

基於小波轉換的高阻抗故障偵測技術

聖約翰科技大學電機系 楊明達

台灣科技大學電機系 辜志承

摘要

對各國電力公司而言配電系統架空線高阻抗故障的保護協調是當前所面臨的一個重要的議題。本論文成功地開發一種新的複合式高阻抗故障偵測系統，它利用 3I0 零序電流偵測架空線的高阻抗故障。採用離散小波轉換解析 3I0 零序電流中的故障特徵信號，並將轉換後的高低頻係數利用卡方分布及 95% 信賴區間自動設定高低頻係數的臨界值，用以檢測高低頻係數的變異程度，作為高阻抗故障判定的依據。連續小波轉換 3D 圖形的輸出結合圖形辨識的方法也可作為高阻抗故障判別的工具。整合前述的兩種故障偵測演算法最後經決策邏輯判定是否有高阻抗故障事故發生。

為了驗證所提出的演算法的可行性，利用先前所實施的人工高阻抗故障試驗記錄資料加以測試。測試的結果顯示所提出的演算法整體的架構具有能明確地分辨高阻抗故障及開關切換暫態的能力。

前言

一旦電力系統發生短路或直接接地故障時，故障電流通常大到超過最大的預期負載電流，此故障即稱為低阻抗故障。低阻抗故障可以藉由過電流電驛或電力熔絲檢出。當一次配電線路掉落於電阻較大的地面時，因架空配電線路電壓並非甚高，

所以故障電流很小，通常在 100 A 以下。由於故障電流偏低，傳統的保護裝置如電力熔絲、過電流電驛及接地過電流電驛無法偵測檢出故障。此類故障稱為高阻抗故障。一旦發生高阻抗故障，帶電的導線斷落在高阻抗地面如柏油路、水泥地、沙地及草地等或不直接接地的樹上、電桿時，常會產生電弧，此電弧稱為高阻抗故障電弧。由於斷落的導線仍處於帶電狀態，一旦有人員誤觸時極易發生感電造成傷亡。又伴隨的電弧，易引起火災造成公共安全的危害及財物的損失。

於民國 80 年代台電公司與清華大學曾合作針對 11.4 kV 配電系統進行高阻抗人工故障試驗。其研究成功地開發利用饋線零序電流的低階偶次諧波成份之變異量檢定是否發生高阻抗故障[1-4]。

歐美各國早於 1980 年代即致力於高阻抗故障相關研究。最早期的有 Calhoun 利用機電式(electro-mechanical)比例接地電驛(ratio ground relay, RGR)計算中性線電流與故障相正序電流的比例用以判斷高阻抗故障[5]。

德州農工大學的 Dr. Russell 曾從事多次人工故障試驗，並有多篇論文的發表。當高阻抗接地故障發生時，無任何單一參數會穩定均勻呈現，因此採用九種判斷準則的多重標準整合成專家型弧光接地偵測系統。此偵測系統僅利用電流訊號即可判定高阻抗故障，而電壓訊號則可用於故障

相別判斷，適用於裸銅線架空配電系統，故障鑑別成功率約為 80%。另外 Dr. Russell 的研究團隊近來更發展一套融合多種演算法的智慧型保護電驛，其具備有偵測各種型態的故障之能力，並能在安全與可靠的操作下成功地偵測到高阻抗故障，最後並授權廠商將此保護器商品化 [6-8]。

南韓漢城大學的 Park 使用 EMTP 中的 TACS(transient analysis of control systems) 控制兩個時變的電阻並將他們串聯作為模擬高阻抗故障電弧的模型 [9]。

Girgis 採用卡門濾波器分析高阻抗故障所產生的信號 [10]。芬蘭的 Hänninen 利用機率的方法做高阻抗故障的偵測及定位 [11]。

人工智慧演算法也常被提出作為故障偵測的手段。Jota 利用模糊推論鑑別高阻抗故障 [12]。紐約壬色列理工學院的 Erzen [13] 及伊朗的 Khorashadi-Zadeh [14] 均利用類神經網路開發可靠的高阻抗故障偵測架構。Ko 採用類神經網路及混沌度 (chaotic degree) 偵測高阻抗故障 [15]。

Sheng 利用決策樹 (decision tree) 的方法來作高阻抗故障的判斷。另外也提出一種電弧的模型，透過 EMTP 模擬軟體實現高阻抗故障時的電壓、電流現象。所提出的演算法可以正確的分辨負載、電容組的切換暫態、變壓器的突入電流及高阻抗故障 [16]。

新加坡南洋大學的 David Chan 提出一種新的電弧模型，讓故障發生時間及電弧持續的長短可由外界加以控制。小波理論蓬勃發展後，各種的應用也孕育而生。David Chan 採用小波轉換作為高阻抗故障或電容組切換暫態的信號辨析工具 [17-18]。

香港科技大學的 Snider，將經過離散

小波分析後的高頻及低頻係數做均方根值的計算，再將這些數值送到分類器做訊號辨識。分類器所使用的演算法是最近相鄰法 (nearest neighbor rule, NNR)，另外也提出了另一種簡化的二極體電弧模型 [19]。

西班牙的 Lazkano 提出基於中性線電流的小波封包 (wavelet packet) 分析技巧，辨識含有電弧特徵的高阻抗故障 [20]。

另外也有為數甚多的研究採用小波轉換作為特徵信號的擷取，最後利用人工智慧理論判定故障。加拿大的 Jabr 利用結合小波轉換及有限脈衝響應神經網路 (finite impulse response artificial neural network, FIRANN) 判斷檢出高阻抗的故障 [21]。

伊朗的 Sedighi 提出了兩個演算法來偵測高阻抗故障，分別是第一種利用小波轉換作為特徵的解析，接下來的基因演算法 (genetic algorithm, GA) 其使用的目的為特徵信號的化簡/選定，最終利用貝氏分類器 (Bayes classifier) 判定高阻抗故障。第二種方法一開始也是用小波分析技巧，接下來利用主要成份分析法 (principal component analysis, PCA) 作為特徵信號的化簡/選定的工具，最終利用神經網路作高阻抗故障及其他事件的分類辨識 [22]。

德州達拉斯大學與 ABB 公司共同執行高阻抗人工故障試驗，他們提供了如何進行安全無虞的人工故障實驗流程及兼顧試驗進行中其他饋線的電力不中斷、跳脫的電力品質維護的方法 [23]。

最近 ABB 與美國 Lafayette College 合作，利用人工智慧理論開發一新的高阻抗故障偵測演算法，綜合包括：高階統計量、小波理論及神經網路多重演算法則，經 Matlab 驗證其對於高阻抗故障偵測率非常接近 100%，此演算法並已內建於一型取樣率為 32 samples/cycle 之 ABB 配電系統 REF 550 型保護電驛中，惟截至目前為止

尚未有實際應用於配電系統饋線保護之測試報告[24]。

理論基礎

複合式高阻抗故障偵測系統包含兩個獨立的故障偵測演算法，其架構如圖 1 所示。第一種演算法是結合連續小波轉換及圖形辨識偵測故障。第二種方法是結合離散小波轉換及統計信賴度故障偵測演算法。基於兩個演算法的輸出最後經決策邏輯判定是否發生高阻抗故障。

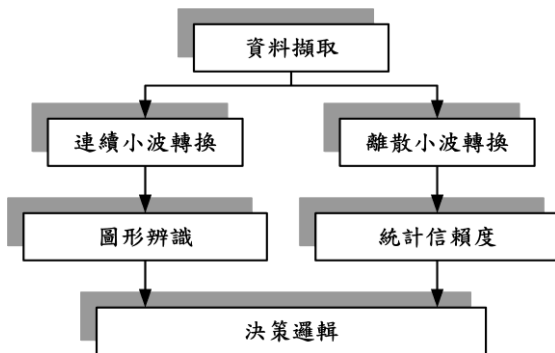


圖 1 複合式高阻抗故障偵測系統

小波轉換[25]

小波(wavelet)，即小區域的波，是一種長度有限，平均值為零的波形。它有兩個特點：一是“小”，即在時域具有緊緻支撐；二是正負交替的“脈動性”，即直流分量為零。小波轉換的基底函數是由一母波函數 $\psi(t)$ (mother wavelet) 作尺度伸縮 (scale dilation) a 與平移(translation) τ 兩個動作而來，因此具有彈性的時間/頻率特性，能自動在高頻時變窄，低頻時變寬。

其中基底函數 $\psi^{a,\tau}(t)$ 定義成：

$$\psi^{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right), a \in R^+, \tau \in R \quad (1)$$

較大的 a 值，表示小波是由母波作擴張的結果，而變成一個寬而低頻的基底。反之較小的 a 值，表示小波是由母波作壓縮而形成一個窄而高頻的基底。但不管是尺度伸縮或位移，小波的大小值(norm)始終不變，且和母波相同，即

$$\|\psi^{a,\tau}\| = \|\psi\| \quad (2)$$

連續小波轉換 (continuous wavelet transform, CWT) 的定義是把母波函數 $\psi(t)$ 做位移 τ 後，再在不同尺度 a 下與待

分析的信號 $f(t)$ 做內積：

$$CWT_f(a,\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt, a > 0 \quad (3)$$

我們可以用顯微鏡觀點來解釋上面的意義：我們用鏡頭觀察 $f(t)$ ， $\psi(t)$ 代表鏡頭所起的作用(例如濾波或迴旋積分)。 τ 相當於使鏡頭相對於 $f(t)$ 平行移動， a 的作用相當於鏡頭對 $f(t)$ 推進或遠離。

我們注意到 CWT 在時間與頻率的解析度取捨方式是和 STFT 不同，這樣的架構使得 CWT 比 STFT 更有能力來觀察信號瞬間的高頻暫態現象。因此 CWT 非常合適於非靜態(nonstationary)信號之分析。

很明顯的，不管是 STFT 或者是 CWT，當它們的係數 (τ, w) 或 (a, τ) 是連續的時候，就會有高度的資訊冗餘 (redundant)。因此是否可以使用一組離散式集合的基底函數並只對係數的離散格點作

計算，就能完全描述訊號 $f(t)$ 。如果可以找到一組離散式集合的基底函數形成一組正規化垂交基底(orthonormal basis)，這意味著沒有冗餘存在。

我們定義一個離散小波轉換(discrete wavelet transform, DWT)

$$\begin{aligned} DWT_f(j, k) &= \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \\ &= a_0^{-j/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(a_0^{-j}t - kb_0) dt \end{aligned} \quad (4)$$

我們稱 $DWT_f(j, k)$ 為小波係數(wavelet coefficients)。

為了計算的方便，我們將 DWT 的離散方式選為二元格點(dyadic grid)，即 $a_0=2, b_0=1$ ，我們將小波與 DWT 重新寫成：

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), \psi \in L^2(R) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} DWT_f(j, k) &= \langle f, \psi_{j,k} \rangle \\ &= 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(2^{-j}t - k) dt, f \in L^2(R) \end{aligned} \quad (6)$$

此後我們都使用上面這兩個式子作為小波與 DWT 的定義。

基於以上的觀點小波轉換具有以下特點：

1. 小波展現(wavelet representation)可基於所在的時間與頻率(localization in both time and frequency)展現一個信號，是一種時間-頻率展現(time-frequency representation)。小波轉換可將一個非靜態信號分解至一系列的小波(wavelets)基底之上，而基底上的係數會變得比較靜態，因此有利於編碼。

2. 具有多重解析(multiresolution)的架構，也叫多尺度分析的特點，可用粗調及細調地逐步觀察信號。
3. 可以看成用基本頻率特性為 $\Psi(\omega)$ 的帶通濾波器，具有非一致性(non-uniform)濾波頻寬特性的樹狀濾波器組(tree-structure filter bank)。在不同尺度伸縮下對信號做濾波。其中尺度越大相當於頻率越低。這使得信號的高頻部份有較好的時間解析度(time resolution)，而低頻部份則有較好的頻率解析度(frequency resolution)。

4. 適當地選擇小波基底函數，使 $\psi(t)$ 在

時域上為緊緻支撐， $\Psi(\omega)$ 在頻域上也

比較集中。小波轉換在時域及頻域上都可以明顯表現出信號的局部特徵，因此有利於檢測信號的暫態現象或奇異點。

5. 小波分析的一個主要特點就是能夠解析信號的局部特徵，例如可以發現疊加在一個平滑的正弦信號上的一個非常小的畸變信號的出現時間。傳統的傅立葉轉換只能得到頻譜的大小。利用小波分析可以非常準確地分析出信號在什麼時刻發生畸變。

6. 我們把小波和傅立葉轉換做一比較。傅立葉轉換所用的正弦波在時間上是沒有限制，從負無限大到正無限大，但小波函數傾向於不規則與不對稱。傅立葉分析是將信號分解成一系列不同頻率的正弦波疊加，同樣小波分析是將信號分解成一系列小波函數的疊加，而這些小波函數都是由一個母波函數經過尺度伸縮與平移得來的。用不規則的小波函數來逼近瞬時變化的信號顯然要比平滑的正弦曲線要好。

小波轉換已在學術界及工業界引起廣

泛的討論，包含有信號處理、影像處理、系統識別、地震勘測等的應用。另外也成功地使用在電力系統的各種高頻暫態現象的偵測及分類，包括有：電力品質[26]，部份放電 [27]，電力系統傳輸線的故障偵測 [28]，負載的切換及變壓器激磁的突入電流等[29]。

統計分析[30-31]

卡方分佈

設從母體中隨機抽取樣本 (X_1, X_2, \dots, X_n) ，則統計量為：

$$S_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (7)$$

其中 S_X^2 稱為樣本變異數， S_X 稱為樣本標準差。

在一般情況下， S_X^2 的抽樣分配不易直接導出，但若我們假設母體為 $X \sim N(\mu_X, \sigma_X^2)$ ，而將(7)式左右兩邊各除以 σ_X^2 (或稱為標準化)再將 $(n-1)$ 移項於是可得：

$$\frac{(n-1)S_X^2}{\sigma_X^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma_X^2} \quad (8)$$

(8)式的這個統計量的機率分配為自由度 $(n-1)$ 的 χ^2 分配(卡方分配)，它可以幫助推論母體變異數。

$$\text{設 } X \sim N(\mu_X, \sigma_X^2), \text{ 令 } Z = \left(\frac{X - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2,$$

則：

$$Z = \left(\frac{X - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \sim \chi_1^2 \quad (9)$$

Z 為自由度 1 的卡方分配。自由度是指可以選擇的觀察值的數目。

信賴區間

在區間估計方面的評量標準為信賴係數(confidence coefficient)又稱信賴水準(level of confidence)。信賴係數是指區間估計式能夠包含母體未知參數的機率，通常以 $1-\alpha$ 表示。由於區間估計式以 (θ_1, θ_2) 表

示，是隨機變數構成的式子，所以隨著不同的樣本以計算出不同的區間估計值。有的區間包含未知參數 θ ，有的區間不包含未知參數 θ 。因此，以機率來表示這區間估計式能夠包含未知參數 θ 的可能性，這個機率就是信賴係數。例如，100 個可能的樣本分別代入區間估計式 (θ_1, θ_2) 可以得到 100 對的區間估計值。若其中的 95% 區間都包含未知參數 θ ，則此一區間估計的信賴係數為 0.95。

一個較佳的信賴區間是指區間長度較短或信賴係數較接近 1。換言之，如果兩個信賴區間的長度相同，則信賴係數高者為佳；同理，在相同的信賴係數下，以較短長度的信賴區間為佳。

為了提高故障偵測的可靠度避免不必要的供電中斷，利用信賴度作為異常變動的檢測門檻。一旦有高阻抗故障發生，斷續的電弧火花現象或者是跳動的導線都會造成一段時間的信號異常劇烈變動。然而電容組或者是負載的切換也有類似的現象，只是他們的變動持續時間遠小於高阻抗故障發生的事件。所以可以利用檢測經小波轉換後的 $3I_0$ 零序電流高低頻特徵信

號的 95% 信賴區間是否超過臨界值，或者是前後時間的差異值過大來做為判斷是否有高阻抗的故障發生的可能性。

$3I_0$ 零序電流的取樣信號由於取樣的樣本夠大，且該信號又具有隨機性，所以該樣本服從常態分配。若 X 代表 $3I_0$ 零序電流的大小值，令

$$\{X_i | i=1, 2, \dots, n\}, n=60 \quad (10)$$

代表在一段連續時間中取樣而成 X_i 的母體。我們可以將 $\{X_i\}$ 母體視為一常態分佈的隨機參數，簡記為 X ，令 μ 和 σ^2 代表 X 的平均值及變異數。

依據上述的 χ^2 分配的定義可知 Z 為自由度為 1 的卡方分配，我們可以直接由卡方分配表查得 95% 的信賴水準(以 $\chi_{1,0.05}^2$ 表示)，使得

$$P(Z \geq \chi_{1,0.05}^2) = 1 - 0.05 = 0.95 \quad (11)$$

根據(9)式可以求出信賴度為 95% 的臨界值設定

$$X_{Threshold} = \mu + \sqrt{\chi_{1,0.05}^2 \times \sigma^2} \quad (12)$$

因此可以將此臨界值做為檢測經小波轉換後的 $3I_0$ 零序電流高低頻特徵信號是否異常變動的基準值。

高阻抗人工故障試驗

高阻抗人工故障試驗是在雲林區處台西變電所台十六饋線所建置之試驗場實施，進行的試驗內容有斷線接地故障以及斷線未落地故障。此饋線的主要負載為養殖業的魚塭抽水馬達、增氧機及一般住家負載。負載電流的大小約 100-110 A。試驗場距離台西變電所約十多公里[32]。

圖 2 為台電雲林區處台西變電所台十六饋線單線圖，本次之試驗由 #61 電桿引接至試驗場內實施。

為了驗證複合式高阻抗故障偵測系統的可行性，遂將九十四年三月二十七日至三十日的人工故障試驗記錄資料作為測試的依據。試驗的內容包括有 a、b 及 c 三個個別的故障事故；受測導線材質有交連 PE(XLPE) 風雨線、裸銅線及鋼心鋁線 (ACSR)。高阻抗故障的內容有斷線接地-受測導線掉落在如水泥地、柏油地、碎石地、沙地及草地等。斷線未接地的情況有導線掉在草叢、矮樹叢及斷線懸空，總計 59 項。另外有 3 次的電容組切換試驗。

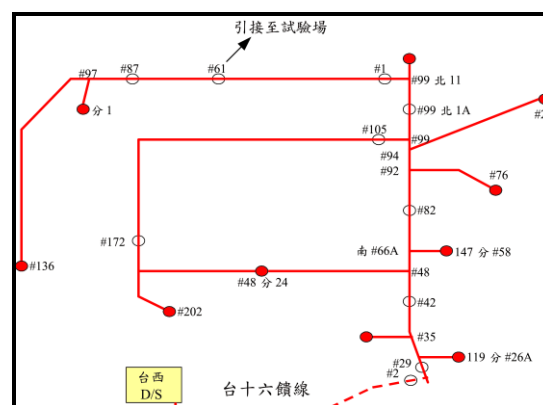


圖 2 高阻抗人工故障試驗台十六饋線單線圖

實驗結果及分析

圖 3、6、9、12 及 15 個別顯示 5 階層的 $3I_0$ 零序電流離散小波分析，其中 $c_0[n]$ 表示未轉換前的原始信號， $c_5[n]$ 表第 5 階層低頻係數信號， $d_1[n] \sim d_5[n]$ 表第 1 到第 5 階層的高頻係數信號，發生的高阻抗故障事故有 XLPE 風雨線於大約 2.5 秒掉落水泥地面；大約在 0.6 秒及 6.3 秒以後發生 XLPE 風雨線斷落在灌木叢中；於 4 秒時

XLPE 風雨線掉落碎石地面故障；於大約 5.8 秒 XLPE 風雨線斷線掉落在矮樹叢。另外有裸銅線在大約 0.5 秒斷線掉在溼柏油路面。圖 4、7、10、13 及 16 則顯示相對應的離散小波各階層高頻及低頻係數利用卡方分佈及 95% 信賴區間所計算而得的臨界值。由圖中我們可以清楚地看到當高阻抗故障發生時其臨界值將會有明顯地變動；隨著故障電流的變大也有增大的趨勢。於高低頻係數中僅 $d_1[n]$ 變動最不明顯，因此其餘的係數 $c_5[n]$ ， $d_5[n]$ ， $d_4[n]$ ， $d_3[n]$ 及 $d_2[n]$ 可做為判定高阻抗故障事故的特徵信號。因此我們可從圖中判定在圖 4 中約 3 秒時有高阻抗事故；於圖 7 中於 1 秒及 7 秒有事故發生。於圖 10 中可以清晰看到約 5 秒時高阻抗故障發生。其餘情形皆與前述相同。

我們另外採用連續小波轉換及圖形辨識的技術來判定高阻抗事故。於圖 5、8、11、14 及 17 中是利用 $3I_0$ 零序電流作連續小波分析，利用 3D 的圖形來顯示其轉換的結果。於故障發生的瞬間，相對應於離散小波轉換，連續小波轉換 3D 圖形的輸出也有明顯地變動，所以此現象可做為故障判別的依據。

另外於圖 18、19 及 20 中則是展示了電容組切換時離散小波轉換的高低頻係數變動，95% 信賴區間臨界值變動，及連續小波轉換的 3D 圖形，由這些圖形的結果可清楚地看到其變化的情況是與高阻抗故障事故有所不同的。

經由測試所有的高阻抗人工故障試驗記錄資料，本文所提出的小波轉換高阻抗故障偵測技術其故障偵測正確率高達 93.2%(55/59)，其中於 59 個事故中，只有發生 4 次誤判斷，其餘均可正確判定故障的發生。由於開關切換的電弧暫態現象遠比高阻抗故障持續的時間更短，因此 3 次

的電容組切換均可正確的偵測到並與高阻抗事故有所區分。

結論

截至目前為止並無任何商業化電驛可完全偵測架空饋線之高阻抗故障，因其故障電流可能遠低於負載電流，甚至發生斷線不接地而無故障電流。GE-Multilin F60 Feeder Management Relay 係針對高阻抗故障發生時所特有之電弧現象發展而成，報告顯示其測試成功率約 80%。最近 ABB 亦宣稱利用高階統計量、小波轉換及類神經網路法已成功發展出具高阻抗故障偵測功能之 ABB REF 550 Distribution Feeder & Subtransmission Line Protection and Control Relay 配電系統電驛，成功判別率幾達 100%。

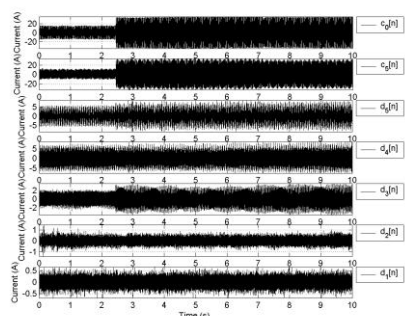
於某一特定相實施高阻抗人工故障，當故障發生時，三相電壓並沒有明顯的變動特徵，也沒有清楚地顯現在故障相的電流上。很幸運地， $3I_0$ 零序電流明白地展現故障的發生。

高阻抗故障的判定可借助於 $3I_0$ 零序電流的離散小波分析，由於第 1 階層的高頻係數充滿了大量的諧波成份因此無法提供故障的判別依據，但是其他階層的高頻係數及低頻係數即可作為故障判斷的依據。透過卡方分配與信賴區間的運用可完成自動設定各階層高頻係數及低頻係數的 95% 信賴區間臨界值，便於故障的檢測。

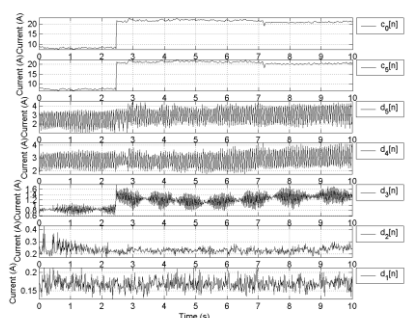
本文另外也提出結合連續小波轉換與圖形辨識開發高阻抗故障偵測演算法，仍然採用 $3I_0$ 零序電流作為高阻抗故障判讀的依據，利用 3D 圖形顯示小波轉換後的結果，並用圖形辨識的方法辨識高阻抗故障。透過前述的兩個演算法最後經決策邏輯判定是否發生高阻抗故障。

為了證明所提出的演算法的可行性，利用人工高阻抗故障試驗記錄加以驗證，經分析其偵測結果正確率可達 93.2%。未

來的工作重點是完成以硬體架構實踐演算法，並實地測試達到 100% 的故障偵測率。



(a)



(b)

圖 3 交連 PE 風雨線 A 相水泥地面高阻抗

故障 5 階層小波分析 3I0 零序(a)：瞬

時電流(b)：均方根電流

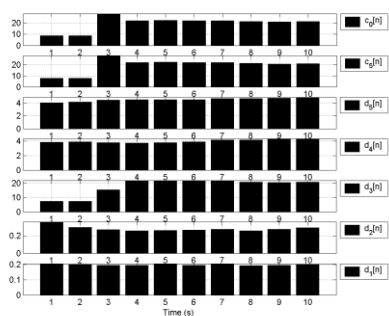


圖 4 水泥地面高阻抗故障 3I0 零序均方根

電流小波係數 95%信賴區間臨界值

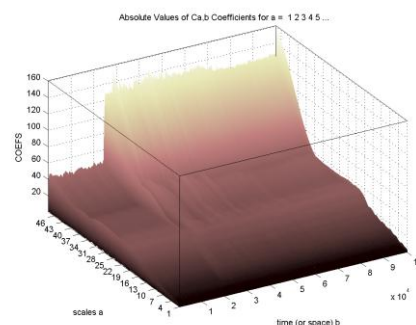
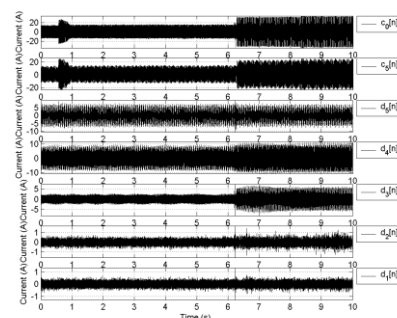
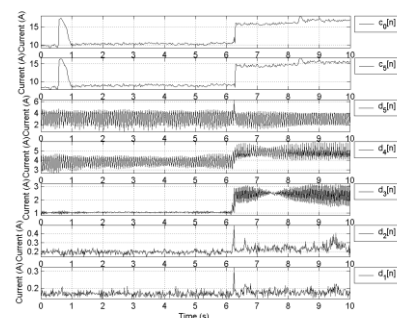


圖 5 水泥地故障 3I0 零序電流連續小波分析



(a)



(b)

圖 6 交連 PE 風雨線 A 相灌木叢高阻抗故

障 5 階層小波分析 3I0 零序(a)：瞬時

電流(b)：均方根電流

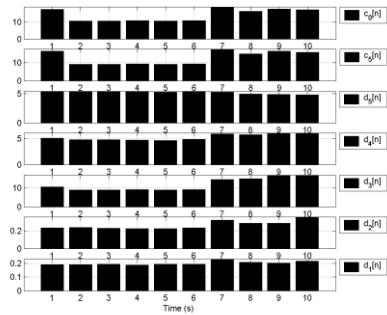


圖 7 灌木叢高阻抗故障 310 零序均方根電

流小波係數 95%信賴區間臨界值

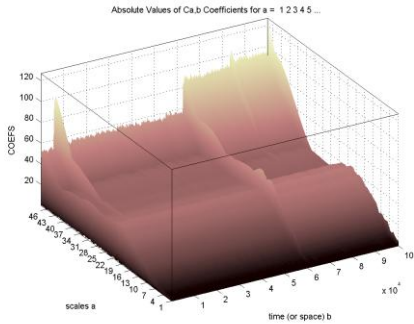
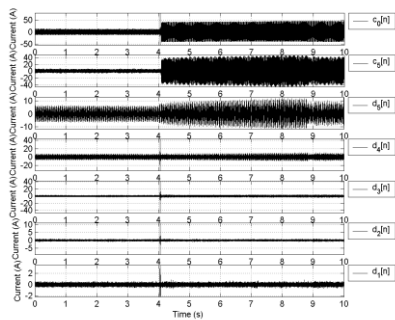
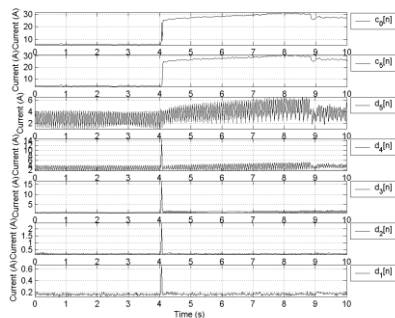


圖 8 灌木叢故障 310 零序電流連續小波分析



(a)



(b)

圖 9 交連 PE 風雨線 A 相碎石地面高阻抗

故障 5 階層小波分析 310 零序(a) :

瞬時電流(b) : 均方根電流

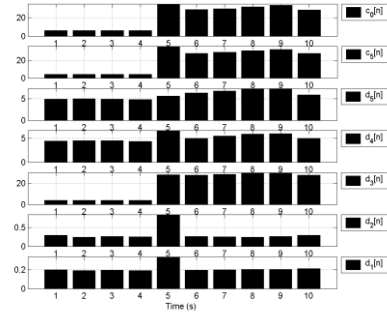


圖 10 碎石地面高阻抗故障 310 零序均方

根電流小波係數 95%信賴區間臨

界值

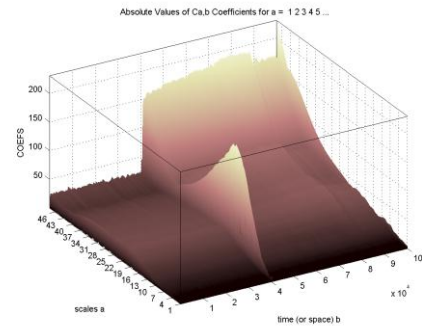
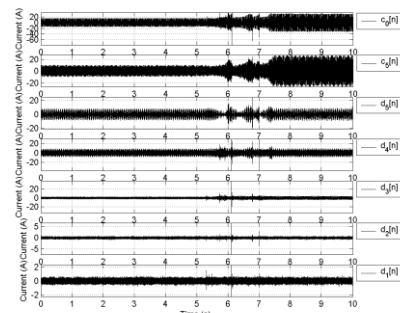
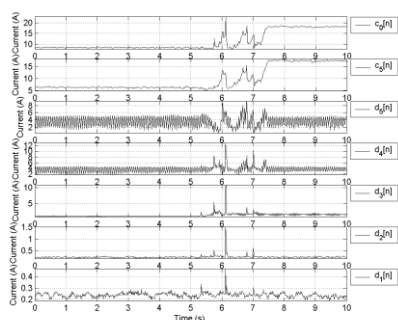


圖 11 碎石地故障 310 零序電流連續小波分析



(a)



(b)

圖 12 交連 PE 風雨線 A 相草叢高阻抗故障

障 5 階層小波分析 3I0 零序(a) : 瞬

時電流(b) : 均方根電流

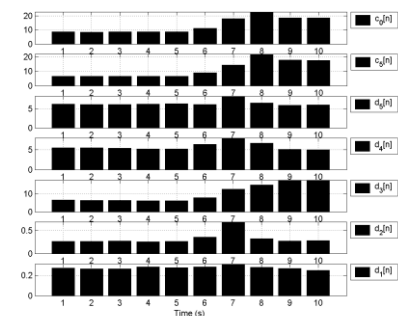


圖 13 草叢高阻抗故障 3I0 零序均方根電

流小波係數 95%信賴區間臨界值

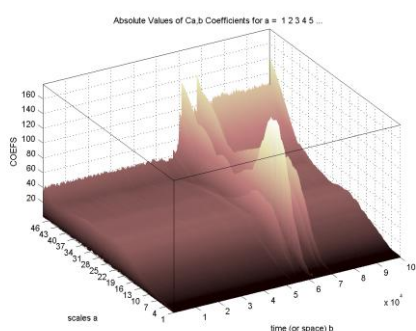
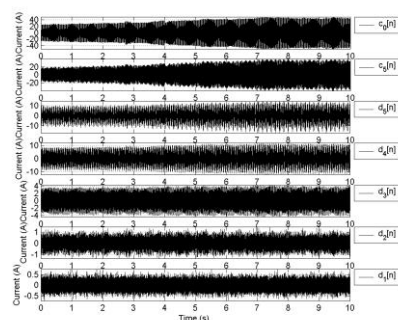
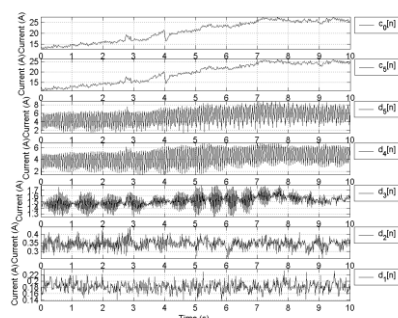


圖 14 草叢故障 3I0 零序電流連續小波分析



(a)



(b)

圖 15 裸銅線 A 相溼柏油地面高阻抗故障

5 階層小波分析 3I0 零序(a) : 瞬

時電流(b) : 均方根電流

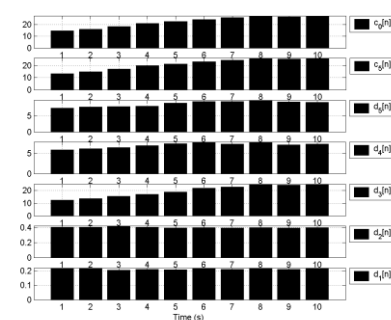


圖 16 柏油地面高阻抗故障 3I0 零序均方

根電流小波係數 95%信賴區間臨

界值

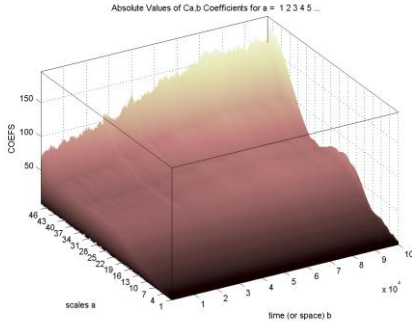
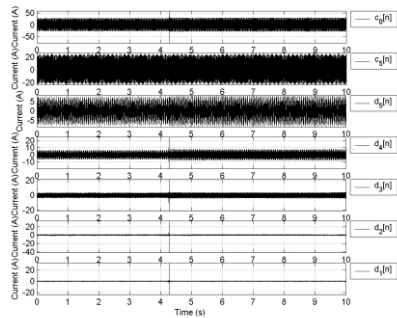
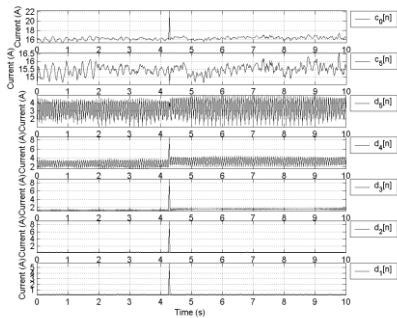


圖 17 柏油地故障 310 零序電流連續小波分析



(a)



(b)

圖 18 電容組切換 5 階層小波分析 310 零

序(a)：瞬時電流(b)：均方根電流

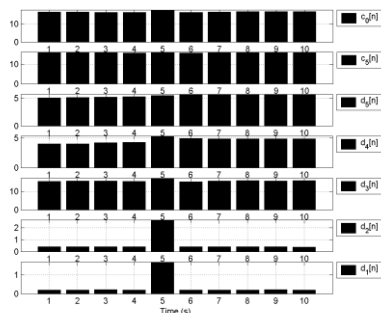


圖 19 電容組切換 310 零序均方根電流小

波係數 95%信賴區間臨界值

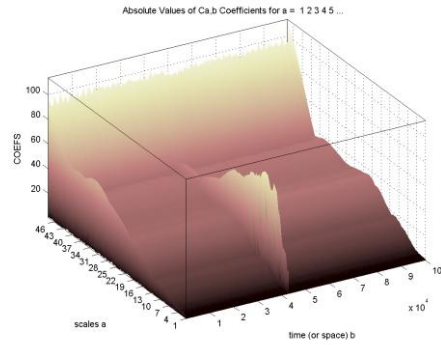


圖 20 電容組切換 310 零序電流連續小波分析

參考文獻

[1] 連聃宇、鄧志淦、陳士麟、張志聲、沈弘彥、林財明,「配電線高阻抗故障偵測器之研究」,台電工程月刊,第 562 期,第 27~39 頁,民國八十四年。

[2] 連聃宇、王文郁、賴漢倫、陳士麟、廖清榮、廖政立、林財明,「高阻抗數位電驛實測與改良」,台電工程月刊,第 591 期,第 56~71 頁,民國八十五年。

[3] 陳士麟、連聃宇、王文郁、顏惠結、郭宗益、楊金石、廖政立、廖清榮、翁進興、沈弘彥、沈哲生、陳瑞檄、林財明,「高阻抗數位電驛實測與改良」,台灣電力公司研究報告,民國八十六年。

[4] K.-Y. Lien, S.-L. Chen, C.-J. Liao, T.-Y. Guo, T.-M. Lin and J.-S. Shen “Energy Variance Criterion and Threshold Tuning Scheme for High Impedance Fault Detection,” IEEE Trans. on Power

- Delivery, Vol. 14 No. 3, pp. 810-817, July 1999.
- [5] H. Calhoun, M. T. Bishop, C. H. Eichler and R. E. Lee, "Development and Testing of an Electro-Mechanical Relay to Detect Fallen Distribution Conductors," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6, pp. 1643-1650, June 1982.
- [6] B. D. Russell and R. P. Chinchali, "A Digital Signal Processing Algorithm for Detecting Arcing Faults on Power Distribution Feeders," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 132-140, Jan. 1989.
- [7] A. V. Marnishev, B. D. Russell and C. L. Benner, "Analysis of High Impedance Faults Using Fractal Techniques," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, Issue 1, pp. 435-440, Feb. 1996.
- [8] C. L. Benner and B. D. Russell, "Practical High-Impedance Fault Detection on Distribution Feeders," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, pp. 635-340, May/June 1997.
- [9] S. R. Nam, J. K. Park, Y. C. Kang and T. H. Kim, "A Modeling Method of a High Impedance Fault in a Distribution System Using Two Series Time-Varying Resistances in EMTP," Proc of IEEE 2001 Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, pp. 1175-1180, July 2001.
- [10] A. A. Girgis, W. Chang and E.B. Makram, "Analysis of High-Impedance Fault Generated Signals Using a Kalman Filtering Approach," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, Issue 4, pp. 1714-1724, Oct. 1990.
- [11] Seppo Hänninen, Matti Lehtonen and Urho Pulkkinen, "A Probabilistic Method for Detection and Location of Very High Resistive Earth Faults," Electric Power Systems Research, Vol. 54, No. 3, pp. 199-206, 2000.
- [12] F. G. Jota and P. R. S. Jota, "High-Impedance Fault Identification Using a Fuzzy Reasoning System," Proc. of IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, Issue 6, pp. 656-661, Nov. 1998.
- [13] Lokman Erzen, "Artificial Neural Network High Impedance Fault Detection," Doctor of Philosophy Thesis, Graduate Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, U.S.A., 2003.
- [14] H. Khorashadi-Zadeh, "A Novel Approach to Detection High Impedance Faults Using Artificial Neural Network," Proc. of The 39th International Conference on Universities Power Engineering, Vol. 1, pp. 373-376, Sep. 2004.
- [15] Jae-Ho Ko, Jae-Chul Shim, Chang-Wan Ryu, Chan-Gook Park and Wha-Yeong Yim, "Detection of High Impedance Faults Using Neural Nets and Chaotic Degree," Proc. of EMPD'98 International Conference on Energy Management and Power Delivery, Vol. 2, pp. 399-404, March 1998.
- [16] Yong Sheng and Steven M. Rovnyak,

- “Decision Tree-based Methodology for High Impedance Fault Detection,” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 553-536, April 2004.
- [17] Yibin Xia, Li Qi and D. T. W. Chan, “DSP Implementation of a Wavelet Analysis Filter Bank for High Impedance Fault Detection,” Proc. of 1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery, Vol. 2, pp. 417-421, March 1998.
- [18] D. T. W. Chan and Yibin Xia, “A Novel Technique for High Impedance Fault Identification,” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, pp. 738-744, July 1998.
- [19] T. M. Lai, L. A. Snider, E. Lo and D. Sutanto, “High Impedance Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform and Frequency Range and RMS Conversion,” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, Issue 1, pp. 397-407, Jan. 2005.
- [20] Andoni Lazkano, Jesus Ruiz, Elisabete Aramendi and Luis A. Leturiondo, “Evaluation of a New Proposal for an Arcing Fault Detection Method Based on Wavelet Packet Analysis,” European Trans. on Electrical Power, Vol. 14, pp. 161-174, 2004.
- [21] H. M. Jabr and A. I. Megahed, “A Wavelet-FIRANN Technique for High-Impedance Arcing Faults Detection in Distribution Systems,” Proc. of The 5th International Conference on Power Systems Transients, Paper No. IPST05-035, June 2005.
- [22] A.-R. Sedighi, M.-R. Haghifam and O.P. Malik, “Soft Computing Applications in High Impedance Fault Detection in Distribution Systems,” Electric Power Systems Research, Vol. 76, Issues 1-3, pp. 136-144, Sep. 2005.
- [23] M. Carpenter, R. F. Hoad, T. D. Bruton, R. Das, S. A. Kunsman and J. M. Peterson, “Staged-Fault Testing for High Impedance Fault Data Collection,” Proc. of The 58th Annual Conference on Protective Relay Engineers, pp. 9-17, April 2005.
- [24] Ratan Das and Steven A. Kunsman, “A Novel Approach for Ground Fault Detection,” Proc. of The 57th Annual Conference on Protective Relay Engineers, pp. 1-14, April 2004.
- [25] C. S. Burrus, R. A. Gopinath and H. Guo, Filter Banks and The Discrete Wavelet Transform, Introduction to Wavelet and Wavelet Transforms: A Primer, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 31-32, 1998.
- [26] Surya Santoso and Peter Hofmann, “Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis,” IEEE Trans. on Power Deliver, Vol. 11, No. 2, pp. 924-930, 1996.
- [27] X. Ma, C. Zhou and I. J. Kemp, “Interpretation of Wavelet Analysis and Its Application in Partial Discharge Detection,” IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 3, pp. 446-457, June 2002.

- [28]J. Liang, S. Elangovan and J. B. X. Devotta, "A Wavelet Multiresolution Analysis Approach to Fault Detection and Classification in Transmission Lines," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 5, pp. 327-332, 1998.
- [29]O. A. S. Youssef, "A Wavelet-based Technique for Discrimination between Faults and Magnetizing Inrush Currents in Transformers," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, pp. 170-176, Nov. 2003.
- [30]張健邦，統計學，第 241~290 頁，台北，三民書局，民國九十年。
- [31]D. C. Montgomery and G. C. Runger, Applied Statistics and Probability for Engineers, John Wiley & Sons, New York, ch. 8, 2003.
- [32]楊明達，「應用小波轉換及神經網路於配電線路高阻抗故障偵測之研究」，博士學位論文，第六章高阻抗人工故障試驗，第 67~91 頁，民國九十五年。