

# 諧波對比流器及變壓器用之差動電驛的影響分析

何 金 滿 劉 建 志

中原大學電機工程學系  
台灣省中壢市普仁 22 號

(Received: May 31, 2000 ; Accepted: September 30, 2000)

## 摘要

近年來由於科技的進步與生活品質的提昇，工業界與家庭使用的非線性設備激增，如整流器、轉換器、變頻器、截波器、等非線性負載，使得原本應為正弦波的電流發生畸變而含有大量諧波，並流入系統中造成電力品質不良而影響其他用戶，即為諧波污染。

本文針對諧波對差動電驛影響加以分析探討，首先對比流器的操作頻率加以探討，利用 EMTP 所建構的數學模型進行分析並建立實測環境，再加以檢討分析比較。

變壓器差動保護須考慮的因素甚多，在規劃及運用上很容易發生錯誤，本文只針對諧波對差動電驛的影響現象做分析，忽略了變壓器的激磁湧流和比流器的飽和現象，施予不同工作頻率、不同諧波之作用下，差動電驛始動時間變化情況。藉由本研究之分析，期能提供有價值的參考依據，以期協助差動電驛的應用及發展。

關鍵詞：諧波，比流器，差動電驛。

## 壹、緒論

近年來非線性負載設備的繁多，使得電路中的諧波含量越來越高而衍生許多嚴重問題，在正常情況下，保護設備之間或許可以協調，但當系統饋線有諧波污染源時，原先的保護設備可能無法提供系統完善的保護，因此考慮諧波對保護設備的影響有其必要性。

雖然目前市面上具有為諧波考量設計的差動電驛，但是皆根據二次諧波在並聯激磁情況下，不低於基本波的 15%，而含直流成分的故障電流其二次諧波僅在 7% 以內，利用此一差異的特性來區分激磁湧流與故障電流【1】。諧波抑制設計的差動電驛，即為依據此原理設計，並無針對諧波污染源進入差動保護設備做設計，所以本文對此現象分析，希望提供往後研究者和保護工程師有用的參考。

## 貳、諧波概述

一個非正弦波的週期性函數可以近似分解成為其直流成份加上基本波再加上整數倍頻波之和，若應用於電力系統之中則可以表示成下式：

$$V(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{h=2}^n V_h \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (2-1)$$

$$I(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{h=2}^n I_h \sin(h\omega t + \phi_h) \quad (2-2)$$

式中

$V_0$ ：直流電壓成分

$I_0$ ：直流電流成分

$\theta_h$ ：第  $h$  次諧波電壓的相位角

$V_1 \sin(\omega t + \theta_1)$ ：基波電壓，角頻率  $\omega$

$I_1 \sin(\omega t + \phi_1)$ ：基波電流，角頻率  $\omega$

$\sum_{h=2}^n V_h \sin(h\omega t + \theta_h)$ ：諧波電壓，角頻率為基頻的整數倍

$\sum_{h=2}^n I_h \sin(h\omega t + \phi_h)$ ：諧波電流，角頻率為基頻的整數倍

$h = 2, 3, 4, \dots, n$

電力系統的諧波效應對用戶而言，會引起照明、電動機、電腦及保護設備的異常動作，可能造成用戶的設備或資料損毀；對電力公司而言，電流諧波所引起的熱效應問題，造成線路損失的增加，降低發電效率。電壓諧波所造成的絕緣耐壓問題，加速電力設備老化與絕緣破壞，降低

設備的使用年限。諧波並可造成儀表量測的誤差與保護設備誤動作而使系統發生非預期之狀況，甚至可能導致系統共振而破壞系統設備。此外，電力系統諧波還會造成通訊系統的干擾【2,3,4】。

## 參、差動保護之原理

差動保護為電力設備保護的基本保護方法之一，比較設備之輸入及輸出電流的差量作為故障判斷的基準，使其具備準確且快速的故障動作特性，不但適用於大多數的電力設備的保護，也常用為重要電力設備的最前衛保護，如圖 3-1(a)、3-1(b) 所示。

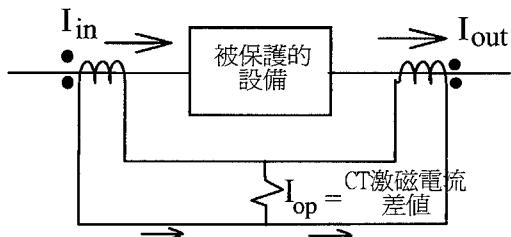


圖 3-1(a) 正常運轉或外部故障情況

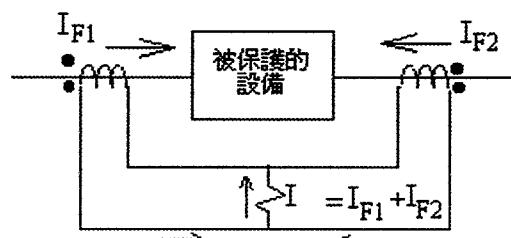


圖 3-1(b) 內部故障情況

一般電力變壓器的故障保護依變壓器的容量及其重要性有不同的保護方式可供選擇，但是大容量的電力變壓器均要求以差動為其主要保護，但如果系統當中某些低於 10MVA 之小型變壓器組如配電用的主要變壓器其重要性提高亦可能採用差動保護【5】。變壓器的差動保護須考慮的因素特別多，在規劃及運用很容易發生錯誤，稍一疏忽，就會引起不正確的動作，所以本文只針對變壓器用的差動電驛來探討。

## 肆、比流器等效電路

若比流器的一、二側電流比為  $N:1$ ，則比流器轉換至二次側等效電路如圖 4-1 所示。通常一次側的  $R_{LP}$  和  $X_{LP}$  遠比系統的  $R$ 、 $X$  值小，即使發生故障電力系統的電阻會

降低，仍可以忽略不計，二次側的漏抗為  $R_{LS}$  和  $X_{LS}$  此時從二次側所看到的比流器等效電路如圖 4-2 所示。

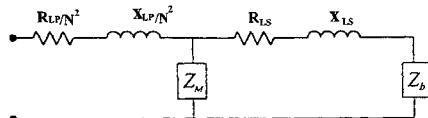


圖 4-1 考慮一次側阻抗的比流器等效電路

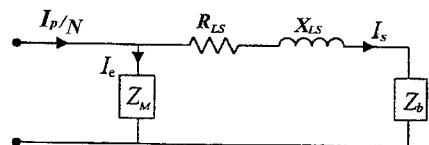


圖 4-2 忽略考慮一次側阻抗的比流器等效電路

圖中  $Z_M$  則代表比流器的激磁阻抗。圖 4-3 為相量圖，對於比流器的效能主要考慮一次側電流反應至二次側時，其電流大小和角度的準確度【6】。在比流器穩態時其比率誤差 (Ratio Error) 和角度誤差 (Phase-Angle Error) 則如 4-1 式及圖 4-3 所示：

$$\text{比例誤差} = \frac{NI_s}{I_p} \times 100\% \quad (4-1)$$

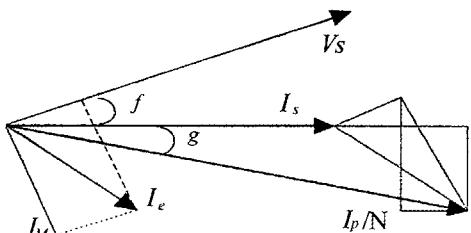


圖 4-3 比流器之電壓電流向量圖

其中

$V_s$ :一次側的電壓

$I_M$ :磁化電流

$I_e$ :激磁電流

$I_p/N$ :一次側電流

$I_s$ :負載側的電流

## 伍、EMTP比流器模組的建立

變壓器模擬的主要問題在於磁化鐵心的非線性特徵，也就是  $B/H$  遷路。通常將比流器數學模式中的磁化阻抗視為一單值(Single-Valued)的非線性的電感，而忽略磁滯現象(Hysteresis Phenomenon)。然而，若要增加模擬的準確性，則必須包括變壓器的磁滯現象，特別要考量暫態行為，如變壓器激磁的湧入電流、磁共振現象時剩磁的決定及諧波造成變壓器的飽和等問題。

目前關於比流器鐵心磁化曲線數學模式的表示，有 M. Poljak 的九階的多項式數學模式如方程式(5-1)式【7】

$$i_1 = \left( c_1 + \frac{c_0\delta}{l-\delta} B - c_3 B^3 + c_5 B^5 - c_7 B^7 + c_9 B^9 \right) \times \frac{(l-\delta)}{N_2} \quad (5-1)$$

其中

$c_0$ - $c_9$ :鐵心材料體積參數

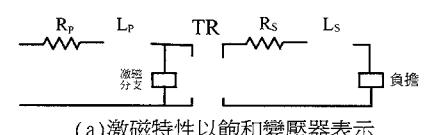
$\delta$  :鐵心氣隙長度(m)

$l$  :磁路的平均長度(m)

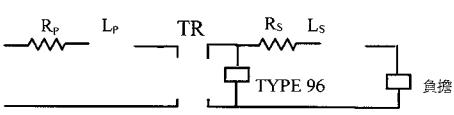
$N_2$  :二次側繞組的數目

$B$  :最大的磁通密度(T)

EMTP 提供單相變壓器鐵心飽和的模組，這模組是由一個等效電路圍繞一個理想變壓器所組成，如圖 5-1(a)所示。磁化支路是用來描述非線性電感的  $\lambda - i$  特性，通常  $\lambda - i$  特性無法直接獲得，因此 EMTP 提供一個輔助方程式來轉換比流器 V-I 特性成等效的  $\lambda - i$ 。另外，也可以使用 EMTP 內的 Type-96 非線性電感器和上述可飽和變壓器模式組成比流器等效電路，如圖 5-1(b)所示。要建立 EMTP CT 等效模組電路必須建構如圖 5-3 之流程圖【8】。



(a) 激磁特性以飽和變壓器表示



(b) 激磁特性以TYPE96表示

圖 5-1 EMTP 比流器等效電路

由於 EMTP 不直接使用 V-I 特性曲線，而需使用輔助方程式 SATURA 把 V-I 曲線轉換成  $\lambda - i$  資料集，圖 5-2 為 10/5 的 CAPV 型式比流器 V-I 特性曲線【9】。根據

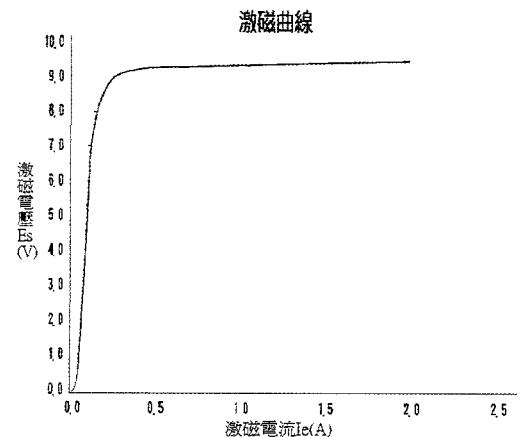


圖 5-2 10/5 CT 激磁曲線

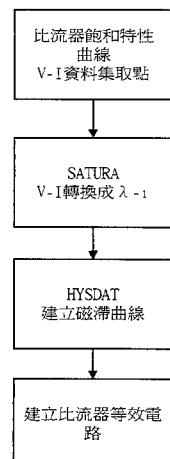
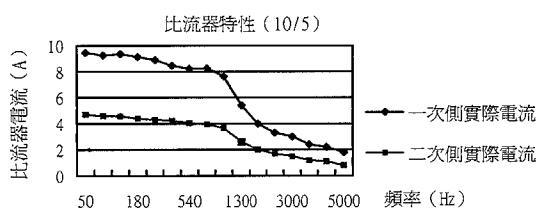


圖 5-3 為建 EMTP 比流器等效電路之建立流程圖

SATURA 所求得的  $\lambda - i$  資料集，再利用 HYSDAT 方程式產生磁滯曲線建 Type-96 元件【10】。根據圖 5-1 所模擬測試的波形可以知道比流器二次側的電流大小會隨著頻率的增加而下降，其大小如表 5-1、圖 5-4 所示。

表 5-1 比流器的特性

比流器工作頻率(Hz)	50	60	120	300	540	660
二次側實際電流(A)	5.12	5.01	5.00	4.85	4.615	4.38
比流器工作頻率(Hz)	1000	2K	3K	4K	5K	
二次側實際電流(A)	4.06	3.62	3.2	2.9	2.8	



(a)二次側負擔為零

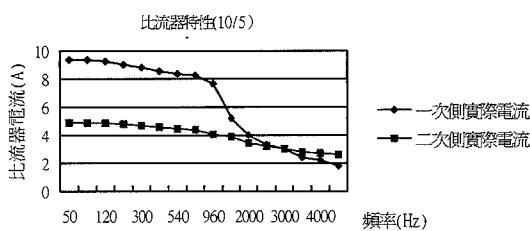
(b)二次側負擔為  $0.5\Omega$ 

圖 5-4 比流器的特性(一次側電壓均為 120V)

由本節所模擬測試的波形可以知道比流器一次側及二次側的電流大小隨頻率的增加而下降，且特性也與負擔有關，因此在實測時應注意此問題，以避免實測時造成電驛誤動作。

## 陸、差動電驛線路實測試驗

### 一、實測接線線路

在應用差動保護的時候，變壓器的激磁湧流、比流器的頻寬皆有可能造成電驛的誤動作，造成原線路實測不易，故本文測試在不考慮變壓器的激磁電流及比流器頻寬等等的問題下來模擬諧波對差動電驛的影響。

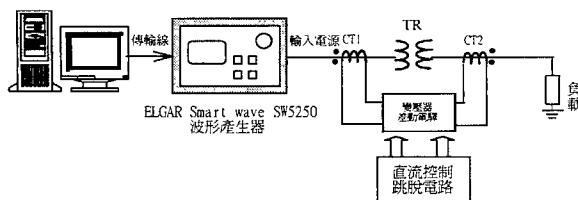


圖 6-1 線路系統方塊圖

利用波形產生器，施予不同諧波次數的頻率所產生的工作電壓，以及 60Hz 為基頻的諧波電壓，於圖 6-1 所示電路，來觀測差動電驛動作時間的情形。

下列的分析圖表中共分內部測試故障和外部故障二部份。以 60Hz 為基頻在混入不同不同成份諧波的分析圖，工作電壓模式電壓 F3 表示：含三次諧波(33.33%)的工作電壓；F5 表示：含三次諧波 (33.33%)、五次諧波(20%)的工作電壓；F7 表示：含三次諧波 (33.33%)、五次諧波(20%)、七次諧波 (14.28%) 的工作電壓；F9：含三次諧波 (33.33%)、五次諧波(20%)、七次諧波 (14.28%)、九次諧波 (11.1%) 的工作電壓；以上的諧波電壓與基波電壓相角差為零度。

## 二、差動保護的設計與測試

模擬內部故障：

表 6-1 差動電驛設計實例(1)

模擬用變壓器的額定電流	一次側：2.89A 二次側：5A
選擇比流器的電流比	$I_1/I_2=2.9/1.45$ $I_3/I_4=5.01/5$
高壓側流入差動電驛的電流	1.45A
低壓側流入差動電驛的電流	5A
選擇電驛電流分接頭	5-5

模擬外部故障：

如圖 6-1 差動保護接線，再將一只 CT 反接，表 6-2 是模擬外部故障差動電驛的設計實例，本文為模擬外部故障電流超過 50% 的比率差動情況。

表 6-2 差動電驛設計實例(2)

模擬用變壓器的額定電流	一次側：2.89A 二次側：5A
選擇比流器的電流比	$I_1/I_2=2.9/2.24$ $I_3/I_4=5.01/5$
高壓側流入差動電驛的電流	2.24A
低壓側流入差動電驛的電流	5A
選擇電驛電流分接頭	5-5

實測結果：

負載在正常工作狀態時，負載電流及差動電流的變動比率不變，所以動作線圈不會動作。當故障發生時，變壓器兩側電流的差增大，使得流經動作線圈之差動電流增大，差動比率上升，進而差動電驛產生動作。這是在正常工作頻率之下的動作情況，本文將對電路施予不同的頻率和諧波成分，觀測差動電驛動作時間的情形。

表 6-3 測試內部故障時差動電驛的動作時間

頻率 (Hz)	動作 時間(ms)	動作線圈 電流(A)	頻率 (Hz)	動作 時間 (ms)	動作 線圈 電流(A)
60	970	6.14	F3	928	6.18
120	1150	6.17	F5	920	6.21
180	$\infty$	5.88	F7	940	6.14
240	$\infty$	5.77	F9	956	6.12
300	$\infty$	5.69			
360	$\infty$	5.59			

註：時間之量測係以示波器所顯示之跳脫時間為準

表 6-4 測試外部故障時差動電驛的動作時間

頻率 (Hz)	動作時間(ms)	動作線圈 電流(A)
60	2980	2.58
120	$\infty$	2.54
180	$\infty$	2.51
300	$\infty$	2.49
240	$\infty$	2.49
300	$\infty$	2.47
420	$\infty$	2.47
F3	2900	2.54
F5	3380	2.54
F7	3620	2.48
F9	4360	2.42

註：時間之量測係以示波器所顯示之跳脫時間為準

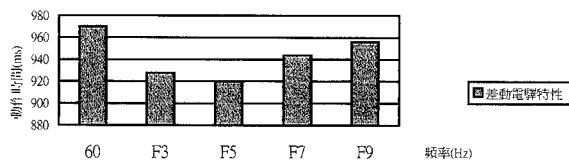


圖 6-2 內部故障差動電驛的動作時間與諧波模式關係圖

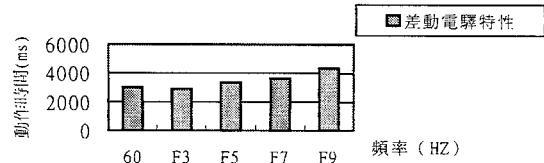


圖 6-3 外部故障差動電驛的動作時間與諧波模式關係圖

比較結果顯示，感應轉盤式差動電驛，並非隨著頻率增高，或是諧波增加而始動時間就一直增加，它有一段非線性區域，過了這段非線性區域，就會隨著頻率或諧波增加，而動作時間會延長或是不動作，當發生內部故障時，若有諧波進入差動電驛，差動電驛去觸發斷路器跳脫的時間會被延遲，屆時可能會影響整個電力系統。當發生外部故障時若諧波電流超過 50% 的比率差動，電驛會被誤動作，但當有諧波進入時差動電驛去觸發斷路器跳脫的時間同樣會被延遲，對差動電驛而言諧波使差動電驛變的較不靈敏。而且當轉盤式差動電驛外加含量高於 66.66%三次諧波成份電源，差動電驛屆時將不動作，另外差動電驛對單一非操作頻率則有相當不靈敏的現象，所以差動電驛不適合操作在非操作頻率下。

## 柒、結論

本論文旨在探討諧波對比流器及變壓器差動保護的影響分析，利用 EMTP 建立比流器的等效模型，模擬 CT 的頻寬特性，再加上實際線路測試，發現 CT 直接影響到系統的穩定，由本文第四章節比流器暫態動作現象的模擬和第五章節實測結果，知道 CT 的二次側電流在頻率在 960Hz 以上有明顯的驟降現象。然而往往系統保護工程師會把比流器看成理想之電流轉換設備，視其能夠完全正確地反應系統之狀況，但當諧波污染源進入系統，CT 飽和現象的影響，會致使保護設備的誤動作，進而造成電力系統中斷，因此在選用 CT 時應該考慮到當有諧波污染源進入時，CT 頻寬的大小。所以比流器的特性應納入電驛設定的考量。

雖然目前有具有諧波抑制設計用的差動電驛，但皆是根據激磁湧流來設計的，並無針對諧波污染源的諧波來設計抑制。本文忽略 CT 的飽和現象影響，及電力變壓器的激磁湧流，針對變壓器用差動電驛在諧波污染下，做一探討發現在諧波作用下，感應轉盤式差動電驛，並非隨著頻率增高，或是諧波增加而始動時間就一直增加，它有一段非線性區域，過了這段非線性區域，就會隨著頻率或諧波增加，而動作時間會被延長，或是不動作，所以在有諧波之下發生內部故障時，保護電驛的動作會受到不同程度的影響。

## 致謝

本研究感謝國科會經費補助，研究計劃編號: NSC88-2213-E-033-023

## 參考文獻

- 李宏任，「變壓器差動保護經驗談」，電機月刊第六卷，第十一期，第 109~116 頁，民國八十五年。
- IEEE Working Group on Power System Harmonics, "Power Line Harmonic Effects on Communication Line Interference", IEEE Trans. On Power Apparatus and System, Vol.PAS-104, No.9,

- pp2578-2587,Sept1985 .
- 3. J.S. Svjab , Jr., John S. Mcqikin , "Harmonics Causes, Effects, Measurement, and Analysis : An Update " , IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.IA-26,No.6, pp.1034-1042(1990) .
  - 4. V.E.Wagner,"Effects of Harmonics on Equipment", IEEE Trans. on Power Delivery Vo1.8,No.2, April ,pp672-680(1993) .
  - 5. American National Standard, "Guide for Protective Relay Application to power Transformer," ANSI/IEEE C37.91-1985.
  - 6. R.D.,Power System Protection Reference Manual,pp.66-102(1982)
  - 7. Poljak, M. and N. Kolibas, " Computation of Current Transformer Transient Performance," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.3,No.4, pp.635-645(1988) .
  - 8. Kezunovic, M.,C. Wfromem and F. Phillips," Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models For Protective Relay Transient Study," IEEE Trans. on Power Delivery,Vol.9,No.1,pp405-413(1994) .
  - 9. 士林電機股份有限公司，CAPV 比流器，技術資料。
  - 10. Leuven,K.U.,EMTP Center, Alternative Transients Program-Rule Book, Leuven EMTP Center, Belgium,(1987) .

## The Effects of Harmonics on Current Transformer and Differential Relay for Transformers

JIN-MAUN HO AND CHIEN-CHIH LIU

Department of Electrical Engineering  
Chung Yuan Christian University  
Chung-Li, 32023, Taiwan, R.O.C.

### ABSTRACT

The use of nonlinear devices such as rectifiers , converters, power supplies and other devices utilizing solid state switching have been increased in the industry during recent years. The power quality has been deteriorated by these equipments. This deterioration causes the increasing of power loss, resonance problem, insulation deterioration , and even safety problem of system apparatuses.

This paper aims at analyzing and probing into the influences of harmonics on a differential relay. First it probes the operation of a CT in frequency domain. Then, it analyzes and compares the mathematic model, which is constructed by using EMTP, and the real test results.

There are many factors, which must be considered in transformer differential protection design and application. This paper only analyzes the influential phenomena of harmonics to differential relay.

The results of this research can be valuable references and for applying and designing differential relay.

**Key words:** *Harmonic, Current Transformer, Differential Relay .*

