

匯流排差動保護電驛誤動作原因分析測試

台電綜合研究所 鄭強、范振理、楊金石
逢甲大學 黃思倫
亞東技術學院 盧光常
巧立工業股份有限公司 林木智

摘要

本研究應用短路試驗設備，架構單匯流排一進兩出電路，作為單相匯流排差動保護之試驗模型，探討於匯流排發生外部事故時，短路電流暫態響應，對比流器飽和及其二次合成電流幅值之影響。試驗結果驗證短路電流之直流暫態成分，影響各個比流器一、二次電流變比準確度外；其鐵心飽和及磁滯效應，亦可導致比流器二次電流相角偏移一次電流；若過電流僅輕微影響比流器鐵心磁路飽和，但磁滯特性導致二次電流相位角度偏移，亦是低阻抗型差動保護電驛誤動作之主要因素。

Abstract

A single-phase short circuit test system has been applied to study the through fault current protection of bus bar system. The main purpose of this study is to figure out when a fault located at outside of bus bar, the current differential amplitude influenced by the saturation, phase angle shift characteristics of the current transformers. The test results show that the differential current increased and the protection relay tripped factors not only caused by core saturation but also the phase angle shift between primary

and secondary side are very important too. This study is important for refer to improve the malfunction of low impedance differential protection relay.

關鍵詞 (Keywords)：比流器(Current transformer)、匯入點(junction point)、匯流排差動電流保護(bus differential protection)、交流對稱成分(symmetrical component)、直流暫態成分(dc component)

一、前言

變電所之匯流排設備是電力匯入及匯出的一項重要裝置，在系統中任一匯流排發生故障或保護電驛產生誤動作，均會造成系統產生嚴重的擾動，引起系統穩定度問題，因此，匯流排保護架構除須滿足簡單性之外，尚須具備快速性、可靠性及安全性多項要求，以達穩定系統的保護目的。

匯流排保護範圍涵蓋斷路器、隔離開關、比壓器、比流器、避雷器及匯流排相關附屬配件等電力設備，於超高壓變電所、一次變電所及配電變電所之匯流排保護，廣泛應用差動電流法(Differential current method)作為主保護，基本原理是以克希荷夫電流定律(KCL)為基礎，在正常運轉且無偶發事故時，保護區間流入與流

出匯流排節點上的電流總和為零，反之，當保護區間內發生事故時，流入與流出此一節點的電流總和不等於零，因此，在匯流排差動電流保護結構中，利用各個比流器二次側電流匯入點(Junction point)上的合成電流作為驅動保護電驛動作之信號來源。

過去國內、外關於比流器飽和研究文獻指出[1~4]，差動保護電驛在故障電流之直流暫態成分，以及比流器二次負擔相互作用下，可能引起比流器磁飽和而喪失變比器之線性度，導致差動電流保護電驛誤動作。惟在整體差動保護系統中，合成電流與鐵磁飽和之動態響應較少探討，本文乃參考匯流排保護電驛誤動之紀錄資料，利用短路電流試驗設備，建立匯流排保護一進兩出的單相線路模型，探討短路電流對比流器二次側電流之動態響應，並進一步分析比流器飽和與差動保護合成電流之特徵，藉以究明外部事故與差動保護電驛誤動作之影響因素。

二、匯流排保護基本原理

假設匯流排的短路銅片上無任何阻抗，因此電流在其上流動時，不會產生任何電壓降，故無阻抗消耗與損失能量；另一方面，同時假設匯流排保護選用之比流器為理想變比器，因此在系統正常運轉情況下，比流器鐵心的 v-i 特性可以視為線性區域工作。在此理想狀況下，流進任一匯流排節點之電流總和必須等於流出此一匯流排節點之電流總和。圖 1-a 顯示匯流排發生外部故障時，故障電流自匯流排流出湧向故障點；故流入與流出匯流排節點的電流和為零，由匯流排上觀察外部線路事故之合成電流值，可寫成下式：

$$i_f = i_6 = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 \dots\dots\dots(1)$$

圖 1-b 顯示故障點位於匯流排內部時，連接在匯流排上的各個線路提供故障電流，改變系統原有電流的平衡狀態；觀察電路節點電流，則僅有注入匯流排的故障電流，而無流出匯流排的負載潮流，故流入節點的電流相量總和，等於流入故障點之總電流。

在匯流排內部故障下，匯流排上各比流器之二次側合成電流值大於零，其故障電流相量和可表示為：

$$i_f = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_6 \dots\dots\dots(2)$$

式 1~2 顯示差動保護利用節點電流和之大小，判斷故障點係發生在保護區間內或是保護區間外，故可利用過電流電驛組成簡單型式的差動保護系統，並以最大負載電流值，作為設定差動保護之基礎，惟此類差動保護犧牲了部分靈敏度，但可獲得較佳的可靠性。

差動保護法是發變電所匯流排保護之主要型式，其流進保護電驛動作電路中的差電流，如圖 2 所示，圖 2-a 顯示事故發生於匯流排保護區間外，其二次側差動電流為零；圖 2-b 顯示，若事故點位於匯流排保護區間中，則流進保護電驛動作線圈中的差動電流不為零，保護電驛可利用此合成電流產生電驛接點動作之轉矩，迅速跳脫相關斷路器，並將事故點自系統中隔離，保障正常設備可繼續運轉，並維持系統穩定供電。

比流器在短路電流作用下，其鐵心若含有剩磁，或短路電流含有直流暫態成分，則可能引起保護系統各個比流器發生鐵心磁飽和。於最惡劣的運轉條件中，鐵

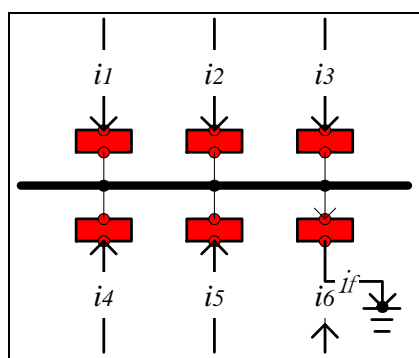
心含有剩磁或/及在過電流直流成分作用下，差動保護電驛可能因此因素產生誤動作，此係匯流排差動電流保護較難以克服之問題。

三、短路電流與比流器特性分析

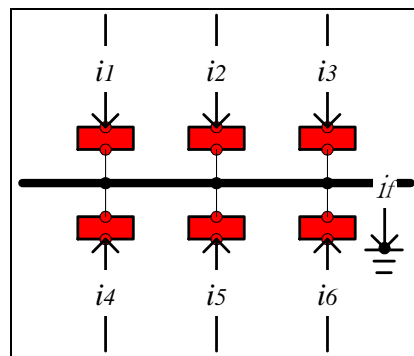
比流器飽和原因與直流暫態成份、磁滯特性、鐵心剩磁、鐵心的飽和磁通密度、鐵心之截面積、比流器的匝比及其二次側負擔 (Burden) 大小等因素有關，以下說明短路電流對比流器特性之影響。

(一) 短路電流

一次側故障電流之直流暫態成份，是引起比流器飽和的重要因素，發生磁飽和的比流器，勢必導致二次側電流波形畸變，並可能影響差動保護合成電流之位準。圖 3 顯示由短路試驗產生之過電流，除交流對稱成分 (Symmetrical component) 外，亦含有直流暫態成分 (DC component)。

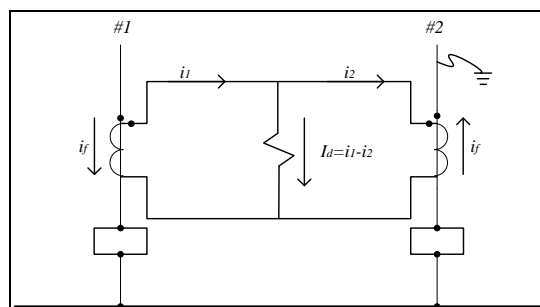


(a) 外部事故

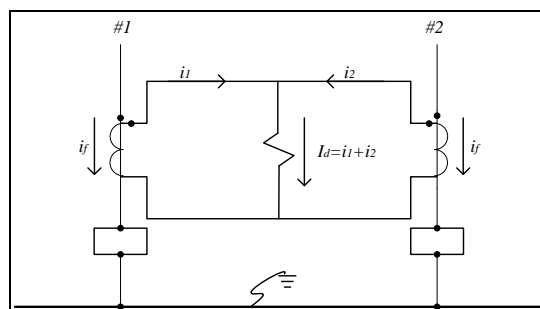


(b) 內部事故

圖 1 匯流排保護事故分類



(a) 外部事故差電流為零



(b) 匯流排內部事故差電流大於零

圖 2 差動保護電路圖

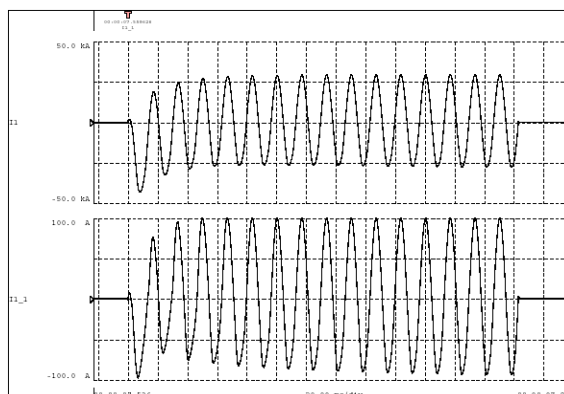


圖 3 短路試驗比流器一、二次側電流波形

過電流之直流暫態成分起始於最大值，並以指數衰減至零後，短路電流中僅含有交流對稱成分。因此，短路電流可以下式表示交流對稱成份及直流暫態成份：

$$i_p = I_{\max} \left[\sin(\omega t + \psi - \phi) + e^{-Rt/L} \sin(\psi - \phi) \right] \dots (3)$$

式中

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right)$$

ψ = 故障發生後電壓為零之電流相角

在 IEC 60044 及 IEEE Std. C37.13 比流器標準中，規範變比器之各項特性，依據上述標準產製比流器且檢驗合格者，在工程量測與應用上，可正確的將一次側電流轉換至二次側電流，並可保有其變比準確度之特性。惟在短路故障電流含有直流暫態成分，及比流器操作於低頻率狀態時，並不保證比流器仍然可以保持其在穩態情況下的準確度。

(二) 比流器飽和特性分析

本文以含有直流暫態成份與交流成份的短路電流，分析比流器非線性飽和特性。在短路電流中之直流暫態成分若過大時，將引起比流器產生飽和現象，稱直流飽和。而交流飽和係比流器因一次側交流成份過大，導致比流器鐵心磁路過激磁產生的飽和現象。交直流飽和是指一次側交直流均過大而使比流器產生飽和現象。

直流暫態成分在鐵心磁路中所建立的磁通量，通常較交流成分所建立的磁通量為大，因此故障電流中之直流暫態成分，是引起比流器鐵心飽和的主要因素。上述的比流器的飽和現象，與比流器的一次側電流 i_1 、二次側電流 i_2 、飽和電壓 \bar{V}_x 、飽和磁通 $\bar{\phi}_x$

與激磁電流 \bar{i}_m 有關。

比流器等效電路，如圖 4 所示；故直流暫態成分對比流器動態響應之作用，值得利用短路電流試驗設備，深入探討匯流排差動保護各比流器二次合成電流之動態特性。

四、短路電流與差動保護試驗模型

為重現變電所電源提供遠端線路事故一進兩出過電流之事故現象，本文利用短路電流試驗設備，配合調整串聯分路阻抗，模擬一進兩出分流電路特徵，藉以究明匯流排保護於穿透性過電流作用下，其差動保護合成電流，對保護電驛誤動作之影響。

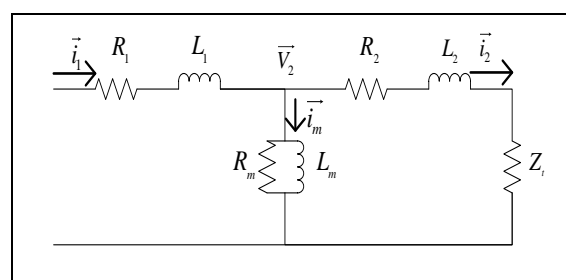


圖 4 比流器等效電路

(一) 短路試驗架構

短路電流試驗設備單線圖，如圖 4 所示；短路試驗主要設備包含：(1) 11.4 kV 配電系統之單相電壓，提供短路設備之試驗電源；(2) 主電源斷路器；(3) 投入開關 (making switch)；(4) 降壓變壓器 (step down transformer)；(5) 兩分路串聯阻抗；(6) 投入開關之邏輯控制器等設備。在短路試驗設備中，利用主斷路器作為試驗系統之後衛斷路器；而投入開關搭配邏輯控制器，職司啟閉短路電流及其持續時間；選擇降壓變壓器分

接頭之變比，可提供試驗所需的短路電流能量；調整串聯分路阻抗，可獲得適當比例之分路電流。

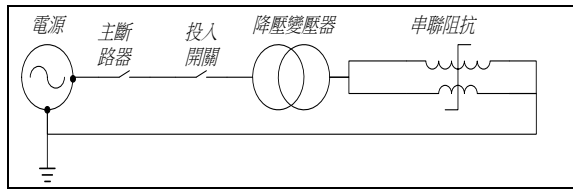


圖 4 短路試驗單線圖

(二) 試驗模型與量測架構

本試驗以低阻抗差動保護法，選用三具同廠型、飽和電壓為 C 800、滿匝比為 2000/5 安培之多繞組比流器，並分別利用滿匝比及 1600/5 安培之繞組，連接 CO-2 定時型過電流電驛，電驛之過電流分接頭設定為 4 安培，時間刻度設定為 1(T/L=4/1)。模擬穿透性過電流之特徵，進行差動保護動態特性測試。

模擬試驗之組成結構含短路試驗設備及動態線性量測系統兩大部分，試驗架構如圖 5 所示；#1、#2 及 #3 三條線路分別與匯流排連接，各比流器二次側繞組，則引接至差動保護系統中的匯入點，比流器之非極性點予以共同接地，保護電驛之過電流或是過電壓輸入訊號，則跨接於差電流匯入點上。

為驗證比流器在短路電流作用下之動態特性，除需要量測比流器一、二次側電流訊號外，並利用線性分壓器擷取比流器二次側及匯入點上的電壓降訊號，藉以釐清比流器動態 $v-i$ 運轉特性。

圖 5 中的 CT1、CT2、CT3 係保護系統之大電流轉換元件，其二次電流與一次電流之變比關係，視選用分接頭而定；系統量測利用線性比流器 CT1-1、CT2-1、CT3-1 轉換一次短路電流，CT1-1_1、CT2-1_1、CT3-1_1 則職司轉換比流器之二次側電流。在匯流排保護用比流器二次側電流共同輸入差動保護匯入點，流入匯入點之合成電流，則利用 CT4-1 量測其值。

二次側電壓降及匯入點之電壓

降，則以量測系統中的四具分壓器分別量測之。圖中合成電流匯入點之下游元件，含電纜阻抗(R_L)、保護電驛之輸入阻抗(87B)，差動保護電驛，可為低阻抗型差動保護電驛，或是高阻抗型差動保護電驛。在此量測架構下，所有量測訊號及保護電驛動作接點狀態，均輸入暫態訊號記錄器中，藉由記錄波形可分析比對匯流排差動保護系統之電量特徵。

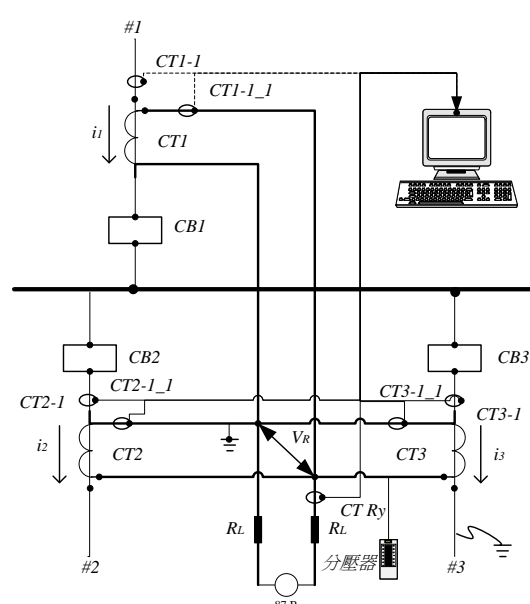


圖 5 三迴路之單相短路試驗單線圖

五、穿透性過電流之模擬試驗

應用短路設備模擬匯流排外部事故，是以上一小節所述之一進兩出三端電路為基礎，藉由投入開關閉合瞬間產生穿透性過電流，以暫態波形記錄器觀察各分路過電流之數值，及其比流器二次電流與電壓降之動態響應。差動保護系統之合成電流，與保護電驛誤動作之關聯性，屬於本研究試驗之分析重點。

(一) 合成電流為零，差動電驛未動作

短路電流模擬試驗結果顯示：當 #1 比流器流進峰值電流為 50 kA 之 (1.0 標么) 短路電流時，#2 及 #3 兩分路分別流出 0.50 標么之短路電流；分析儲存於波形暫態記錄器之電流數值，顯示 CT1、CT2 及 CT3 比流器，在短路電流作用下，均產生不同程度的鐵心飽和。惟比流器磁滯與輕微之鐵心飽和，並未放大匯入點合成電流，而流進電驛過電流動作線圈中的差動電流仍然趨近零安培。因此，差動電流作用於電驛動作線圈產生之電磁轉矩，不足以改變電驛動作接點之開啟狀態。短路電流、比流器二次電流、合成電流波形及接點狀態，如圖 6 所示：圖 6-a 顯示一進兩出之短路電流，圖 6-b 顯示各比流器二次電流、差動保護匯入點之合成電流，及電驛動作接點狀態。圖 7 係重疊顯示比流器之一、二次電流波形，並未發現二次電流相角偏移一次電流之現象。

(二) 合成電流大於零，差動電驛誤動作

在相同的試驗架構中，亦以 50 kA 之短路電流通過保護系統。試驗結果顯示，各比流器二次電流並未產生嚴重的波形畸變，亦顯示出比流器未發生嚴重過激磁與交直流飽和，惟差動保護匯入點上的合成電流，升高至 60 安培(峰值電流)，令差動過電流電驛於短路電流通過瞬間完成動作；亦即差動保護系統於此穿透性過電流作用下，發生誤動作。

電流波形暫態記錄，如圖 8 所示；分析導致電驛誤動作，及穿透性故障電流未引起電驛誤動作之電流波形，記錄波形比較結果顯示，#1、#2

及 #3 迴路之比流器，其二次電流未發現符合鐵心嚴重飽和之畸變波形，因此判斷各個比流器鐵心，並未產生嚴重的交直流鐵磁飽和。因此確認二次電流之波形畸變量，並非影響保護電驛誤動作之唯一原因。

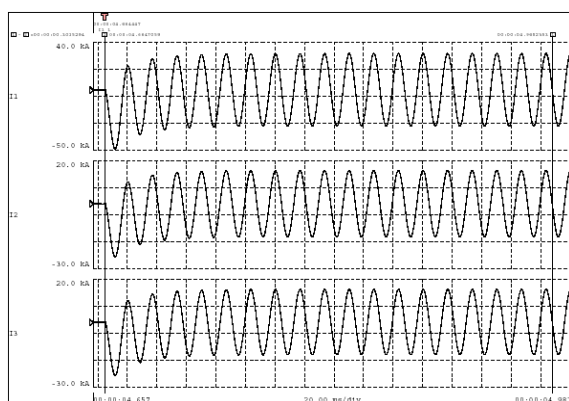
惟將 #1、#2 及 #3 迴路比流器之一、二次側電流波形重疊顯示，則發現 CT1 比流器在通過短路電流時，其二次側電流具有相位角度偏移現象，而 CT2、CT3 兩具比流器之一、二次電流波形仍保持同相位，未發生相位角度偏移。經由數值分析顯示，CT1 比流器在短路電流直流暫態成分作用下，其二次電流相角約領先一次電流 10° ，此係比流器二次電流響應之特徵。二次電流相角偏移放大各二次電流流進匯入點上的合成電流，此合成電流流進電驛動作線圈所產生的電磁轉矩，大於電驛機械性抑制轉矩，因此驅動電驛接點完成閉合動作。

分析試驗結果，差動保護電驛誤動作之因素，除鐵心交直流飽和引起波形畸變因素外，比流器二次電流相角偏移一次測電流時，亦是電驛誤動作之主要因素。

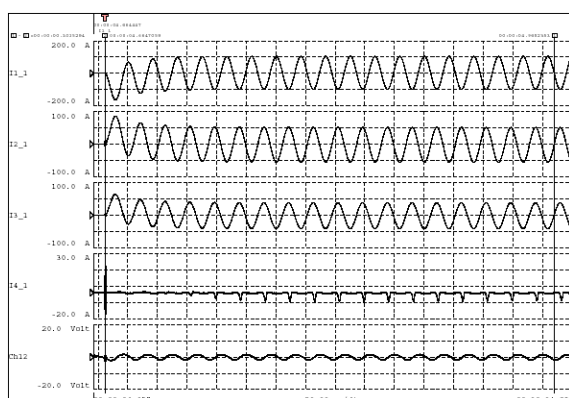
六、結論

在早期的差動保護文獻中指出：若匯流排主保護屬低阻抗差動電流電驛，於外部故障最惡劣的情況下，若引起比流器發生飽和，是差動保護電驛誤動作的主要因素。近年來，工業界已大幅提升比流器之鐵心材料之導磁係數，提升比流器鐵心材料特性後，有助於達成降低鐵心嚴重飽和之發生機率，及減輕二次電流波形畸變程

度之要求；如在短路電流小於比流器 20 倍額定值，即比流器運轉於非極端條件下，比流器鐵心僅有輕微磁飽和現象，二次電流波形未發生嚴重畸變，但產生二次電流相角偏移時，是引起匯流排差動電驛誤動作的因素之一。在此短路條件下，重疊顯示各比流器二次電流及匯入點合成電流，如圖 9 所示；可清晰比較出比流器二次電流相角偏移，對放大合成電流幅值之影響程度，較波形畸變因素更勝一籌，此係一般情況下，匯流排差動保護系統，電驛誤動作之重要發現。



(a) 短路電流之一次波形



(b) 二次電流、合成電流、電驛接點狀態

圖 6 短路電流、二次電流及其合成電流波形記錄

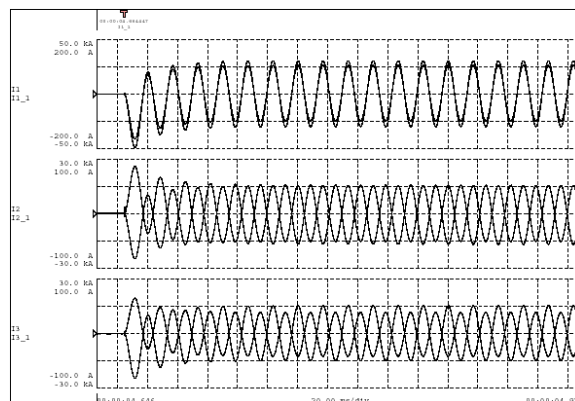


圖 7 重疊顯示短路電流、二次電流波形記錄

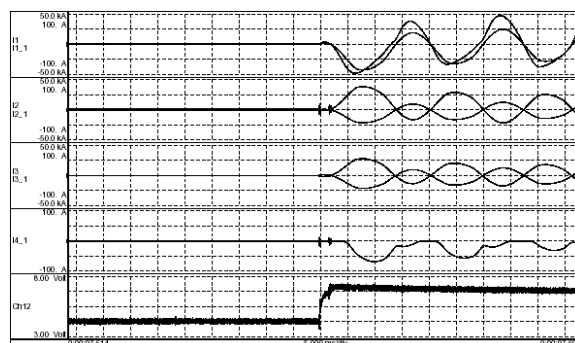


圖 8 短路電流、二次電流、合成電流波形及其動作接點記錄

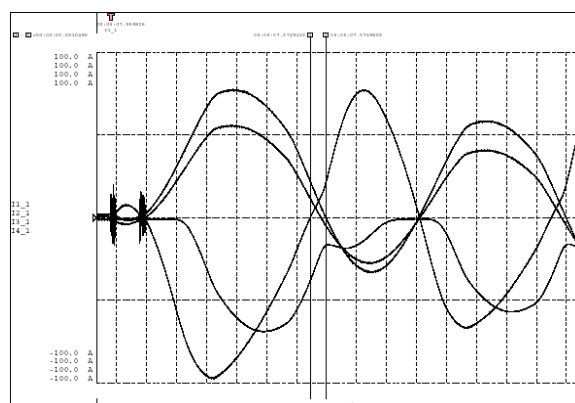


圖 9 重疊顯示二次電流、合成電流波形相角偏移記錄

參考文獻

[1] 曹志豪，“比流器飽和特性對差動保護

之影響”，逢甲大學電機工程研究所碩士論文，民國 90 年 6 月 8 日

[2] P. M. Anderson, *Power System Protection*, pp. 645~657, Power Math Associates, Inc., 1999.

[3] Walter A. Elmore, *Protective Relaying*

Theory and Applications, pp. 193~205, ABB, 1994.

[4] IEEE C37.97-1997, Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses, 1997.