

345kV 充油電纜及 XLPE 電纜 部分放電線上偵測研究

結案報告

委辦單位:財團法人成大研究發展基金會

執行單位:崑山科技大學

中華民國106年12月

345kV 充油電纜及 XLPE 電纜 部分放電線上偵測研究

摘要

近年輸變電設備隨著國內經濟成長而逐步增加，基於安全與電力品質等因素考量，近年台電地下輸電系統的比率及負載日益升高，使得地下電纜之衍生事故逐漸成為影響電力品質及供電可靠度的一重要因素。台灣早期所建構之充油地下電纜系統已邁入「中年期」，維護管理已成為輸電工程的首要挑戰。

充油型電力設備，如：變壓器、電抗器、套管、充油電纜等，一般藉由定期的油中氣體分析，診斷與監測充油設備之故障與狀態，雖可作為診斷之依據，但非隨時監控，無法達到故障預警功能，本文目的在建置輸電級電纜線路之絕緣檢測診斷預警維護系統，同時配合推行智慧型電網之策略目標。依充油電纜之 IMB、GIS 介面、終端匣等組成結構，及電纜系統可能存在的絕緣缺陷類型，探討輸電級電纜系統之部分放電線上檢測方法及其關鍵性核心技術，解決部分放電線上檢測技術瓶頸。

壹、前言

早期國內外地下輸配電以充油電纜(Oil-Filled, OF)為主，隨著全世界之使用量慢慢減少，不少國外電纜廠家也逐漸停止相關設備之產製，取而代之的是交連聚乙烯電纜(Cross-Linked Polyethylene, XLPE)。然而目前在服役的充油地下電纜，其線路維護管理需儘早因應，並規劃相關維護工程，提高設備之妥善率，是現階段輸電維護工程的重要課題。

貳、電纜部分放電檢測技術

一、國際間之檢測技術

目前國際間有關電力電纜的檢測大致可分成電氣試驗及非電氣試驗，如圖 1 所示，電纜部分放電量與其絕緣狀況關係密切，部分放電量之變化意味著電纜絕緣存在著可能危及電纜安全運行及壽命的缺陷^[1,2]。

國際間目前對電纜部分放電檢測方法如下：日本主要採用電容式感測器、德國柏林採用方向性耦合感測器、挪威 SINTEF Energy Research 結合電容式與方向性感測器^[3]...等。若論何種檢測技術較為適當，目前並無定論。研究文獻指出差分法、方向耦合法和電磁耦合法等三種方法已經成功應用於現場檢測^[3]。

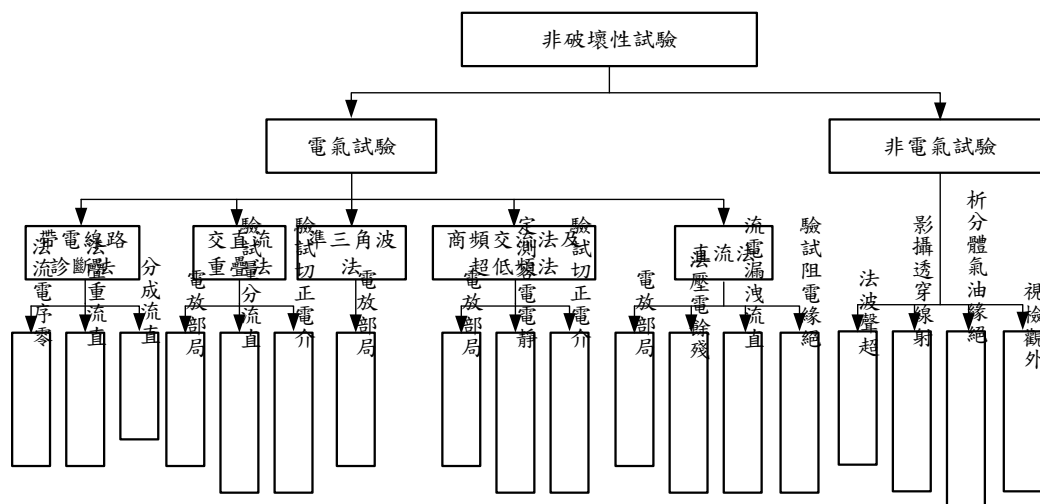


圖 1 國際間電力電纜檢測的方式

二、各類感測器比較

表 1 將 UHF、VHF 與 HF 三種感測器，根據其特性與優缺點做一分析比較。國際標準 IEC 62478 雖已彙整目前市面上主要的非傳統檢測法的相關說明，但並無公認的指導方針與規定，此說明何種設備適用何種檢測法，僅能透過現場檢測人員，依據經驗法則與檢測實務技巧，才能在各檢測目標內，擬出有效的檢測方式並進一步提高精準度。

依據電纜放電能量所產生的電氣暫態訊號、電磁放射訊號、化學變化、震動、聲音、光及熱能等訊號量測結果加以分析，判別其絕緣狀態。然而針對前述放電特徵，以目前之部分量測技術而言，其適用性亦有其不同的優缺點。感測器之訊號傳播的有效檢測距離，會依據各廠家設計方式、靈敏度、元件特性與現場環境不同而有所差異。

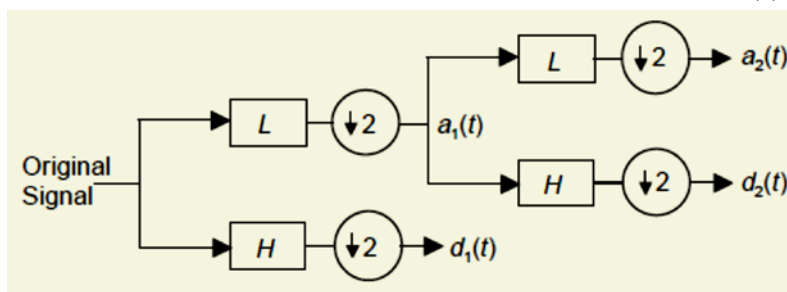
三、訊號處理

(一) 小波轉換法

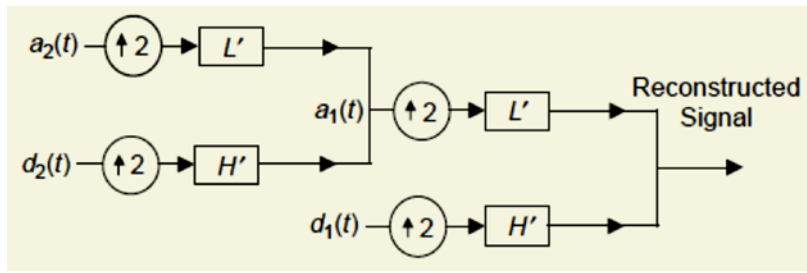
小波轉換是空間與頻率的局部轉換，因此適合應用於非穩態信號的分析(如部分放電信號)，透過伸縮與平移對信號進行多尺度細化分析，解決傅立葉轉換不能解決的許多難題。

小波轉換應用於雜訊抑制程序為:

1. 利用轉換將信號分解，如圖 2(a)產生與訊號及雜訊相關的小波係數。
2. 利用門檻移除或降低小波係數中假設為雜訊的量值。
3. 將門檻處理後的小波係數，利用小波逆轉換獲得雜訊抑制後的訊號，如圖 2(b)所示^[5]。



(a)



(b)

圖 2 小波轉換與逆轉換

對於下列三種電氣信號，此方法可自雜訊中成功辨識：

1. 連續正弦波形態之雜訊，例如：通訊系統。
2. 週期性脈衝雜訊，例如：由閘流體動作產生。
3. 推測雜訊，在時間及幅值呈現隨機，常與電暈、火花、機車火星塞脈衝波及檢測電路內的雜訊有關。

表 1 感測器適用性及優缺點

檢測方式 比較	UHF	VHF		HF
		電磁耦合	電場耦合(金屬箔極)	
檢測原理	放電時之超高頻無線電訊號	利用放電脈衝電流產生之磁力線	利用放電脈衝電流產生暫態電壓變化	放電時之電氣脈衝電流
檢測頻率	30 M~3 GHz	1 M~300 MHz		50 k~50 MHz
量測優點	屬電氣特性檢測方式，可避開低頻之背景雜訊，較適合戶外型設備使用。	2. 接於接地線上，適用於線上監測。 3. 訊號衰減較 UHF 小。 4. 偵測範圍較 UHF 廣。	1. 放電方向性易掌握。 2. 訊號衰減較 UHF 小。 3. 偵測範圍較 UHF 廣。	現場量測可偵測範圍較左列二者廣。
量測缺點	1. 偵測範圍較窄 2. 只可定性不可定量	測試危險性高		1. 指向性差 2. 易接收到低頻雜訊
靈敏度	<10 pC	10 pC		10 pC
建議量測之電纜附件	EBA、EBG、EBO、NJ、IJ、SB-1、SB-2 等皆可使用，但須考慮現場環境因素	EBA、EBG、EBO、NJ、IJ、SB-1、SB-2 等皆可使用，但須考慮現場環境因素	IJ、INJ 等附件，不可有屏蔽	EBA、EBG、EBO、NJ、IJ、SB-1、SB-2 等皆可使用，但須考慮現場環境因素

(二) 脈衝特徵法

脈衝特徵法透過理想的部分放電脈衝特徵參數，如：放電量值、放電間隔時間、放電值與相角關係等特徵參數，將雜訊抑制達到辨識的目的。

理想部分放電脈衝波形如圖 3 所示，其相關參數定義如下^[6]：

1. 脈衝上升時間(Pulse rise time) t_r ：由峰值的 10% 上升至 90% 所需的時間；
2. 脈衝下降時間(Pulse decay time) t_d ：由峰值的 90% 下降至 10% 所需的時間；
3. 脈衝寬度(Pulse width) t_w ：在峰值兩邊的 50% 所間隔的時間；
4. 脈衝下面積(Area under pulse)：在上升與下降段 10% 幅值的時間間距下 $q-t$ 曲線所包含的面積；
5. 平均放電電流(Average Discharge Current)

$$I = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N |q_i|$$

6. 重覆率(Repetition ration) $D = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N q_i^2$

7. 峰值放電量(Peak Discharge Magnitude)

$$q_{\max} = \max(q_1, \dots, q_N)$$

8. 平均放電量(Average discharge Magnitude)

$$q_{av} = \frac{\sum_{i=1}^N |q_i|}{N}$$

應用脈衝特徵法分析是假設僅有一種部分放電現象(一種放電源)，然而現場實際量測，可能會同時超過一種以上的放電源(多重瑕疵或電極雜訊)，一般此法必須搭配其他法則共同使用。

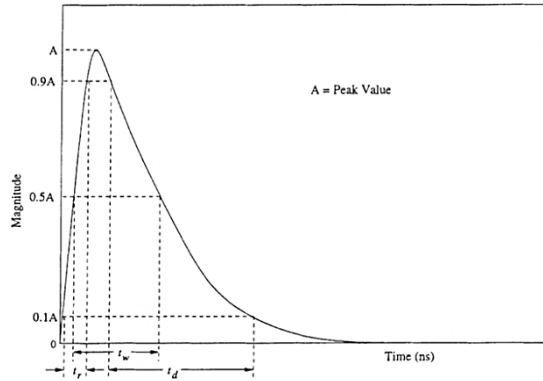


圖 3 理想部分放電脈衝特徵

(三) 3D 圖譜辨識法

3D 圖譜分析是由相位角(φ)、電量值(V)和重複次數(N)所構成的立體空間座標判別部分放電特徵，相關參數說明如下：

1. 相位角(φ)為訊號發生時的相位角，與時間的關係為

$$\varphi_i = 360 \left(\frac{t_i}{T} \right) \dots \dots \dots (1)$$

其中

φ_i ：相位角，以角度表示

t_i ：從零到出現瑕疵訊號的時間

T ：供給電壓的週期

2. 電壓值(V)

定義為當瑕疵訊號產生時，其波形超過所設定門檻值的脈衝電壓，再經過絕對值後的電壓值。

3. 重複次數(N)

為在同相位重複發生的次數，當發生的重複次數愈多，代表為此訊號所分佈的特徵位置，如果重複次數高且電壓高的話，為須注意線段。

參、充油電纜之油中氣體含量分析

利用充油設備絕緣油中溶解之氣體成分及含量變化來判斷充油設備內部是否異常，台電綜合研究所參考日本電器協同研究第 55 卷第 2 號規定，訂定充油電纜故障之油中氣體分析診斷基準，將故障類別分為正常、須注意、異常、危險四級，管理項目則分為乙炔量 (C_2H_2 , PPM) 和可燃性氣體總量 (TCG, PPM)、基準值和異常等級與點檢週期。油中氣體分析診斷基準如表 2 所示。

表 2 台電公司充油電纜油中氣體分析診斷基準^[7]

故障類別	油中溶解氣體管理值		處理方式	故障原因分類
	C ₂ H ₂ 含量 (ppmv)	TCG含量 (ppmv)		
正常	ND	TCG < 1000	每3年試驗一次	◎絕緣性能良好
	ND < C ₂ H ₂ < 10	TCG < 100		絕緣紙表面蠟狀物甚微，無異常
須注意	ND	1000 ≤ TCG < 10000	每1年試驗一次	◎絕緣性能影響小
	ND < C ₂ H ₂ < 10	100 ≤ TCG < 10000		1. 油止端遮蔽層有微小之之放電。 2. 補強層表面有放電痕。 3. 兩端鉛工下面有黑點。
異常	ND < C ₂ H ₂ < 10	10000 ≤ TCG	每半年試驗一次(如 C ₂ H ₂ 量繼續增加，需擇時內檢。)	◎絕緣性能影響大
	10 ≤ C ₂ H ₂ < 50	TCG < 2000		1. 絕緣紙有碳化現象。 2. 有放電痕跡。 3. 絕緣紙表面有蠟狀物
危險	10 ≤ C ₂ H ₂ < 50	2000 ≤ TCG	儘速內檢	◎絕緣性能達危險狀態
	50 ≤ C ₂ H ₂	—		1. 補強絕緣體之沿面放電。 2. 油止端遮蔽層之放電。 3. 電纜破壞

肆、部分放電檢測系統

為建置輸電級電纜線路之絕緣檢測診斷預警維護系統，配合台電推行智慧型電網之策略目標，建立輸電級電纜系統部分放電訊號分析軟體技術，並提出地下線路部分放電遠端監視與預警診斷系統資料庫所需規格，作為日後擴展智慧型電網基礎建設之一。

一、系統演算架構

系統架構主要分為四個部分，如圖 4 以及圖 5 所示包含：

(一) 量測單元：

訊號由感測器接收，經類比放大電路濾波、放大，將輸入信號調整在適當電壓增益範圍後，傳遞至後端；

(二) 處理單元：

透過 ADC 與 ZC702(FPGA)做訊號處理，由 ARM 透過網路將資料傳輸至後端 PC；

(三) 傳輸/介面：

使用 LabVIEW 程式以演算法一(小波轉換法)辨識放電脈衝信號，再將取得之資料透過控制演算法二(脈衝特徵法)處理後送至後端。

(四) 監控電腦：

匯集成長時間之放電變化趨勢圖。

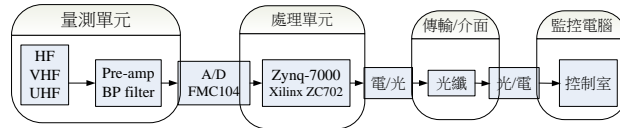


圖 4 系統演算架構

二、系統硬體架構

如圖 6 所示，本計畫之主系統採用搭配 Zynq-7000 晶片的 Xilinx ZC702 開發板，高速 ADC 採用 4DSP 的 FMC104 4ch 250 MHz/s 取樣率，前端類比放大電路則自行設計。

(一) 量測單元

1. HFCT 感測器

如圖 7 所示，部分放電產生時，電力電纜的接地線會有部份放電的脈波電流流動，HFCT 可從接地線感應此脈波電流，此電流信號頻率分佈很高，約在數 MHz 至數十 MHz 之間，所以可利用設計完善的濾波器及處理與電腦軟體濾波處理，偵測電力電纜局部放電的脈波電流信號。

本計畫使用自製 HFCT 感測器量測放電訊號，外觀與現場量測如下圖 8 所示，圖 9 為其特性曲線圖。

2. 類比放大電路

利用 FPGA 控制自行研發設計之高頻數位前端硬體電路板，可將輸入之外部訊號調整在適當的電壓增益範圍之內。此高頻前端硬體電路板又分為局部放電訊號控制硬體電路板與參考訊號控制硬體電路板，分別對局部放電訊號與參考訊號之訊號進行電壓準位之控制。

PD 輸入類比電路設計前端為 0~-31dB 的衰減器，然後再經由兩段 0~20dB 及 0~40dB 的放大電路組成，控制由 GPIO(General Purpose I/O，通用型之輸入輸出) 控制。

利用外部供電並搭配不同輸入電壓準位之訊號控制放大或衰減倍率，使用不同數值查表的排列組合，可實現-31dB~+60dB 的可調增益，並擁有 1dB step 的解析度。

3. 參考訊號控制電路

參考訊號控制電路外觀如圖 11 所示，參考電壓輸入設計為-60 dB、-40 dB、-20 dB 以及 0 dB 等 4 段，再由 1 個低速 200k/s ADC 取樣參考電壓。

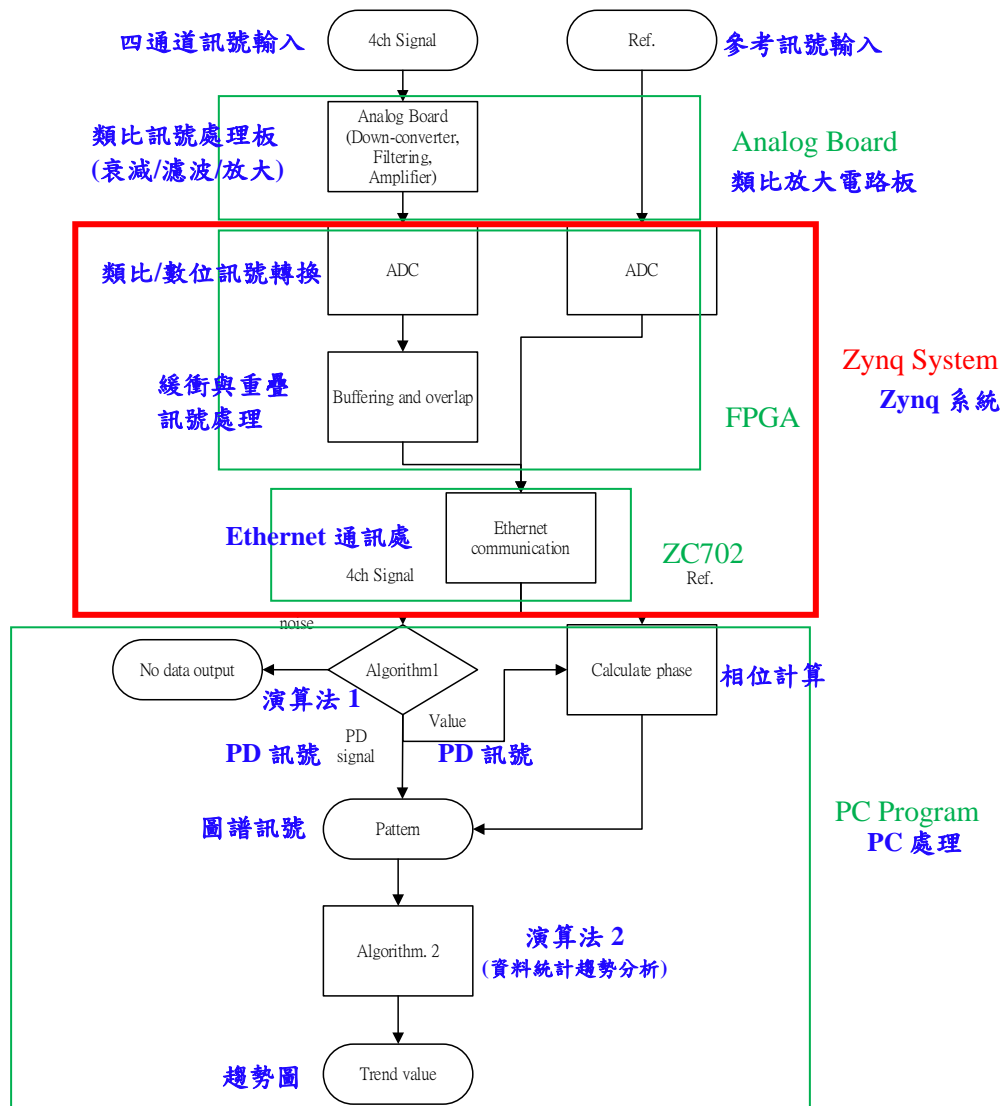


圖 5 系統演算架構流程圖

(二) 處理單元

1. ADC_FMC104

FMC104 是一個四通道 ADC FMC (FPGA 夾層卡)，外觀如圖 12 所示，它提供四個 14 位 250 MSPS 的 A/D 通道，此通道可由內部 clock (可選定到一個外部參考) 或是外部提供的取樣 clock。觸發輸入可自行定義採樣控制。FMC104 具有 LPC (Low-Pin Count) 160 針連接器，前端面板 I/O，並具散熱功能。FMC104 另一個重要的特色是由單一 clock 頻率支援多個 FMC 電路板的能力。該設計基於 TI 的 ADS62P49 雙通道，14 位，250 MSPS ADC，具有可編程的 DDR LVDS 或並行 CMOS (LVCMOS) 輸出，架構圖如圖 13 所示。

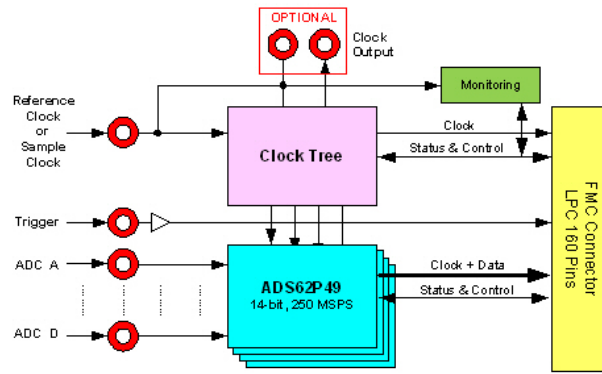


圖 13 FMC104 架構圖

2. ZYNQ-7000 ZC702

ZC702 外觀如圖 14 所示，包括 XC7Z020-CLG484-1 AP 的 SoC 電源 12V，DDR3 元件內存 1GB，支持 32 個數據寬度，通信及網路為千兆乙太網 GMII、RGMII 和 SGMII，USBOTG 1 (PS) 主機的 USB，IIC 總線接頭/集線器 (PS)，擴充之連接器為 FMC # 1-LPC / FMC # 2-LPC 連接 (0 GTX 收發器，68 單端或差分 34 用戶定義的信號)、IIC 集線器/擴展器(圖 5 Zynq System)。