

變壓器繞組變形試驗方法及實例

Transformer Winding Deformation Test Methods and Practical Case

陳建勳

Chien-Hsun Chen

韓佳佑

Gia-Yo Han

林昱宏

Yu-Hung Lin

周至如

Chih-Ju Chou

國立台北科技大學電機工程學系

台灣 台北市

Department of Electrical Engineering
National Taipei University of Technology
Taipei, Taiwan

yoshine76@gmail.com

s49130153@yahoo.com.tw

cjchou@ntut.edu.tw

摘要

變壓器繞組常受到大電流或突波電流的衝擊而發生變形，一旦發生變形而未能自行復原時將使變壓器加速劣化而故障，故若能對繞組的變形加以檢測，則對判斷變壓器的內部狀況之瞭解提供有力的資訊，以便進行預防維護，防範事故於未然。傳統上常做的變壓器維護試驗項目包括絕緣電阻、介質電力因數、線圈電阻及匝比試驗等，由過去試驗的經驗顯示這些試驗項目的結果，並未能反應繞組的變形。為此，本文首先介紹目前被採用的繞組試驗方法，包括低壓脈衝法及頻率響應分析法，其中頻率響應分析法具有較成熟的技術，將在文中有較詳細的介紹包括其原理及實測時的注意事項，最後將舉一實例以說明大型變壓器在承受故障電流後產生的變形，可在頻率掃描下的頻率響應曲線中反應出來，值得參考。

關鍵詞：變壓器、繞組變形、頻率響應分析

Abstract

The transformer windings are usually forced to deformation by the impacts of large current and surge current. If the winding can not restore by itself after deformation, then the transformer will accelerate to deterioration and even failure. Thus, the winding deformation information will help to realize the situations in the transformer and further contribute to preventing maintenances for transformer. However, from the past experiences, the conventional transformer tests such as insulation test, dielectric factor test and winding coil resistance and turn ratio tests can not response to transformer winding deformation. In this paper, two test methods of transformer deformation are first described which include low voltage impulse (LVI) method and frequency response analysis (FRA) method, where the FRA has developed to a useful technology on practical transformer winding deformation test. The principle and test method of FRA will be illustrated in detail. Finally, a practical case of winding deformation of large transformer after the impact of fault current are tested based on FRA. The frequency response curves of windings under the frequency scan with respect to the transformers with and without fault current impacts had show that the winding deformation due to fault current is evident.

Keyword：Transformer Winding Deformation、Frequency Response Analysis

I、前言

變壓器在電力傳輸上扮演著非常重要的地位，若在平时運轉中突然發生故障不但會使電力轉供發生困難，嚴重時更會導致停電事件。變壓器在運轉過程中，不可避免的要受到各種故障短路電流的衝擊，一旦故障發生在變壓器出口附近，變壓器將承受巨大且不均勻的軸向和徑向的應力電動作用。如果繞組內部機械結構存在薄弱環節，必然會發生繞組扭曲、凸出與凹陷或位移等變形現象，嚴重時將會發生突發性故障情形。變壓器為配電設備中極為重要之設備之一，其安全性及穩定度將直接影響供電品質。

變壓器因具有轉換電壓高低之功能，被廣泛應用於電力系統的每一個角落。由於變壓器的功能在電力系統中屬於樞紐位置，發生問題時牽連甚廣，故其平日之保養及維護格外重要，變壓器繞組變形為變壓器事故之隱形殺手之一，精確及有效率的保養及檢測是不可或缺的，因此積極的展開變壓器繞組變形測試並有計劃的進行檢修，不但可節省大量人力、物力，對防止變壓器故障事故有重大幫助。

由於繞組變形對變壓器和電力系統運行的嚴重危害，而以往的試驗方法又不能有效發現這類缺陷，只能通過吊檢來驗證，這不僅要花費大量的人力物力，而且對變壓器本身也有一定的危害性；況且在現行的電力系統運行情況下，大型變壓器的長時間停電也是很困難的。因此能在現場不吊罩情況下快速測量繞組內部變形的頻率響應法提出後，得到國內外有關部門的重視並積極展開這方面的研究工作。

II、繞組變形對變壓器危害及變形原因

變壓器在發生短路故障電流衝擊時，繞組發生局部變形後即使沒有立即故障，也會損傷，如：

1. 絕緣距離改變，固體絕緣受到損傷，導致部分放電，當發生雷擊等過電壓時可能就引發匝間短路事故，甚至正常運轉下由於長期部分放電而導致絕緣擊穿故障。

2. 繞組機械結構變薄弱，再次遭受到短路故障衝擊時將承受不了巨大的電磁應力而發生事故。作用在變壓器的電磁應力大致上可分為橫向力及縱向力兩種：

橫向力：作用力方向取決於線圈相互位置及其電流方向，以雙線圈變壓器而言，其作用應力使得外部線圈向外拉，內部線圈向內緊壓，其應力若超過線圈的屈服點將導致永久變形，出現經常見到的梅花狀或鼓包狀繞組變形現象。

縱向力：當線圈不等高時或磁場分佈不均勻會引起縱向

力(比橫向力更具破壞力)，它可能會使線段和線匝往豎直方向彎曲。

隨著負載的增加短路故障電流的影響更大，其縱向力及橫向力產生的變形狀況也更明顯，而繞組變形測試法因其對繞組些微變化可很靈敏地測出，對於上述的變形狀況在測量研判上有極大的助益，因此目前世界各國都在積極發展繞組變形故障診斷研究，以期能在變壓器發生故障前就能預先得知[1-4]，如此不僅能降低維護成本，更能避免因事故而需付出的巨額損失。

III、繞組變形檢測方式[1-4]

早期使用集中參數檢測法，它是經由測量繞組的漏電抗、阻抗等電氣參數的變化來判斷變壓器繞組是否發生變形，但其檢測靈敏度相當低。近年來則利用網路分析技術，透過測量網路函數 $H(j\omega)$ ，並對測量結果作三相間及與以往紀錄作比對，可有效地診斷出繞組變形現象[1-4]。當變壓器內信號超過1kHz，鐵心起不了作用，每個繞組可視為由電阻、電感、電容所組成的分佈參數的雙埠網路。設繞組單位長度的分佈電感、縱向電容及對地電容分別為 L 、 K 、 C ，忽略繞組電阻(因為在高頻時其單位電阻值遠小於單位感抗及容抗值)，則等效電路如圖1所示，當繞組發生縱向或橫向變形變化時，則網路的 L 、 K 、 C 值勢必會改變，其網路函數特性曲線跟著改變。利用網路函數 $H(j\omega)$ 來診斷變壓器繞組變形的變方法，常見有低壓脈衝法(Low Voltage Impulse) 和頻率響應分析法(Frequency Response Analysis) 兩種，前者為早期所使用的時域分析技術，後者則為頻域分析，是近年所提出並被廣泛採用的測試方法[1]。

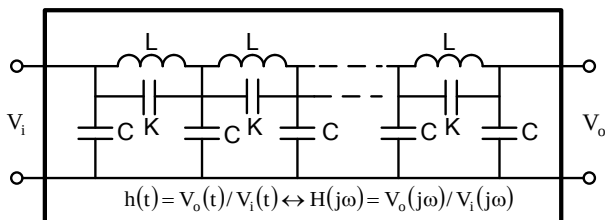


圖1 分佈參數模式下單相變壓器等效電路

3.1、低壓脈衝法(LVI) [1-4]

於變壓器繞組一端對地加入一標準脈衝電壓號，同時測量輸入端及輸出端信號並作相關處理(如圖2示)，最後可得到網路函數 $h(t)$ 及其傅立葉轉換(Fourier transform) $H(j\omega)$ 如下：

$$h(t) = V_o(t)/V_i(t) \quad (1)$$

$$H(j\omega) = V_o(j\omega) / V_i(j\omega) \quad (2)$$

式中：

$V_i(t)$ 為輸入脈衝電壓

$V_o(t)$ 為輸出電壓(脈衝響應之輸出電壓)

$V_i(j\omega)$ 及 $V_o(j\omega)$ 分別為 $V_i(t)$ 及 $V_o(t)$ 之傅立葉轉換

LVI 法採用時域脈衝分析技術，再將測得結果利用數學運算轉換成頻率-增益對應曲線，此法於現場使用時較易受到雜訊干擾，尤其是在高頻部份，並且還有脈衝傳遞過程中的折射及反射、脈衝信號源不穩定性的問題，故現場使用往往較難保證測試結果的重覆性。

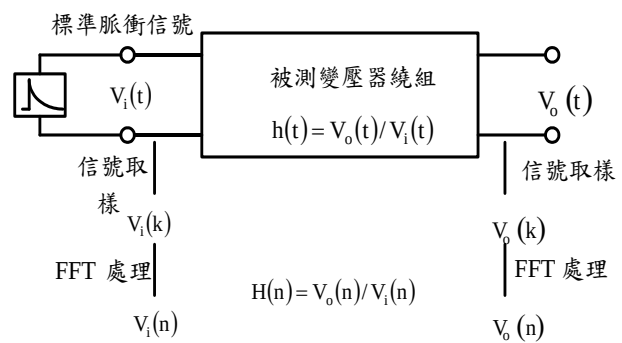


圖2 LVI 法測試原理

3.2、頻率響應分析法(FRA) [1-4]

頻率響應分析法是利用精確的掃頻測量技術，通過測量變壓器各個繞組的頻率響應特性變化，並對測試結果進行縱向或橫向的相關性比較，即相當於比較變壓器繞組的結構特性“指紋”圖。如將變壓器遭受短路衝擊後測得的各個繞組的頻率響應特性與原始圖譜(或短路前測量的圖譜)比較，並綜合考慮變壓器的運行情況，如是否經常受近區短路衝擊、短路電流大小等，從而診斷繞組是否存在變形。在進行變壓器繞組變形試驗過程中，我們發現頻率響應分析法具有很高的靈敏度。

在繞組的一端加入掃描頻率電壓信號 V_s (此信號可輸出不同頻率的正弦波(三角波、方波)電壓信號)，透過數位化紀錄及檢測掃描頻率下，測量並紀錄繞組兩端對地(變壓器外殼)電壓信號 $V_i(n)$ 及 $V_o(n)$ ，最後可得到被測變壓器繞組對第 n 個測試頻率的網路函數 $H(n)$ 如下式：

$$H(n) = 20 \log(V_o(n)/V_i(n)) \text{ (dB)} \quad (3)$$

式中：

$V_i(n)$ 為第 n 個測試頻率之輸入電壓之傅立葉轉換

$V_o(n)$ 為第 n 個測試頻率之輸出電壓之傅立葉轉換

網路函數 $H(j\omega)$ 特性主要取決於內部分佈電容、電感參數，其特徵如下：

- $f < 10\text{kHz}$ ：頻率響應特性主要由線圈的分佈電感決定($X_L = \omega L \downarrow$)，諧振點較少，對分佈電容變化較不敏感。
- $f > 1\text{MHz}$ ：繞組分佈電感被分佈電容所旁路，諧振點減少，對分佈電感變化較不敏感，隨著測試頻率的增加，雜散電容的影響也逐漸明顯。
- $10\text{kHz} < f < 1\text{MHz}$ ：繞組分佈電容及電感均發生作用，頻率響應也有較多的諧振點，能靈敏有效地反映出繞組分佈電感及電容的變化情形。

由上可知理想掃描頻率應在 $10\text{kHz} < f < 1\text{MHz}$ ，在此範圍內最好有 1000 個左右的頻率掃描點，如此可獲得較佳的測量結果。由文獻[1-4]得知利用此法測量變壓器可快速檢測出相當於短路阻抗變化 0.2%或縱向尺寸變化 0.3%的繞組變形現象。圖譜之間的相互比較，主要是比對各諧振波峰的移動情況。而幅值的變化，特別是高頻部分，由於易受外界因素的影響，在判斷時相對只有參考作用。本文首先對同側的三相繞組的頻率響應特性曲線進行比較，如果曲線相似程度較佳，諧振波峰基本重合，則判斷不存在繞組變形。若三相繞組間的相似性不好，則與原始圖譜比較，若兩次測量結果接近，可判斷繞組無變形。如無原始圖譜，則應與同型號同廠家同批次的變壓器的測量結果比較。現階段技術，繞組變形診斷仍停留在根據頻率響應特性的變化情況來判斷

繞組是否變形及變形的嚴重程度，尚難根據頻率響應特性曲線判斷繞組變形的具體部位。

FRA法把不同頻率的正弦波電壓信號 V_s 加到變壓器繞組的一端，經由雙通道檢測器同時紀錄該端及繞組對輸入及輸出端電壓信號 V_i 、 V_o 的波形，以進行相對應的數位化處理，以得到繞組的振幅—頻率及相位—頻率特性曲線。

$$H(f) = 20 \log(A_{V_o}(f) / A_{V_i}(f)) \quad (4)$$

$$\phi(f) = \phi_{V_o}(f) - \phi_{V_i}(f) \quad (5)$$

式中：

A_{V_i} 、 A_{V_o} ：輸入／出端點之電壓大小

ϕ_{V_i} 、 ϕ_{V_o} ：輸入／出端點之相位角

由於FRA診斷繞組變形主要原理是建立在比較繞組頻率響應特性變化的基礎上，相當於比較繞組結構特徵的指紋圖(因每一台變壓器其繞組結構特性、空間距離或多或少不盡相同，其測得的頻率響應圖形一定不同，若每台變壓器出廠時即建立並附此圖，則好比人類之指紋一出生即伴隨其一生)，故測試儀器要求極高的靈敏度和工作穩定度，其測試原理圖形同圖2(將輸入標準脈衝電源改為掃描頻率電壓源)，另外再多了一些增加測量穩定度及抗雜訊干擾的設計技巧：

- 數位鎖相(digital phase lock)技術：確保變壓器輸入端之掃描頻率穩定，以便與測試結果進行比對。
- FFT數位濾波技術：增強測試系統的抗雜訊干擾能力。
- 快速、準確性高的A/D取樣系統：使測試結果有足夠高的靈敏度及測試重覆性。
- 相關係數R的設計：測試後的圖形可根據相關係數R值的大小來進行量化判斷(一般R值在正常狀況下均大於1)，至於相關係數定義如下[2]：

令兩長度為N的函數序列分別為 $X(k)$ 、 $Y(k)$ ， $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ，且 $X(k)$ 、 $Y(k)$ 所有數值均為實數，則

1. 各函數序列之變異數(Variance)為：

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2 \quad (6)$$

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right]^2 \quad (7)$$

2. 兩函數序列之共變異數(Covariance)為：

$$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right] \times \left[Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right] \quad (8)$$

3. 兩函數序列之負相關係數為：

$$\rho_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sqrt{D_x D_y}} \quad (9)$$

4. 兩函數序列之相關係數為：

$$R_{xy} = \begin{cases} 10 & 1 - \rho_{xy} < e^{-10} \\ -\log_{10}(1 - \rho_{xy}) & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

3.3、FRA測試注意事項[3]：

由於本測試方法具有極高的靈敏度，故測量時須注意以下五點：

1. 變壓器套管相連母線對地雜散電容並非定值，儘可能拆除母線並遠離變壓器套管，以降低雜散電容的

影響。

2. 為了便於相互比較，應按照統一規定的試驗接線方式和試驗順序進行測試。
3. 測試線本身的雜散電容也會影響頻率響應測試結果，故要使用專用的測試線，以便往後資料比對判斷。
4. 當發現試驗結果異常時應首先檢查儀器和試驗接線並重複測量一次，前後兩次測量結果應相符，以確保試驗結果的可靠性。接地線應接地良好，建議用螺母緊固在鐵芯接地線上，不可隨意纏繞，因為接地線接地不良可能導致測試結果的重複性不好。
5. 繞組變形測試最好安排在所有直流試驗項目之前進行，以避免累積電荷的影響。
6. 繞組頻率響應特性與分接頭位置關係很大，儘可能將它放到最高的位置，以便整個繞組進行測量，並便於管理比對。

3.4、測試接線圖[3]：

根據套管高度選用合適引線長度的接線夾具，分別連接在輸入單元與檢測單元端，避免測量單元與套管接觸。通過裸銅線將輸入單元與檢測單元的接地端以及變壓器油箱外殼接地位置進行可靠的連接。通過同軸電纜將輸入單元的 U_s 、 U_1 端以及檢測單元的 U_2 端分別與測試儀器的對應埠連接。確認輸入單元及檢測單元達到可靠的接地。然後按圖3所示原則選定電源端(輸入端)和輸出端(測量端)，並將輸入單元與檢測單元牢固的夾接在變壓器的電源端與輸出端，通過通訊電纜將測試儀器的通訊介面與電腦的平行介面連接。

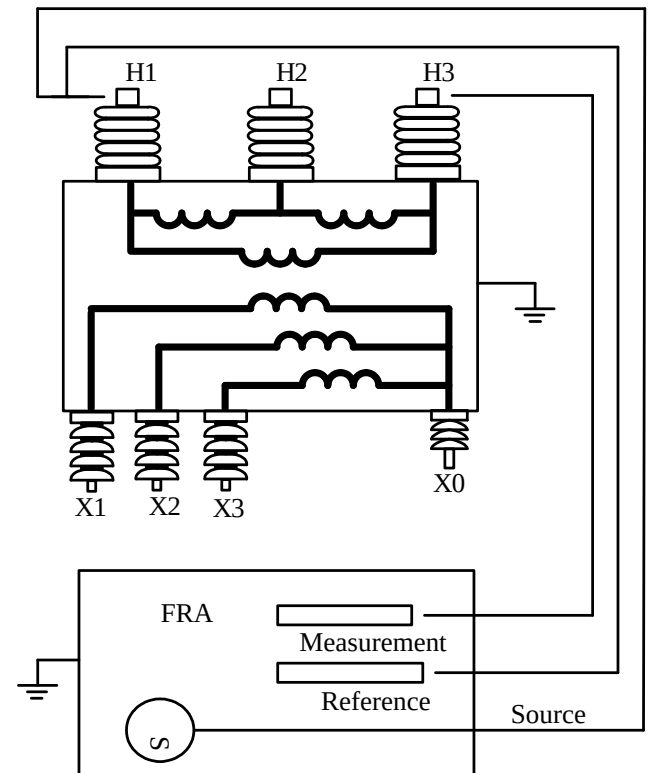


圖3 測試儀器接線圖

4.5、測試相關係數判斷：

測試完成後可由儀器檢測出相關繞組變形數據，可

經由表 1 來判斷繞組變形程度。

表 1 相關係數判斷數據

繞組變形程度	相關係數		
	低頻段 R_{LF}	中頻段 R_{MF}	高頻段 R_{HF}
嚴重變形 (不能投運)	$R_{LF} < 0.5$		
明顯變形 (安排檢修)	$1.0 > R_{LF} > 0.5$	$R_{MF} < 0.5$	
輕度變形 (加強監視)	$2.0 > R_{LF} > 1.0$	$0.5 < R_{MF} < 1.0$	$R_{HF} < 0.5$
正常繞組	$R_{LF} > 2.0$	$R_{MF} > 1.0$	$R_{HF} > 0.5$

IV、繞組變形測試實例

某一石化公司變壓器二次側事故，造成開關跳脫，業主要求測試繞組變形試驗以確認變壓器有無受損。因為此變壓器並無歷史背景測試資料，故選擇同一年份及同型式變壓器作為比較參考。變壓器規格如下：

電壓：11400V/480V，容量：2000kVA，

變壓器接線：△-Y，製造年份：1995

4.1、測試結果如下：

受故障電流衝擊後之變壓器及未受故障電流衝擊之同型變壓器繞組變形測試數據相關係數 R 如表 2 及表 3 所示，其中 R_{12} 、 R_{23} 及 R_{31} 分別代表 a 相對 b 相、b 相對 c 相及 c 相對 a 相所量測之係數，頻率響應曲線如圖 4 至圖 7 所示。

表 2、受故障電流衝擊之變壓器測試相關數據 R

	高壓側			低壓側		
	R_{12}	R_{23}	R_{31}	R_{12}	R_{23}	R_{31}
低頻 (0-100kHz)	2.07	2.60	2.60	0.73	1.50	0.93
中頻 (100-600kHz)	0.95	2.20	1.04	1.24	2.56	1.29
高頻 (600-1000kHz)	0.53	2.58	0.43	2.03	1.91	1.41
全頻 (0-1000kHz)	1.56	2.59	1.57	2.39	2.36	1.85

表 3、未受故障電流衝擊之同型變壓器測試相關數據 R

	高壓側			低壓側		
	R_{12}	R_{23}	R_{31}	R_{12}	R_{23}	R_{31}
低頻 (0-100kHz)	3.07	2.20	2.15	1.45	0.62	0.90
中頻 (100-600kHz)	1.86	1.33	1.45	2.54	1.68	1.76
高頻 (600-1000kHz)	1.27	0.77	1.07	1.59	1.23	2.11
全頻 (0-1000kHz)	2.38	1.88	2.02	2.08	1.71	2.53

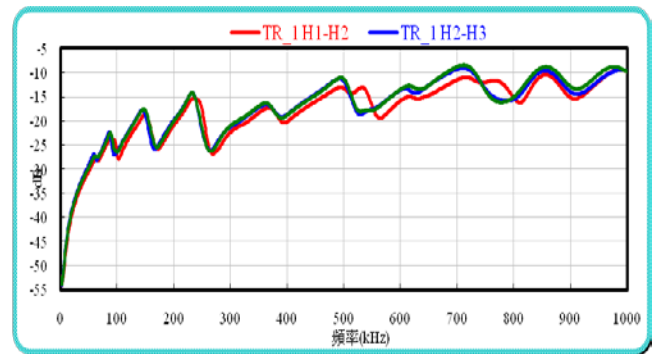


圖 4. 受故障電流衝擊之變壓器高壓側繞組變形頻率響應曲線

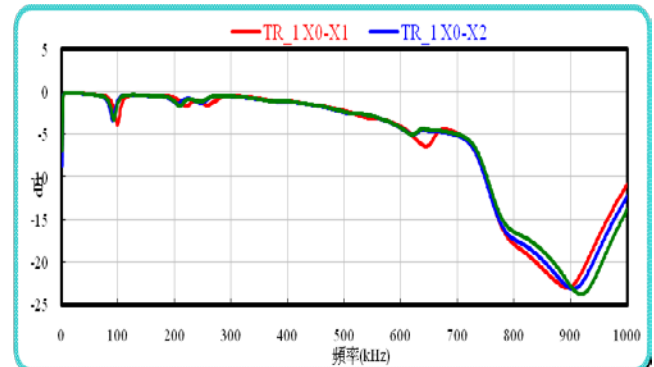


圖 5. 受故障電流衝擊之變壓器低壓側繞組變形頻率響應曲線

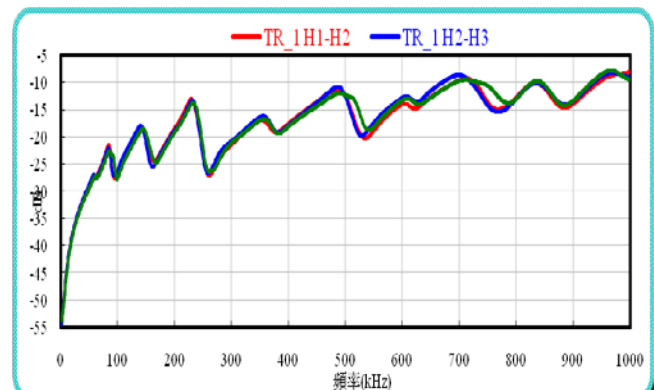


圖 6. 未受故障電流衝擊之同型變壓器高壓側繞組變形頻率響應曲線

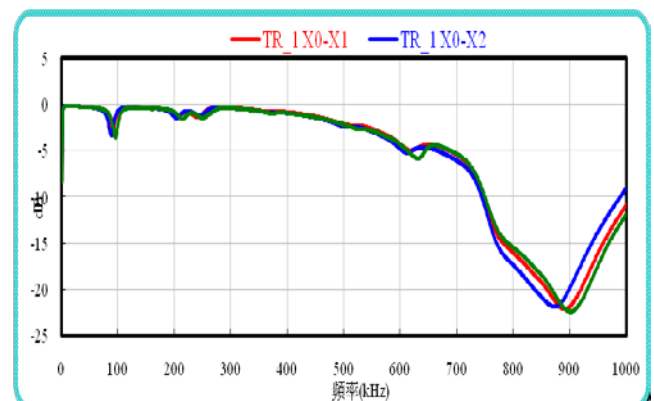


圖 7. 未受故障電流衝擊之同型變壓器低壓側繞組變形頻率響應曲線

4.2、測試結果分析：

從圖 4 至圖 7 中發現 H1H2 相在此次測試中，分別在 100kHz、500kHz、750kHz 處有著明顯差異程度，雖然本變壓器首次作繞組變形試驗，但仍可作三相間相互比較，及與同類型變壓器比較，此繞組應已產生壓縮與拉伸之變形作用，由此可知本變壓器已存在輕微之繞組變形。

V、結論

繞組變形測試為一種對變壓器新的測試方法，可以及時有效地發現變壓器由於受短路衝擊後造成的繞組變形缺陷，或是長時間系統共振導致繞組位移、鬆動脫落及鐵心故障等，並通過及時的檢修，避免重大事故的發生。繞組變形報告類似人類指紋圖，在作判斷時最好是同線圈與以往量測資料互相比較，其次是同製造廠、同等級、同年份之變壓器對等線圈互作比較，或是三相繞組間互相比較，如此才能追蹤變壓器的位移及變形狀況。變壓器繞組變形測試今後的主要發展方向是盡快建立波形的分析軟體及資料庫，以利往後試驗比對，為變壓器安全運轉及變壓器狀態檢修工作提供依據，以確保變壓器的正常運轉，提昇供電品質及穩定度。

參考文獻

- [1] Dick,E.P.,Erven,C.C.,Transformer Diagnosis testing by Frequency Response Analysis,IEEE Trans PAS-97,No.6,pp 2144-2153,1
- [2] 梁江東、李建建 電力變壓器變形測量與分析，武漢高壓研究所
- [3] 繞組變形試驗儀說明書，得元儀器公司
- [4] 吳春明 變壓器繞組變形試驗之研究 台電工程月刊 vol.672 pp38-49,Aug 2004