

# 應用 Matlab/Simulink 於常閉環路配電系統

## IED 保護策略之研究

國立台灣科技大學電機系 辜志承、莊志鴻、沈浞源、廖文彬

### 一、前言

常閉環路採用雙端供電方式，同時結合載波電驛系統(Pilot Relaying System)之保護規劃，能將故障區域在最短的時間隔離。甚至當故障發生於環路饋線時，用電用戶亦無斷電之虞。根據統計，中壓配電系統的事故大多發生於架空饋線，因此，常閉環路配電系統地下化能有效改善過去常開環路配電系統斷電次數多與供電品質不良之問題，進而滿足高供電可靠度之要求[1]。

常閉環路配電系統係利用新一代智慧型電驛(IED)規劃其保護。然而，有鑑於 IED 的單價不菲，且作為完整系統保護規劃的探討與研究，需要足夠的 IED 數量，否則無法完整反映真正的標的系統狀況，且更需要繁雜的硬體接線及昂貴的量測設備，考量諸如上述之因素，對於學術單位或一般廠家，除非有電驛相關業者協助，否則難以自行規劃、測試系統之保護。因此，本文將利用 Matlab/Simulink 軟體的強大功能，建構常閉環路配電系統及其相關之 IED 保護設備，並模擬系統發生故障時電壓、電流之動態行為及 IED 各種不同保護邏輯方式的動作響應，以期達到無損害性、可重複性、高準確性及多元性之測試效果，進而分析最佳保護之可行性。

### 二、模擬範例系統：

本文之模擬範例系統係以台電台北市信義計畫區之虎林變電所#1 主變常閉環路配電系統參數[2]，建立模擬之典型範例系統。為了使模擬單純化且顧及主、後衛保護之規劃測試，環路饋線上配置有 4 個配電站，每個配電站主要包含一組 4 路開關及相關保護設備，其主變壓器容量採用 20MVA、額定電壓為 161/22.8 kV、標么阻抗值  $Z_T = 10\%$ 。變電所饋線出口端之主斷路器 (Feeder Circuit Breaker, FCB) 額定電流為 600 A、額定啟斷容量為 12 kA、啟斷時間為 5 週波 (cycles)。主環路饋線採 25 kV 級 500MCM 之交連 PE (XLPE) 電纜，其線路阻抗值為  $0.1469+j0.1325 \Omega/\text{km}$ ；而分歧線則採 25 kV 級 AWG #1 電纜，其線路阻抗值為  $0.8716+j0.1737 \Omega/\text{km}$ ，此外，線路的並聯充電電容假設為  $1.09 \mu\text{F}/\text{km}$ 。其負載之配置假設採用均勻分佈之方式，導線之安全容量及線路末端電壓降之設計準則，除必須符合正常環路供電之要求外，亦必須滿足環路饋線因故障隔離後之輻射式供電架構或因變電所事故後相互支援之轉供架構。即以目前台電饋線正常供電為 450A 而言，若採環路式供電且考慮轉供時，不得超過線路最大容量，則在規劃上，每一饋線環路之正常負載電流應低於 225A，則轉供時，線路電流才不致超過線路之安全容量(450A)。常閉環路配電範例系統單線圖如圖 1 所示。

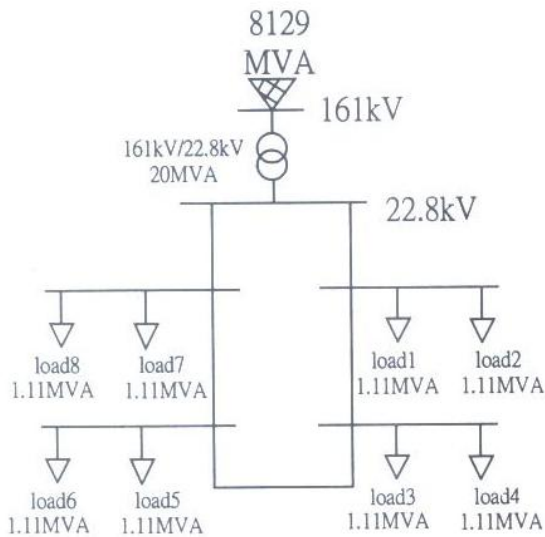


圖 1 常閉環路配電範例系統單線圖

### 三、常閉環路之保護規劃與系統模擬

針對常閉環路配電範例系統，利用 Matlab/Simulink 規劃其保護架構。常閉環路系統之保護可概分為饋線、匯流排及分歧線等三大部份相互重疊之保護區間，如圖 2 所示。

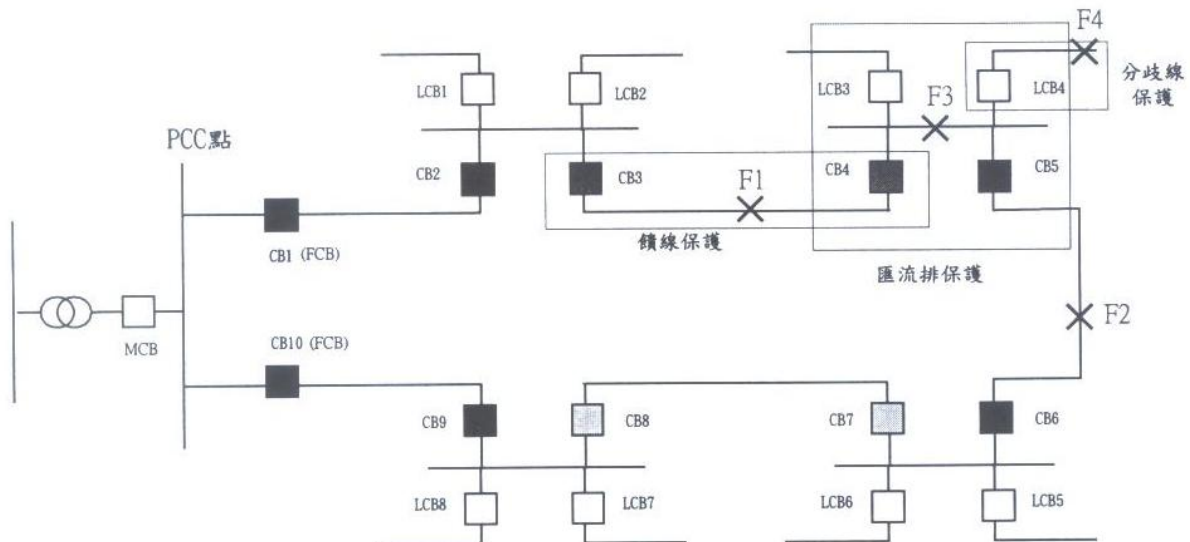


圖 2 常閉環路配電範例系統之保護區間圖

#### 1. 饋線保護

環路饋線保護區間係由各不同成對 IED 所控制之斷路器(CB)所組成，如圖 2 所示。圖中 CB1 和 CB2 形成饋線保護區間，CB3 和 CB4 形成另一饋線保護區間，…以此類推。饋線上每一個斷路器的跳脫皆由其相對應之 IED 所控制。假設饋線故障發生在圖 2 中之 F1，則 CB3、

CB4 所對應之電驛對 IED<sub>3</sub>、IED<sub>4</sub> 將陸續動作使斷路器跳脫而隔離故障。常閉環路之饋線保護規劃採用閉環路配電系統之 POTT 及 DCB 載波主保護方式[3]。

#### A. POTT 載波電驛系統

POTT 的基本保護架構，係採用兩個具有副線保護元件及 67F 方向性過電流保護元件 IED 所組成之 IED 電驛對來完成。POTT 跳脫遲



輯動作如圖 3 所示。

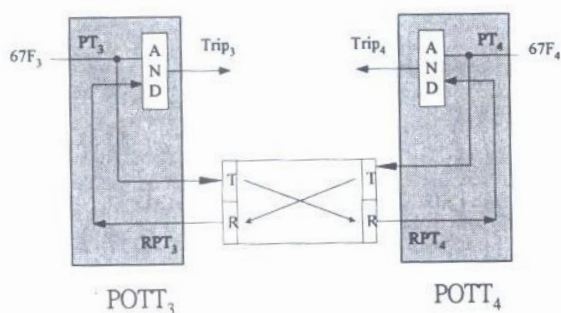


圖 3 POTT 跳脫邏輯動作圖

POTT 跳脫邏輯動作分析如下：

- (1) 正常供電時：兩端 IED 之 67F 元件均未偵測到過電流，故 IED 均不會跳脫。
- (2) 故障發生在 F1 時：此一故障位置在 CB3 與 CB4 的保護區間內，因此對於 CB3、CB4 所屬之 IED 電驛對而言，F1 為內部故障，兩端 IED 各自之 67F 元件皆動作 ( $PT_3=PT_4=1$ ) 且透過通訊頻道 (Communication Channel) 收到對方 IED 所傳送過來之允許跳脫訊號 ( $RPT_3=RPT_4=1$ )，如此兩端 IED 的跳脫條件經 AND 邏輯後

皆滿足而跳脫相對應之斷路器。

- (3) 故障發生在 F2 時：此一故障位置對饋線保護 CB3、CB4 所屬之 IED 電驛對而言不屬於其責任保護區，因此 F2 為外部故障。則 IED4 的 67F 元件不動作 ( $PT_4=0$ )，但 IED3 的 67F 會動作 ( $PT_3=1$ ) 並傳送一允許跳脫訊號至 IED4 ( $RPT_4=1$ )。跳脫邏輯方面，IED4 雖收到對方 (IED3) 所傳送過來之允許跳脫訊號 ( $RPT_4=1$ )，但本身 67F 並無動作 ( $PT_4=0$ )，故不會跳脫。IED3 的 67F 雖已動作 ( $PT_3=1$ )，但無對方傳送過來之允許跳脫訊號 ( $RPT_3=0$ )，故亦不會跳脫。

利用 Simulink 完成 POTT 之保護方式如圖 4 所示。由圖可知 CB3 要跳脫 (trip)，POTT3 本身 IED 之 67F 方向性過電流元件動作 ( $PT_3=1$ )，且接收到對方 IED 傳來的允許跳脫訊號 ( $RPT_3=1$ )，才能使斷路器啟斷。因此，使 POTT3 跳脫的條件為

$$\text{Trip}_3 = PT_3 * RPT_3 \quad (1)$$

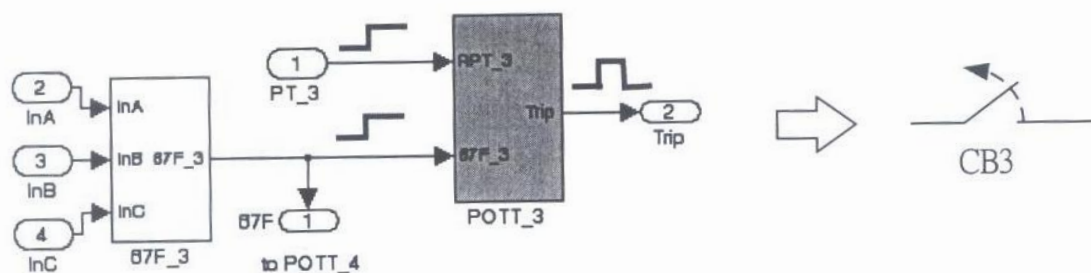


圖 4 IED 之 POTT 於 Simulink 之動作邏輯規劃

## B. DCB 載波電驛系統

方向比較閉鎖式 (DCB) 載波電

驛系統的基本架構係由採用兩個具有副線保護元件、67F 順向過電流

元件及 67R 逆向過電流元件功能 IED 所組成之 IED 電驛對來完成。DCB 跳脫邏輯動作如圖 5 所示。

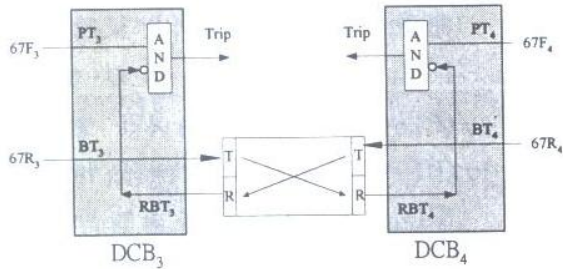


圖 5 DCB 跳脫邏輯動作圖

DCB 跳脫邏輯動作分析如下：

- (1) 正常供電時：兩端 IED 之 67F 元件均未偵測到過電流，故 IED 均不會跳脫。
- (2) 故障發生在 F1 時：此一故障位於 CB3 與 CB4 的保護區間內，因此對於 CB3、CB4 所屬之 IED 電驛對而言，F1 為內部故障，兩端 IED 各自之 67F 元件皆會動作 ( $PT_3=PT_4=1$ )，但兩端之 67R 元件皆不會動作 ( $BT_3=BT_4=0$ )，亦即兩端之 IED 都沒有收到對方 IED 透過通訊頻道所傳送過來之閉鎖訊號 ( $RBT_3=RBT_4=0$ )，因此跳脫邏輯獲得滿足而跳脫相對應

之斷路器。

- (3) 故障發生在 F2 時：由於此一故障位置對饋線保護 CB3、CB4 所屬之 IED 電驛對而言不屬於其責任保護區，因此 F2 為外部故障。則 IED4 的 67F 元件不動作 ( $PT_4=0$ )，但其 67R4 元件會動作 ( $BT_4=1$ )，並且此一閉鎖訊號 ( $BT_4$ ) 將被傳送至 IED3 的 RBT3；IED3 的 67F3 元件會動作 ( $PT_3=1$ )，但其 67R3 元件不動作 ( $BT_3=0$ )。跳脫邏輯方面，由於 IED4 本身的 67F4 元件並未動作 ( $PT_4=0$ )，所以不會跳脫，至於 IED3 的 67F3 元件雖然已動作 ( $PT_3=1$ )，但因 RBT3 收到 IED4 所傳送過來的閉鎖信號 ( $BT_4=1$ )，所以 IED3 也不會跳脫。

利用 Simulink 模擬 DCB 保護方式如圖 6 所示。由圖可知 DCB3 必須 IED3 本身 67F3 元件動作 ( $PT_3=1$ )，且沒有接收到對方 IED4 傳來的閉鎖訊號 ( $RBT_3=0$ )，才能使斷路器啟斷。因此，使 DCB3 跳脫的條件為

$$Trip_3 = PT_3 * !RBT_3 \quad (2)$$

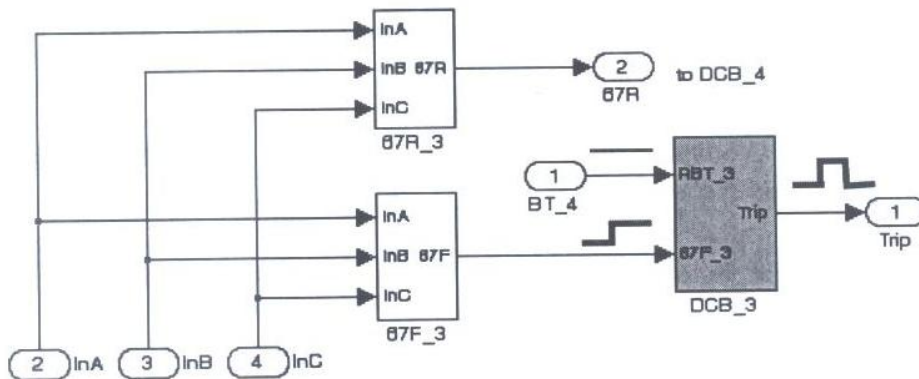


圖 6 IED 之 DCB 於 Simulink 之動作邏輯規劃



一般而言系統於正常供電情況下，採用 POTT 保護方式的安全度 (Security) 比較高，而採用 DCB 保護方式的可靠度 (Dependability) 比較高。但是當考量通訊線故障對配電系統之影響時，POTT 保護方式變得不可靠，而 DCB 保護方式變得不安全。因此結合 POTT+DCB 的保護方式，不但可以提升系統保護的可靠度及安全度，並可避免因通訊線不正常所引發的 IED 誤動作。

一個閉環路配電系統於饋線發生故障且 IED 正常跳脫斷路器後，將形成兩個輻射式供電系統，為了使 POTT 保護方式亦能適用並改善輻射式供電架構之故障清除時間，在 POTT 的規劃中加入 Echo keying 的功能。當本端 IED 收到遠端 IED 送來的允許跳脫訊號 (PT) 且本身亦

無傳送 PT 或閉鎖跳脫訊號 (BT) 時，則將此收到的 PT 訊號延遲 1.5 週波後回送至遠端 IED，即所謂的 Echo PT，進而跳脫遠端斷路器。

## 2. 常閉環路配電系統之後衛保護

常閉環路配電系統之保護，於 IED 除了規劃 POTT 及 DCB 作為饋線主保護外，尚規劃斷路器失能保護 (CBFP) 及直接傳訊跳脫 (DTT) 兩種後衛保護方式。

### A. 斷路器失能保護 (CBFP)

斷路器失能保護 (CBFP) 屬於 IED 後衛保護的一種，在確認 IED 主保護所跳脫的斷路器未能正常跳脫時，CBFP 必須動作以跳脫相關匯流排上所有的斷路器，圖 7 即為斷路器失靈保護的動作示意圖。

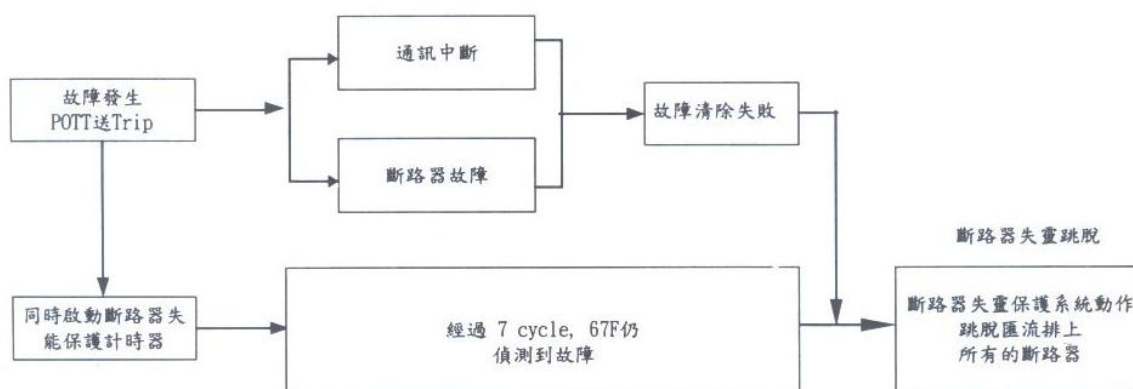


圖 7 斷路器失能保護的動作示意圖

假設饋線於 F1 發生故障 (如圖 2 所示)，以 IED<sub>3</sub> 為例說明 CBFP 的動作原理，由於此故障位於 IED<sub>3</sub> 與 IED<sub>4</sub> 的保護區間內，因此，饋線區間之主保護 POTT<sub>3</sub> 與 POTT<sub>4</sub> 動作，同時啟動斷路器失能保護之機制。

正常情況下，主保護將跳脫 CB<sub>3</sub>、CB<sub>4</sub>，而順利隔離故障 F1，但倘若 IED<sub>3</sub> 因通訊線中斷或斷路器故障，而無法順利隔離故障時，經過斷路器保護失能計時器的設定時間後 (假設為 100ms)，IED<sub>3</sub> 之 67F<sub>3</sub> 元件仍

偵測到此故障，則斷路器失能保護啟動，跳脫匯流排上所有相關斷路器 CB2、CB3、LCB1 和 LCB2，以作為饋線故障主保護之後衛保護。

**B. 直接傳訊跳脫(DTT)保護**

直接傳訊跳脫(DTT)保護方式係於產生環路斷路器跳脫訊號的同時，另外產生一「直接傳送跳脫訊號」經由導線或通訊頻道傳送至遠端，遠端收到此訊號後即行強迫遠端斷路器跳脫。

假設環路饋線故障發生於圖 2 中所示之 F1 位置，則 IED 主保護 POTT<sub>3</sub> 與 POTT<sub>4</sub> 動作的同時，會互傳 DTT 訊號給對方，以確保饋線故障點兩端之斷路器 CB3 與 CB4 均能跳脫。本範例系統的 IED 保護規劃中，會產生斷路器跳脫訊號的有 POTT、DCB、Busbar 以及遠端傳送過來的 DTT 訊號，如圖 8 所示。

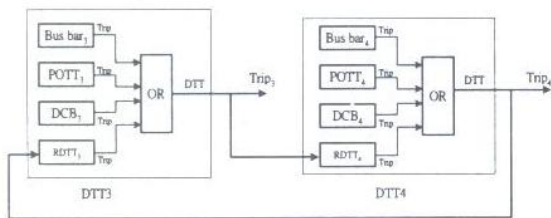


圖 8 直接傳訊跳脫保護(DTT)之規劃

**3. 匯流排保護**

考量簡單又經濟的方法，本文採用過電流電驛之匯流排差動保護[4]，此法如圖 9 所示。

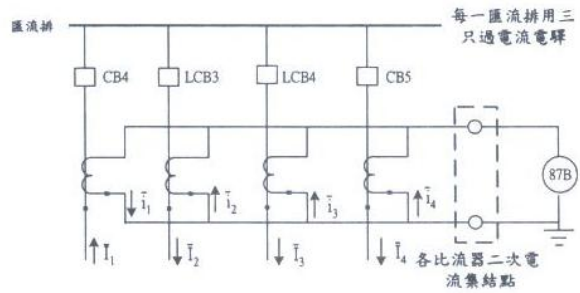


圖 9 使用過電流電驛之匯流排差動保護

匯流排各路電流之方向定義為正常供電情況下之流向，如圖 9 所示。根據克希荷夫電流定律，比流器二次側各線路電流之關係式如下：

$$\vec{i}_1 = \vec{i}_2 + \vec{i}_3 + \vec{i}_4 \quad (3)$$

假設發生匯流排外故障，流經匯流排之各線路電流如圖 10 所示，比流器二次側各線路電流之關係式如下：

$$\vec{i}_1 = \vec{i}_2 + \vec{i}_3 + \vec{i}_4 \quad (4)$$

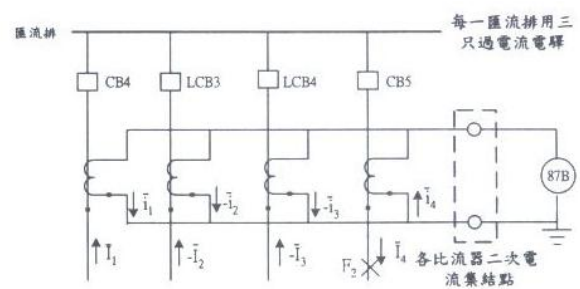


圖 10 匯流排外部故障時，各線路電流之流向

假設匯流排發生內部故障，流經匯流排之各線路電流如圖 11 所示，比流器二次側各線路電流之關係式如下：

$$\vec{i}_1 \neq \vec{i}_2 + \vec{i}_3 + \vec{i}_4 \quad (5)$$



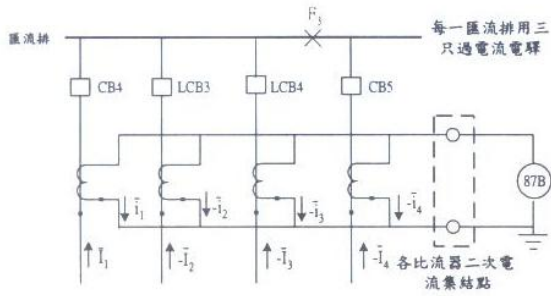


圖 11 匯流排內部故障時，各線路電流之流向

由前述可知，匯流排正常供電和匯流排外部故障時，比流器二次側各線路電流之關係式可用  $\bar{i}_1 = \bar{i}_2 + \bar{i}_3 + \bar{i}_4$  表示，而當匯流排發生內部故障時，比流器二次側各線路電流關係式為  $\bar{i}_1 \neq \bar{i}_2 + \bar{i}_3 + \bar{i}_4$ 。因此利用 Simulink 規劃 IED 之匯流排保護時，只要符合(3)式即表示為正常供電或匯流排外部故障，匯流排保護並不動作。反之，若符合(5)式，則表示匯流排發生內部故障，此時匯流排保護必須動作以啟斷匯流排上的所有相關斷路器。

#### 4. IED 之 Simulink 模擬

現行之 IED 中均會提供一專屬的規劃工具，其具備 PLC 功能，可以在個人電腦上將線路上載波電驛保護系統如方向性閉鎖、方向比較超範圍允許式等保護功能作一完整的規劃，再將規劃好的 PLC 程式下載到 IED，以便執行保護、量測、監視及控制等功能。

本文則是利用 Simulink 軟體將前述有關常閉環路配電系統的保護方式加以模擬、規劃，並且將每一種保護方式分別以方塊圖表示，再整合於名為 IED 的方塊內，因此每一個 IED 方塊的內部應包含以下幾個保護方塊：有 POTT、DCB、DTT、Echo PT 及 CBFP 等，並且考慮保護協調，所以尚須用到時間延遲(delay)方塊。各式保護方塊整合於 IED 方塊內如圖 12 所示。

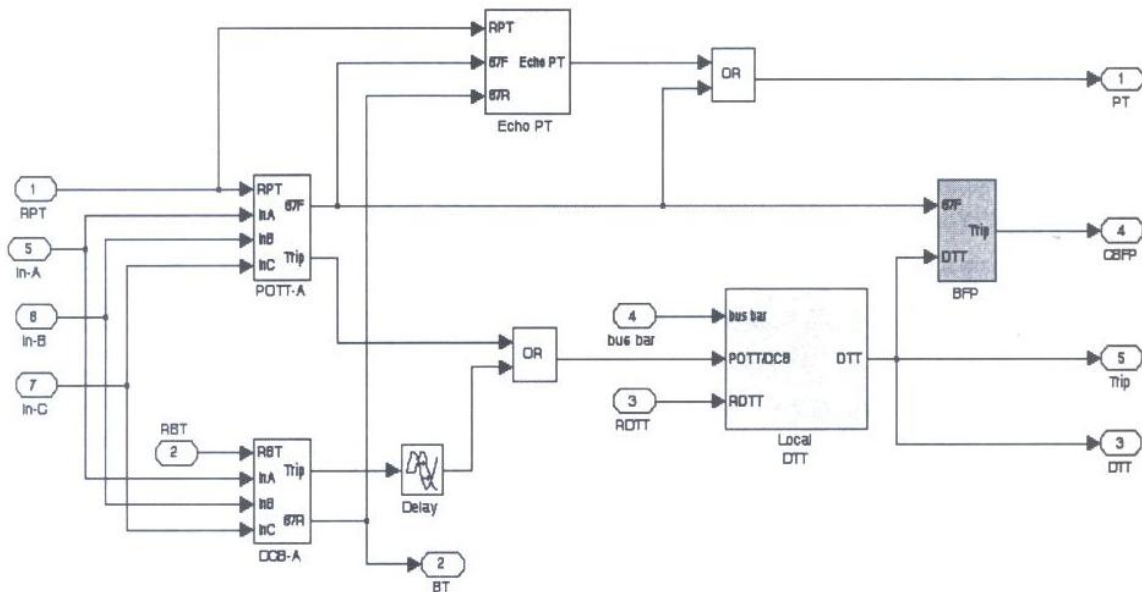


圖 12 利用 Simulink 內建於 IED 內部之保護方塊

根據前述的保護規劃要求，所有常閉環路配電系統之保護分析可以用 Simulink 來實現。其中一個完整饋線保護 IED 電驛對之規劃如圖 13 所示。每一饋線保護電驛對的 IED 方塊應有六條通訊線，三

條傳送訊號，分別是：POTT 送出的 PT、DCB 送出的 BT 以及 DTT，三條接收訊號，分別是：RPT、RBT 以及 RDTT。

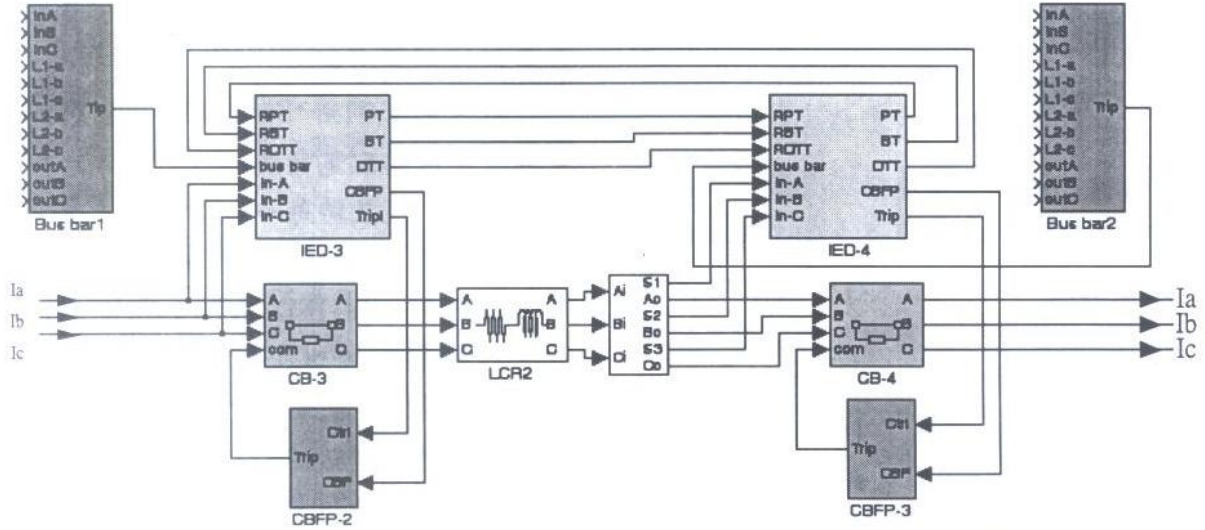


圖 13 完整的 IED 電驛對保護規劃圖

### 5. Simulink 模擬結果

常閉環路配電系統保護協調規劃方式如前所述，並利用 Simulink 軟體完成範例系統及保護架構。因此可以分別就饋線故障、匯流排故障、分歧線等故障三種故障情形加以探討。除了比較環路式及輻射式供電的故障清除時間，並就通訊正常與否、斷路器正常與否等狀況來模擬故障跳脫時間。

以饋線故障模擬分析為例，假設饋線於圖 2 中所示之 F1 點發生單相接故障 (SLGF)，故障起始時間為 0.05 秒。則於通訊線路及斷路器皆正常的狀況下，模擬 IED3 內部動作時序及 PCC 點上之電壓、電流波形分別如圖 14 及圖 15 所示。

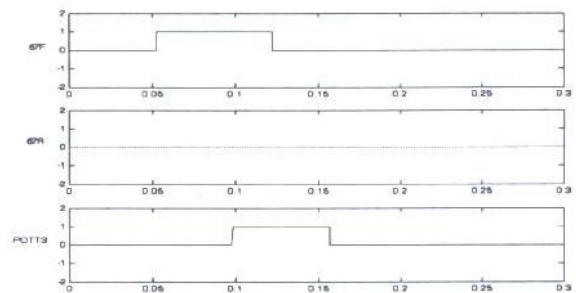


圖 14 通訊線及斷路器皆正常時，饋線發生 SLGF 於 IED<sub>3</sub>之動作時序



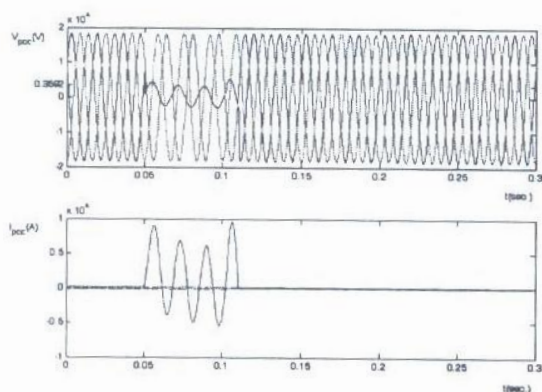


圖 15 通訊線及斷路器皆正常時，饋線發生 SLGF 於 PCC 點之電壓、電流波形

將 Simulink 模擬常閉環路與輻射式配電系統之保護協調結果，與 SEL-351F 所規劃之常閉環路與輻射式配電系統保護架構[5]，實際量測之故障跳脫時間作比較，其比較結果如表 1 所示。

表 1 SEL-351F 實際量測與 Simulink 模擬結果比較表

故障種類		跳脫訊號時間 (cycles)	
通訊線正常		SEL-351F 實測	Simulink 模擬
斷路器正常	饋線故障	環路式供電	3
		輻射式供電	5
	匯流排故障	4.5	4.6
	分歧線故障	5	4.6
斷路器故障	饋線故障	環路式供電	10.5
		輻射式供電	12.5
	匯流排故障	5	5.1
	分歧線故障	12.5	10.6
通訊線不正常		SEL-351F 實測	Simulink 模擬
斷路器正常	饋線故障	環路式供電	11
		輻射式供電	11
	匯流排故障	4.5	4.6
	分歧線故障		
斷路器故障	饋線故障	環路式供電	18.5
		輻射式供電	18.5
	匯流排故障	11	11
	分歧線故障		

#### 四、結論

由表 1 之比較結果可得驗證，利用 Simulink 軟體模擬 IED 之保護規劃是可行的。且透過 Simulink 模擬 IED 功能與其保護規劃，突破硬體設備之限制。結合系統故障模擬，更可以完成任何電力系統事故、電力品質之模擬分析。未來可進一步與 Visual Basic 或 Labview 等軟體結合，建立系統保護規劃之人機介面，使 IED 的規劃及設定更為人性化。

#### 參考文獻

- [1] R. Settembrini, "Seven Distribution System: How Reliabilities Compare", Electrical World, pp.41-45, May 1992.
- [2] 辜志承，陳在相，沈混源，黃維澤，莊宗霖，趙恆寬，敦宗益，蒲冠志，許炎豐，環路式配電系統之保護協調分析，第 23 屆電力研討會論文集，民國九十一年十二月。
- [3] J.Lewis Blackburn, Protective Relaying Principles and Applications, Bothell, Washington, pp.444-455(1998)
- [4] 李宏任，實用保護電驛，全華科技圖書股份有限公司，民國八十八年。
- [5] 配電常閉環路系統保護協調細部設計文件。

