行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
電力系統穩定度與控制-子計畫六：防止電力系統崩潰之防衛系統研究(Ⅰ)

A Study of Defense System Against Power System Collapse

計畫編號：NSC 89-2218-E-002-044

執行期限：89年8月至90年7月

主持人　：劉志文　　國立台灣大學電機工程學系

一.中英文摘要: 本研究提出一基於相量量測單元(PMUs)之電力防衛系統來防止電力系統因一連串的保護電驛跳脫事故而造成電力系統崩潰。

在一個中央電腦控制中心，我們使用 PMUs 監控電力系統中主要的發電機組以及超高壓輸電線，並且提供預測電力系統不穩定及保護策略之演算法來避免保護電驛的連續跳脫事故而造成的電力系統不穩定。當故障發生時，我們將所有一同搖擺發電機構成同一群，進而簡化成單機無限匯流排系統。其中改善系統之行為包含負載卸載以及發電機跳機，這個策略是以保護電驛設定限定等面積法則(Relay Setting Limited Equal Area Criteria)來決定其控制行為。

本防衛是以台電系統來做為測試對象，模擬狀況為台電系統在主要的超高壓輸電線有嚴重的事故，並且引起一連串的電驛跳脫時，而導致類似 1999 年七月二十九日台灣北部及中部大停電情形。

Abstract: This project proposes a defense system to prevent power system blackout due to a sequence of relay trip events based on Phasor Measurement Units (PMUs).

In a contool center, we use PMUs to monitor the generators and the major EHV transmission lines of a power system, and apply an instability prediction algorithm for initiating a system protection schemes(SPS) to avoid a sequence of relay trip events whenever necessary. When a fault happens, we group the generators swinging coherently and reduce the system to One-Machine-Infinite-Bus(OMIB)system. The remedial control actions consist of load shedding and generation tripping. The strategy for determining the amount of remedial control actions is a proposed relay setting limited equal-area-criterion for OMIB.

The proposed scheme is tested with Taipower system, which experienced a severe fault at a major EHV and caused a successive relay trips resulting in system north and center area blackout on July 29,1999(729 event).

關鍵詞：相量量測單元,大停電,電力防衛系統,特殊保護系統.

二.緣由與目的

電力工業是台灣邁向科技島之重要基礎建設。電力之使用必須經由輸配電網路將發電廠產生的電力分送給各用戶，發電廠、輸配電網路與用戶構成一個龐大且複雜之電力系統。由於台灣電力系統於民國 88 年 7 月 29 日，因 345kV 輸電鐵塔倒塌，導致一連串的保護電驛跳脫，造成台灣五十年來最大規模的斷電，全台約 83%的用戶斷電，導致工商業高達上百億元以上的損失；所以監控電力系統的穩定狀態以及有效的防止電力系統崩潰，在現階段是一項重要的課題。

因此也是各國較多採用的方向。因此台灣電力系統應盡速建立一套有效之防止系統崩潰的防衛系統，來防止類似 729 大停電之事故的發生。

三.防衛 系統策略介紹

由於台灣電力系統乃屬長條型輸電架構，主要可概分為北、中、南三個區域，其輸電方式主要藉由 345KV 超高壓輸電線來傳送電力。

由圖 1 所示，它是以 PMU 為基礎之電力系統防衛架構，整個架構的功能如下：

1. 使用 PMUs 監控台電系統主要發電機以及超高壓輸電線。
2. 提供一套估測電力系統不穩定與否之演算法並實施矯正動作，來防止系統崩潰。
3. 當發生故障時，利用 PMU 將故障資訊即時傳回中央控制中心，由中央控制中心決定控制行為。
4. 控制行為包含發電機跳機、負載卸載。

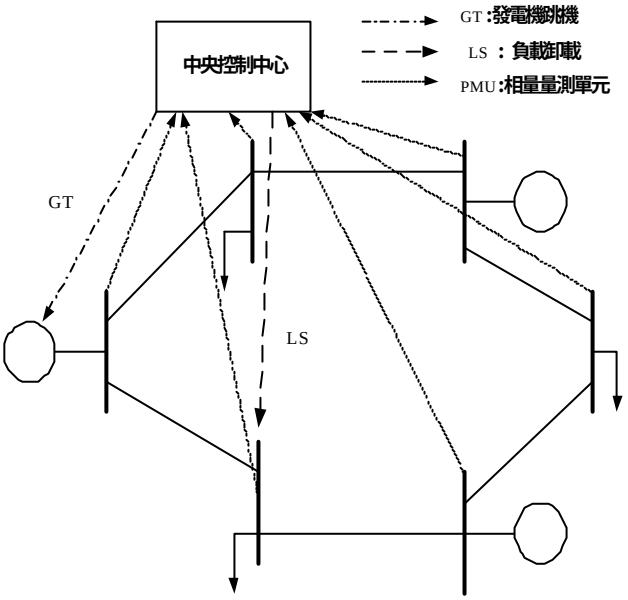

圖1防衛系統架構圖

3.1 演算法結構

在此，我們提出一在電力系統防衛策略下之演算法，它能夠即時的預測整個電力系統的穩定與否並做適當的改善措施。其流程圖如圖 2 所示。在圖 2 中，我們在控制中心使用 PMUs 監控發電機組以及主要的 345KV 超高壓輸電線，並且提供一預測電力系統暫態不穩定之演算法來防止系統因保護電驛的連續跳脫而造成系統崩潰。

當故障發生時，且對於一個長條形的電力系統，例如台電系統，我們可將所有同行搖擺發電機簡化成單機無限匯流排系統(此步驟主要在離線時，針對系統所模擬結果)，並且使用最小平方法來估測此系統參數；最後利

用保護電驛設定限定等面積法則來預先估測系統的穩定與否，在系統不穩定前做適當的控制行為以防止系統崩潰。

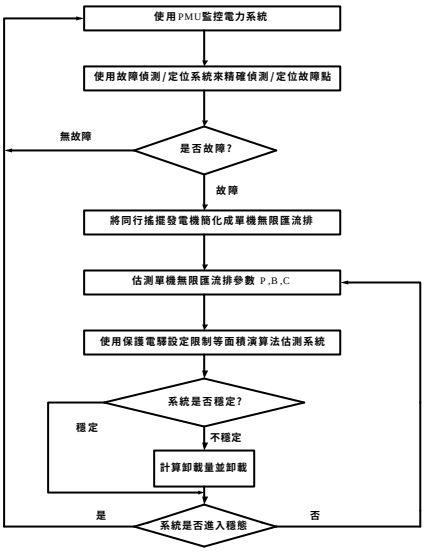

圖 2 防衛系統流程圖

3.2 最小平方參數估測

在一個多機系統的發電機古典模型中，當一已知故障發生時，可將系統簡化為單機無限匯流排系統(例如，台電系統)如圖3所示；此時將多機系統解偶為兩個子系統，並以連接線(Tie-line)連接兩系統如圖4所示。因此我們只描述兩機組等效模型的估測程序，對多機組而言，除了因座標變換而減少方程式以外，其一般化是直觀的。然而，兩機組等效模型因座標變換靈活的減少一個方程式。兩機組等效模型的搖擺方程式有P、B、C三個係數如

$$\ddot{\delta} = P + B\cos(\delta) + C\sin(\delta) \qquad (1)$$

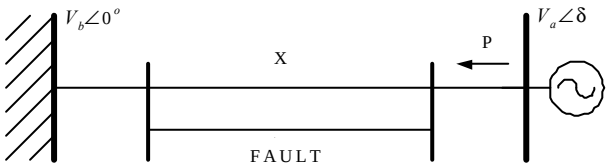

圖3 單機無限匯流排系統

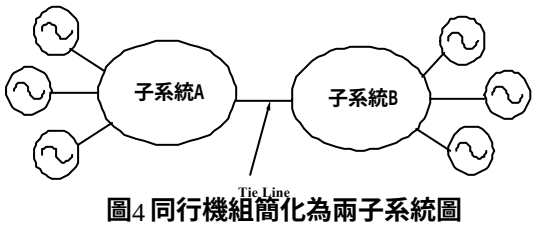

圖4 同行機組簡化為兩子系統圖

我們利用最小平方誤差法來估測 OMIB 中 P、B、C 參數，如(1)式，其中 d 表示兩機組間轉子角度，以 $\ddot{d}(m\Delta t)$ 表示在某取樣時間 $m\Delta t$ 內，角度中心的差，其中 $m = 0,.....N$，且用以估計 P、A、B 三係數。其二階導數可近似於：

$$\ddot{\delta}(m\Delta t) \approx \frac{\delta((m+1)\Delta t) - 2\delta(m\Delta t) + \delta((m-1)\Delta t)}{(\Delta t)^2} \qquad (2)$$

其中 $m = 1,2,....., N-1$

並且考慮誤差函數如(3)式所示

$$e(t) = \ddot{\delta} - P - B\cos\delta(t) - C\sin\delta(t) \qquad (3)$$

$$\min_{P,B,C} \sum_{m=1}^{N-1} e^2(m\Delta t) \qquad (4)$$

(4)式表示其誤差函數最小化，即P，B，C誤差最小值；且令

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cos\delta(\Delta t) & \sin\delta(\Delta t) \\ . & . & . \\ . & . & . \\ . & . & . \\ 1 & \cos\delta((N-1)\Delta t) & \sin\delta((N-1)\Delta t) \end{bmatrix} \qquad (5)$$

$$b = \begin{bmatrix} \ddot{\delta}(\Delta t) \\ . \\ . \\ . \\ \ddot{\delta}((N-1)\Delta t) \end{bmatrix} \qquad (6)$$

然後，利用最小平方估測P、B、C參數以(7)式表示：

$$\begin{bmatrix} P \\ B \\ C \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b \qquad (7)$$

3.3 保護電驛設定限制等面積法則

在一個單機無限匯流排系統，若此系統發生故障或擾動而使得無限匯流排上的發電機開始搖擺，此時保護電驛設定限制等面積法則(Relay Setting Limited Equal-Area-Criterion)，以下簡稱 REAC，它能夠決定在暫態條件下，藉由求解搖擺方程式來決定系統穩定度。在系統發生故障後，藉由估測系統參數 P、B、C 可得到電力角曲線。

REAC 方法由傳統等面積法則修正而來；此法主要是在防止當超高壓輸電線發生連續短路故障時，因保護電驛的連續跳脫而造成電力系統崩潰所發展出的控制方法。

其方法及概念如下所述：使用過電流電驛來防止線路上的熱容量超過其線路額定，並且把連接線(Tie-line)上過電流電驛所設定的值等效轉換到區域間過電流電驛流量設定的值，並選擇最小電驛設定值限制區域間流量，藉由 REAC 觀念來決定系統之穩定度。舉例而言；有一線路編號為 i，$P_{set,i}$ 為保護電驛電流設定值轉換的等效功率，其數學式由(8)所示：

$$\sqrt{} \qquad (8)$$

對於等效區域間過電流電驛流量設定，所轉換的等效功率如(9)式所示：

$$P_{R,i} = P_{coa} + \frac{P_{coa}}{P_{line-i}} * \left(P_{set,i} - P_{line,i}\right) \qquad (9)$$

其中

$P_{R,i}$ ：第 i 條連接線(tie-line)等效區域間流量限制

P_{coa} ：介於兩區域間線路上所量測的總流量

$P_{line,i}$ ：第 i 條連接線上所量測的功率

$P_{set,i}$ ：第i條線路功率電驛設定值

REAC中保護電驛設定的原則描述如下：由圖5所示，計算最小保護電驛設定限制值的線路流量 P_R ，並且從(7)式估測P值。假如加速面積 A_a 大於減速面積 A_d 如圖3-6所示，則此系統將會產生搖擺不穩定現象，更嚴重者可能引起保護電驛的連續跳脫，而使整個系統更加惡化。此時我們將藉由調整圖5中P的量，其調整可由負載卸載以及發電機跳機來達成，只要 A_a 小於 A_d ，系統趨於暫態穩定且不會引起保護電驛的連續動作；而負載卸載主要是以北部負載為主要卸載區域，發電機跳機則以南部機組為主但基載機組(如核能機組)除外，以達到使系統穩定下之最少負載卸載量。

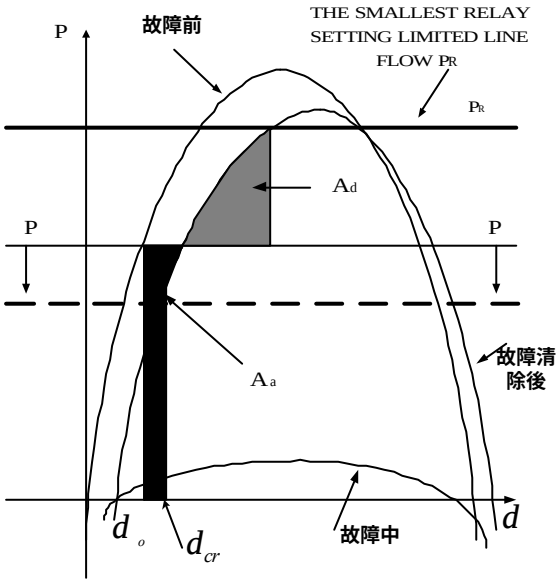

圖5保護電驛設定限制REAC方法概念

表1為民國88年七月台電系統尖峰及離峰所有匯流排、發電機、輸電線以及負載匯流排、變壓器等數量

表1 台電系統容量裝置

	匯流排(個)	發電廠(座)	發電機(組)	負載匯流排(個)	輸電線(條)	變壓器(組)
尖峰負載	467	84	80	166	716	395
離峰負載	467	84	52	166	716	395

四. 結果與討論

在完成電力系統保護策略設計後，將採用電力系統模擬器(Power System Simulator, PSS/E)，並引入所撰寫之副程式來驗證其響應性能。首先，對 PSS/E 做一簡單介紹，並執行其電力潮流程式，詳細列出台電系統主要 345KV 輸電線之電力潮流模擬結果；最後以類似 729 事故為模擬對象來驗證，並說明其保護系統策略模擬結果。

4.1 系統單線圖及保護電驛設定

如圖 6所示，為民國 88年台電系統主要 345KV輸電系統單線圖，由圖可看出整個系統大致可區分為北、中、南三個主要區域，分別以龍潭、中寮、以及龍崎為主要分界，括弧內之值為各條輸電線路之熱容量限制(Thermal Limit Rating)單位為 MVA。吾人在每條輸電線分別裝置延時型過電流電驛以及姆歐型測距電驛來保護整個系統，其中各電驛設定值如下所述：

1.延時型過電流電驛

延遲時間為 0.6秒(36 cycle)，1.5倍線路熱容量限制。

2.姆歐型測距電驛

姆歐型測距電驛共有三個設定保護區間，其分別設定為 90%，150%，220%線路阻抗值，跳脫時間分別為 1.5、10、以及 60 cycle。

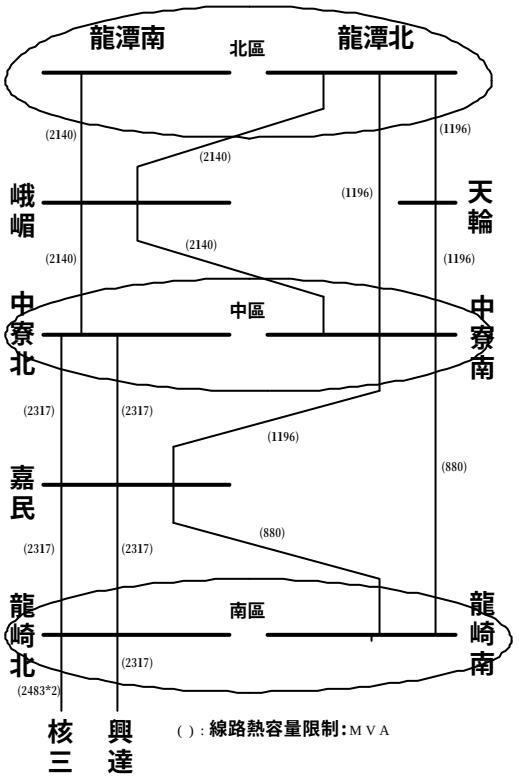

圖6台電系統345KV輸電線結構圖

4.2 電力潮流模擬結果

經由 PSS/E 之電力潮流輸出可得各區域間傳送功率，如表 2所示。

表 2 民國 88 年 7 月尖、離峰區域間功率(MW)

綜合以上電力潮流執行結果，可得在尖峰以及離峰負載下，各區域發電總量、負載、損失以及所剩餘電量，如表3、4所示；由表3或4中，可看出不論在尖峰或離峰負載，北部由於發電量不足於北部負載所用，故必須仰賴南部、中部多餘發電量往北部送，這乃是台電系統主要的問題所在，也是急需改善之處。

負載	中部→北部	南部→中部
尖峰負載	5004	3550
離峰負載	2658	3670

表2民國88年7月區域間傳送功率(MW)

表3 民國88年7月離峰區域間負載消耗及發電量(MW)

	北	中	南
發電量	3838	5666	7321
負載+損失	6496	6678	3651
供需平衡狀態	-2658	-1012	3670

	北	中	南
發電量	6310	8941	9317
負載+損失	11314	7487	5767
供需平衡狀態	-5004	1454	3550

表 4 民國 88 年 7 月尖峰區域間負載消耗及發電量(MW)

4.3 保護策略模擬結果

為了印證本保護策略之可行性，本文除了使用 PSS/E 模擬軟體之外，並且引入所撰寫之副程式來達到整個保護策略之完整性。首先，利用 PSS/E 執行電力潮流程式可得到台電系統在 88 年七月尖峰、離峰各負載潮流如前節所述。而本節將模擬 729 停電事故，並以類似 729 事故之例子，以民國 88 年七月尖峰、離峰共模擬八個例子，最後將以所提之保護策略來有效防止系統崩潰。現分別將所有故障例子，其中包含故障線路以及故障時間整理成表 5所示。

CASE1：首先，模擬類似 729 事故，其事故過程乃在龍崎南(2660) →嘉民(2500)以及龍崎南(2660)→中寮南(2490)兩迴路分別在時間 0秒及 1.632 秒發生三相短路故障；如圖 7(a)、(b)、(c)所示，分別為區域間傳送功

表5 研究例子總表

Case	鰓	故障描述	
1	尖峰	3PSC龍崎南-->嘉民 3PSC龍崎南-->中寮南	Time = 0second Time = 1.632second
2		3PSC龍崎北-->嘉民 線路1 3PSC龍崎北-->嘉民 線路2	Time = 0second Time = 1.632second
3		3PSC中寮南-->天輪 3PSC中寮南-->龍潭北	Time = 0second Time = 1.632second
4		3PSC中寮北-->峨嵋 3PSC中寮南-->峨嵋	Time = 0second Time = 1.632second
5	離峰	3PSC龍崎南-->嘉民 3PSC龍崎南-->中寮南	Time = 0second Time = 1.632second
6		3PSC龍崎北-->嘉民 線路1 3PSC龍崎北-->嘉民 線路2	Time = 0second Time = 1.632second
7		3PSC中寮南-->天輪 3PSC中寮南-->龍潭北	Time = 0second Time = 1.632second
8		3PSC中寮北-->峨嵋 3PSC中寮南-->峨嵋	Time = 0second Time = 1.632second

(3PSC:三相短路故障)

率、發電機角度、系統頻率；其中各個觀測點如下：括弧內為各發電機組、匯流排編號。

發電機角度：核一(11)、核二(21)、中火(531)、明潭(701)、核三(1001)、興達(1081)

系統頻率：核二(30)、核三(1000)、中寮(2480)

區域間傳送功率：龍崎南(2660)→中寮南(2490)、龍崎南(2660)→嘉民(2500)、龍崎北(2650)→嘉民(2500,1) 龍崎北(2650)→嘉民(2500,2)四迴路功率總和。

由圖 7(a)可看出，當 0 秒發生第一次故障時，在 3 cycle 之後，姆歐型測距電驛動作；36 cycle 之後，時間為 0.65 秒，姆歐型測距電驛復歸失敗故障無清除，因而姆歐型測距電驛動作，隔離故障；接著到 1.632 秒第二次故障發生，此線路上的姆歐型測距電驛在 36 cycle 之後，此時時間為 2.282 秒，姆歐型測距電驛復歸失敗故障亦無清除，因而姆歐型測距電驛動作，隔離故障，而導致其他過電流電驛接連跳脫，因而造成系統崩潰，南北解聯。

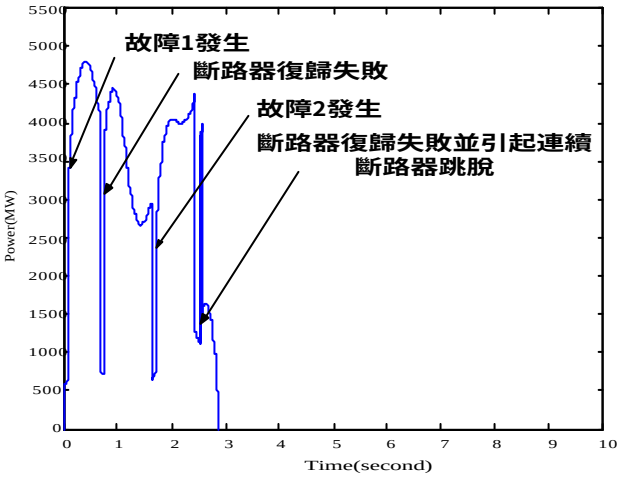

圖7(a) 區域間轉移功率

圖7(b)為各個主要發電機角度，由圖可看出，當發生連續故障後，由於南部機組發電量無法正常藉由345KV輸電線傳送至北部，造成南部機組轉子加速；北部機組由於無足夠電量供給本身負載，使得轉子急速減速，因而角度愈小。

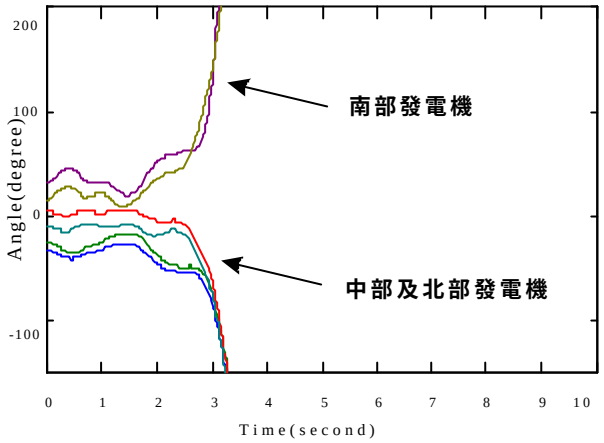

圖7(b) 發電機角度

圖 7(c)為主要匯流排上頻率，由於台電系統額定頻率為 60Hz，發電機組可以允許連續運轉的最低頻率為 59.5Hz。核能機組運轉最低頻率限制為 58.2Hz。因此，台電系統最低運轉頻率為 58.2Hz；由此可知，在圖中北部發電機在第二次故障發生後，已相繼跳機；因而造成南北頻率分別解聯。

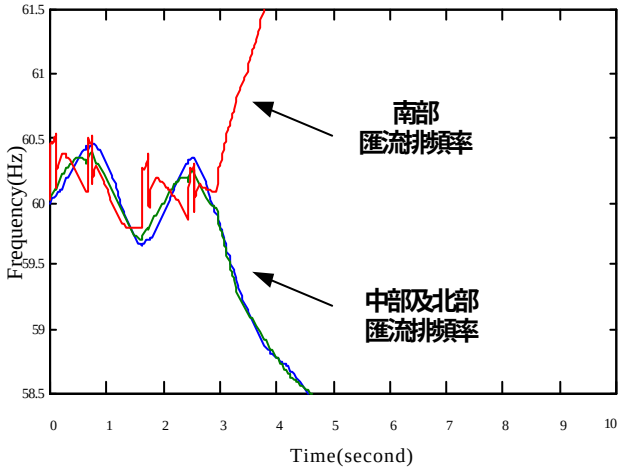

圖7(c) 系統頻率

接下來加入保護系統策略保護之後，且利用 REAC 方法讓整個系統自動執行改善措施，執行南部發電機跳機並配合北部負載卻載，以使得整個電力系統達到暫態穩定，如圖 8(a)、(b)、(c)所示，分別為圖 7(a)、(b)、(c)改善之後的區域間功率，發電機角度以及系統頻率圖，經由計算可得全部卻載量為 1332MW；換句話說，我們將原本故障線路龍崎南(2660) →嘉民(2500)以及龍崎南(2660)→中寮南(2490)兩迴路上的傳輸電量轉移到另兩輸電線龍崎南(2650)→嘉民(2500,1)，龍崎南(2650)→嘉民(2500,2)的量為 2134MW，此值也就是 Tie-Line 上的量。

圖 8(b)為執行保護策略後，可看出其發電機角度已明顯的拉回，而趨於穩定。圖 8 (c)中，系統頻率在經卻載後，頻率仍可保持在 59.5Hz 以上，甚至可回升至額定頻率 60Hz 狀態。

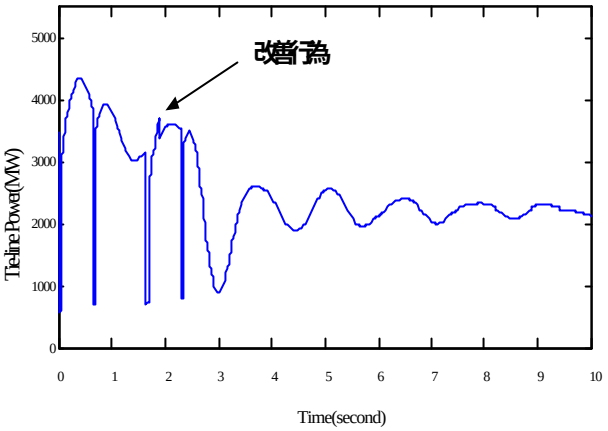

圖8(a) 區域間轉移功率

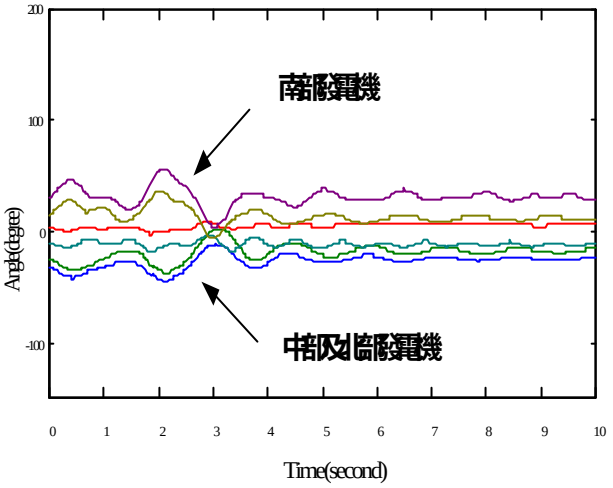

圖8(b) 發電機角度

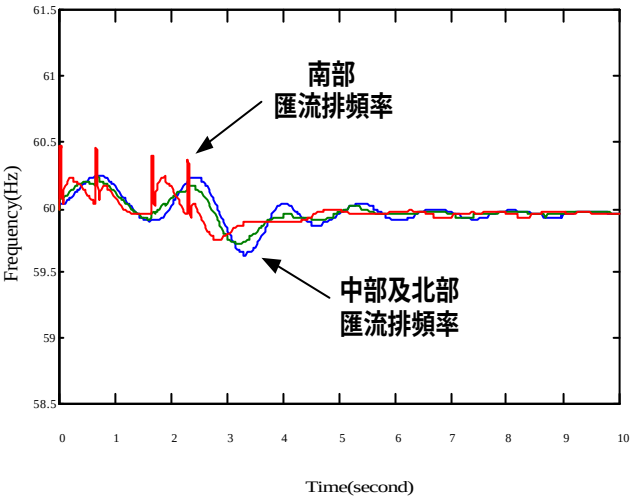

圖8(c)系統頻率

CASE3：經由防衛策略做有效控制之後，區域間轉移功率、發電機角度、系統頻率如圖9(a)、(b)、(c)所示。在 CASE3中，雖然在中寮南到天輪以及中寮南到龍潭北接

連故障，但系統本身將可自己趨於穩定，防衛策略並無做任何負載卸載，原本故障線路所傳送的量可順利轉移另兩線路，分別為中寮北→峨嵋以及中寮南→峨嵋兩迴路，其Tie-Line總量為4090MW。

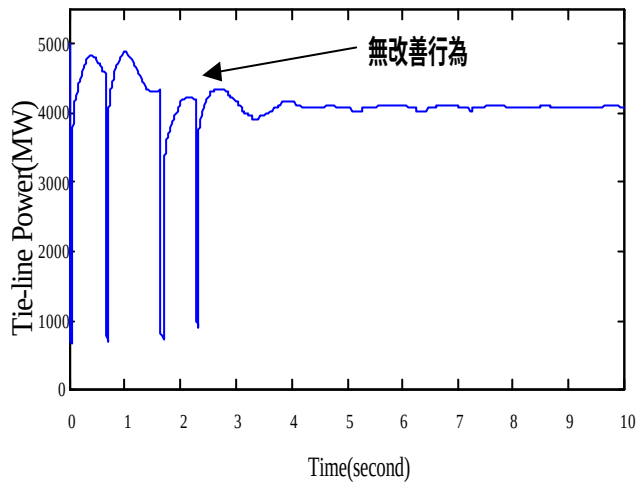

圖9(a) 區域間轉移功率

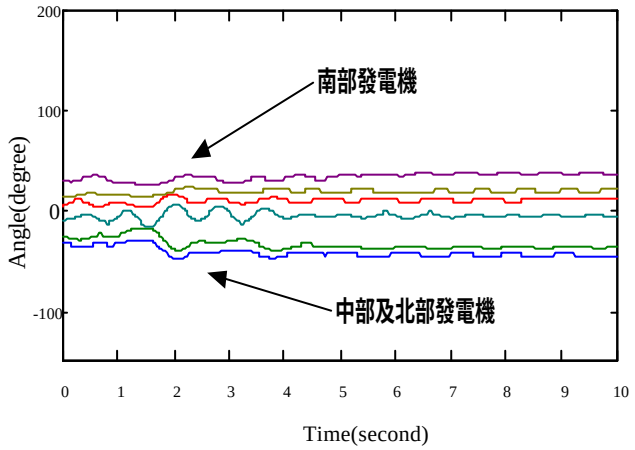

圖 9(b) 發電機角度

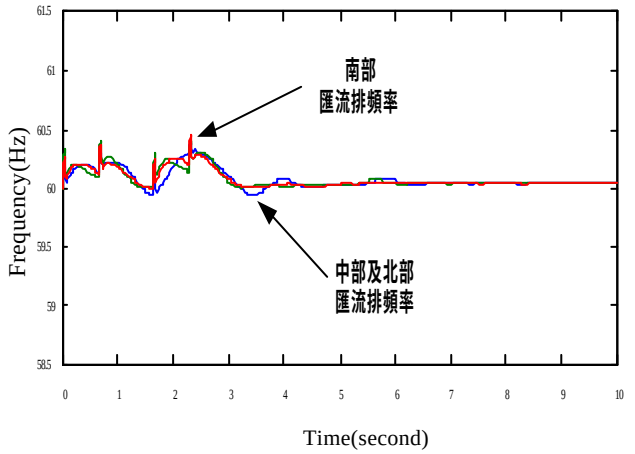

圖 9(c) 系統頻率

表6 模擬結果總表

狀態	電力防衛系統策略	Case1	Case2	Case3	Case4
尖峰負載	無高壓動作	不穩定	不穩定	穩定	不穩定
	REAC	1332MW	2550MW	0MW	2500MW
狀態	電力防衛系統策略	Case5	Case6	Csae7	Case8
離峰負載	無高壓動作	不穩定	不穩定	穩定	穩定
	REAC	1350MW	2271MW	0MW	0MW

五. 計畫成果自評

本計畫提出一電力系統防衛策略，主要在防止超高壓輸電線路因發生短路故障進而引起一連串電驛跳脫的事故，以避免整個電力系統的崩潰，以防止大規模停電事件發生。本研究自評如下：

1. 本研究之執行成果符合計畫目標。
2. 本研究之成果發表於2000 IEEE PES會議。

六. 參考文獻

[1] O. Faucon and L. Dousset. “Coordinated Defense Plan Protects Against Transient Instabilities.” IEEE Computer Applications in Power, July 1997, pp.22-26.

[2] K. Matsuzawa, K. Yanagihashi, J. Tsukita, M. Sato, T. Nakamura and A. Takeuchi, “Stabilizing Control System Preventing Loss of Synchronism from Extension and It’ s Actual Operating Experience”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 3, August 1996.

[3] H. Ota, Y. Kitayama, H. Ito, N. Fukushima, K. Omata, K. Morita and Y. Kokai. “Development of Transient Stability Control System(TSC System)Based on On-Line Stability Calculation.” IEEE Transactions on Power System, Vol. 11, No. 3, August 1996.

[4] P. Cholley, P. Crossley and V. V. Acker. “System Protection Schemes in Power Networks.” CIGRE SCTF 38.02.19-Summary for Electra, July 2000.
12, No. 1, January 1997.