

比壓器線圈經由串聯電容(series capacity)激磁，可產生線性或非線性共振。當非線性電感(nonlinear inductor)經由串聯電容(series capacity)充電，也就是飽和磁性元件(saturated magnetic element)經由電容激磁所發生的共振現象。若於線性共振條件下，比壓器飽和磁性元件在其線性區域中，其感應電壓與激磁電流呈現線性關係；反之，於非線性共振條件下，比壓器飽和磁性元件進入飽和區域，感應電壓與激磁電流呈現出非線性關係，造成感應電壓波形畸變，及變壓器感抗降低，隨著共振電流增大，其運轉點更深入飽和區之雙重影響，此時非線性情況，成為一種惡性循環，伴隨而來之過電壓及過電流之熱損耗，可造成設備絕緣劣化或設備毀損。串聯電路之電容來源為：線路相間電容、導體對地電容、斷路器極間電容(grading capacity)、母線電容(busbar capacity)，以及套管電容(bushing capacity)等。

鐵磁共振與線性共振不同，線性共振是當電路中電感(inductive)與電容(capacitive)阻抗維持定值。在線性共振中，電壓與電流是與頻率成線性關係。在鐵磁共振的狀況下，電壓與電流是由一穩定狀態突然跳躍到(sudden jump)另一個狀態。電壓與電流間的關係不但與頻率相關，同時與下列因素有關：系統電壓、變壓器鐵心初始磁通狀態、鐵磁電路的總損失、波形的初始切入點(the point on wave of initial switching)。若鐵心激磁電感與電容形成共振回路，電容應包含相間電容及對地電容(或電容組)，電流流經變壓器繞組後由對地電容回流至電源，形成共振線路。此類鐵磁共振可能為基波、次諧波或渾沌模式，由相關阻抗值決定。變壓器鐵磁共振特徵說明如下：

- (1) 鐵磁共振之 C 值介於一個特定範圍內。
- (2) 發生鐵磁共振電壓及電流頻率可能與電源頻率不同。
- (3) 若線路阻抗參數相同，鐵磁共振的初始條件不同，共振響應可能不同。
- (4) 共振時，電壓及激磁電流皆明顯放大。

變壓器發生鐵磁共振類型，說明如下，其共振波形，如圖 1 所示：

- (1) 基波模式(Fundamental mode)：電壓/電流的週期與系統週期(T)相同，且包含諧波，經頻譜分析，除基頻(f_0)外尚包含其他整數倍頻諧波($2f_0, 3f_0, \dots$)，屬於非連續性頻譜。
- (2) 次諧波模式(Subharmonic mode)：電壓/電流的週期為系統週期的整數倍(nT ，多為奇數)，經頻譜分析，除基頻外尚包含其他分數諧波(f_0/n)，屬於非連續性頻譜。

- (3) 類週期模式(Quasi-periodic mode)：此模式未含固定週期性，經頻譜分析，頻率可表示成 nf_1+mf_2 (其中 n, m 為整數， f_1/f_2 為無理數)，屬於非連續性頻譜。
- (4) 渾沌模式(chaotic mode)：在頻譜分析上屬於連續性頻譜。

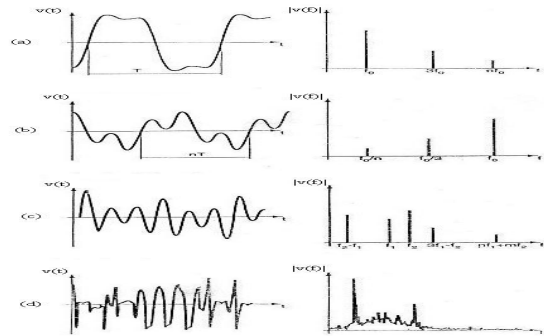


圖 1. 共振波形，(a)基頻模式，(b)次諧波模式，(c)類週期模式，(d)渾沌模式[1]

三、比壓器鐵磁電路

1. 磁路原理

一個時變電動勢供應電力使電流 i_0 在線圈 1 中流動，電流產生時變之磁場線，則此時變場線通過線圈 2，於是在線圈 2 中便產生一個感應電動勢。當一個電感元件中的電流發生變化，導致另一個電感元件中產生感應電動勢，則可在同一電路中的兩個元件之間，或是兩個不同電路元件之間發生互感。在任何點上，線圈 1 所產生的磁場與 i_0 成正比，亦即若將 i_0 加倍，則磁場與感應電勢亦加倍，其次通過線圈 2 的總磁通量亦與磁場成正比。

2. 磁滯

當時變正弦電壓以特定頻率 f 作用於變壓器一次側線圈時，在鐵心上的磁場強度亦隨著正弦電壓頻率交替變換其極性，因而升高了在鐵心上的磁滯損與渦流損。在時變磁通環境下，感應電壓作用在各個薄片組成的矽鋼片上，因而產生渦電流損失。渦流損與矽鋼片厚度平方、頻率平方、磁通密度均方根值之平方成比例關係。

磁滯損與磁滯迴圈之面積成比例關係，令 e 、 i_0 、 ϕ_m 表示感應電壓、無載電流、鐵心磁通，而感應電壓超前 $\phi_m < 90^\circ$ ，另磁滯現象顯示激磁電流(i_0)超前磁通(ϕ_m) $< \beta^\circ$ ，具有非正弦波時變特徵，可將 i_0 分解為與磁通 ϕ_m 同相位之 i_m 及與感應電壓 e 同相位之 i_h ，如圖 2 所示；圖中第一象限 OABDO 之區域顯示磁路之能量損失，ABDEFIA 區域顯示磁滯迴圈所有的損失能量，此一損失能量與 i_h 有關。

在磁滯曲線上亦顯示激磁電流 i_0 與磁通 ϕ_m 之間的關係，例如激磁電流 i_0 由最大值驟然降至零時，磁通 ϕ_m 將不隨正常磁滯曲線遞減至零，而暫停留於 C 點，顯示出變壓

器在停電後，鐵心中存有殘磁，若復電後，變壓器鐵心未能去磁，可於殘磁上形成另一磁滯迴圈，導致感應電壓瞬時波形中，存有直流分量，另殘磁現象亦為討論變壓器暫態激磁湧入電流響應基礎。

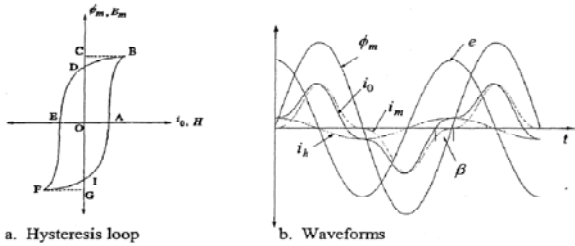


圖2. 磁滯曲線及v-i-φ波形

四、 電路參數及建立模型

在比壓器故障案例分析之 GIS 匯流排比壓器電路組成，包含匯流排、線路側斷路器、匯流排聯絡斷路器之極間電容與三相 Yyn 結線之比壓器電感；斷路器主觸頭於閉合位置時，匯流排受電中，極間電容處於旁通短路狀態，此時系統電壓直接對比壓器一次側提供激磁電流；其次，斷路器於開啟狀態，系統電源、極間電容與比壓器電感形成 L-C 串聯電路，比壓器一次側激磁電流與此 L-C 串聯電路阻抗有關；線路側或聯絡斷路器改變為啟斷狀態時，斷路器主觸頭於分離瞬間，其極間電容與比壓器電感立即形成 L-C 串聯電路，匯流排仍處於帶電狀態；#1~2 匯流排比壓器與極間電容電路，系統操作與#1~2 比壓器連接狀態，如圖 3 所示比壓器激磁電流-磁通值，如表 1 所示，激磁曲線如圖 4 所示；依據 GIS 製造廠提供之 GIS 及比壓器技術資料，整理相關參數及建立 ATP 模型，模擬電路如圖 5 所示，電路元件含斷路器極間電容、比壓器非線性電感、二次側負擔及鐵磁共振抑制器 ZD 等，依變電所 161 kV 匯流排停復電操作模式，線路停電或啟斷連絡斷路器之模擬結果，如圖 6 所示，圖中顯示比壓器二次側電壓維持正弦波，共振頻率未改變(系統頻率等於共振頻率)，惟直流成分改變其正負週波之對稱性。[4][5]

- (1) 氣體絕緣比壓器額定電壓：161/√3 kV/115-66.4 V/115-66.4 V/66.4 V、0.3 ZZ/0.3 ZZ/0.3 Z、BIL 750 kV；規格之 ZZ 符號表示額定負擔為 400VA，Z 符號表示額定負擔為 200VA。
- (2) 一次側及二次側電感為 $L_p=41157$ mH、 $L_s=0.02128$ mH。
- (3) 斷路器於啟斷狀態下，極間電容為 2600 pF，氣體絕緣開關設備對地電容值為 800 pF；66.4 V ZD(抑制器)之阻抗值為 0.12~0.42 Ω，115 V ZD(抑制器)之阻抗值為 0.93 Ω。

- (4) 由廠家提供之比壓器激磁電流-磁通量對應數值(如表 1)，轉換為激磁曲線，激磁曲線顯示激磁電流在 86.72 mA 時，比壓器鐵心已逐漸進入飽和區域中。

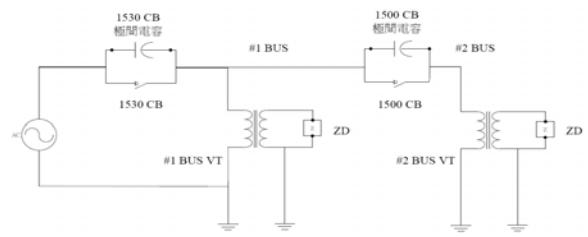


圖3. #1~2匯流排比壓器與斷路器極間電容之組成電路

i	0.00087	0.00339	0.01239	0.02478	0.04542	0.06194	0.08672	0.13214	0.16462
φ	189.14	378.29	491.77	567.43	643.09	680.92	718.74	756.57	758.46

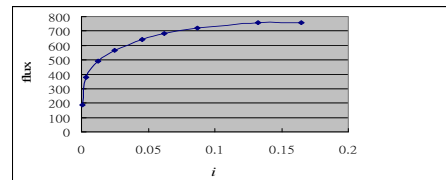


圖4. 比壓器激磁曲線

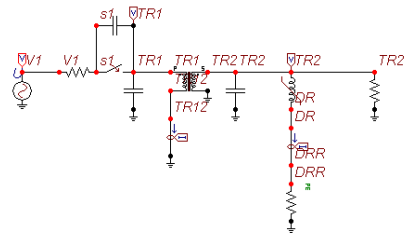
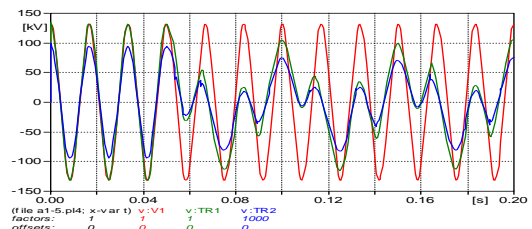
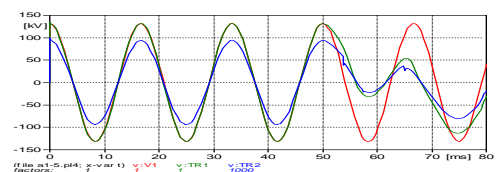


圖5. ATP模擬電路



(a)



(b)

圖6. VT一、二次側電壓響應模擬結果

五、比壓器動態響應量測與分析

2007年11月間於某發電廠161 kV開關場進行MOF VT動態響應試驗，以線路正常停電操作模式為試驗基礎，檢討分析比壓器之動態響應；其次於配電變電所161 kV匯流排停復電操作中，以比壓器二次側電路裝設新形式ZD之狀態，檢討比壓器之動態響應。

1. 比壓器二次側額定R-L負擔之共振響應

在比壓器二次側負擔為R-L被動元件情況下，系統電壓經斷路器斷口之極間電容與比壓器一次側繞組形成L-C串聯電路後，a、b相電壓值顯示為0.75 pu；長時間之三相電壓及c相二次側負擔電流波形，如圖7所示；展開相關記錄波形後，顯示c相電壓升高至2.21 pu，電壓波形發生畸變，因過激磁而令其鐵心磁路進入飽和區域，其二次側負擔電流波形發生嚴重畸變，顯示二次側負擔之L被動元件因過電壓、過激磁易進入飽和區域；記錄波形如圖8所示。

反之VT運轉點於線性區域，其二次側電壓與負擔電流之波形皆可維持正弦波，如圖9所示；比壓器於線性區間之頻域頻譜以基波為主，不含諧波成分，如圖10所示；本項檢測分析結果顯示：L-C串聯阻抗之電路電流，可改變VT激磁電流及感應電壓值；激磁電流升高後，可導致VT進入飽和區域，鐵心電感因而降低，串聯電路之電流再升高，令比壓器鐵心磁路，更深入飽和點。分析結果顯示此現象，屬基波共振模式。

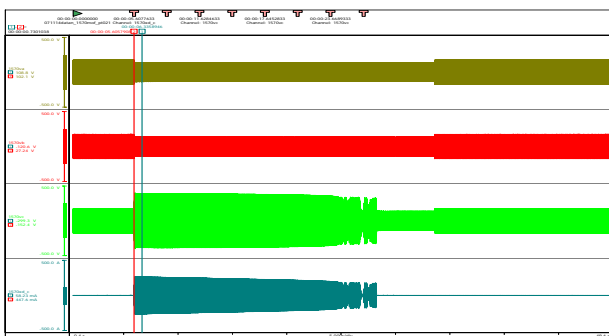


圖7. DS啟斷後MOF PT三相電壓及c相ZD電流波形

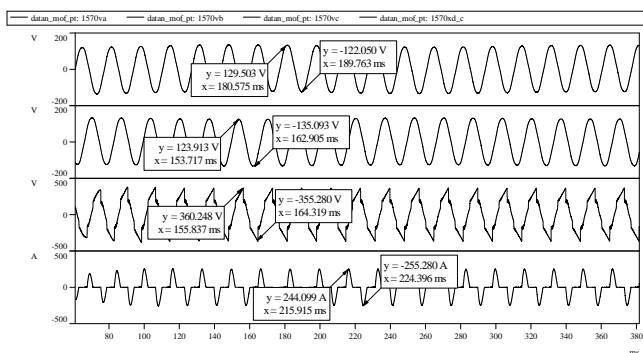


圖8. DS啟斷後，MOF VT三相電壓及c相二次側負擔電流波形，c相電壓及電流過激磁畸變波形

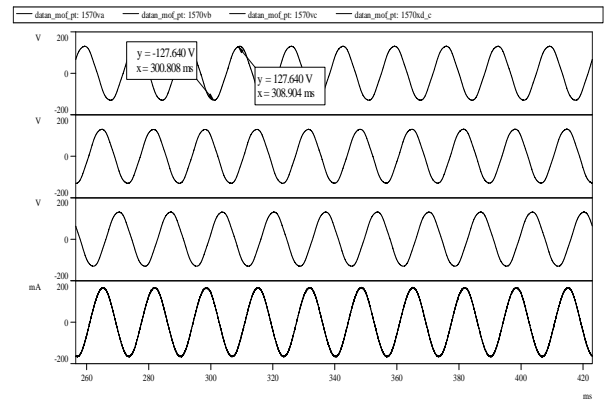


圖9. DS啟斷後，MOF VT於線性區間之三相電壓及c相二次側負擔電流波形

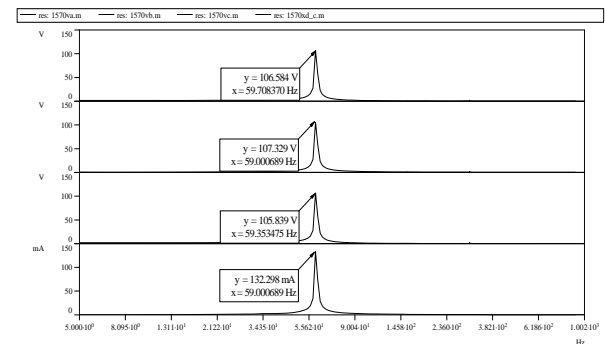


圖10. DS啟斷後，MOF VT於線性區間之三相電壓及c相二次側負擔電流頻譜

2. 比壓器二次側負擔含ZD之共振響應

隔離開關啟斷前，a相二次側峰值電壓為 ± 93.5 V，均方根值為66.5 V；隔離開關啟斷後，VT二次側三相電壓波形畸變持續時間分別為 ϕ a 857.4 ms、 ϕ b 238.4 ms、 ϕ c 523.1 ms。VT在此振盪期間，三相電壓幅值，如表2所示；三相電壓振盪波形及ZD電流波形，如圖11~12所示，在此振盪期間，三相VT二次側電壓正負週波瞬時波形不對稱，顯示波形中含有直流成分。

以a相波形記錄為例，隔離開關啟斷後，a相比壓器二次側瞬時電壓，超越 ± 93.5 V共有14次，其中過電壓最大值及最小值為122.967 V過電壓1.315 pu，-133.908 V過電壓1.432 pu；電壓在此振盪期間電壓瞬時值，呈現出正負週波不對稱，波形中含有直流成分，顯示鐵心磁路運轉點偏移零點。電壓波形中的直流分量，將對時域與頻域轉換造成次諧波之影響。本文以電壓對時間的微分方程式濾除直流成分；a相電壓原始波形及其瞬時值對時間微分後之波形，如圖13所示，圖中電壓幅值及相位受到ZD作用而驟然改變時，微分值亦可顯示對應之變化速率；進一步將微分值轉換為頻域時，顯示頻譜以基本波、五次、七次諧波為主，a相電壓頻譜，如圖14所示。分析結果顯示此一現象，亦屬基波共振模式。

表 2. DS 開啟後 VT 二次側三相電壓數值記錄

	V _m 161 kV	V _{bn} 161 kV	V _{cn} 161 kV	備註
From: 00:00:45.264 To: 00:00:46.143, Duration: 879.800 ms, Samples: 8799.				
Mean :	-25.264 mV	283.332 mV	70.558 mV	VT 一/二次側電壓比: 1400/1
Std Dev :	50.148 V	40.846 V	45.545 V	
RMS :	50.146 V	40.844 V	45.542 V	
Maximum :	122.967 V	114.417 V	113.092 V	
p.u.	1.31	1.22	1.21	
At time :	00:00:45.293	00:00:45.337	00:00:45.382	
Minimum :	-133.908 V	-86.775 V	-119.917 V	
p.u.	1.43	0.92	1.28	
At time :	00:00:45.551	00:00:45.312	00:00:45.773	

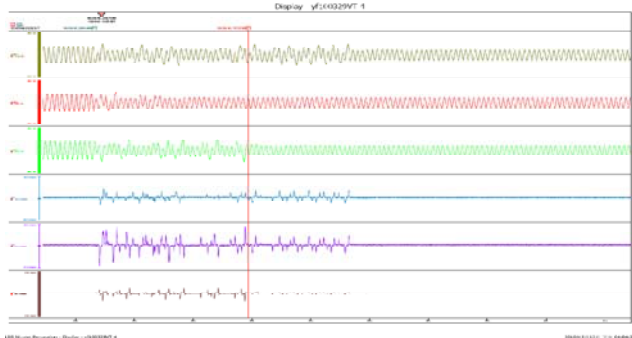


圖 11. DS 開啟前/後，三相 VT 二次側電壓、ZD 電流波形

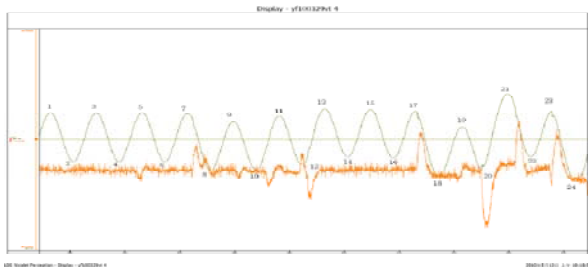


圖 12. VT a 相二次側電壓及 ZD 電流波形

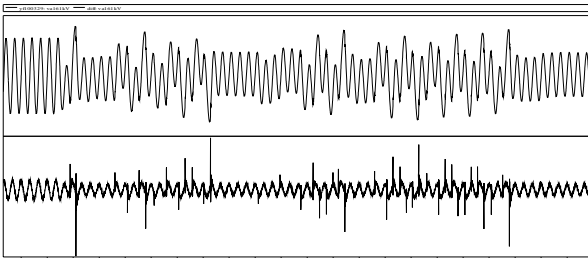


圖 13. a 相二次側電壓及其微分之波形

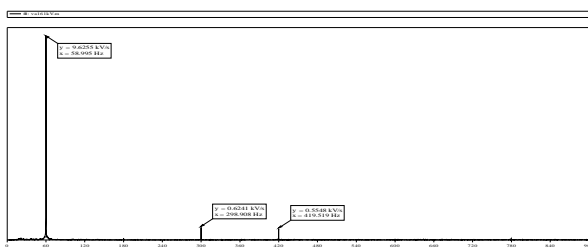


圖 14. a 相二次側電壓頻譜

六、結論

電力系統中的各型變壓器，一般應用於額定電壓及頻率之運轉情況中。在此條件下，產生額定激磁電流，建立磁通及一次繞組之感應電壓，亦即激磁電流決定繞組感應電壓值。161 kV 匯流排於停電操作時，斷路器於開啟瞬間，

即形成匯流排透過連接斷路器極間電容與比壓器一次側迴路電感形成一 L-C 串聯電路。在此動態響應過程中，電路阻抗受到頻率影響較電壓為大；若電路阻抗於斷路器開啟操作動態響應中阻抗降低，系統電壓將提高串聯電路上的電流，因此可導致比壓器過激磁，而進入磁飽和區域。比壓器進入磁飽和區域後，其電感視飽和嚴重程度而亦形降低。過激磁亦同時引起繞組感應電壓升高，產生過電壓、過電流、波形發生畸變、鐵心與繞組過熱等異常現象。

依據比壓器於現場檢測分析結果，屬基波共振模式，而波形中的直流成分，係因 ZD 動態負擔所引起，改善建議事項臚列如下：

1. 斷路極間電容與匯流排對地電容之分壓比為 0.76，於斷路器開啟動態響應中，因阻抗變動，易導致比壓器磁飽和；設備製造廠家宜依斷路器參數，慎選比壓器配件，避免串聯電路阻抗變動，改變比壓器磁路運轉點。
2. 在 ZD 元件觸發後，比壓器電壓驟升至 1.3 pu，二次電壓仍維持正弦波形，顯示比壓器磁路並未發生側鐵磁共振。
3. 現行 ZD 屬主動式負擔，於電壓相位 $\pm 90^\circ$ 觸發時，令比壓器運轉點偏移，並產生直流分量，引起電壓波形持續振盪。本次試驗 VT 二次側電壓波形變動時間達 3.885 秒，顯示 ZD 主動式負擔觸發性能仍有改進與提升的空間。
4. GIS 於設計試驗階段，須考慮 GIS 正常運轉操作程序之各種啟閉結構，確定設備各個組成元件間的匹配性。

參考文獻

- [1] Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems," John Wiley & Sons, INC. pp. 116-122, 393-399.
- [2] "Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients- Part III: The Study of Ferroresonance", by Slow Transients Task Force of the IEEE Working Group on Modeling and Analysis of Systems Transients Using Digital Programs, Chair M. R. Iravani, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000, pp. 255-265.
- [3] Cadick corporation, "TECHNICAL BULLETIN - 004a Ferroresonance", May 29, 2002.
- [4] TPRI G7.8-2102-9839 "德義 D/S 161kV #1、#2 匯流排比壓器暫態量測"技術服務報告。
- [5] TPRI G7.8-2102-9941 "分析宜府 D/S 161 kV GIS #1、#2 BUS VT 鐵共振試驗"技術服務報告。