

# 應用VHF/UHF檢測油浸式電力變壓器局部放電的開發

## VHF/UHF Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers

邱敏彥 李長興 黃智賢 吳明學 顏世雄  
Min-Yen Chiu, Chang-Hsing Lee, Chih-Hsien Huang Ming-Xuei Wu Shih-Hsiung Yen

震江機電技術顧問股份有限公司  
Chan-Ching Electric Technique  
Consulting CO.,LTD  
Hsinchu, Taiwan, R. O. C.  
Chan.ching@msa.hinet.net

台灣電力公司綜合研究所電力課  
Taiwan Power Research Institute  
Taipei, Taiwan, R.O.C.  
wumx200e@yahoo.com.tw

工業研究院 材料所  
Industrial Technology  
Research Institute  
Hsinchu, Taiwan, R. O. C.

### 摘要

一般而言若依局部放電IEC-60270標準測試法於線上檢測的話，則必須考慮測試設備連接上的問題，因為要安裝耦合電容或連接絕緣套管測試分接頭(Bushing Tap)時，都必須在停電下進行，這都會造成一些經濟效益上的損失。

目前大部分都利用非電氣的檢測方法來檢測特高壓電力變壓器的局部放電，如油中氣體分析、音源法(Acoustic Emissions)等，其實最有效的方法是利用電氣訊號來檢測局部放電，因此本文就探討如何利用VHF/UHF感應器來應用於電力變壓器內來檢測局部放電的電氣訊號。

關鍵詞：局部放電、絕緣套管分接頭、特高頻/超高頻，音源法、油中氣體分析。

### Abstract

Partial discharge measurements under on-site condition according to the IEC-60270 standard, however is connected to considerable problem. So the installation of coupling capacitor or bushing tap needs an outage time for the HV equipment under test, which causes unnecessary economical lost.

Recently, most of partial discharge measurements in power transformer are using non-electrical methods of partial discharge detection, such as dissolved gas-in-oil analysis, acoustic emissions and etc. Actually, the most effective way for partial discharge measurements is using electrical methods of partial discharge detection. Therefore, discussing how to use VHF/UHF partial discharge measurement in liquid-filled power transformers.

**Keywords:** Partial Discharge, Bushing Tap, VHF/UHF, Acoustic Emissions, dissolved gas-in-oil analysis,

### I. 前言

目前特高壓電力變壓器仍然是以絕緣紙作絕緣的油浸式變壓器為主，以往在定期維護中很少針對運轉中的電力變壓器檢測局部放電，主要原因是若依據IEC-60270局部放電標準測試法(圖1)，則必須並聯耦合電容或利用絕緣套管的測試分接頭(Bushing Tap)來測量

局部放電，但是目前部份的電力變壓器都是利用電力電纜與GIS做電力上的連結，因此若在設計安裝前未將絕緣套管的測試分接頭引接出來的話(圖2)，如要利用絕緣套管來檢測局部放電的可能性就不高了，況且更不可能於現場停電來並聯耦合電容，於是目前大都採用非電氣訊號檢測法的油中氣體分析為主，來判斷電力變壓器是否絕緣異常，另外還有使用音源法來定位放電的位置。

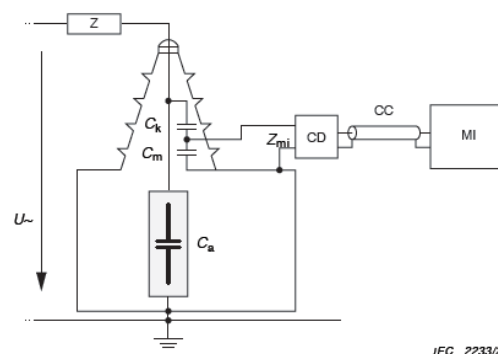


圖1 利用絕緣套管分接頭測試局部放電



圖2 絕緣套管測試用分接頭

但是需注意到所謂的油中氣體分析是當變壓器內部絕緣發生異常，如發生局部放電，或局部過熱等造成絕緣油的分解，分解後會產生『微量』的氣體，此氣體會溶解並擴散在絕緣油中，當油中的氣體必須累積達到氣體分析儀的偵測極限之後，油中氣體分析儀器才有反應並顯示出異常來，因此若變壓器已經有局部放電異常時，如果溶解在絕緣油中的氣體尚未累積到一定的量之前，油中氣體分析可能偵測不出任何的異常，所以當變壓器發生異常放電一直到油中氣體可分析出來的這

一段時間，就呈現了一個空窗期(圖3)，此空窗期的長短會因放電的位置不同而不同，如危險性較低的電暈放電，會因放電能量較大而縮短空窗期，而危險性較高的就是層間的絕緣劣化放電，則會因放電能量非常小而拉長整個空窗期。

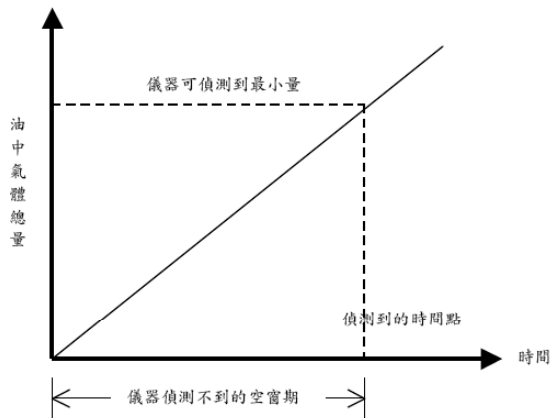


圖3 油中氣體分析的空窗期

而聲音在絕緣油中的傳遞比在空氣好，所以可以利用聲音的感應器來檢測發生在變壓器內部的局部放電訊號，但使用音源法(Acoustic Emissions)在檢測局部放電上仍然有些盲點出現。雖然當變壓器內部發生能量較大的電暈放電時，音源法可以比油中氣體分析更快速的偵測到電暈放電，但是若發生較深層的放電時，能量小相對所產生的聲音也小，因此有可能所產生的放電聲音會被背景雜訊所淹蓋，或著是完全偵測不到。

基於以上幾點因素，非電氣訊號的檢測上會有盲點及空窗期出現，因此要如何有效並快速的檢測到有危險性的局部放電訊號，則應該朝電氣訊號的檢測方式來著手，本研究在探討如何利用VHF/UHF天線感應器來檢測局部放電的可能性。

## II. 局部放電的電氣特性

變壓器內除了一般電壓電流訊號之外，當變壓器發生局部放電時，會造成電壓及電流的暫態變化，電場的變化產生磁場，磁場的變化也會形成電場，即兩者交互作用的波動稱為電磁波，而電磁波簡單的說就是電磁場(Electromagnetic Fields簡稱EMF)的波動，因此電磁波會從放電的位置以向外輻射或利用導體等兩種方式傳送，此電磁波的頻率從100 kHz一直到數百MHz左右不等，因此只要選擇適當的天線感應器，就可以接收到局部放電的電磁波訊號。

要選擇適合的天線感應器前，必須先了解局部放電的電氣特性頻譜才行，首先必須考慮到要如何模擬局部放電的訊號，然後才能分析到正確的放電頻譜，因此就利用環氧樹脂(Epoxy)來當試片，並於試片的上方加上一個帶有尖端的電極來模擬沿面放電，然後使用局部放電測量儀器(LDIC LDS-6)，並聯一只1,000pF的耦合電容來

測量局部放電，並使用頻譜分析儀(Agilent E4401B ESA-E)來測量局部放電的電氣特性頻譜(圖4)，圖5是在未加壓之前測量實驗室內的背景雜訊值的頻譜，中心頻率為250MHz，掃描頻寬為500MHz，其中有部份低頻雜訊及100MHz FM調頻電台的訊號。

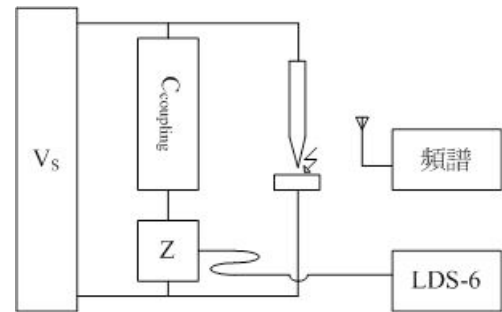


圖4 利用模擬沿面放電測量放電的頻譜

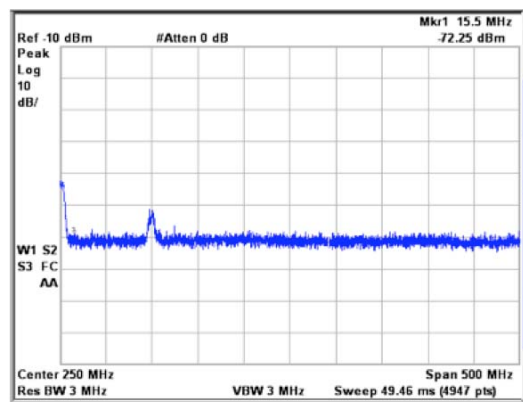


圖5 未加壓前的背景雜訊值頻譜

剛開始加壓至7kV左右時試片就開始放電，然後持續加壓至12kV後再觀察放電頻譜的變化(圖6)，其中主要放電頻譜分佈在50MHz~220MHz左右的VHF頻帶裡，次要分佈頻帶為5MHz~35MHz左右，然而在更高頻的300MHz~500MHz UHF頻帶之間仍有局部放電的訊號，不過放電重複率較低，能量也小很多，於是初步可選用VHF/UHF頻帶的天線感應器來量測局部放電的訊號。

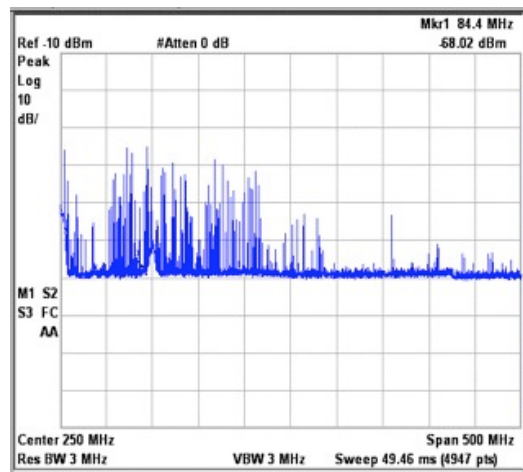


圖6 局部放電的電氣特性頻譜

### III. 模擬測試程序

不同的放電位置及放電形態會有不同的電氣特性，因此需模擬幾種油浸式變壓器常見的放電形態，如尖端電暈放電及絕緣紙間的放電等。

本模擬實驗使用一只如圖7所示的油浸式變壓器空桶，並於下方洩油口處佈置一只VHF/UHF感應天線(圖8)，然後於桶內裝滿絕緣油後，再置入模擬幾種的放電形態於油中，觀察加壓過程中放電頻譜的變化，並依標準測試法來確認放電狀態。

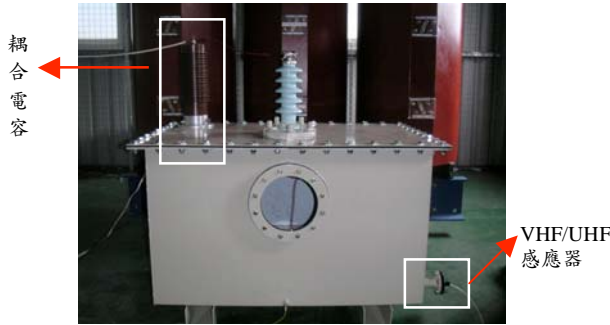
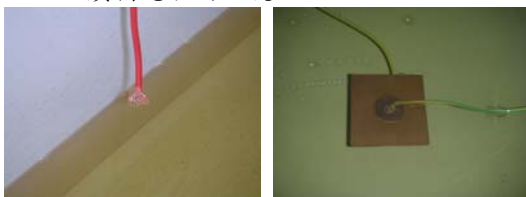


圖7 模擬測試用變壓器空桶



圖8 由洩油口佈置的VHF/UHF感應天線

首先模擬油中的尖端放電，做法是將多蕊電線剝皮，如圖9(a)所示露出細微的尖端點後再置入絕緣油中加壓，加壓至6kV左右在標準測試法中已經觀察到開始放電，因為VHF/UHF感應器直接與頻譜連接，之間並無任何的放電大電路，所以在起始放電時無法於頻譜中明顯看出放電頻譜，於是再持續加壓至10kV後才明顯看出放電頻率分佈(圖10)，其中紅色線是背景雜訊值，藍色線是放電訊號頻率分佈，主要頻率分佈為10MHz~75MHz及120MHz~150MHz之間，不過仍可以接收到100MHz FM廣播電台的訊號。



(a) 尖端放電 (b) 絕緣紙放電

圖9 模擬油浸式變壓器兩種常見的放電形態

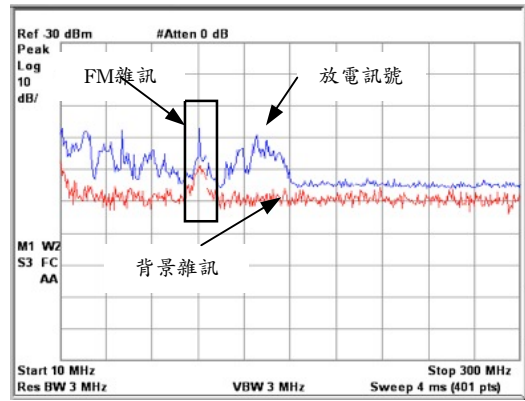


圖10 尖端電暈放電頻率分佈

然後再模擬絕緣紙的放電，因一張絕緣紙絕緣耐壓約500V左右，於是將六張絕緣紙黏在一起，經烘乾之後再於上下兩面加上銅箔電極，如圖9(b)所示把試片放入油中3小時後再進行加壓，主要目的是要讓絕緣紙完全吸收絕緣油。加壓至2.5kV就已經開始有明顯的放電，然後持續加壓至3.6kV讓放電更明顯，此時在頻譜有觀察到較高頻率的放電訊號，圖9是絕緣紙放電的頻率分佈，藍色線為背景雜訊，紅色線為放電訊號頻率分佈，主要頻率分佈為5MHz~150MHz及340MHz~590MHz之間。

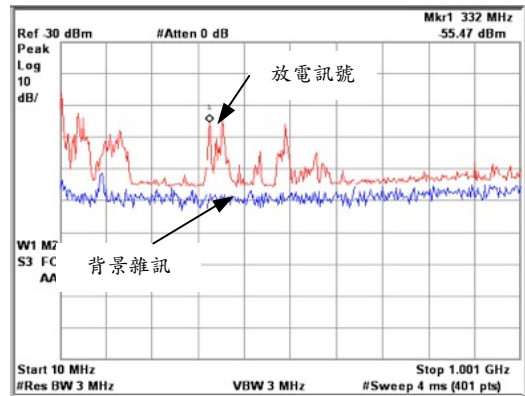


圖11 絕緣紙的放電頻率分佈

### IV. 感應器規劃設計

從以上的模擬測試結果看來，雖然局部放電的頻帶會因不同的放電形態而有點不同，但局部放電的訊號仍屬於寬頻訊號，因此可利用此特性來選用頻寬較寬的感應器，不過以上的試驗是於有遮蔽室的實驗室施作，環境雜訊除了FM廣播電台外，沒有其他的雜訊干擾，若把測試移到現場施作的話，則充滿了許多不可確定的外在因素，而變壓器外殼雖然是很好的遮蔽，但仍然有許多的雜訊會透過電力線進入變壓器裡，除了無線電波外還有電力系統所產生的各種雜訊等，因此雜訊的克服是相當重要的議題。

目前把感應器的頻率選用在30MHz~800MHz VHF/UHF頻帶之間，主要的原因是一般電力系統的雜訊



頻率大都分佈在15MHz以內，而900MHz又是大哥大所廣用的頻率，所以才把高通的頻率定在30MHz，低通的頻率就定在800MHz，而FM廣播電台的雜訊干擾就可以利用Band Stop 88MHz~108MHz濾波器來克服，另外為了提高感應器的靈敏度，所以利用放大器來放大訊號，不過局部放電測試儀器的前置處理器的頻寬大都在50MHz以下，所以需再經過一個頻率轉換器處理訊號後再給測試儀器使用，圖12是整個感應器的設計方塊圖。

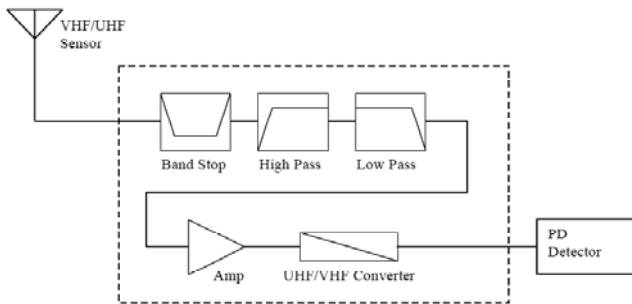


圖12 VHF/UHF感應器方塊圖

之前有提到現場測試時充滿了許多不確定的外在干擾因素，因此在這麼寬的頻帶裡，就很容易被各種雜訊干擾，其實在圖12中的高通及低通濾波器就設計為可調式，其中高通濾波器可調整的頻率範圍為30MHz~300MHz之間，而低通濾波器可調整的頻率範圍為600MHz~800MHz之間，因此在現場測試前可先量測背景雜訊值，然後再選擇最佳的測試頻率。

感應器的頻帶、濾波及放大器都解決了，但感應器要如何在活電下不影響供電下放入變壓器中，則是另一個所考量的要點，目前可讓感應器置入變壓器的位置應該就是洩油口的位置，因此先設計可伸縮的感應器，而感應器的前端可與洩油口的法郎片連接(圖13)，連接後為了避免空氣進入變壓器中，則必須先抽真空，抽完真空就可以把閘開啟讓感應器深入變壓器中(圖14)，等測試完畢後再把感應器移開。

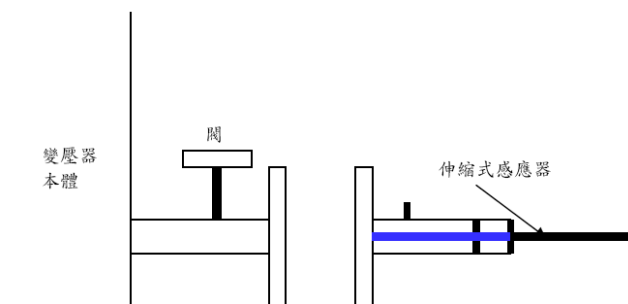


圖13 感應器未連接前

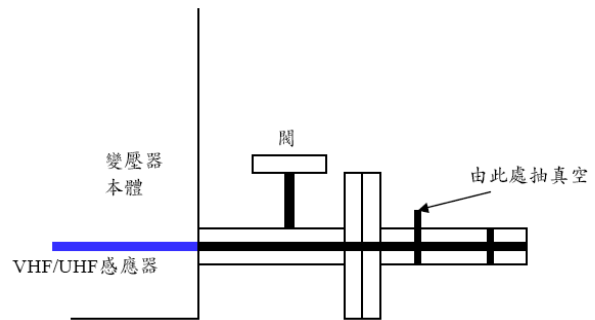
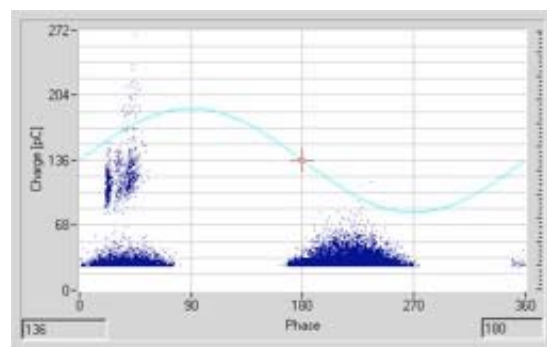


圖14 感應器連接後

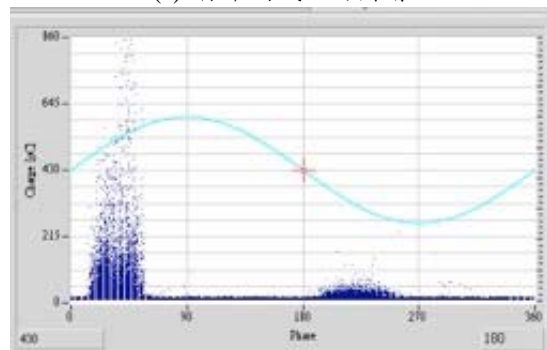
## V. 實際測試比對

將VHF/UHF感應器連接到局部放電測試儀器(LDIC, LDS-5, LDP-5)，然後利用之前所製作的試片模擬放電，再跟標準測試法同步作比對，看是否能夠準確量測到局部放電的訊號。

首先模擬尖端放電，加壓至6kV後開始放電，此時兩部不同測試法的儀器都同步量測到訊號，然後加壓至8kV讓放電量穩定後將測試值記錄下來，圖15即是記錄下來的圖譜，兩者比對相差不多。



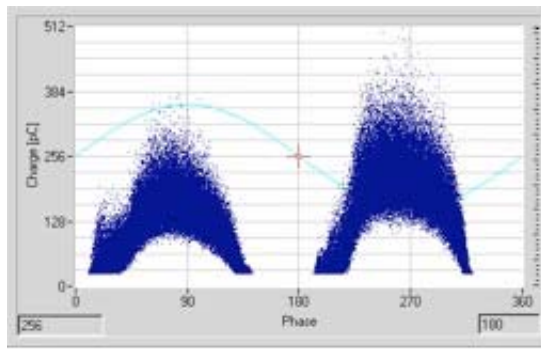
(a) 標準測試法的圖譜



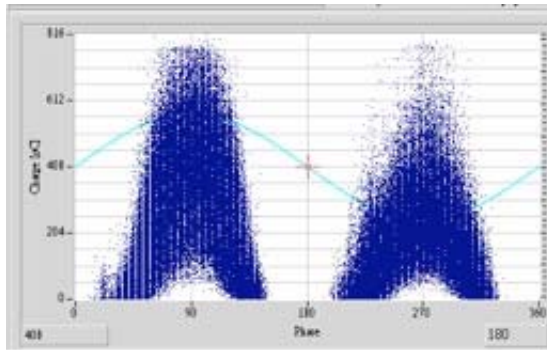
(b) VHF/UHF感應器的圖譜

圖15 尖端電暈放電圖譜

再來是模擬絕緣紙放電，同樣的連接法，然後加壓至2.5kV就已經開始有明顯的放電，觀察兩部不同測試法的儀器都同樣同步量測到訊號，然後持續加壓至3.6kV讓放電更明顯同樣將值記錄下來，圖16即是記錄下來的圖譜，兩者比對也相差不多。



(a) 標準測試法的圖譜



(b) VHF/UHF感應器的圖譜

圖16 絕緣紙放電圖譜

## VI. 結論

從以上的實驗的結果可以驗證，利用VHF/UHF感應器可以在不停電下量測到局部放電的訊號，而且其靈敏度跟IEC-60270標準測試法差不多，因此利用此方法不只能彌補非電氣訊號的檢測法的缺點，更可以互相交叉比對所測量的值，讓有危險性的局部放電訊號提早發現。

實際上VHF/UHF不只能應用到油浸式變壓器，也可以應用到目前的模鑄式變壓器或裝甲開關箱裡，甚至可發展延伸到GIS，不過GIS的頻寬則需到2GHz左右才足夠，不管應用發展為何，後段的局部放電測量設備及分析技術也是相當重要的。

## 參考文獻

- [1] IEC 60270 High-voltage test techniques – Partial discharge measurements.
- [2] IEEE Std 1434-2000 Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.
- [3] E.GockenbachA, "High voltage engineering and testing,"Partial discharge measuring technique, Chapter 17, pp. 533-548.