能之狀態評估，低壓環境之電驛只求功能(靜態)試驗，無法檢驗出電驛深受周遭情境劇烈變動之影響程度，本文擬介紹線路保護電驛、變壓器保護電驛、匯流排保護電驛及發電機保護電驛、頻率電驛之暫態試驗概要。

二、保護電驛動態測試平台之簡介

在 1993 年加拿大 RTDS[6]公司推出世界上第一台全數位化電力系統動態模擬器 RTDS 後，再繼有法國電力公司(EDF)的 ARENE 及加拿大 IREQ 研究所

TEQSIM 公司的 HYPERSIM 也是全數位化電力系統動態模擬器，這些全數位化電力系統動態模擬器，無法採用何種硬體，其共同特色是使用多 CPU 平行處理技術，當系統模擬時由軟體決定每個 CPU 應負責執行所指定電力系統元件，所以在時間步階及 I/O 介面頻寬滿足要求之下，電力系統模型只與軟體有關，而與硬體無關，此模式造就了未來數位化電力系統動態模擬器之快速發展。以下我們將就目前國際上主要之電力系統即時動態模擬器，RTDS、HYPERSIM 及 ARENE 一一做簡介。

RTDS 是國際上最早研發出之電力系統即時動態模擬器，其並行處理硬體是採用 NEC 公司及 AD 公司的 SHARCAD21062 高速信號處理器，主機板及軟體自行研發，此種模式好處在於可將軟、硬體效能充分發揮，但不利於硬體升級。另外，RTDS 的軟體核心為 EMTDC，PSCAD 為其人機介面，可以使用 PSS/E 系統資料。

HYPERSIM 系統的技術是以 IREQ 的數位類比混合模擬器為基礎，由 TEQSIM 公司研發出之電力系統即時動態模擬器，其硬體採用 SGI2000 或 ALPHA 超級平行處理電腦，其軟體核心為 EMTF。另外，SGI3200 伺服器用於直流系統(HVDC)動態特性模擬。

ARENE 系統是法國電力公司(EDF)研發，其使用 HP-CONVEX 平行處理電腦，目前該電腦之 CPU 最大可安裝 64

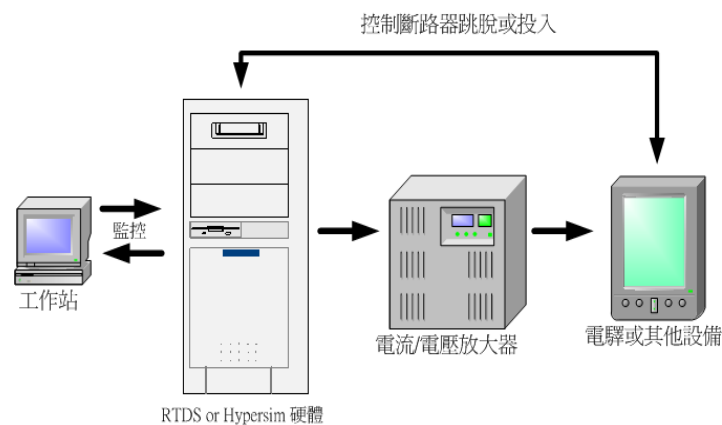
個，其軟體核心為 EMTP。此系統之優點為，其所用之硬體為一般之商用品，EDF 只研究撰寫適用於電力系統即時動態模擬之演算法。

以上這些電力系統即時動態模擬器，共同缺點是價格昂貴、維護成本高及靈活性差等等；因此，目前國際上較新之電力系統即時動態模擬器研究，以 PC 為架構配合高速網路方式實現平行處理來實現。

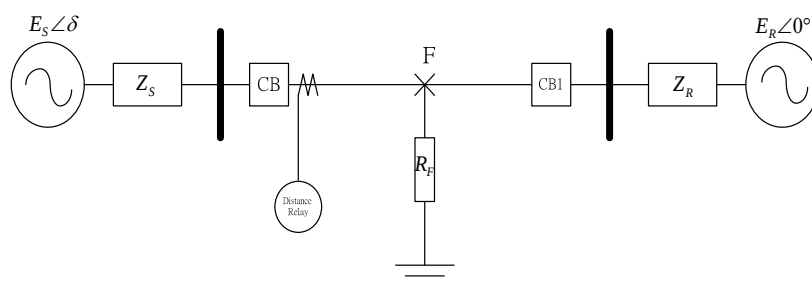
三、線路保護電驛(差流電驛、測距電驛)之暫態試驗

閉迴路動態測試系統組成如圖一所示，為校驗線路保護電驛(差流或測距電驛)於輸電線路發生故障時之暫態性能，在此我們使用如圖二所示簡單模型來說明測距電驛之性能評估，我們可依實際建立試驗模型提供相關參數如表一所示。其次

模擬各種不同類型故障，將故障波形輸入電驛來量測出電驛之輸出，如圖三為一 BC 相間短路故障之電壓、電流及電驛跳脫信號之波形，係依實際電驛之量測輸出來撰寫程式，再置入電驛暫態試驗模型中，和實際電驛響應一起做評估。如圖四測距電驛之阻抗軌跡，與實測電驛之結果來比對；對輸電線路之測距電驛暫態試驗評估包括：(1)保護區內外直接短路故障(2)保護區內外經過渡電阻短路故障(3)故障延續又擴展(4)CT 和 PT 斷線(5)CT 飽和(6)系統振盪和振盪時發生故障(7)電驛動作時間(8)保護製造商所指定之特殊試驗項目(9)線路空加壓(10)系統頻率偏移(11)弱電源端(12)測距電驛的暫態越區跳脫。



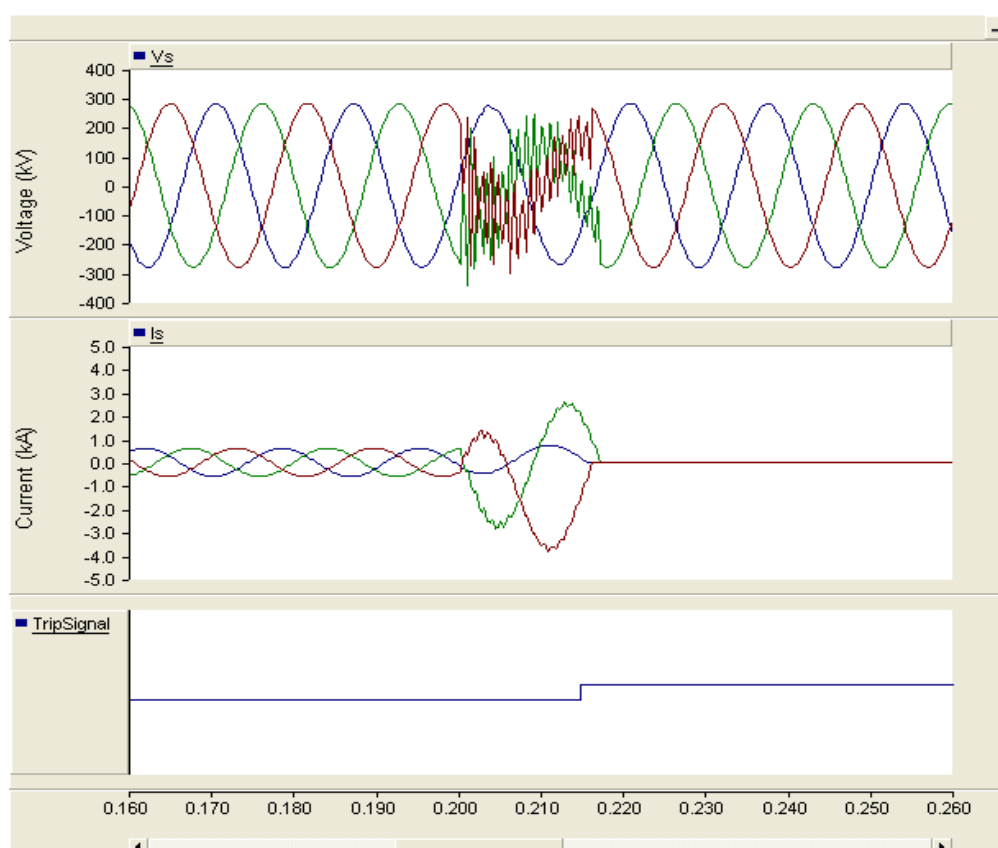
圖一 電驛動態試驗基本架構



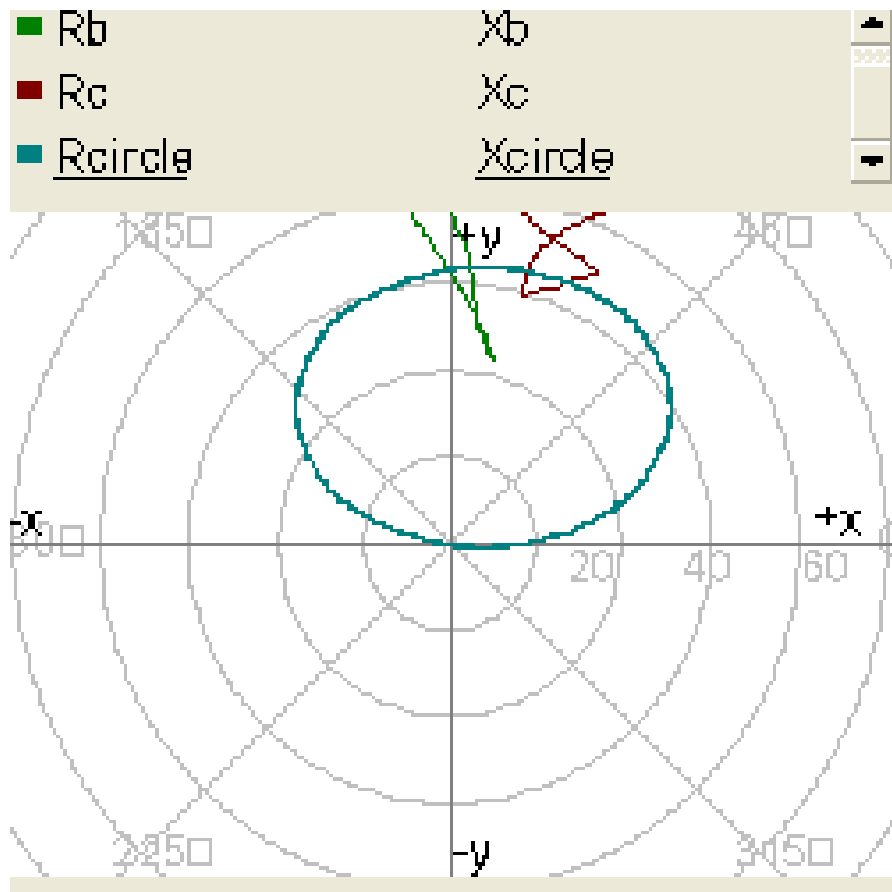
圖二 簡單線路之試驗模型

表一 簡單線路試驗模型之相關參數

<u>Voltage Rating:</u>	345 kV
<u>System frequency:</u>	60 Hz
<u>Equivalent Voltage Per Unit:</u>	
	$E_S = 1\angle 15^\circ (\text{p.u.})$, $E_R = 1\angle 0^\circ (\text{p.u.})$
<u>Equivalent Source Impedance:</u>	
	$Z_{S1} = 0.238 + j15(\Omega)$, $Z_{S0} = 2.738 + j26.6(\Omega)$
	$Z_{R1} = 0.238 + j16(\Omega)$, $Z_{R0} = 0.833 + j13.6(\Omega)$
<u>Length of Transmission Line:</u>	127.216 km
<u>Line Constant:</u>	
	$R_0 = 0.2079(\Omega)$, $L_0 = 2.552(\text{mH})$, $C_0 = 7.668(\text{nF})$
	$R_1 = 0.0196(\Omega)$, $L_1 = 1.011(\text{mH})$, $C_1 = 14.167(\text{nF})$



圖三 BC 相間短路故障之電壓、電流及電驛跳脫信號之波形



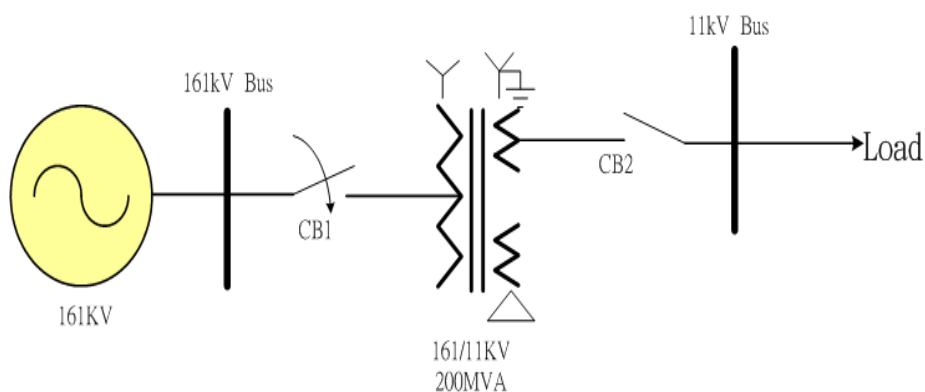
圖四 BC 相間短路故障之測距電驛阻抗軌跡

四、變壓器保護電驛之暫態試驗

變壓器保護電驛之暫態試驗，應同時試驗差動保護及後衛保護，且模擬故障期間應短，方能考驗後衛保護之安全性高而不會誤動作，其暫態試驗項目包括：與線路保護電驛之前(1)~(8)項相同，另外尚有(9)變壓器空載加壓試驗 (10)投切低壓側電容器或電抗器(9)間歇性和永久性故障。

在此我們以變壓器空載加壓試驗為例，其模型如圖五所示，相關參數如表二所示，模擬結果之變壓器空載湧入電流波形，如圖六所示，將不同條件所模擬之變壓器空載湧入電流波形，輸入至變壓器可多方評估電驛對變壓器空載湧入電流之抑制能力。假設變壓器差動保護使用二次諧

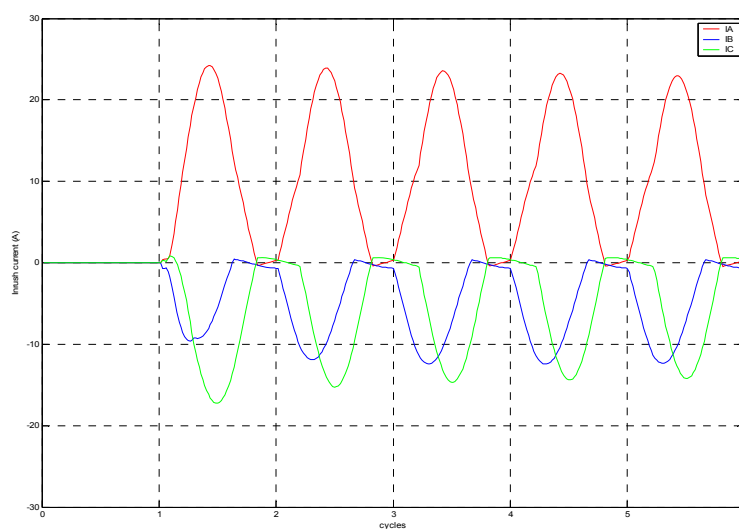
波原理來識別變壓器空載湧入電流，則我們可利用傅立葉轉換公式演算出二次諧波之含量，來判定電驛是否受到抑制而靜止，故將圖六之波形做傅立葉轉換後，可得圖七所示二次諧波含量圖，由圖七中可知若二次諧波抑制設定在 15%時，在此一情況將造成保護電驛抑制不足而誤動作，因變壓器空載湧入電流 A 相之二次諧波大都高於 15%；相同的變壓器空載加壓試驗，可測試不同抑制原理之保護電驛，例如波形對稱原理、間斷角原理、小波識別原理、虛擬三次諧波原理等類型變壓器差動保護，有了精緻化模擬檢驗測試，可讓使用者安心選擇某類型之變壓器差動保護電驛。



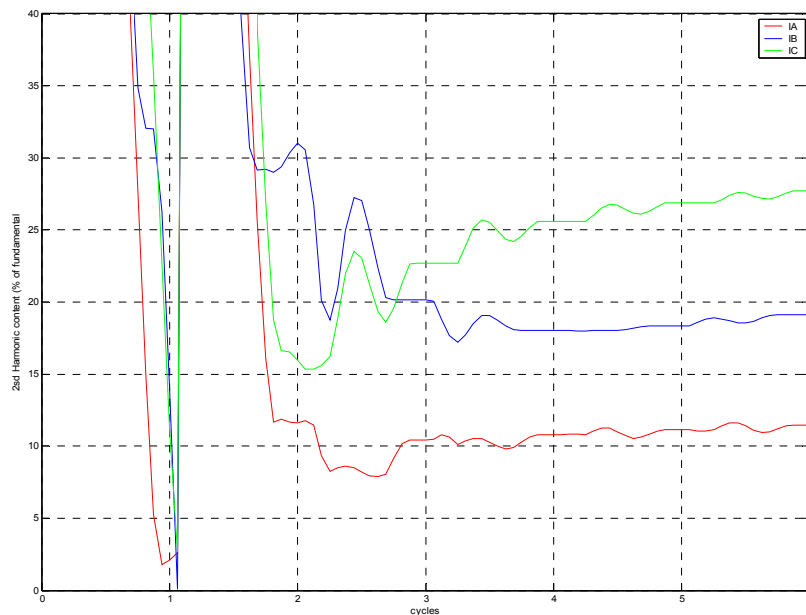
圖五 變壓器空載加壓試驗模型

Voltage Rating: 161 kV	
System frequency: 60 Hz	
Equivalent Source Impedance:	
$Z_{s1} = 0.238 + j5.72(\Omega)$	$Z_{s0} = 2.738 + j10(\Omega)$
Transformer Specification:	
3 Phase ; 161kV/69kV/11kV	
200MVA/200MVA/66MVA Y/Y/D1	
Based on 161kV	
$\begin{cases} Z_y = 0.2203 + j17.2505 (\Omega) \\ Z_s = 0.1296 - j1.287 (\Omega) \\ Z_t = 0.7128 + j26.7275 (\Omega) \end{cases}$	
Base on 11kV	
$\begin{cases} Z_m = 303.91 - j3844.76 \text{ u(mho)} \end{cases}$	

表二 變壓器空載加壓試驗模型相關參數



圖六 變壓器空載加壓之湧入電流波形



圖七 為圖六波形之二次諧波含量圖

五、匯流排保護電驛之暫態試驗

匯流排保護電驛之暫態試驗，與線路保護電驛之暫態試驗除前(1)~(8)項均相同外尚包括：(9)斷路器失靈保護(10)系統頻率偏移 BUS 對變壓器或線路空加壓(11)保護區間盲點檢測(12)系統解聯和併聯對匯流排保護電驛之影響。

六、發電機保護電驛之暫態試驗

發電機是電力系統的泉源，其保護電驛性能優劣攸關系統之運轉；因此，發電機保護電驛在定型試驗時，電驛動暫態試驗是不可少之項目，限於篇幅僅列舉發電機保護電驛之動暫態試驗項目如下：(試驗模型如圖八所示)

- A. 動作時間
- B. 發變電組差動和匝間保護
- C. 湧浪電流(Inrush Current)
- D. 共感湧流(Sympathetic Inrush Current)

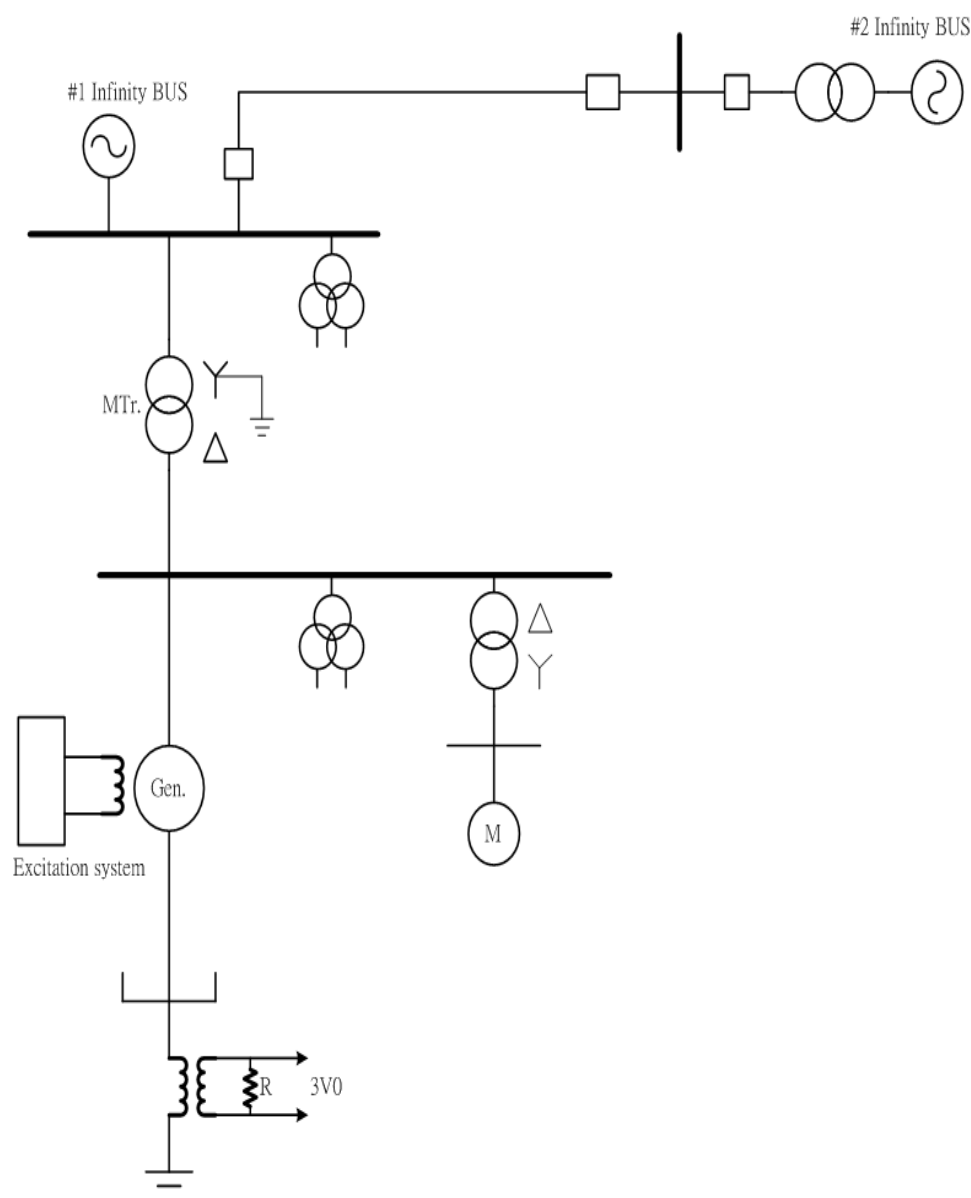
- E. 定子接地：90%、95%及 100%
- F. 轉子接地：正極及負極單點接地故障
- G. 發電機失磁
- H. 發電機逆功率：50%及 100%額定無效功率下，模擬發電機逆功率運轉
- I. 過壓過激磁：模擬過電壓 1.2~1.4 倍，造成變壓器過激磁。模擬發電機誤過激磁及甩負載，造成發電機過激磁。
- J. 發電機啟動及停止
- K. 發電機失步
- L. 特殊項目

七、頻率電驛之試驗項目

一般頻率電驛製造廠家，會於頻率電驛製造完成時，施以表三所列之各項電氣試驗，確保頻率電驛功能之良好。

為便利於判斷試驗數據之良窳，在此定義一誤差計算如下：

$$\frac{\text{試驗值} - \text{設定值}}{\text{設定值}} = \text{誤差} \quad (1)$$



圖八 發電機保護電驛動暫態試驗模型

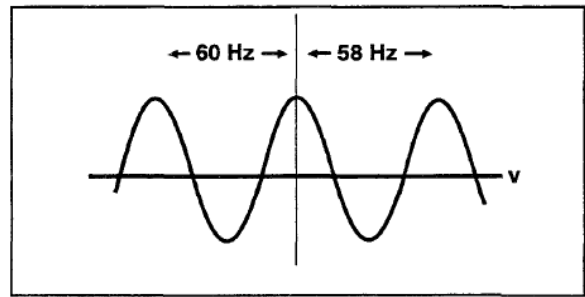
頻率電驛之一般試驗，指其加一頻率信號可調變之電壓，使其頻率達設定值時，頻率電驛輸出接點動作閉合，求得頻率始動值；或待時間延遲到達時，電驛輸出接點動作閉合，求得時間延遲值，此種試驗方式稱為頻率電驛之靜態特性試驗。上項試驗值得探討的是：「時間延遲計算」，因不同試驗設備會有不同之試驗結果，其主因在於試驗設備之時間起算點。現今之試驗設備不外乎三種模式(1)第一種模式為頻率改變在非零點之電壓波形，

如圖九所示。(2)第二種模式為頻率改變在正零點交換處之電壓波形，如圖十所示。(3)第三種模式為頻率改變在負零點交換處之電壓波形，如圖十一所示。因此，在時間延遲試驗時之首要工作，就是確認試驗設備之特性，不然就無法掌控試驗結果。另外，如圖十二之電驛輸出接點延遲也是試驗時要考慮之因素。今假設時間量測起始在頻率改變之零點交換處，如圖十三所示，其所量測之結果將造成1Cycle 的時間誤差，因此事故頻率在零

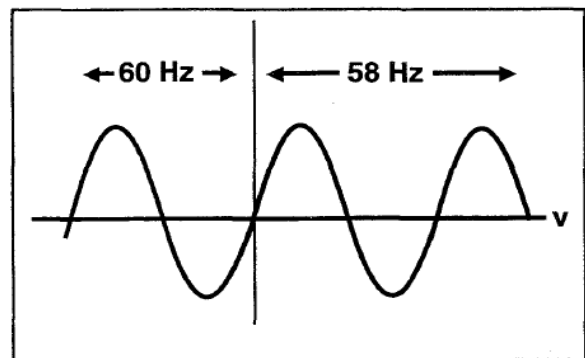
點才始改變，而其試驗設備之時間量測起始會至下一個週期才計算，如此將造成至少 1Cycle 的時間延遲，若再加電驛接點延遲，其總延遲將超過 1.5Cycle，這將造成實際應用之困擾；因此，我們對試驗設可修改成時間量測起始在頻率改變不在零點交換處，如圖十四所示將其頻率改變點，提前 5 度以防治時間量測誤差，以上為試驗設備源之問題，於試驗頻率電驛時應予注意。

表三 頻率電驛之出廠電氣檢測項目

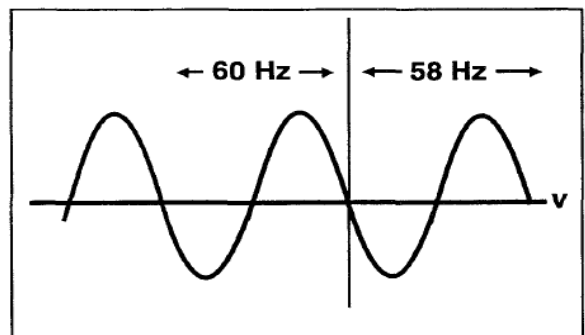
序號	檢 測 項 目
1	電氣性能試驗： (1)動作性能試驗 (2)時間性能試驗
2	功能函數試驗： (1)低壓截止效應試驗 (2)“鳥啄”試驗 (3)頻率滑差閉鎖試驗
3	影響量及影響因素試驗： (1)電源性能的影響試驗 a.直流電源波動影響試驗 b.直流電源中斷影響試驗
4	過載能力試驗： (1)過電壓能力 (2)過電流能力 (3)極限動態穩定
5	接觸點性能試驗
6	電磁相容試驗： (1)1MHz (100kHz) 脈衝抗擾度試驗 (2)靜電放電抗擾度試驗 (3)射頻電磁場輻射抗擾度試驗 (4)快速瞬變脈沖群抗擾度試驗 (5)涌浪 (沖擊) 抗擾度試驗 (6)射頻感應的傳導干擾抗擾度試驗 (7)工頻抗擾度試驗
7	電磁發射限值試驗： (1)傳導發射限值 (2)輻射發射限值



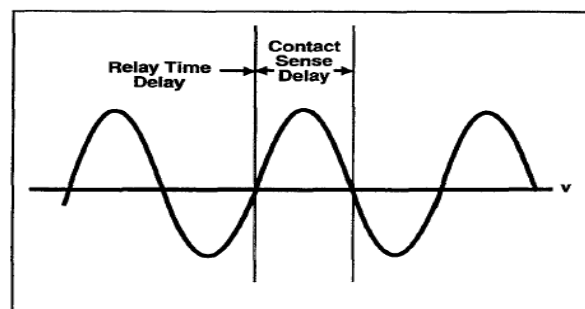
圖九 頻率改變在非零點之電壓波形



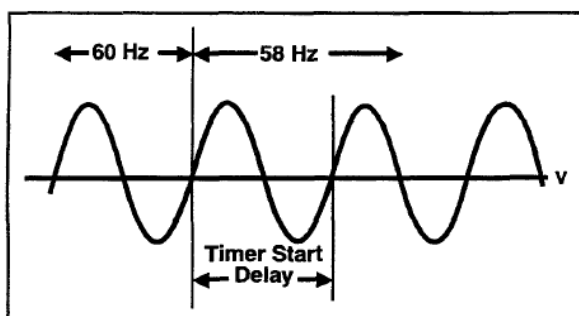
圖十 頻率改變在正零點交換處之電壓波形



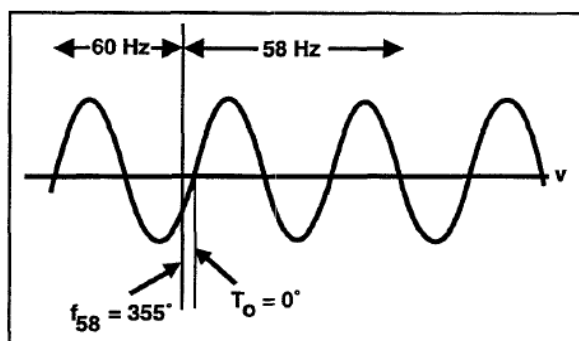
圖十一 頻率改變在負零點交換處之電壓波形



圖十二 電驛輸出接點之延遲



圖十三 時間量測起始在頻率改變之零點交換處



圖十四 時間量測起始在頻率改變不在零點交換處

以下將討論試驗設備源與電驛本身測頻問題，如圖十五所示，其試驗電源頻率改變在正零交換處，而其電驛本體是從負零交換處測頻，如此從圖十五可清楚發現，造成頻率試驗設備源與電驛本體測頻元件並非同步啟動，亦即對事故頻率發生起點並非同步感測，如此可能使其頻率電驛延遲試驗值將至少相差 0.5Cycle，圖十六說明各種不同試驗源與電驛本身測頻之

關係圖。另外，試驗設備時間是以 Cycles 或秒為單位也需注意，因秒要換算為 Cycles 時，會有頻率基準問題，其一是以通常電源工作頻率 60Hz 為基準，另一是以試驗之事故頻率為基準(如 59Hz)，這些對頻驛電驛的時間測試有密不可分之關係。

一般為防止頻率電驛因頻率突變性之暫態而誤動作，製造廠家通常使用頻率對時間變化率($\Delta f / \Delta t$)設計閉鎖功能，此功能之試驗方式，如圖十七所示從正常頻率值至設定動作值間，輸出一頻率對時間變化率($\Delta f / \Delta t$)之信號，用以試驗此功能正常與否。

當一電力系統之供需面發生不平衡時，會引起頻率變化，此變化可用式(2)表示，依此式繪出過載需求對頻率-時間特性關係，如圖十八所示。

$$f(t) = f_0 \left[1 + \left(\frac{P}{2H} t \right) \right] \quad (2)$$

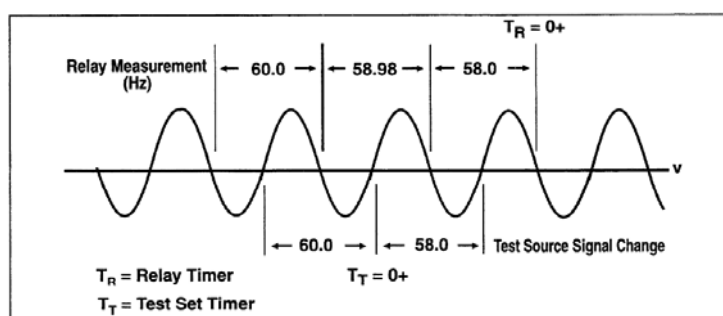
其中

$$P = \frac{P_{\text{發電量}} - P_{\text{負載量}}}{P_{\text{發電量}}} \quad (\text{p.u.})$$

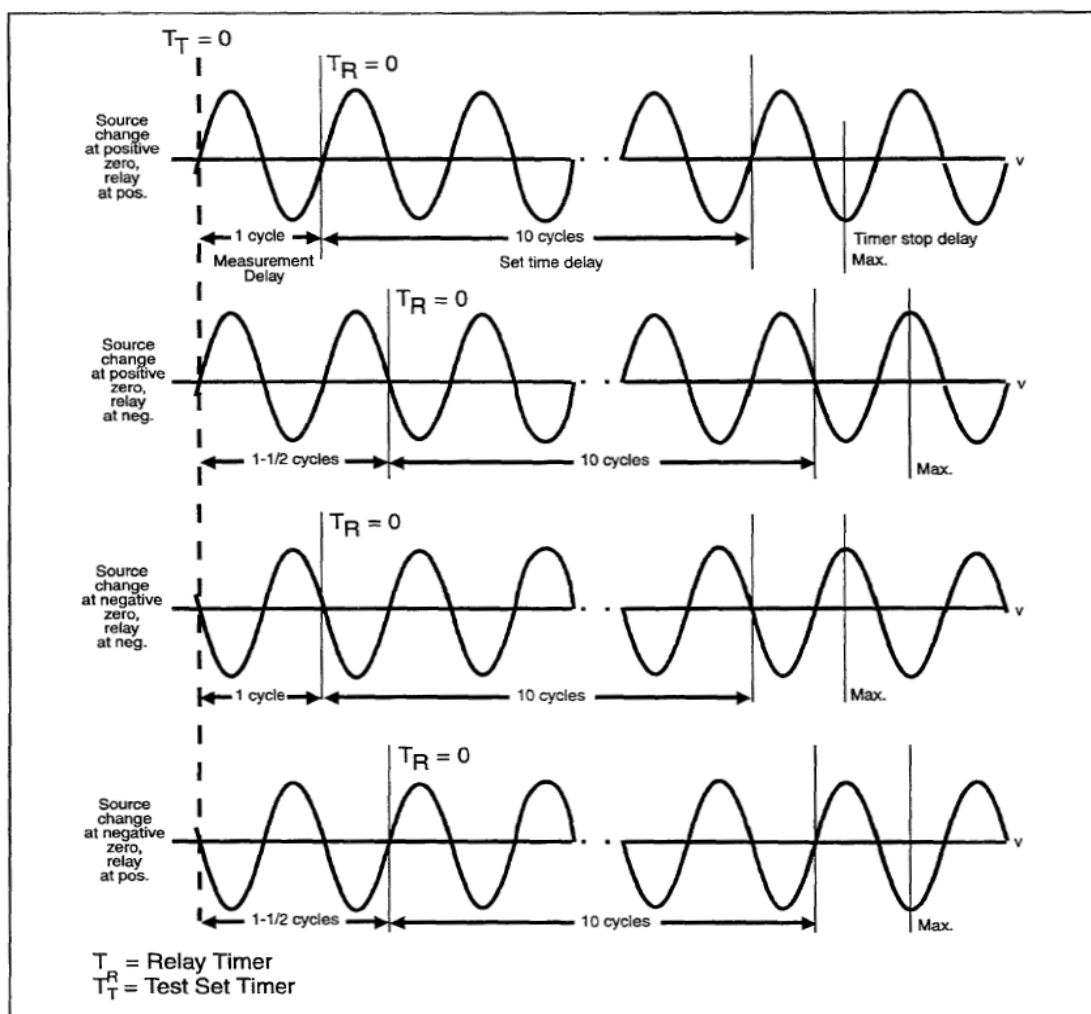
$$H = \frac{H_1 * MVA_1 + H_2 * MVA_2 + \dots}{MVA_1 + MVA_2 + \dots}$$

$$f_0 = 60\text{Hz}$$

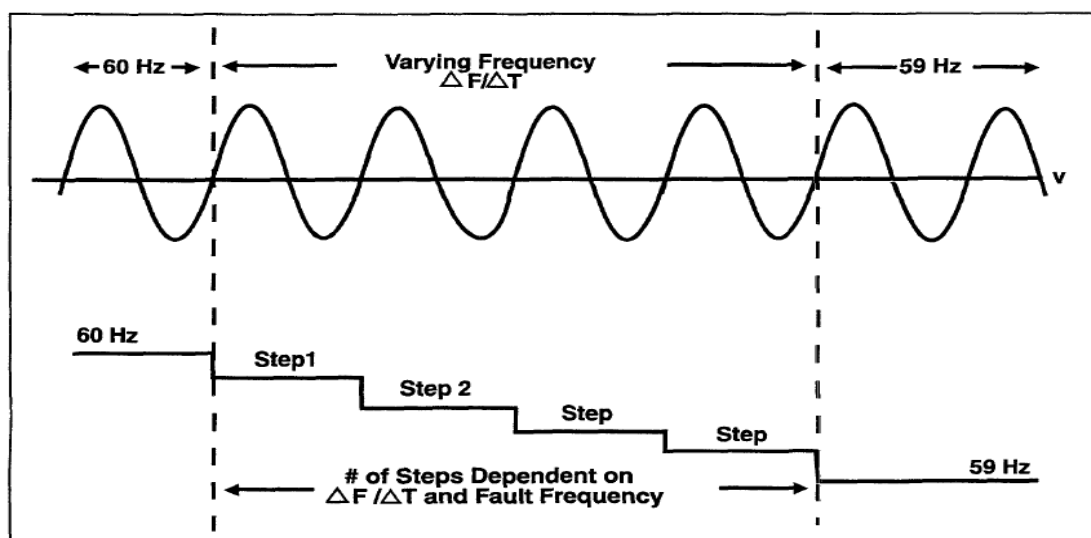
依據此一模型，可得到頻率-時間之變化率($\Delta f / \Delta t$)，再檢驗頻率電驛動作時間。



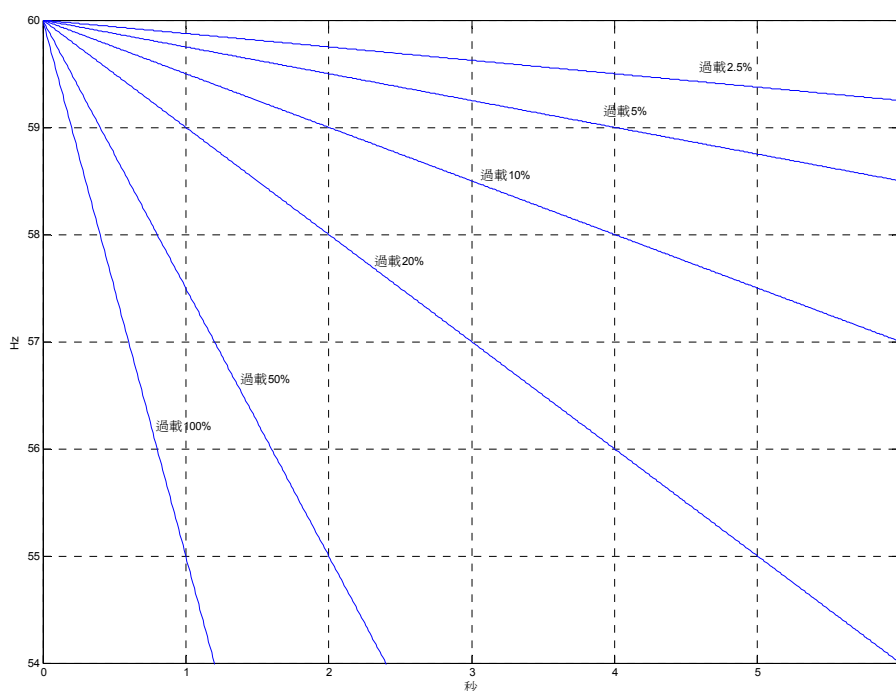
圖十五 頻率試驗設備源與電驛本體測頻



圖十六 各種不同試驗源與電驛本身測頻之關係圖



圖十七 頻率變化率測試



圖十八 過載引起之頻率—時間變化圖

八、結語

電力系統設備為滿足負載需求激增而不斷擴充造成日趨複雜，而保護電驛之基本職責就是保護這些設備安全運轉與隔離故障，甚至防止事端擴大或設備燒損，因此電力系統之規模隨時在演變，無論對新加入或既有之設備，其均需依賴保護電驛之高可靠度與高安全性之特質，然而為檢驗出各廠家電驛是否符合保護需求，必須施於多樣化之性能檢測，如此卻使得試驗項目既繁瑣且耗時，因此基於經濟性、時效性與實用性之考量，如果能夠於平時建立一套高正確性、高變通性與高效能之保護電驛測試系統便顯得相當重要，因此，本文簡介先進型保護電驛動暫態試驗平台，正可滿足檢驗出各式各樣電驛是否具足必備性能之時代需求，這樣的訴求及概念普遍性受到重視，而在全球逐步蔓延展

開了。

儘管高科技之數位保護電驛動暫態試驗平台(RTDS、HYPERSIM)，對保護電驛動暫態試驗，已經具備強大功能，但其本身仍受限於信號縮小時，影響其D/A(類比/數位)轉換精度而嚴重失真，其次信號放大亦受放大器極限，同理模擬系統之規模容量也易受CPU運算能力所限制，盡管如此但整體表現尚可滿足大部份保護電驛動暫態試驗要求，仍值得善加推廣應用。

九、參考資料

- [1] P. G. McLaren et al., "A Real Time Digital Simulator for Testing Relays", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 207-213.
- [2] P. R. Bishop et al., "Implementation of Dynamic Distance Relay Scheme

- Evaluation Testing Guidelines Using Analog and Real Time Digital Simulators”, <http://www.tde.alstom.com/p-c/en/papers.htm>.
- [3] M. Kezunovic and Z. Galijasevic, “An Advanced PC-Based Digital Simulator for Protective Relay Testing”, Second International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS '97), Montreal, Canada, May 1997.
- [4] Working Group F-8 of the Relay Input Sources Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee, “Digital Simulator Performance Requirements for Relay Testing”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998, pp. 78-84.
- [5] IEEE C37.111-1996, “IEEE Standard Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems”, IEEE, 1996.
- [6] <http://www.rtds.com/testing2.htm>
- [7] M. Agrasar, J.R. Hernández, F. Uriondo, “Simulation and Transient Testing of Numerical Relays”, OCT IEEE 2002