

利用整體經驗模態方法分析氣體絕緣開關之局部放電

Ensemble Empirical Mode Decomposition Analysis for Partial Discharge in GIS

湯雅雯^{1*}

戴政祺^{1*}

蘇經洲²

陳建一¹

陳建富¹

Ya-Wen Tang

Cheng-Chi Tai

Ching-Chau Su

Chien-Yi Chen

Jiann-Fuh Chen

¹ 國立成功大學電機工程學系

Department of Electrical Engineering

National Cheng Kung University

Tainan, Taiwan, R.O.C.

² 南榮技術學院電機工程學系

Department of Electrical Engineering

Nan Jeon Institute of Technology

Tainan, Taiwan, R.O.C.

*E-mail: n2894140@mail.ncku.edu.tw

摘要

由於今日工業的高速發展，對於電力設備的安全要求也相對增加。目前，因為六氟化硫氣體絕緣開關具有體積小且安全性高優點，所以被廣泛應用於各種工業場合中。而為了避免絕緣劣化造成不必要的意外發生，擁有正確的檢測與分析是不可或缺。本研究利用音射感測器與導波管相並配合使用，能迅速且正確將局部放電訊號傳出並由示波器紀錄，且透過整體經驗模態分解法來進行局部放電分析。此演算法除可將訊號隱含的模態分解取出外，更可有效的抑制經驗模態分解法所造成的模態混淆現象。研究的結果顯示此方法確實抑制了模態混淆的現象，同時也提供了更明確的頻譜分佈圖，將會是一個分析局部放電之實用工具。

關鍵字：局部放電、內建模態函數、整體經驗模態分解法、希爾伯特黃轉換。

Abstract

The rapidly growing industry today makes the safety requirements of electric power requirements increased. Because the small size and high safety of SF₆ gas insulated switchgears, they have been widely used in many industrial applications. To prevent the unexpected accidents of insulation deterioration, the correct detections and analyses are necessary. In this work, the acoustic signals, transferred out with a waveguide and an acoustic sensor, were recorded for analysis. These acquired signals were analyzed with the ensemble empirical mode decomposition (EEMD). This method is used to extract the implied empirical mode functions of input signal and to overcome the mode-mixing problem of empirical mode decomposition (EMD) method. According to the results of this work, it is found that the EEMD method does eliminate the mode missing effects, and provide the clearer spectrum distribution than that of EMD method. For the partial discharge analysis, EEMD method is a useful tool that can extract the implied information.

Keywords: partial discharge, intrinsic mode function, ensemble empirical mode decomposition, and Hilbert-Huang transform.

I. 簡介

近年來，由於高科技快速發展，使得電力的要求日益增加。為了降低傳輸過程的功率散逸並達到高品質供電效果，操作電壓也持續上升，進而造成對於電力設備之絕緣能力的挑戰。由於絕緣能力下降容易造成電力設備故障，甚至釀成嚴重工業安全問題。因此，為了避免不必要的工安事故，電力設備的檢測與保養一直是許多研究者所努力的重要目標。

本研究將針對填充六氟化硫(SF₆)之氣體絕緣開關進行量測與訊號分析。六氟化硫是一種惰性且不燃性的氣體，可被高壓填充於設備中作為絕緣氣體使用。氣體絕緣開關因為採用絕緣氣體將接地開關、比流器、比壓器等設備隔離，所以具有體積較小且安全可靠的特點。再加上使用年限長、免維修保養、適用任何環境、氣體

不外漏等優點，使得六氟化硫氣體絕緣開關被大量採用於輸配電力設備上。目前已經有許多檢測方式被應用在氣體絕緣開關檢測上，音射法則是其中一種[1]。音射法是透過相互連接的硬體設備以聲波方式傳出放電訊息，再透過聲電轉換器將訊號取得並分析。相較於其他檢測方法，音射法具有成本低廉且可快速分析的優點。因此，在此研究中主要使用音射法作為量測方法以進行局部放電檢測。

電力設備內部所產生之局部放電訊號通常屬於一種非穩態訊號，並較不適用一般穩態訊號分析方法。一般常見非穩態分析方法包含有小波轉換、短時距傅立葉轉換等方法[2-3]，都有其獨到之處且廣泛應用在局部放電檢測分析。此外，黃鈺博士在 1998 年提出一個特別針對非穩態訊號的時頻分析方法：希爾伯特-黃轉換法(Hilbert- Huang transform, HHT) [4]。與其他分析方法不同之處在於其具有局部性、完整性、正交性與適應性之特性，可展現出隱含於訊號本身的基本模態。這方法大致上可分成兩部份，分別為經驗模態分解法(empirical mode decomposition, EMD)，與希爾伯特轉換(Hilbert transform, HT)。前者將訊號依照時間尺度與頻率範圍分解成多個內建模態函數(intrinsic mode functions, IMFs)分量。後者以這些模態函數作為基底，進行希爾伯特轉換。轉換結果可以得到瞬時頻率(instantaneous frequency, IF)與瞬時振幅(instantaneous amplitude, IA)。最後，依照訊號瞬時變化的特性，可將結果展示成振幅-頻率-能量之三維空間分佈或振幅-頻率二維分佈之邊際頻譜(marginal spectrum)。

儘管經驗模態分解法優點甚多也廣泛成功應用在許多不同領域上，但在面對具週期性的複雜資料中，其頻率尺度方面算法本身仍存在一些問題，其中一個主要問題就是模態混淆(mode mixing)的現象。模態混淆是指當訊號被分解成多個經驗模態時，所產生的多個時間尺度不同現象。換句話說，一個基本模態會因為訊號拆解過程不當，而出現在兩個經驗模態內。也因為這個模態被不規則性切割並分散於多個模態中，進而造成模態混淆的問題。這現象使得傳統的經驗模態分解方法引入不被預期的雜訊成份，並使分解過程不再具有實值物理意義。為解決此一問題，則可透過經過改良的整體經驗模態分解法(ensemble empirical mode decomposition, EEMD) [5]來解決。在本研究中，為了要正確取得放電的經驗模態，特別採用整體經驗模態分解法對局部放電訊號進行分析。透過此法將可獲得更加明確之局部放電訊號特性與特徵，預期將可更清楚瞭解局部放電訊號之特徵，進而改良局部放電檢測系統之正確率。

II. 系統架構與分析

2.1. 量測系統

本研究主要針對氣體絕緣開關採用音射法進行局部放電檢測，下圖 1 為量測系統之方塊圖。氣體絕緣開關之內部局部放電訊號是由被置放於設備表面的音射感測器所收集，再透過高階數位示波器進行擷取，最後則進入電腦端進行分析。本研究中所採用的音射感測器，其頻率響應區間為 23 kHz 至 80 kHz。



圖 1 量測系統方塊圖

2.2. 經驗模態分解法

本研究重點在於使用整體經驗模態分解法針對局部放電訊號進行分析，以找出放電訊號所隱含之訊號模態。在介紹整體經驗模態分解法之前，先簡要說明經驗模態分解法之原理。經驗模態分解法在分解時，有下列三項條件：

(1) 欲分析訊號至少需有兩個極值，其中包括一個極大值與一個極小值。

(2) 訊號特徵時間尺度是定義兩個極值之間時間的差值。

(3) 若資料全無極值，但只包含反曲點，則將訊號做一或多次微分，將極值找出。

利用訊號的特徵時間尺度作為定義該訊號之振動模態，再依據其分解訊號，所以此步驟稱為轉移過程 (shifting process)。經驗模態分解法需分別找出訊號之局部極大值和局部極小值，再將所有的局部極值利用立方弧線 (cubic spline) 連接起來，產生上圍包絡線和下圍包絡線。則待分析之原始訊號即會被上下圍包絡線完全包覆，再由極大值包絡線與極小值包絡線取平均得均值包絡線，而原始訊號與均值包絡線之差則是第一個分量。當原始訊號越複雜時，所求得符合內建模態函數條件的函數就需要更多次的轉移過程。當訊號經過 k 次轉移過程後若符合一個內建模態函數條件時，這即是原始的訊號中第一個內建模態函數分量，如 (1) 所示。

$$C_1(t) = h_k(t) \quad (1)$$

藉著轉移過程可消除載波及使得訊號之不平整振幅平滑，但轉移過程進行到一定極限後，會導致無法平滑不平整之振幅，因此必須決定轉移過程停止的收斂條件。其收斂條件有兩個：

(1) 跨零點數量要和局部極值總數量要相等。

(2) 基本標準偏差值最佳設定範圍在 0.2 - 0.3 間，而該標準偏差 (standard deviation, SD) 為：

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)}{h_{1(k-1)}(t)} \right]^2 \quad (2)$$

當滿足以上任一收斂條件，即停止此一模態的轉移過程再繼續下一個模態的轉移過程。整體來說，應該是包含訊號中最佳的時間尺度或者是最短週期的分量。最後，當餘數變成常數或單調函數，而無法解析出內建模態函數即停止轉移過程。因此，最後可將

一個訊號完整分解成 n 個內建模態函數及一個可以當作趨勢或常數的餘數，如 (3)。

$$X(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + r_n(t) \quad (3)$$

2.3. 整體經驗模態分解法

前述提及經驗模態分解法的重要問題發生在於訊號分解過程中，會產生模態混淆情形。而模態混淆主要原因在於經驗模態分解法中，部份的內建模態函數會被無法預期的雜訊所摻雜。這些引入的雜訊通常是片段且不規則出現，進而造成被取代的原內建模態函數被移植至其他內建模態函數內。

為避免此一問題發生，黃鐸博士便提出改進方法將其稱為整體經驗模態分解法。簡單的說，此方法是利用白噪音 (white noise) 來抑制雜訊影響的特性以克服模態混淆問題，進而獲得模態一致的內建模態函數，圖 2 為簡易流程圖，其演算法步驟如下：

(1) 先將原始訊號加上一白噪音，使得此兩訊號視為一整體訊號。

(2) 對該整體訊號進行經驗模態分解。

(3) 多次重覆上述兩步驟，但每次增加一個隨機產生白噪音在每個時間尺度上。

(4) 將步驟 3 分解之結果做平均值處理。

由於白雜訊會均勻分布在每個分量上，因此加入的白雜訊能量就會被分解到每個分量中。當這些步驟重覆多次時，會因為平均行為而降低加入白雜訊所造成之影響，藉此得到符合真實訊號的結果。整體經驗模態分解法其公式定義如下：

$$c_j(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{c_j(t) + \alpha r_k(t)\} \quad (4)$$

其中， N 為整體總合成數的數目， α 為增加噪音的振幅大小， $c_j(t)$ 為整體經驗模態分解法所得到之內建模態函數。此外，根據整體經驗模態分解法，其理想的整體合成數 (ensemble number) 應近似於無窮大。

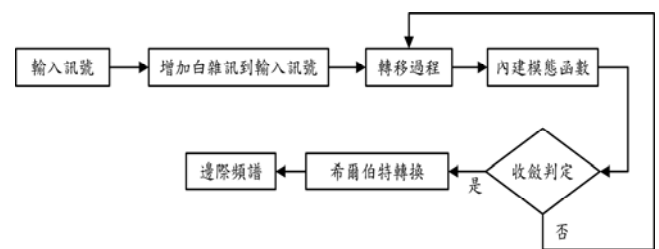


圖 2 整體經驗模態分解簡易流程圖

III. 結果與討論

本研究主要目的在於正確取得氣體絕緣開關之局部放電訊號，並利用整體經驗模態分解法找出放電的隱含訊息。為了取得局部放電訊號，進行多次實際現場線上量測 345KV 之氣體絕緣開關，以找出有局部放電案例進行分析研究。圖 3 為量測氣體絕緣開關所得到的一個局部放電音射訊號。

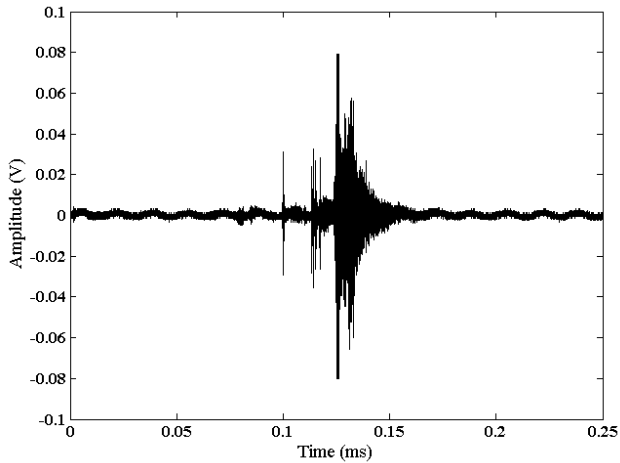


圖 3 氣體絕緣開關之局部放電訊號圖

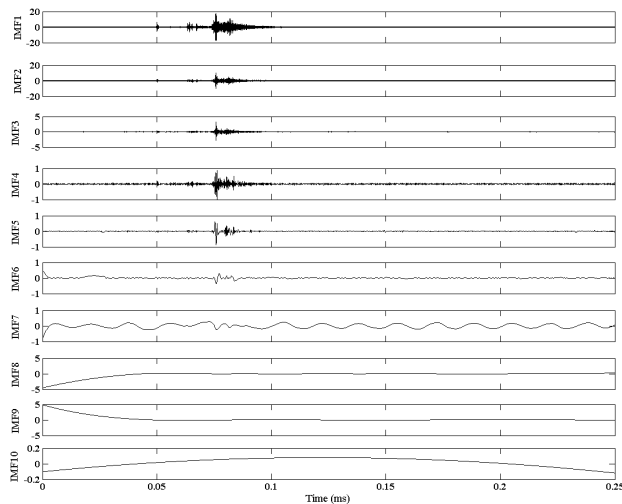


圖 4 經驗模態分解法所得之內建模態函數

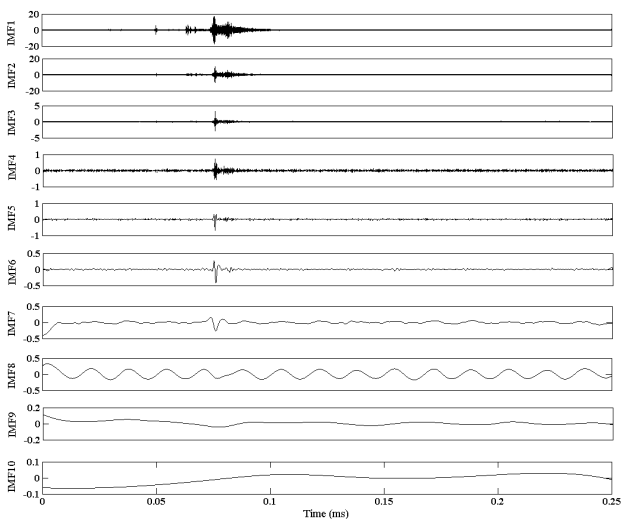


圖 5 整體經驗模態分解法所得之內建模態函數

為了展現整體經驗模態分解法的優勢，特別將量測到的局部放電訊號分別進行經驗模態分解與整體經驗模態分解分析，進而各別得到兩演算法之內建模態函數並繪製於圖 4 和圖 5。由結果可知，兩演算法皆可得到數個相類似的內建模態函數，卻也藉此可清楚看出的確有模態混淆之情形發生。仔細觀察圖 4 與圖 5 的第四內

建模態函數可發現，經驗模態分解法已經產生模態混淆情形。由先前討論已知，當產生模態混淆時，已經使內建模態函數失去本身代表訊號的物理意義，將造成正確分析之錯誤評估。而使用整體經驗模態分解法所得到之內建模態函數也的確有效減少經驗模態混淆之情形。

因為整體經驗模態分解法過程所加入的白雜訊會影響訊號全部頻帶，因此若沒有正確去除將會造成頻譜分佈改變而失去原先分解用意。所以，為了確認計算過程沒有引入過度失真，特別利用上面兩組結果進行邊際頻譜分析分別顯示在圖 6 與圖 7。觀察兩個頻譜分佈情形可以發現，局部放電能量主要集中在 45k 到 55 kHz 間。經驗模態分解法得到的頻譜展現出較複雜之頻率變化，也間接增加找出主頻困難性。反之，由整體經驗模態分解法所得的頻譜並沒有因為加入白雜訊而掩蓋實際訊號的頻譜，反而凸顯出較為明確的主頻率分佈區域。因此，整體經驗模態分解法所得的結果相對於傳統經驗模態分解法更能正確有效找出局部放電訊號發生之主要頻率，進而得到更正確放電訊息。

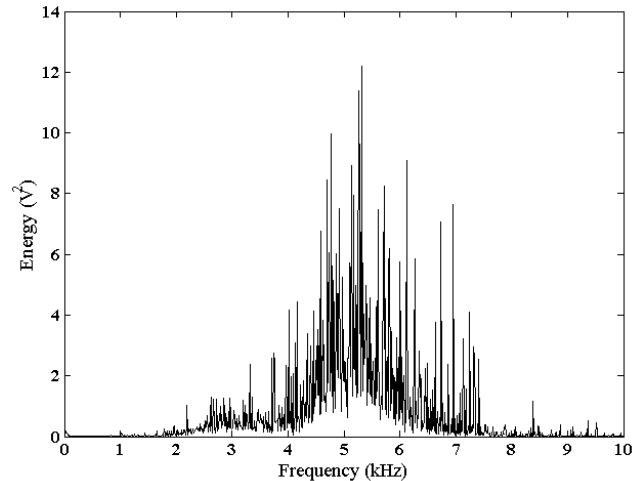


圖 6 經驗模態分解法之邊際頻譜

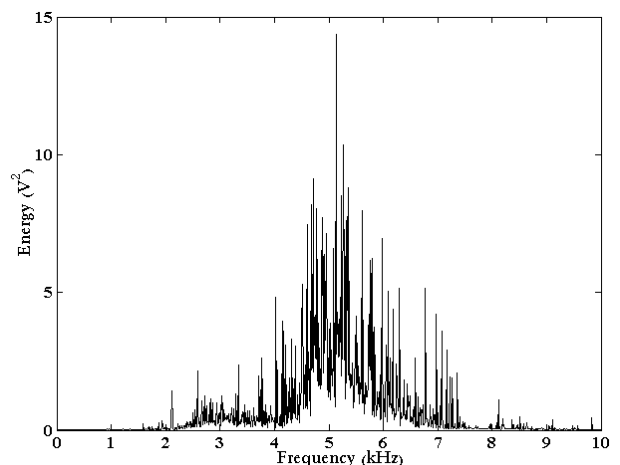


圖 7 整體經驗模態分解法之邊際頻譜

IV. 結論

由於工業安全意識的抬頭，對於電力設備的安全考量更加的重視。本研究主要針對六氟化硫氣體絕緣開關之局部放電進行音射檢測，透過整體經驗模態分解技術萃取局部放電的特徵。研究結果發現，整體經驗模態分

解法確實有效抑制了經驗模態分解法所產生之模態混淆缺點。透過兩者結果比較，整體經驗模態分解提供了更有物理意義且清晰的頻譜表現。因此，藉由整體經驗模態分解法，將更可有助於瞭解局部放電的組成與提昇預警系統的準確性。

V. 誌謝

感謝行政院國家科學委員會(NSC96-2628-E-006-256 -MY3) 經費贊助。

參考文獻

- [1] R. Baumgartner, B. Fruth, W. Lanz, K. Pettersson, "Partial discharge. X. PD in gas-insulated substations-measurement and practical considerations," *IEEE Trans. on Electrical Insulation Magazine*, vol.8, No.1, pp.16-27, 1992.
- [2] S.R. Sagar, J. Amarnath, S. V. L. Narasimham, "Wavelet-based partial discharge signal analysis in GIS," Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2007), pp.217-220, Oct. 14-17, 2007.
- [3] M.L. Chai, Y.H.M. Thayoob, P.S. Ghosh, A.Z. Sha'ameri, M.A. Talib, "Identification of Different Types of Partial Discharge Sources from Acoustic Emission Signals in the Time-Frequency Representation," 2006 IEEE International Conference on Power and Energy, pp. 581-586, Nov. 28-29, 2006.
- [4] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," in *Proc. the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 454, pp. 903-995, 1998.
- [5] Zhaohua Wu, N. E. Huang, "Ensemble Empirical Mode decomposition: a noise-assisted data analysis method," *Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-41, 2009.