

模鑄式變壓器線上/離線局部放電檢測方法比較

The Comparison between On-line and Off-line Partial Discharge Measurement for Epoxy Resin Transformer

邱敏彥
Min-Yen Chiu

李長興
Chang-Hsing Lee

黃智賢
Chih-Hsien Huang

楊智雄
Chih-Hsiung Yang

震江機電技術顧問(股)公司
台灣 新竹市
javis@ms15.hinet.net

摘要

傳統用於模鑄式變壓器之絕緣特性檢測方法為絕緣電阻及電力因數，其缺點為不容易檢測出絕緣物內部之瑕疵。隨著數位儀器之進步，線上局部放電檢測遂變為可行，可用以彌補傳統絕緣狀態檢測之不足。然而，線上局部放電檢測之應用難題為現場環境雜訊遠較工廠或實驗室來得大，而且量測靈敏度會隨量測方式而有所差異。為此，本文使用一具有瑕疵之模鑄式比壓器進行探討，分別使用標準測試法及線上局部放電檢測進行量測。根據量測結果分析其波形、頻譜、以及靈敏度等特性，提供分析人員對於線上局部放電檢測讀值之評判。

關鍵詞：模鑄式變壓器、局部放電、電磁場。

Abstract

Traditional diagnostics of insulation conditions for cast resin transformers are measurements of insulation resistance and dielectric power factors. The weaknesses of these diagnostics are hard to detect the defect inside insulation material, such as void and crack. Complying with the progressing of digital instrument, on-line partial discharge measurement becomes applicable at field. And on-line partial discharge measurement can be used to remedy the deficiency of traditional diagnostics. However, the difficulty of application of on-line partial discharge measurement is the noise level is relatively higher than factory/laboratory, and the sensitivity varies with different measuring strategies. Therefore, this paper tests a cast resin voltage transformer with defect by means of off-line partial discharge (IEC 60270) and on-line partial discharge measurements. Authors record the waveforms, spectrums, and sensitivity of these approaches, and analyze these data. The results show the characteristics of these approaches, and provide useful information for analyst.

Keywords: Epoxy Resin transformer, partial discharge, electromagnetic field.

I. 前言

模鑄式變壓器因比較環保，而且在維護保養簡單之下，目前被廣泛的應用在各變電站裡。由於變壓器的功能常位於電力系統的主要樞紐位置，一但發生事故，所影響的範圍非常的大，若沒有備用電力系統的話，常常影響整個停電的時間，因此預知變壓器絕緣材料劣化的

維護工作就顯的非常重要。

模鑄式變壓器的定期維護工作，常用的測試方法以絕緣電阻、介質功率因數、絕緣耐壓等方式來檢測變壓器絕緣材料的好壞。然而，此類方法多需要停電，而且效果不是很好[1]，因絕緣劣化所導致之變壓器事故卻未曾少過。探討模鑄式變壓器事故的原因，絕大部分都是層間短路所引起，所以一般常用的絕緣電阻、介質功率因數的測試方法，並沒有辦法檢測出變壓器層間的瑕疵問題。

近年來預知電氣設備絕緣劣化的維護工作，開始被加以重視，其中紅外線熱影像是最早期引進使用的檢測工具之一，而且對於檢測出因熱應力破壞的效果非常的好，但對如變壓器層間的電應力破壞卻效果不佳，因此對於此類型的電應力破壞的檢測，局部放電測試是公認最有效的方法之一。過去局部放電測試因加壓及雜訊的問題，大部分都只有在出廠前在廠內做測試，對於運轉中的變壓器就無法照廠內的方法測試，但隨著科技的進步，局部放電檢測已經可以應用在現場及活電下(on-site/on-line)檢測，近年來已經被廣泛的應用在變電站的各種高壓設備，而且呈現不錯的成效[2]。

依據國際法規 IEC-60270[3]所定義的局部放電測試法，主要是離線式(off-line)的測試法，所定義的頻帶、校正及耦合等等方式，皆跟線上(on-line)的測試方法有點不同，而其他高壓設備國際法規所定義的局部放電測試標準值，也不能應用於線上的測試標準值，雖然 IEC-62478 正在定義現場及活電下利用電磁場及聲音的方法測量局部放電，但是在法規未公佈之前，所有的線上測試方法，在沒有一定的測試標準下，其測試過程及結果就比較會有爭議性，因此本文主要的目的就是比對線上及離線局部放電檢測結果的相關性，並觀察其頻率響應及特性等。

本文使用一具於線上局部放電檢測出有異常放電的模鑄式比壓器，此比壓器電壓等級為 22.8kV，容量為 5kVA，經停電更換後至實驗室利用局部放電標準測試法測試，也同樣檢測出有異常放電訊號，因此使用此具有瑕疵的比壓器來進行試驗，同時使用線上及離線局部放電檢測，並紀錄比較其量測結果，

II. 測試原理

當絕緣材料因受電應力、熱應力及機械應力的影響而老化，或在製作過程中往往會殘留許多雜質與瑕疵，最常見的就是殘留氣泡，基於這些原因常常造成絕緣材料因介電常數的不同而有不均勻的電場分佈，此不均勻

之電場有可能導致部份介質之跨壓超過自身的崩潰電壓，進而發生放電現象。由於此放電現象僅發生在局部範圍而非全部絕緣材料，故一般稱之為局部放電。此放電現象會加速週遭之絕緣材料劣化，最後並造成設備發生短路故障。

一但絕緣材料發生局部放電時，會伴隨著不同的物理現象，如電磁場變化、電壓變化、電流變化等，這些暫態變化頻率從數百 kHz 一直到數百 MHz 不等。傳統的離線測試方法都是使用耦合電容及測量阻抗來直接耦合局部放電的暫態訊號；而非傳統的線上測試法[4]，則利用放電產生的電場及磁場變化，選用適當的感測器來耦合放電的暫態訊號，以下將幾種測試法作詳細的說明。

1. 標準測試法(IEC-60270)

圖 1 是局部放電測試原理的示意圖，其中虛線內是有異常瑕疵絕緣材料的等效電路圖， C_1 是絕緣材料內的瑕疵氣泡的等效電容， C_2 是包圍在氣泡周圍的等效電容，而 C_3 則是材料中完整無瑕疵的等效電容，當式(1) U_1 的分壓大於其崩潰電壓時，就會發生局部放電，一但放電時 C_1 間就視同短路，原本式(2)放電前的 Q_2 電荷量是 C_1 與 C_2 的分壓，表示在放電時式(3) U_2 的分壓就改變成原本的工作電壓 U ，因此 Q_2 的電荷量在放電前後的差以式(4)表示，所以當絕緣材料內部發生局部放電時， C_2 的電荷量會變大，因此電荷會從 C_3 轉移到 C_2 的位置處，然後再回到 C_3 形成一個迴路，這個過程也稱為電荷的補償作用。

$$U_1 = U \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

$$Q_2 = U_2 C_2 = U \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{放電前} \quad (2)$$

$$Q_2 = U C_2 \quad \text{放電後} \quad (3)$$

$$\Delta Q = U \frac{C_1^2}{C_1 + C_2} \quad (4)$$

其中 U 表示工作電壓

U_1 為 C_1 的分壓 U_2 為 C_2 的分壓

C_1 為絕緣材料內的氣泡的電容量

C_2 為包圍在氣泡外絕緣物的電容

Q_2 為 C_2 的電荷量

ΔQ 為放電前後的電荷差

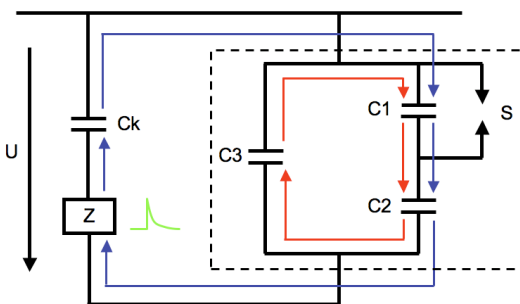


圖 1：標準測試法測試原理

標準測試法是依上述局部放電的原理，如圖 1

所示在停電離線下將耦合電容(C_k)與待測物並聯，當待測物發生局部放電時，由耦合電容同樣補償電荷到放電位置，為了測量此放電的電荷量時，將耦合電容串聯一個測量阻抗，然後由測量阻抗來量測局部放電的放電訊號。

2. 磁場耦合測試法

以電纜頭為例來說明線上局部放電的測試原理，當電纜頭內部發生局部放電時，局部放電的脈衝電流會沿著電纜如行進波般傳導，由式(5)得知暫態電流 $I_E(t)$ 會導致暫態電壓的變化 $U_E(t)$ 。

$$U_E(t) = I_E(t) * Z_W \quad (5)$$

其中 $U_E(t)$ 表示暫態電壓

$I_E(t)$ 表示暫態電流

Z_W 表示電纜的阻抗

局部放電的脈衝電流 $I_E(t)$ 在導線及接地線傳導中會產生磁場，此時可利用電感性感應器，如高頻 CT 和 Rogowski 線圈來感應測量脈衝電流產生的磁場線 $B(t)$ ，這就是磁場耦合的主要原理(圖 2)。

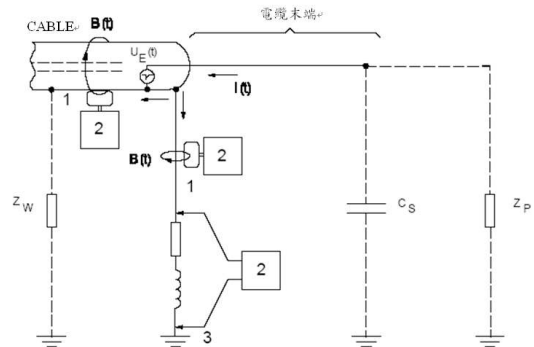


圖 2：磁場耦合等效電路

3. 電場耦合測試法

以終端電纜頭為例來探討電場(電容性)耦合的主要原理，當電纜頭內發生局部放電時，局部放電的脈衝電流 $I_E(t)$ 會產生暫態電壓 $U_E(t)$ ，一部分的暫態電壓會散發在電纜頭的周圍，此時利用電容性感應器，以空氣當雜散電容來測量暫態電壓的變化(圖 3)。

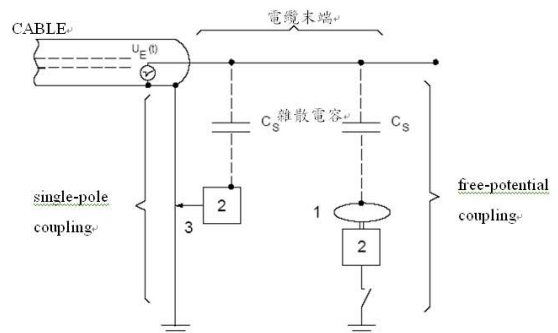


圖 3：電場耦合等效電路

III. 試驗程序

IEC-60044-2[5]針對比壓器局部放電測試的接線法如圖 4 所示，其中 T 是加壓設備，Z 是濾波器，此濾波器的目的是防止從加壓設備過來的干擾雜訊， C_a 是待測

物比壓器。因模鑄式變壓器的接地線不適用於磁場耦合的模式量測，一般都是利用連接變壓器電纜頭的接地線來測試，所以本次試驗在濾波器與比壓器之間銜接一條測試電纜(圖 5)，再利用電纜頭的接地線來耦合局部放電的磁場訊號(圖 6.a)，一般於現場利用接地線測試局部放電時，背景雜訊相當的大，所以提高測量的頻率，進而改善信號與雜訊比，因此本次試驗的磁場感測器採用頻率較高的 UHF 磁場感測器來測試；電場耦合模式則利用電容性感測器靠近比壓器線圈處量測(圖 6.b)。

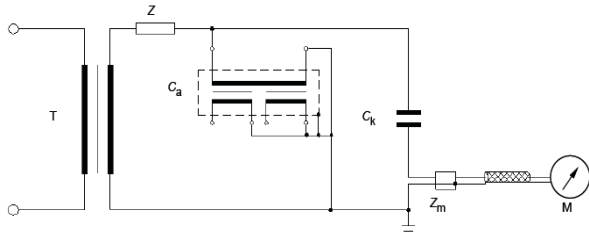


圖 4：比壓器局部放電接線圖

依據標準的測試電壓須加壓至相間電壓的 1.2 倍，其放電量不得超過 20pC，因實驗室的加壓設備為 60Hz，為了防止過壓造成鐵心飽和，所以只加壓至 1.1 倍 25kV。另外為了防止電纜頭放電而影響判讀結果，所以一開始只先對電纜加壓至 25kV，確認電纜沒有放電後再銜接至比壓器測試。

局部放電測試一個最重要的步驟就是校正，校正是為了得到正確的測試值，而且在不同的測試系統也會得到相同的值。標準測試法的校正法是在待測物直接注入一定電荷量，然後由測試儀器去設定與校正器相等的值，但是線上局部放電測試法都在活電下測試，無法在待測物注入校正訊號，所以線上局部放電測試法都是利用比較法來校正，也就是校正訊號直接注入到感測器來校正，此一方法也稱為性能及靈敏度確認(Performance and sensitivity check)。



圖 5：現場實際測試接線圖



a. UHF 磁場耦合模式 b. 電場耦合模式

圖 6：離線式局部放電測試法

IV. 試驗結果比較

本次試驗同時使用三套設備同時紀錄試驗結果，三相的比壓器每一相個別加壓試驗，R、T 相在加壓至 25kV 時，放電量都在 5pC 以內，符合標準值 20pC 以內，表示 R、T 相健全沒有放電；而 S 相一開始先緩慢加壓至 17.8kV 時即開始放電，由標準測試法觀察到啟始放電量為 56pC，然後再加壓至 25kV 持續 30 秒後降壓，降壓時每一 kV 都持續 10 秒，一直到沒有放電為止，表 1 是各個測試法的點火及熄滅電壓比較表，由此比較表可以得知雖然測試法不同，但都得到相同的結果。

表 1：點火及熄滅電壓比較表

測試法	點火電壓	熄滅電壓
標準測試法	17.8kV	13.4kV
磁場耦合	17.8kV	13.5kV
電場耦合	17.9kV	13.4kV

加壓至 25kV 時由標準測試法觀察到此比壓器的放電量達 400pC(圖 7)，遠超過標準值的 20pC，局部放電辨識法大都以放電量與放電角度之間的關係來辨識，從放電圖譜及放電角度約在 330°~100°及 152°~300°之間，以及加壓過程中放電量的變化看來，此比壓器確定有明顯的內部放電的問題；磁場耦合(圖 8)與電場耦合(圖 9)的放電為 720pC 及 2000pC，放電角度及圖譜與標準測試法類似。

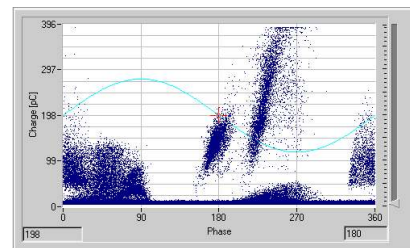


圖 7：標準測試法放電圖譜

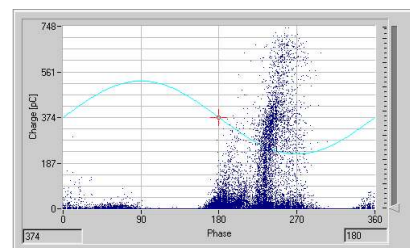


圖 8：磁場耦合測試法放電圖譜

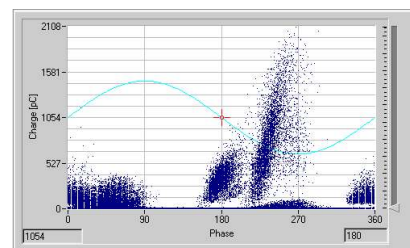


圖 9：電場耦合測試法放電圖譜

線上局部放電測試法所測量結果的值與標準測試法的值相差很大，主要是校正上的不同而產生的差異

性，不見的每次線上局部放電測試法的值都比標準測試法的值大，因線上局部放電測試法採電磁場耦合的方式，所以感測器耦合的位置會影響到測試值的大小，雖然不同的耦合方式會有相同的結果，如靈敏度、放電角度及圖譜等，但是量化的結果在不同的耦合方式下無法比較，只能在相同的耦合方式間比較。

圖 10 是不同的電壓等級的放電量比較，不同的耦合方式會有不同的量化呈現，但大致上電壓與放電量都呈現線性的關係。

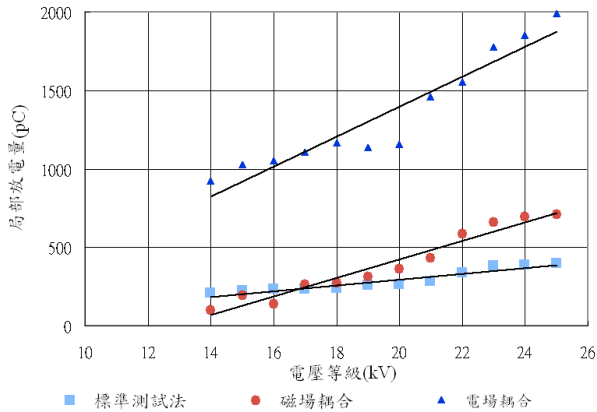


圖 10：放電量比較

IEC-60270 標準測試法是以電荷為測量單位，電荷量是在一定時間內積分的量，不同耦合方式下會有不同的放電波形，其振幅及時間會因不同的耦合方式而不同，從圖 11 的標準測試法所量測的波形，其振盪較小，所以可以使用積分電路計算電荷量，而電磁場耦合量測的波形為振盪波形，若使用積分電路換算電荷量，會得到較大的誤差值，因此線上局部放電檢測多計算其峰值大小來比較放電量的大小

局部放電測試除了以放電圖譜來辨識放電訊號外，還可以使用放電原始波型來做輔助分析，一般以上升時間及振幅來辨別訊號是真的放電還是雜訊，不然就利用來辨別訊號來自遠方或進方，或使用兩只感測器來定位放電位置，因線上檢測常有雜訊干擾的問題，所以線上檢測還有使用頻譜分析來輔助訊號分析。

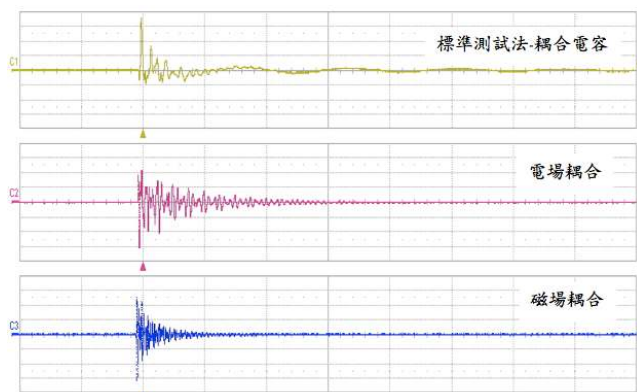


圖 11：測試法波型比較

局部放電引起電壓電流的暫態變化，其頻率從數百 kHz 一直到數百 MHz 不等，屬於寬頻的訊號，如果是 GIS 的話，其放電頻率因 SF6 特性的關係而高達 2GHz。

標準測試法所定義的測量頻率為 1MHz 以下，若於線上局部放電檢測同樣使用 1MHz 以下的頻率來測量的話，可能雜訊遠大於放電訊號，反而增加測量性的困難，因此最新的 IEC-62478 所使用測量的頻帶為 3 MHz – 30 MHz – 300 MHz – 3 GHz, (HF – VHF – UHF)。測量頻帶使用的越低，可測量的距離越遠，如使用在長距離的電力電纜的局部放電定位，就必須使用較低頻的頻帶，但是相對的雜訊也越大，容易造成分析診斷上的困難；而測量頻帶用的越高雜訊就越小，但放電量及放電重複率都會減少，相對的可能需要犧牲某些訊號，不過並不影響最後的測量結果。

影響局部放電頻率的範圍，除了放電位置及放電型態外，主要測量頻帶取決於感測器的頻率響應，標準測試法的耦合電容、高頻 CT、Rogowski 線圈及一些電容性感測器都是使用 HF 頻帶，從圖 11 耦合電容及電場耦合的頻譜分析結果，主要測量頻仍在 30MHz 以下，雖然最高仍可測量到 150MHz，但訊號就衰減非常大。

其他如 TEM、TEV 感測器及 UHF 磁場感測器等，頻率響應範圍涵蓋 VHF/UHF 頻帶，最高可達 2GHz，而本次試驗使用的 UHF 磁場感測器，其頻率響應為 30MHz~1.3GHz 的寬頻感測器，從接地線耦合比壓器放電的頻帶主要密集在 450MHz 以內(圖 11 下方)，450MHz 以上到 1GHz 的放電量則比較少重複率也低，這也是模鑄式變壓器放電頻帶的特性。

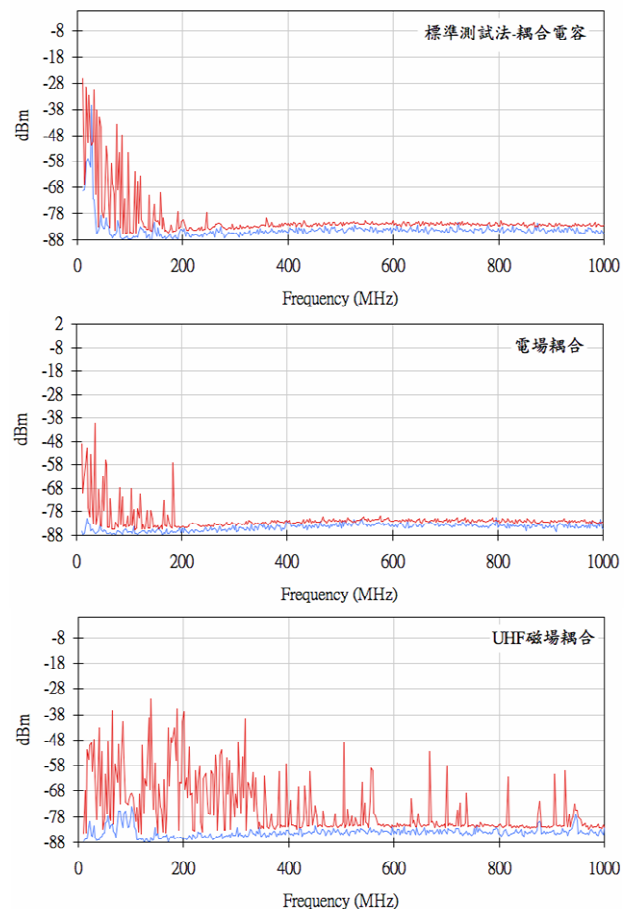


圖 11：測試法頻譜分析

表 2 是比較線上及離線局部放電的測試法後的優缺點比較表。

表 2：線上及離線局部放電量測比較表

	優點	缺點
線上局部放電量測 (on-line)	真實的運轉環境（電場／電流／機械應力／振動、溫度） 不需停電／節省成本 容易觀察局部放電變化趨勢 及早偵測到危險之絕緣異常 不需要額外的電源 負載變化範圍大	大量干擾／雜訊 雜訊可能會遮蔽放電訊號 數個局部放電源之訊號疊加在一起 資料分析需要專業的經驗 局部放電發生位置之定位困難
離線局部放電量測 (off-line)	較少之干擾／雜訊量級 電壓大小可調整：“PD”=f(U) 可量測放電起始電壓，放電熄滅電壓 容易定位局部放電發生位置 可進行其它之絕緣特性量測 可進行目視檢測以及維護工作	需要外部電源 必須停電測試 耗時／成本高 線圈本體皆需承受高壓 不是實際運轉狀態 量得之局部放電源可能不會在正常運轉中發生

V. 現場實測案例

線上局部放電檢測與實驗室裡最大不同的是雜訊干擾，而且現場有各種的不確定因素存在，以及相位參考的問題，一般都是採用現場插座來當參考源，所以線上檢測到的放電圖譜不見得會跟標準測試法相同，圖 12 是線上檢測到案例一的放電圖譜，表 3 是案例一測試結果比較，結果確認變壓器 R 相有異常；圖 13 是線上檢測到案例二的放電圖譜，表 4 是案例二測試結果比較，結果確認變壓器 S 相有異常。

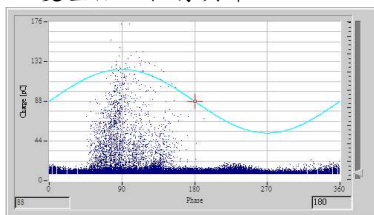


圖 12：案例一的放電圖譜

表 3：案例一測試結果比較

測試法	Sensor	測試結果		
		R	S	T
On-line	電場式	130pC	-	-
Off-line	耦合電容	441pC	-	-

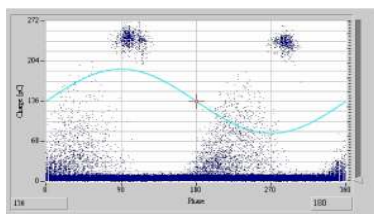


圖 13：案例二的放電圖譜

表 4：案例二測試結果比較

測試法	Sensor	測試結果		
		R	S	T
On-line	電場式	-	200pC	-
Off-line	耦合電容	-	356pC	-

VI. 結論

線上及離線局部放電量測，雖然使用不同的感測器來耦合放電訊號，但都得到相同的結果，如靈敏度、放電角度及圖譜等，但是放電量的大小卻無法比對，不過正常的模鑄式變壓器在正常運轉下，不應該有異常的放電訊號存在，如果線上局部放電量測到放電訊號時，可利用相同的耦合方式來比對訊號，並可追蹤放電量的趨勢變化。

很多種方法都可以於線上量測局部放電，但是現場雜訊不像實驗室般的單純，必須選用對的頻帶使用來克服雜訊干擾，但除了雜訊干擾外，放電訊號的診斷分析才是最重要的，可以多重的使用放電圖譜、放電波形及放電頻譜來分析訊號。

雖然局部放電檢測跟其他絕緣診斷測試法相同，都無法預知絕緣物的壽命，而必須蒐集設備正常運轉背景值(含外在因素干擾背景值及歷史資料值)並互相比較判定設備異常或依廠家建議標準值判定，或以放電量的大小、放電角度及放電重複率等來判斷變壓器的嚴重性。

參考文獻

- [1] 李長興、邱敏彥、黃智賢、吳明學、顏世雄，” 比壓器絕緣診斷手法之差異研究”，第 26 屆電力工程研討會，pp. 712-716。
- [2] Min-Yen Chiu, Chang-Hsing Lee, Chih-Hsien Huang, Shih-Hsiung Yen,” The Case Study of On-Line PD Measurement on in service MV Cable Terminations”, The 5th International Workshop on Electrical Installations in Hiroshima, JAPAN, pp. 511-516.
- [3] IEC 60270 High-voltage test techniques – Partial discharge measurements.
- [4] Lemke E., “PD probe measuring technique for on-site diagnosis tests on HV equipment” 6th ISH New Orleans / U.S.A., 1989, paper 15.08
- [5] IEC 60044-2 Instrument transformers – Part2: Inductive voltage transformers.