

教學式保護電驛模擬平台在 Matlab/Simulink 下實現

辜志承、張源吉、楊明達*、沈混源、廖文彬、許文興

國立台灣科技大學電機系

聖約翰技術學院電機系*

摘要：

傳統的保護電驛若做實際量測或實驗要花費大量的人力、物力、時間，不是一般人所能負擔，幾乎都是利用套裝軟體來模擬，如 (EMTP/ATP、ETAP...)，但因這些軟體功能不夠強大，只能用在純電力方面模擬，不能完全模擬所需要的結果，為了改善上面的缺點，利用 Matlab/Simulink 使用者圖型界面來模擬，其功能已完全取代 EMTP/ATP，另外使用者可搭配數位訊號處理、通訊、傅立葉、小波轉換等數學領域方面的，相護搭配使用，而且使用者容易上手模擬，和容易擴充自己領域所作的平台方塊(以下稱 block)。

本文建構了電驛的平台有瞬時過電電驛 50、延時過電流電驛 51、過電壓電驛 59、交流方向性過流電驛 67、差動電驛 87...等等，依照各不同電驛功能設計出不同的電驛 block，以後只要使用者在發電機、變壓器、輸電線等需要用到電驛的 block，只要在 Matlab/Simulink 底下拖曳出來使用，就可以

直接使用來模擬各種電驛跳脫前後的波形、比流器飽合對電驛的影響、諧波對電驛的影響等等...

一、前言

一般保護電驛的成員包含了電驛 (Relay)、斷路器 (Breaker)、比流器 (CT) 及比壓器 (PT) 三部份，如圖 1 所示，在實際運用的情況會下，比流器會考慮到飽和問題[1-2]，以往因比流器飽合模擬不易實現，所以部份期刊、論文幾乎都忽略此部分，比壓器要考慮到電壓調整率的問題，而電驛在實用上就會有諧調、誤動作、參數計算設定考量[3]，以下就介紹各電驛成員的製作及設定，再以例子模擬此電路。現在使用的模擬軟體都是利用使用者圖形輸入界面來輸入參數，本套模擬所開發的模擬平台軟體也不例外，使用者只要把設計好的電路圖畫好，依次輸入電路元件(block)的參數再設定模擬的時間長度和演算法種類，即可模擬[4]。而模擬的難度在於參數的設定值，可依實際大小輸入或假設值輸入 [5]。

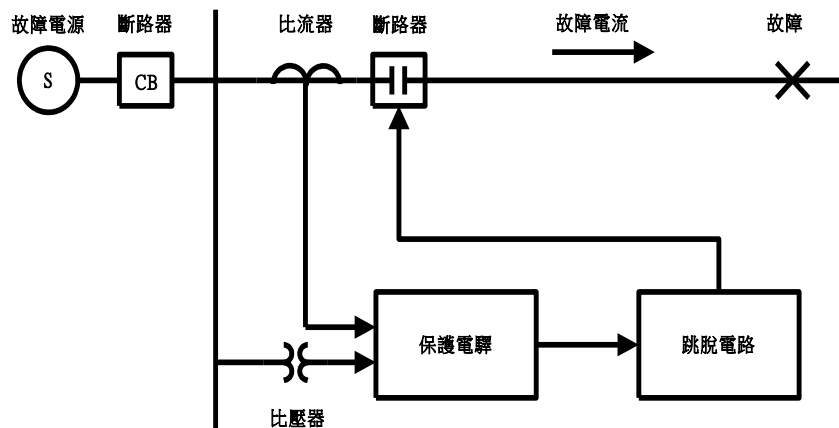


圖 1 保護電驛系統基本架構圖

二、CT 及 PT 的設定

一般保護電驛其輸入量為電流及電壓，除少數如溫度或壓力等電驛外，其 CT 及 PT 的功能是將高電壓及強電流降為低電壓(額定 120V)小電流(額定 5A)。

(a) PT 設定

一般電力變壓器的等效電路和比壓器的基本設計原理相同，由於比壓器在運轉時激磁電流很小，故可將等效電路中的激磁阻抗予以忽略，如圖 2 所示，模擬時需設定的參數有額定功率(Pn)、頻率(Fn)、一、二次側電壓(V1、V2)及一、二次側阻抗(Z_H、Z_L)，依比壓器的種類可自行設定不同參數值，通常結果為二次側電壓的相角稍為落後一次側，且幅值也較小於一次側，而比壓器的性能一般要考慮的是電壓調整率，其二次側電壓為

$$V_{EF} = V_{CD} - I_L(Z_H/n^2 + Z_L) \dots \dots \dots (1)$$

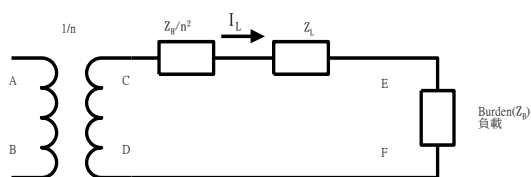


圖 2

比壓器化簡後的等效電路

(b) CT 設定

在比流器的場合中，由於激磁電流值較高，故其等效電路中的激磁阻抗不可予以忽略圖 3 所示，模擬時需設定的參數有額定功率(P)、頻率(F)、一、二次測電壓(V₁、V₂)、一、二次測阻抗(Z_H、Z_L)及激磁電感和電阻(L_M、R_M)，而激磁電感是利用點對點描述的方法，如圖 4 所示，非線性電感元件利用點對點描述，依序輸入點 1、2、3、4 φ-I 激磁曲線，使用者所收集的資料一般都是 V-I 曲線，利用公式 $V = N \frac{d\phi}{dt}$ 求出相對應的 φ-I 激磁曲線，其輸入點數不限。

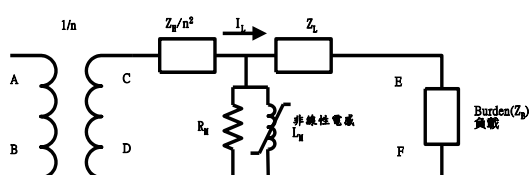


圖 3 比流器化簡後的等效電路

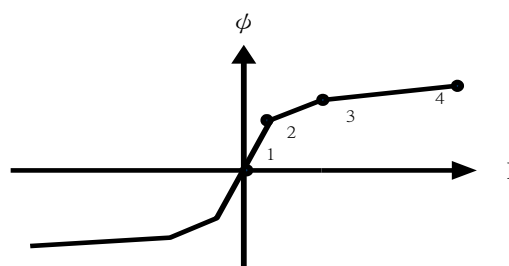


圖 4 非線性電感元件利用點對點描述

(c) 比流器飽合模擬

以下做一個比流器飽合的模擬，圖5是在 Matlab/simulink 底下所設計的比流器飽合電路圖，電源為 120KV(rms)、60HZ、CT 比率 2000/5、25VA、負載burden=1Ω，負載用戶 69.3 MVAR、1 kA(rms)、Q = 100，磁通設定 10pu 發生飽合，模擬時 breaker 投入在 t=1.25/60s 和 t=1/60s 時，計算後 t=1.25/60s 時無直流成份(無直流飽合)，t=1/60s 時含最大直流成份(發生直流飽合)；圖6是比流器飽合參數設定，依所選用的比流器設定參數，若有任何問題，在 block 底下有一個 help 按鍵，可幫助你解決參數設定的問題；圖7在 t=1.25/60s 開關投入時依計算後無直流成份

圖7上圖是 I1/400 和 V2 波形圖(在此 V2=I2 波形，因為 Burden=1Ω)

$$I_2 = 1000 \times 5 / 2000 = 2.5A \text{ (有效值)}$$

$$= 2.5 \times \sqrt{2} = 3.536A \text{ (最大值)}$$

圖7下圖是每標么磁通波形圖

$$\text{Flux} = 0.0125V \times (\sqrt{2}) / (2 \times \pi \times 60)$$

$$= 46.89 \times 10^{-6} V.S$$

如圖8是在 t=1/60s 開關投入，計算後含最大直流成份，圖8下圖磁通經一段時間到達 10pu 飽合點時，圖8上圖的 V2 開始發生飽合，產生一、二次側不對稱的電流波形；圖9在 t=1/60s 開關投入負載用戶，時間常數 T 改為原來的 0.5 倍，可看出時間常數越短，充放電越快，越快到達穩態，發生飽合的時間縮短；圖10在 t=1/60s 開關投入負載burden增加為 2Ω，加速飽合的

時間。

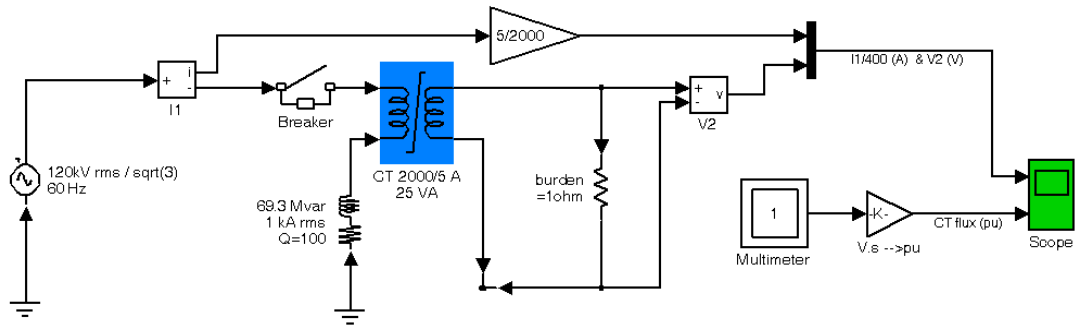


圖 5 比流器飽合電路圖

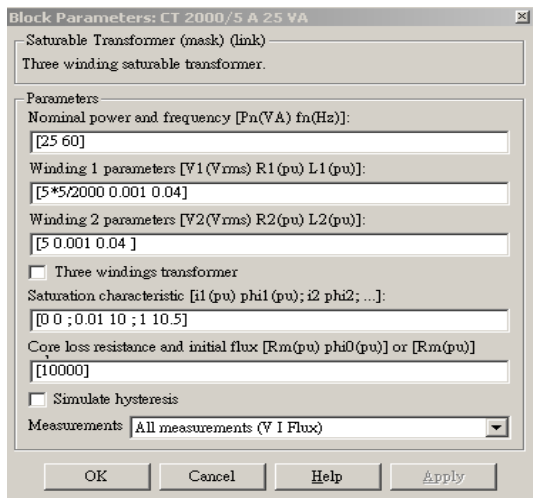


圖 6 比流器飽合參數設定

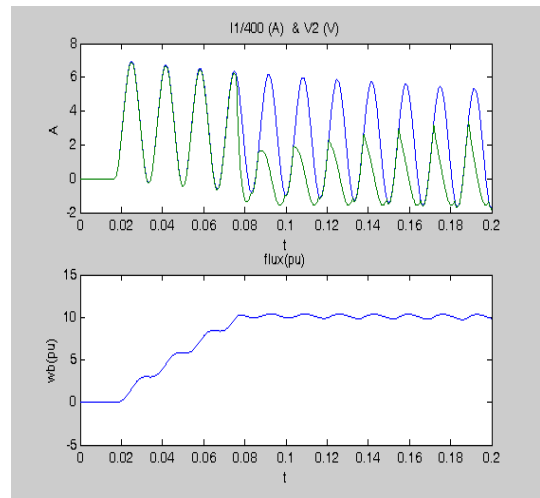


圖 8 $t=1/60s$ 開關投入(有直流飽合)

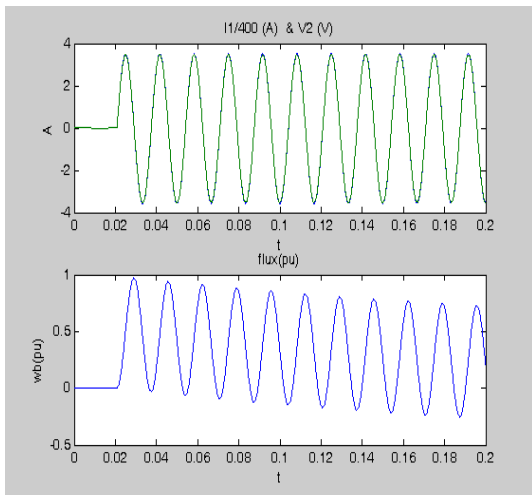


圖 7 $t=1.25/60s$ 開關投入(無直流飽合)

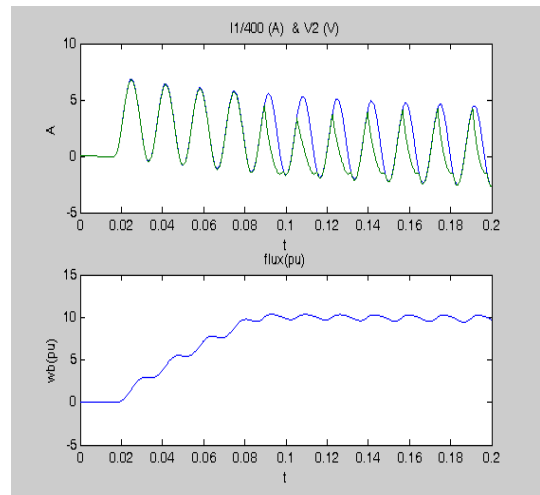


圖 9 負載用戶時間常數 T 為 0.5 倍

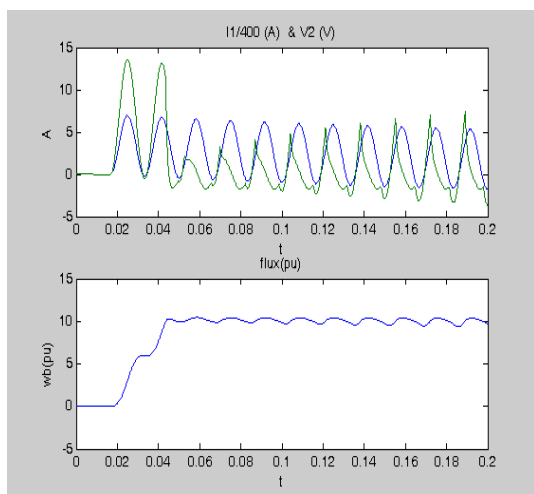


圖 10 負載 $\text{burden}=2\Omega$ 時(加速飽合)

而比流器之最大的問題就是直流飽和的問題，依模擬結果可知開關投入的時間不同、和電驛負載(burden)大小、負載用戶時間常數大小，都是影響飽和的因素，比流器並不是在故障一開始時就發生直流飽和，而是在故障發生經過一段時間，等到比流器鐵心的磁通達到其飽和密度後才開始發生飽和。其由故障開始至比流器發生直流飽和所需時間，是可以估算的。

三、斷路器(Breaker)的設定

圖 11 是斷路器 block 參數設定，在這裡使用斷路器時必須設定開關突波電阻、開關初始狀態(1=開、0=關)、突波電容設定(inf 表示無限大)、外部控制開關的時間(打勾是利用電驛動作來跳脫，而斷路器是利用低電位動作)。

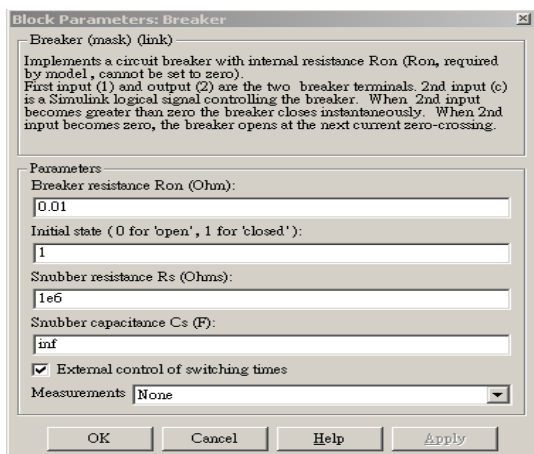


圖 11 斷路器 block 參數設定

四、跳脫斷路器電路的製作

此電路在電力系統中的功能是将電驛送出的跳脫信號放大到足夠的能量跳脫 CB，而在 Matlab/Simulink 內此功能是将電驛送出信號保持住，再以低電位 0 的訊號來跳脫 CB。如圖 12 是利用 D 型正反器來作出一跳脫電路。

通常一個完整的電路包含有多個 block 因此不易整理，且看起來雜亂。所以完成後把的整個電路群組成 1 個 block，只要全選圖 12 全部 block，按滑鼠右鍵選擇 create subsystem 即可變成如圖 13 所示。

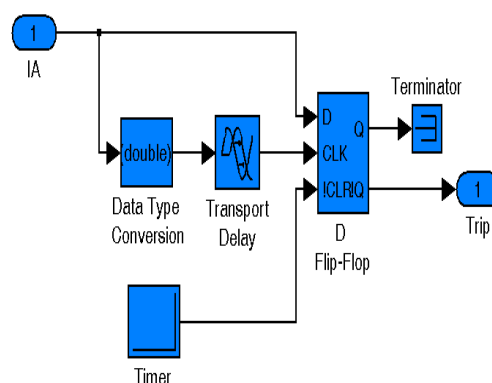


圖 12 跳脫電路

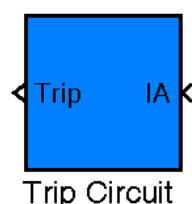


圖 13 許多 block 群組成 1 個 block

五、電驛(Relay)的製作

在 Matlab/Simulink 下製作傳統過電流、差動、過壓、欠壓電驛等等，也可用來規劃各種數位保護，一般要做一顆電驛必須先找出此類電驛的各種數學式、用法及使用者能自行設定的參數有那些，利用流程圖畫出，再依序作出來，圖 14 所示為過電流電驛製作流程圖，利用傅立葉轉換取基波電流有效值(公式 2~3)，和利用 ABB 的電驛特性曲線，DPU200R 公式求出對應的時間 T(公式 4)，再利用參數 T 延遲一段時間 t 送出一觸發訊號(T 表示參數，t 表示跳脫時間)。傅立葉轉換在此功用是濾除雜訊，取基本波電流有效值來運算。

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad \dots(2)$$

$$|H_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \angle H_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad \dots(3)$$

$$T = \left(\frac{A}{M^p - C} + B\right) \times \left(\frac{14n - 5}{9}\right) \quad \text{ANSI標準} \quad \dots(4)$$

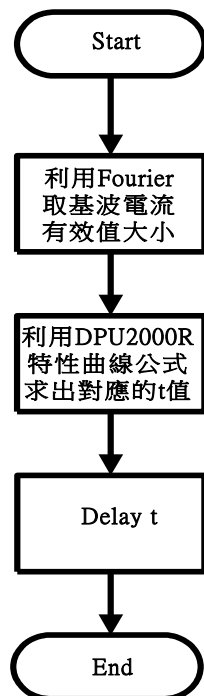


圖 14 過電流電驛製作流程圖

(a)過電流電驛製作

過電流電驛主要是參考 ABB 的 SPAJ140C 使用手冊所做成，圖 15 所示為單相過電流電驛在 Matlab/Simulink 下的 block 接線圖，利用比流器降流成額定 5 安培後由 IA 處引進，經過傅立葉轉換取基本波 60 赫茲的最大值，再利用 gain 降為電流有效值，把有效值丟到公式 4 (C09 function block) 計算出 I-T 跳脫時間，最後再利用計算出來的跳脫時間參數 T，延遲一時間 t (T to t block)，而傅立葉轉換可取出各個諧波成份和直流成份，在此傅立葉轉換只取基本波 60 赫茲。最後 I>1.5 倍額定電流 block，流進 Relay 的電流要大於 1.5X5=7.5A 才會開始動作，也稱作始動電流，防止誤動作。

完成後把的許多 block 群組成 1 個 block，只要全選圖 15 全部方塊，按滑鼠右鍵選擇 create subsystem 即可變成如圖 16 所示；而對話框的製也不難，只要點選圖 16 按滑鼠右鍵選擇 Edit mask 設定一下內部變數就完成了，此功能是用來和使用者對話的界面，只要下次使用點選 block 兩下，就會出現圖 17，使用者就可以輸入 tap 及 TDS 來設定 Relay51。

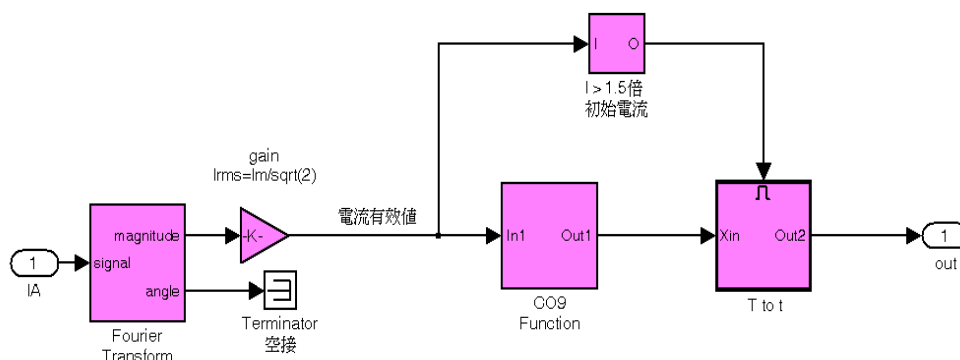


圖 15 單相過電流電驛方塊接線圖

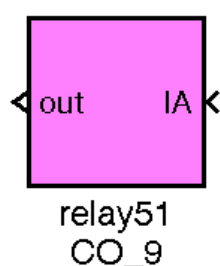


圖 16 許多 block 群組成 1 個 block

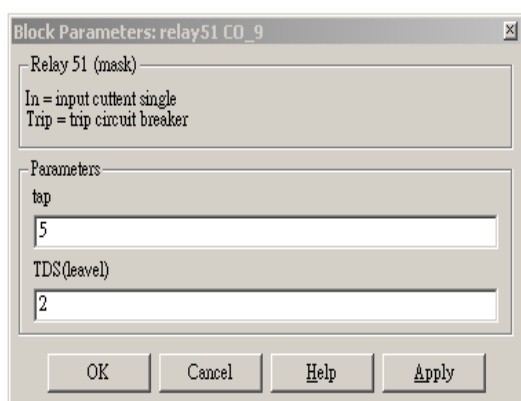


圖 17 Relay51 對話框

(b) 過電流電驛模擬

由一例子來說明，過電流電驛的應用，如圖 18 所示，為一般輻射型線路保護，若 F1 故障只需跳脫 CB3 斷路器，F2、F3 故障只需跳脫 CB2 斷路器，F4、F5 故障只須跳脫 CB1 斷路器，假設圖 18 中各比流器變比為 1500/5，線路時間容許過載電流 I_{STM} 為 600A，各故障點的最大及最小故障電流如表 1 所示，F1 最大

故障電流為 5000A，最小障電流為 3500A，在 F1 故障時，利用瞬時過電流電驛，動作時間為 0.02 秒，而 H 及 G 電驛用 CO_8 特性曲線及 CTI=0.3 秒條件，設定值如下

◇ 電驛 H 的設定：

電驛 H 選用 Tap=5

$$I_{STM} = 600 / (5 / 1500) = 2A$$

$$I_{MIN}(F1) = 3500(5 / 1500) = 11.67$$

Tap > 2X2 Tap < 11.67/2 故 Tap 設 5

電驛 R 動作時間 CTI 為 $t = 0.02 + 0.3 = 0.32s$

如表 2 所示，計算後 $5000 / (300 \times 5) = 3.3$ 倍， $t = 0.47s > 0.032s$

故選用 CO_8，TD=0.75，Tap=5

◇ 電驛 G 的設定：

$$I_{STM} = 600 / (5 / 1500) = 2A$$

$$I_{MIN}(F3) = 7000(5 / 1500) = 23.33A$$

Tap > 2X2 Tap < 23.33/2 故 Tap 設 6

電驛 G 動作時間 CTI 為 $t = 0.28 + 0.3 = 0.58s$

如表 3 所示，計算後 $5000 / (300 \times 6) = 5.6$ 倍， $t = 0.59s > 0.58s$

故選用 CO_8，TD=1.75，Tap=6

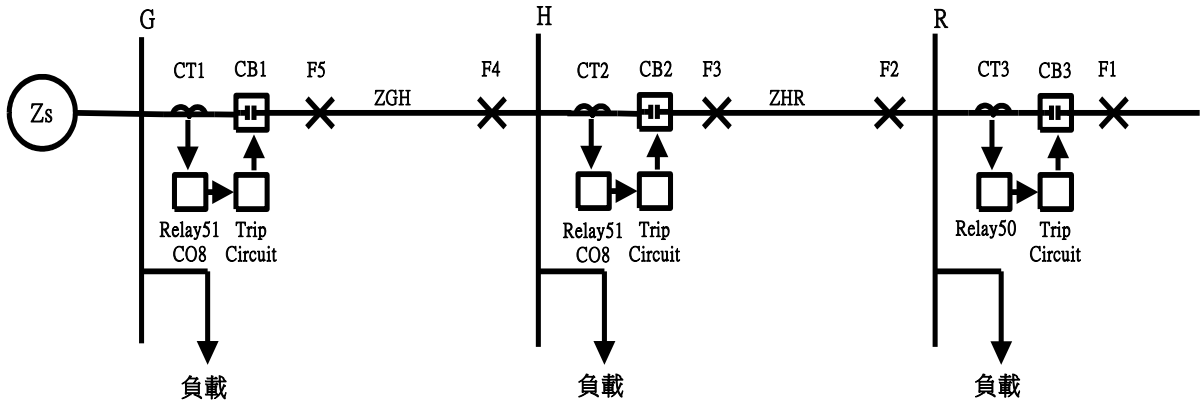


圖 18 典型幅射型線路保護

故障地點	F5	F3	F1
最大故障電流	25000A	10000A	5000A
最小故障電流	12500A	7000A	3500A

表 1 故障點的最大及最小故障電流

故障地點	F3	F1
最大故障電流	$10^3 / (300 \times 5) = 6.6$ 倍, $t = 0.22s$	$5000 / (300 \times 5) = 3.3$ 倍, $t = 0.47s$
最小故障電流	$7000 / (300 \times 5) = 4.7$ 倍, $t = 0.28s$	$3500 / (300 \times 5) = 2.3$ 倍, $t = 0.94s$

表 2 各種故障電流情況下，其動作時間

故障地點	F5	F3
最大故障電流	$10^3 / (300 \times 6) = 13.8$ 倍, $t = 0.33s$	$5000 / (300 \times 6) = 5.6$ 倍, $t = 0.59s$
最小故障電流	$7000 / (300 \times 6) = 6.9$ 倍, $t = 0.48s$	$3500 / (300 \times 6) = 3.9$ 倍, $t = 0.89s$

表 3 各種故障電流情況下，其動作時間

圖 19、20 所示是利用 Matlab 內 Simulink 所建的保護諧調幅射型電路圖，其內部參數前面已經推導過，只要依序填入電源參數、比流器參數、電驛參數、線路參數、負載參數就可模擬出保護協調電流動作圖，或者可作更深入的探討，例如比流器是否發生飽和，或者發生高阻抗接地情形又會如何，在這不作討論。

如圖 21 所示， $t = 0.1s$ 時在 F1 發生三相短路故障，故障電流約 5000A 有效值的電流，經 Relay50 運算，0.02s 後跳脫 CB(在 $t = 0.12s$)，圖 21 的上、中、下圖，分別代表故障點 F1、F3、F5 點的電流波形圖，明顯可

看出 F1 在

$t_{(0)} = 0 \sim 0.1s$ 時穩態電流約 200A 有效值

$t_{(0.1)} = 0.1s$ 後發生故障

$t_{(0.12)} = 0.12s$ 後故障排除

如圖 22 所示， $t = 0.1s$ 時在 F3 發生三相短路故障，故障電流約 10700A 最大值，7000A 有效值，經 Relay51(CO8)運算，Tap 設 5，TDS 設 0.75，計算後約 0.28s 跳脫 CB($t = 0.1 + 0.28 = 0.38s$)，上、中、下圖，分別代表故障點 F1、F3、F5 點電流波形。

如圖 23 所示， $t = 0.1s$ 時在 F5 發生三相短路故障，故障電流約 10700A 最大值，7000A

有效值，經 Relay51(CO8) 運算，Tap 設 6，TDS 設 1.75，計算後約 0.47s 跳脫 CB($t=0.1+0.47=0.57s$)，上、中、下圖，分別代表故障點 F1、F3、F5 點電流波形。

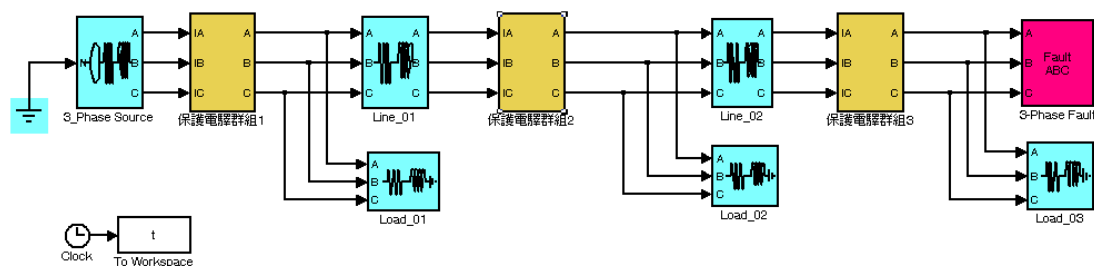


圖 19 保護諧調幅射型電路圖

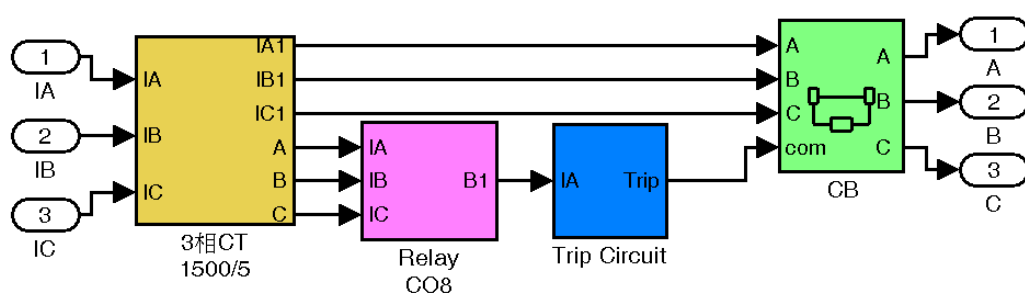


圖 20 保護電驛群組

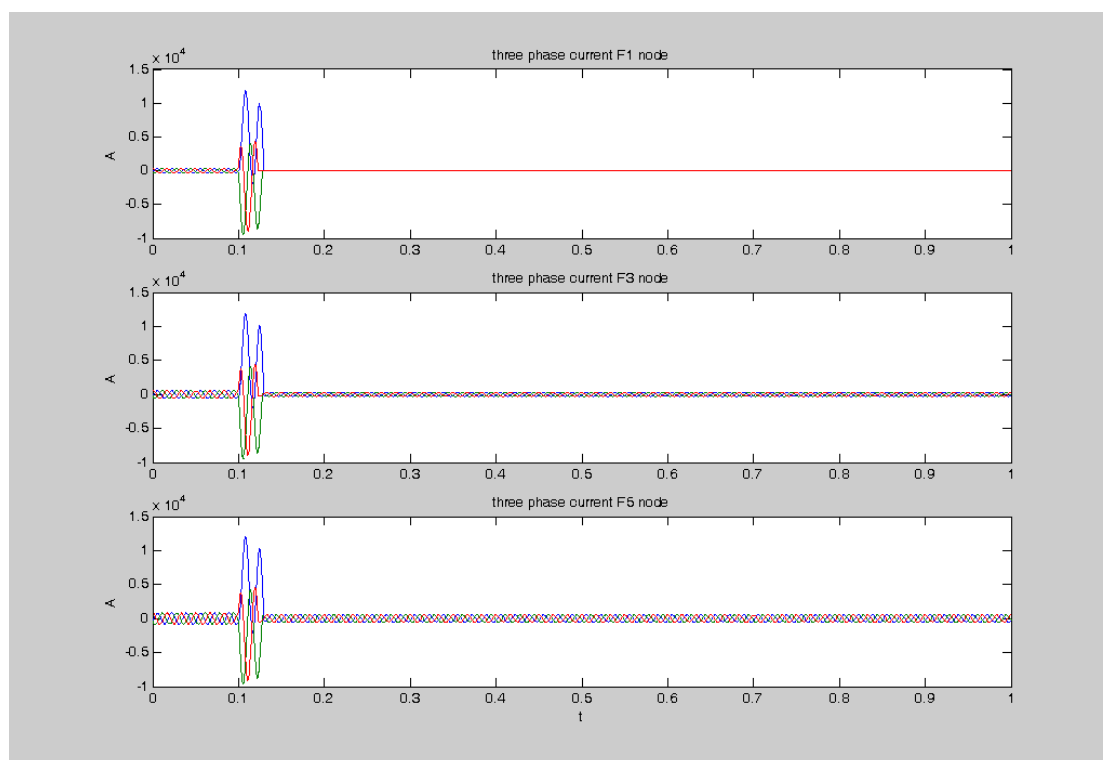


圖 21 $t=0.1s$ 時在 F1 發生三相短路故障，0.12s 跳脫
上、中、下圖，分別代表故障點 F1、F3、F5 的電流波形圖

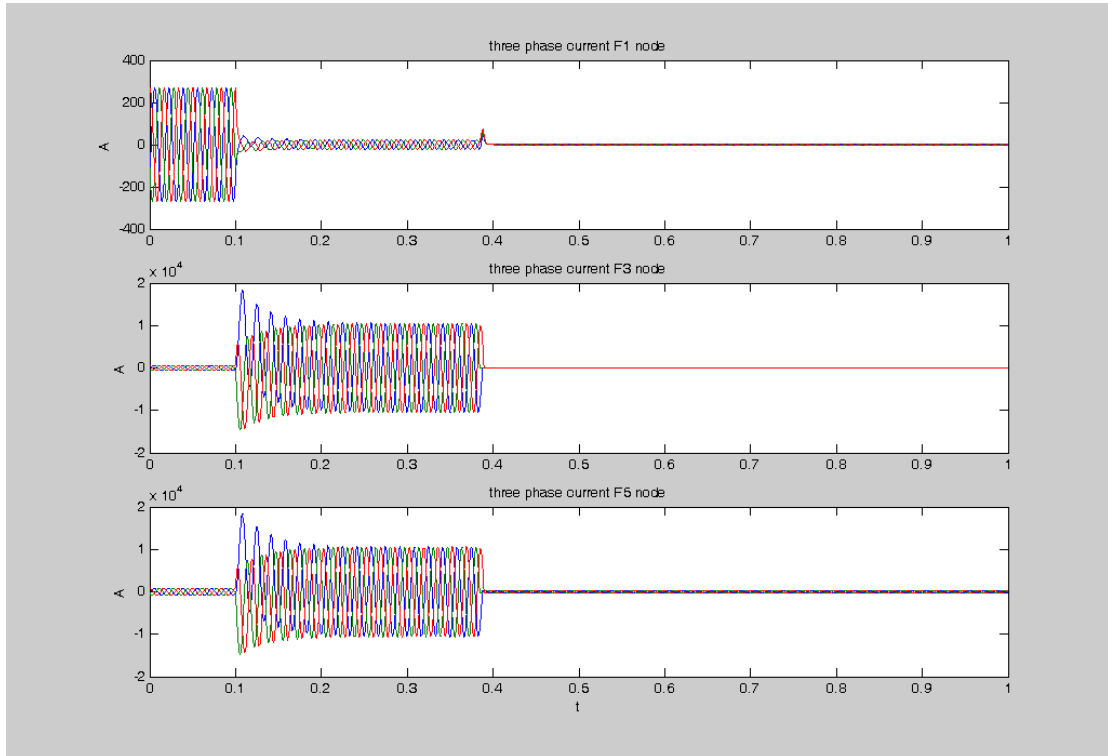


圖 22 $t=0.1s$ 時在 F3 發生三相短路故障，經 $0.38s$ 跳脫
上、中、下圖，分別代表故障點 F1、F3、F5 點的電流波形圖

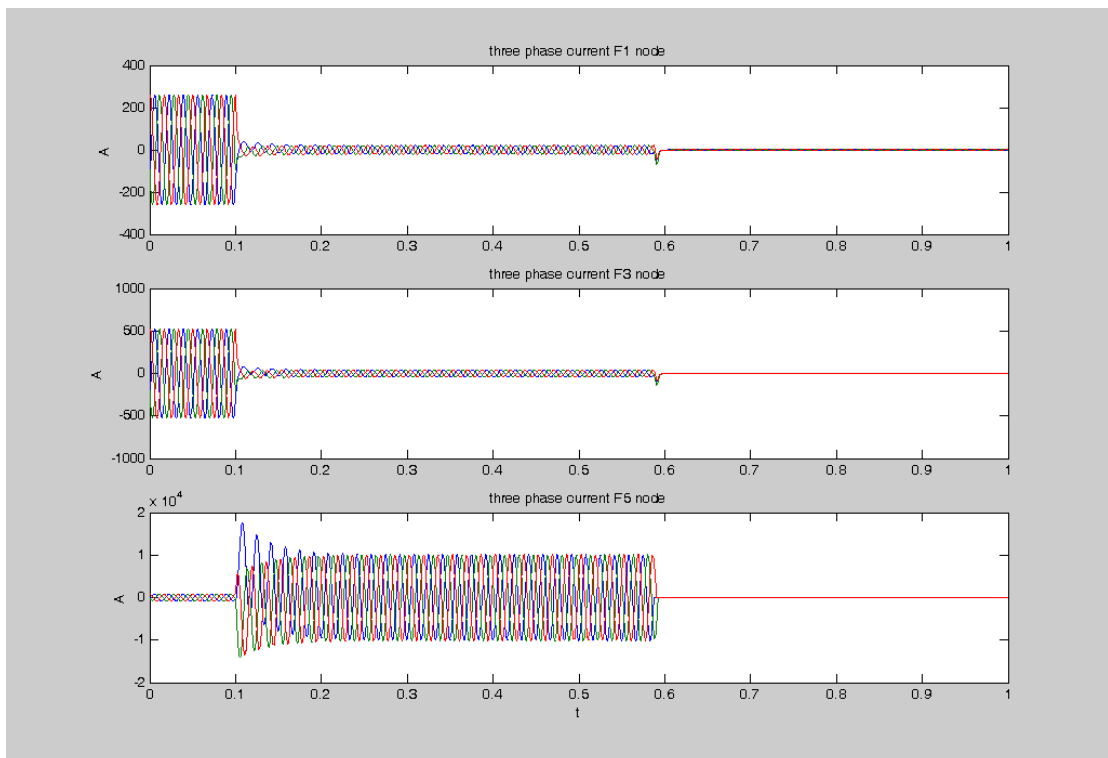


圖 23 $t=0.1s$ 時在 F5 發生三相短路故障， $0.58s$ 跳脫
上、中、下圖，分別代表故障點 F1、F3、F5 點的電流波形圖

六·結論

比流器之最大的問題就是直流飽和的問題，依模擬結果可知開關投入的時間不同、電驛負載(burden)大小、負載用戶時間常數大小，都是影響飽和的因素，比流器並不是在故障一開始時就發生直流飽和，而是在故障發生經過一段時間，等到比流器鐵心的磁通達到其飽和密度後才開始發生飽和。

利用過電流電驛做線路保護，其中 CTI 一般都設 0.3 秒，也可加一瞬時過電流電驛改善穩定度。

本文前面討論了保護電驛的架構和比流器飽合的模擬，後面討論了保護電驛用於一般線路保護的設定與模擬，不但考慮飽和也考慮協調性，因此證明了在 Matlab/Simulink 所建的模擬平台不僅可模擬傳統的電驛、載波電

驛、數位電驛都能規劃和模擬，也可考慮更深入的情形和問題，而且結果更趨近於真實。

七·參考文獻-

- [1] IEEE std. C57.13-1993, IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers
- [2] 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 18 日
- [3] 李宏任，實用保護電驛，全華圖書股份有限公司，民國 87 年 6 月
- [4] The Mathworks, Inc., Using Simulink, Version 5, 2002.
- [5] The Mathworks, Inc., Power System Blockset User' s Guide, Version 2, 2002.