

相平衡電流電驛設定之檢討

—以 CM 型電驛為例

清華大學 吳宜宗、陳士麟

一、前言

國內某電廠(以下稱為 A 電廠)曾於民國 85 年發生因廠外 345kV 輸電線路多次閃絡故障，造成冷卻水泵馬達的相平衡電流電驛動作，致使冷卻水泵馬達跳脫，進而引發發電機跳脫解聯的事故。事故發生後，該電廠即更改冷卻水泵馬達相平衡電流電驛的標置設定，將電驛標置值(TAP 值)由 1A 更改為 2A。

更改電驛設定後，電驛的動作條件及動作時間均作改變。民國 90 年 3 月該電廠再度發生廠外 345kV 輸電線跳脫事故，廠外兩回路輸電線遂分別以一回線供電。本文主要目的在於：

- 分析相平衡電流電驛的標置設定更改後，對於因廠外 345kV 輸電線故障所造成的不平衡故障電流所導致的冷卻水泵馬達之跳脫，是否得以改善。
- 對於 90 年 3 月的廠外線路跳脫事故期間之負序電流，評估電驛設定是否仍保有足夠的裕度。
- 根據電壓不平衡的國際管制規範，分析當廠內高壓(13.8kV)匯流排存有 2% 的電壓不平衡時，相平衡電流電驛是否能有效偵測因電壓不平衡所產生的不平衡電流，進而正確跳脫冷卻水泵馬達。

二、相平衡電流電驛特性

冷卻水泵馬達所使用的相平衡電流電驛為 CM 型電驛，此類電驛主要應用於當電力設備的三相電流存有長達數秒(圖 3)且超過電驛設定的不平衡率時，可提供電力設備對相電流不平衡的保護作用。

CM 型電驛包含有兩個機械性獨立的感應盤元件。通常 A 相和 B 相電流用來激勵上部感應盤的電磁元件，B 相和 C 相電流用來激勵下部感應盤的電磁元件。以圖 1 的電驛動作原理示意圖為例，A 相電流流經電磁元件時，會在上部的感應盤元件產生一個逆時針方向的轉矩，B 相電流則產生一個順時針方向的轉矩。同理 C 相及

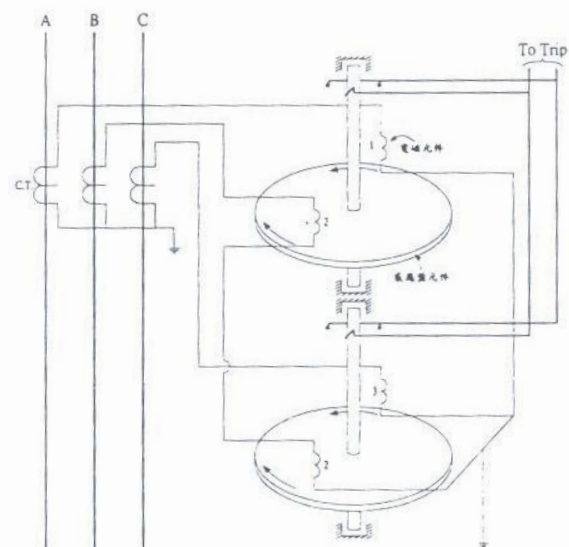


圖 1 · 相平衡電流電驛動作原理圖

B相電流亦在下部的感應盤元件產生方向相反的轉矩。所以在三相電流為平衡的時候，各感應盤的電磁元件所產生的力矩大小相等，但方向相反(順時針及逆時針)，所以感應盤並不會轉動。

CM型電驛的接點分為靜止接點和活動接點，上下兩個感應盤的接點是電氣共接且並聯在一起的，所以任一接點閉合即可完成跳脫電路，進而動作電驛，使被保護的電力設備能順利跳脫。

附有標置設定的CM型電驛，其最大持續熱功率額定電流為7A。標置設定分別有1A、2A、3A三種不同的標置用來設定最小起動電流。至於最小起動電流的定義為在其他電磁元件沒有激磁的情況下，每一個電磁元件的最小起動電流。

CM型電驛動作區間如圖2；圖2的橫軸為B相比流器二次側電流對最小起動電流的比值，縱軸為A相或C相比流器二次側電流對最小起動電流的比值。電驛動作時間曲線如圖3。

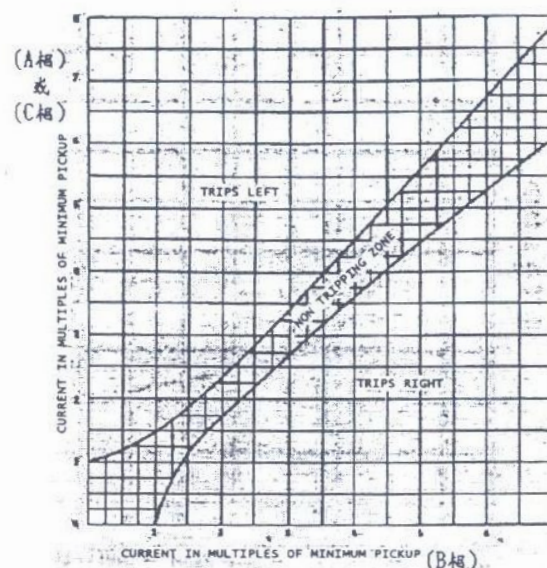
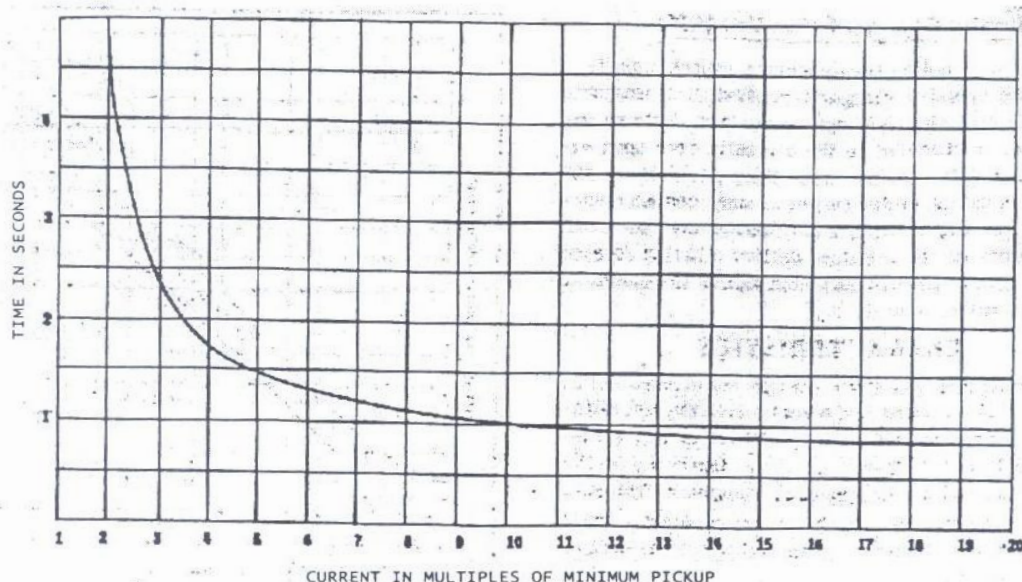


圖2·相平衡電流相平衡電流電驛動作區間

圖2的相平衡電流電驛的動作區間座標為最小起動電流之倍數，最小起動電流值即為標置值(即TAP值)。所以將最小起動電流之倍數乘以標置值才是比流器二次側的電流，冷卻水泵馬達所使用的比流器比值為400/5，即為80倍。



註：圖中的動作時間是指在沒有限制的情況下，亦即在二相電流中有一相電流為0安培的狀況下所測量的動作時間

圖3·相平衡電流相平衡電流電驛動作時間曲線

以冷卻水泵馬達的額定電流 270A 計算。在標置設定為 1A(TAP=1A)時，假設 B 相電流為 270A，換算到比流器二次側為 3.375A，亦為最小起動電流的 3.375 倍。比對圖 2 可知：另一相電流可在最小起動電流的 3.1~3.85 倍之間擺動(此即非跳脫區, non-trip zone, 的範圍)。於是在標置值為 1A 的狀況下，動作相平衡電流電驛的最小一次側不平衡電流為 60A，其中 $60A = (3.85 - 3.1) \times 1A \times 80$ 。

在標置值為 2A(TAP=2A)時，假設 B 相電流為 270A，換算到比流器二次側為 3.375A，亦為最小起動電流的 1.6875 倍。比對圖 2 可知：另一相電流可在最小起動電流的 1.42~2.02 倍之間擺動。於是在標置值為 2A 的狀況下，動作相平衡電流電驛的最小一次側不平衡電流為 96A，其中 $96A = (2.02 - 1.42) \times 2A \times 80$ 。

三、考量 90 年 3 月廠外兩回路各一回線供電期間冷卻水泵馬達的負序電流，檢討相平衡電流電驛設定

茲根據 90 年 3 月廠外兩回線跳脫期間的三個不同時段之冷卻水泵馬達負序電流，再由模擬結果當中，選擇負序電流最嚴重的情況，探討相平衡電流電驛設定的裕度。觀察表 1~ 3 可知：流入冷卻水泵馬達的負序電流分別為 7.62A、6.85A 及 8.28A。故選取 RCP 馬達的負序電流為 8.28A 進行模擬。假定冷卻水泵馬達的正序電流等於額定電流，即 $I_1 = 270A$ 。在不考慮零序電流的前提下，此時冷卻水泵馬達的三相電流會隨著正、負序電流彼此的相角差不同而改變。為考慮各種可能的三相電流情況，分別對不同的正、負序電流

相角差計算其對應的三相電流。以得到的三相電流繪於相平衡電流負相序電驛動作區間圖上，如圖 4。由圖 4 可知：此時的三相不平衡電流離跳脫區至少有 25A 以上的裕度。

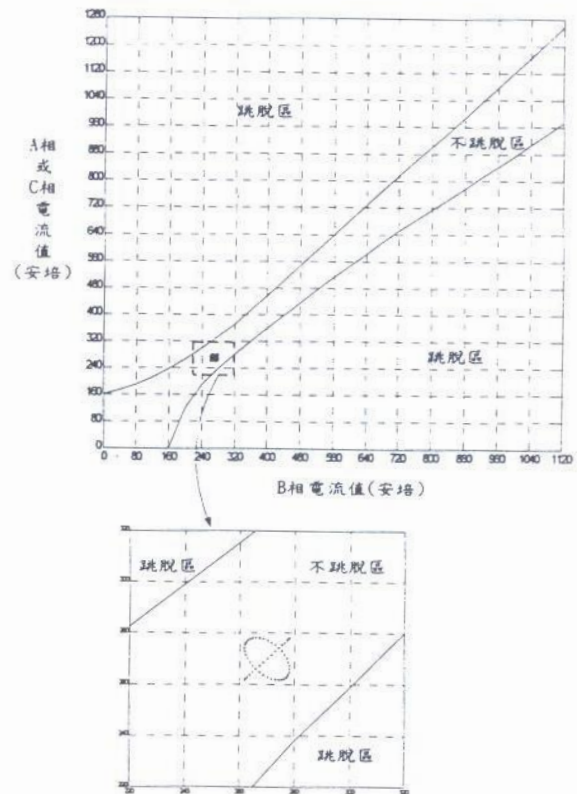


圖 4·當冷卻水泵馬達的負序電流為 8.28A 時，不平衡電流在電驛動作區間的相關位置圖

—相平衡電流電驛標置為 2A (TAP=2A) 的情況

表 1·時段一的 A 電廠之負載狀況及不平衡模擬結果

匯流排	使用負載	I_R (A)	I_2 (A)	I_2/I_R (%)
13.8kV BUS1	循環水泵馬達	112	2.96	2.64
13.8kV BUS2	循環水泵馬達	112	2.96	2.64
	冷卻水泵馬達	270	7.62	2.82

註：表 1~表 3 的 I_R 為額定電流值 I_2 為負序電流值

表 2· 時段二的 A 電廠之負載狀況及不平衡模擬結果

匯流排	使用負載	I_R (A)	I_2 (A)	I_2/I_R (%)
13.8kV BUS1	凝結水泵馬達	122	3.14	2.57
	循環水泵馬達	112	2.63	2.35
13.8kV BUS2	循環水泵馬達	112	2.63	2.35
	冷卻水泵馬達	270	6.85	2.54

表 3· 時段三的 A 電廠之負載狀況及不平衡模擬結果

匯流排	使用負載	I_R (A)	I_2 (A)	I_2/I_R (%)
13.8kV BUS1	冷卻水泵馬達	270	8.28	3.07
13.8kV BUS2	循環水泵馬達	112	3.2	2.86

四、考量廠外輸電線閃絡故障，檢討相平衡電流電驛設定

該電廠將冷卻水泵馬達的相平衡電流電驛設定之所以由 TAP=1A 改為 TAP=2A，主要是為避免廠外輸電線路在鹽霧害嚴重時，因短時間多次閃絡故障而造成的故障電流導致相平衡電流電驛跳脫。基此原因，本節探討相平衡電流電驛標置更改後，對於上述故障跳脫的改善情形。

由於輸電線路因閃絡所造成的故障電流大小會隨著故障點和電弧電阻的不同而改變，且輸電線不同相別的接地故障亦會使冷卻水泵馬達所提供的故障電流有所不同。故本文並不針對各種可能的閃絡故障逐一模擬其故障電流，而是以一個固定的故障電流值，並以此故障電流對不同的相平衡電流電驛設定作一個定性的探討。

假設廠外四條 345kV 輸電線均在正常送電中，其中一回線突然發生閃絡造成 B 相接地故障三週波。利用 ASPEN 故障分析軟體模擬結果得到此時該廠 345kV 匯流排的三相電壓分別為(kV)：

$$A \text{相電壓} = 211.5 \angle 19^\circ$$

$$B \text{相電壓} = 42.63 \angle -147^\circ$$

$$C \text{相電壓} = 218.5 \angle 126^\circ$$

在此事故情況下，冷卻水泵馬達所提供的故障電流分別為(A)：

$$A \text{相電流} = 271.9 \angle -4^\circ$$

$$B \text{相電流} = 531.33 \angle -161^\circ$$

$$C \text{相電流} = 301.23 \angle 39^\circ$$

以下取上述三相故障電流中的 A、B 相故障電流來探討。

將 A、B 相故障電流分別繪於標置為 1A(TAP=1A)及標置為 2A (TAP=2A)的相平衡電流電驛動作區間，結果如圖 5。將故障電流座標點距離動作區間的距離分別設定為 D1 及 D2，由圖 5 可知：

D1 的距離大於 D2 的距離。換言之，相同的故障電流在標置為 1A 的動作時間會小於標置為 2A 的動作時間。

由上可知，相平衡電流電驛的標置設定由 1A 更改為 2A 之後，雖然動作電驛的最小不平衡電流提高。然而從故障電流來看，皆仍可進入此二不同標置值的跳脫區，亦即均仍可能使電驛動作而跳脫馬達。所以更改標置值的主要效果在於延長電驛的動作時間。當故障電流相同時，標置值為 2A 的動作時間要比標置值為 1A 的動作時間來得長。在標置值為 2A 的情形下，相平衡電流電驛遂可以容忍較多次的輸電線閃絡故障。所以將相平衡電流電驛的標置設定由 1A 更改為 2A 的確對避免因輸電線閃絡故障而造成冷卻水泵馬達誤跳脫有一定程度的改善效果。

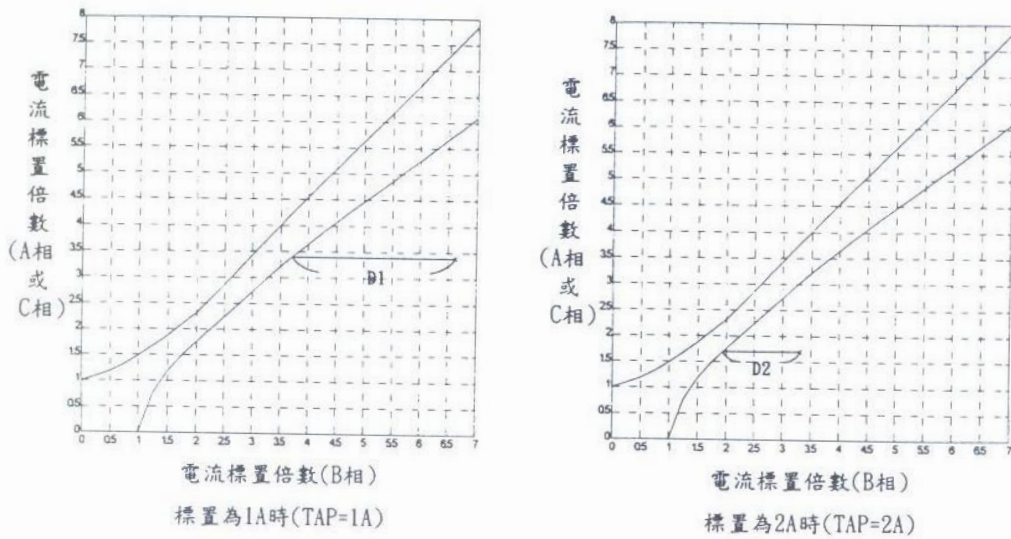


圖 5 · 相同故障電流於不同標置設定下的相對位置圖

五、根據電動機之電壓不平衡率國際標準檢討相平衡電流電驛設定

有關電動機在額定連續運轉下的電壓不平衡率，國際標準一般都設定在 2%。換言之，當 13.8kV 匯流排(冷卻水泵馬達所連接的匯流排)的電壓不平衡率達到 2% 以上時，冷卻水泵馬達的相平衡電流電驛應能偵測此時冷卻水泵馬達所產生的不平衡電流，跳脫冷卻水泵馬達以達到保護的目的。本節針對相平衡電流電驛標置設定值，檢討相平衡電流電驛的保護功能。

假設該廠的冷卻水泵馬達處於額定運轉狀況下，廠內 13.8kV 匯流排端存在 2% 的電壓不平衡率，經由模擬得知冷卻水泵馬達的負序電流和負序電壓的比值約為 6.7 倍。故可求得此時冷卻水泵馬達所產生的負序電流約為

$$I_2 = 270 \times 0.02 \times 6.7 = 36.2A$$

其中 270A 為冷卻水泵馬達的額定電流值

0.02 乘以 6.7 為電流不平衡率

在此假定冷卻水泵馬達的正序電流仍等於額定電流，即 $I_1 = 270A$ 。

由於 IEEE 的電流不平衡率標準僅考慮負序電流和正序電流的比值，所以在推導過程中不考慮零序電流的影響。

由於即使正序電流和負序電流的大小維持不變，若彼此的相角差改變，亦會造成不同的三相電流。所以為考慮各種可能的三相電流情況，本文分別對不同的正負序電流相角差，計算其對應的三相電流，如表 4。

將表 4 的三相電流分別繪於相平衡電流電驛動作區間圖，得到圖 6 和圖 7。其中圖 6 是依照電驛標置設定為 1A (TAP=1A)所繪者；圖 7 是依照電驛標置設定為 2A (TAP=2A)所繪者。

觀察圖 6：不論正負序電流的角度差為何，在電驛標置設定為 1A (TAP=1A)的情況下，三相不平衡電流均至少有一相的電流會進入電驛跳脫區。意即當 13.8kV 匯流排有 2% 的不平衡電壓存在時，冷卻水泵馬達的相平衡電流電驛可以偵測此一不平衡，進而跳脫冷卻水泵馬達，達到保護

冷卻水泵馬達的作用。

表 4 不同正負序電流角度差所對應之三相電流

正負序電流角度差	A相電流 (A)	B相電流 (A)	C相電流 (A)
0°	306.2	253.9	253.9
10°	305.7	259.9	248.3
20°	304.2	266.1	243.4
30°	301.9	272.4	239.4
40°	298.6	278.6	236.3
50°	294.6	284.4	234.5
60°	289.8	289.8	233.8
70°	284.4	294.6	234.5
80°	278.6	298.6	236.3
90°	272.4	301.9	239.4
100°	266.1	304.2	243.4
110°	259.9	305.7	248.3
120°	253.9	306.2	253.9
130°	248.3	305.7	259.9
140°	243.4	304.2	266.1
150°	239.4	301.9	272.4
160°	236.3	298.6	278.6
170°	234.5	294.6	284.4
180°	233.8	289.8	289.8
190°	234.5	284.4	294.6
200°	236.3	278.6	298.6
210°	239.4	272.4	301.9
220°	243.4	266.1	304.2
230°	248.3	259.9	305.7
240°	253.9	253.9	306.2
250°	259.9	248.3	305.7
260°	266.1	243.4	304.2
270°	272.4	239.4	301.9
280°	278.6	236.3	298.6
290°	284.4	234.5	294.6
300°	289.8	233.8	289.8
310°	294.5	234.5	284.4
320°	298.6	236.3	278.6
330°	301.9	239.4	272.4
340°	304.2	243.4	266.1
350°	305.7	248.3	259.9

註： $I_1 = 270A$ 、 $I_2 = 36.2A$

角度差 10° $I_1 = 270 \angle 0^\circ A$ $I_2 = 36.2 \angle 10^\circ A$
，餘類推。

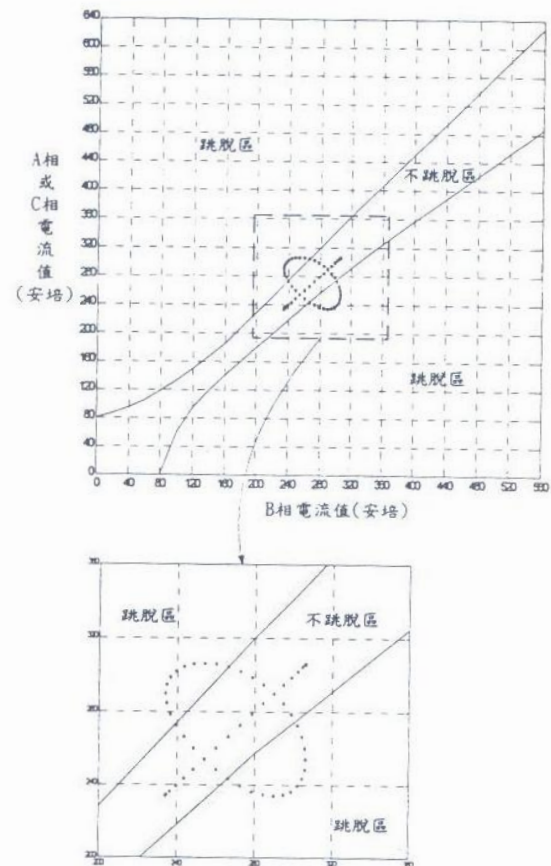


圖 6 · 當冷卻水泵馬達的不平衡電壓為 2% 時，不平衡電流在電驛動作區間的相關位置圖

一相平衡電流電驛標置為 1A (TAP=1A) 的情況

在同樣的電壓不平衡狀況下，由圖 7 可知：雖然在電驛標置設定為 2A (TAP=2A) 時，部份的三相不平衡電流仍有一相電流會進入跳脫區。但在正負序電流相差 $-10^\circ \sim 40^\circ$ 、 $200^\circ \sim 250^\circ$ 及 $290^\circ \sim 310^\circ$ 三種情形下，三相電流均落在非跳脫區 (Non-Trip Zone)，致使電驛不動作。換言之，有必要檢討電驛標置設定是否存在保護盲點。

對相平衡電流電驛的設定作進一步分析，得知：

在標置設定為 2A (TAP=2A) 時，13.8kV 匯流排上的電壓不平衡率要到 3%

以上，冷卻水泵馬達相平衡電流電驛才能確保偵測到所產生的不平衡電流，如圖 8。

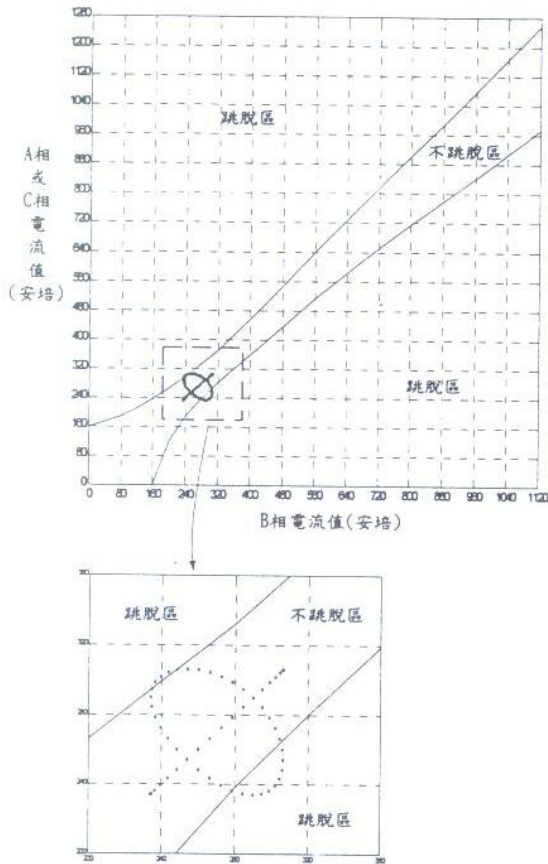


圖 7 · 當冷卻水泵馬達的不平衡電壓為 2% 時，不平衡電流在電驛動作區間的相關位置圖

一相平衡電流電驛標置為 2A (TAP=2A) 的情況

六、結論

由上述的模擬可知，A 電廠在 90 年 3 月廠外四回線跳脫二回線的期間，流經冷卻水泵馬達的負序電流所對應的三相不平衡電流，距離相平衡電流電驛的跳脫區至少還有 25A(相對於實際電流值)以上的裕度。且冷卻水泵馬達的相平衡電流電驛在新的標置設定(TAP 值由 1A 改為 2A)後，對於因輸電線路閃絡頻繁而造成冷卻水泵馬達跳脫的確有相當程度的改善。據此，

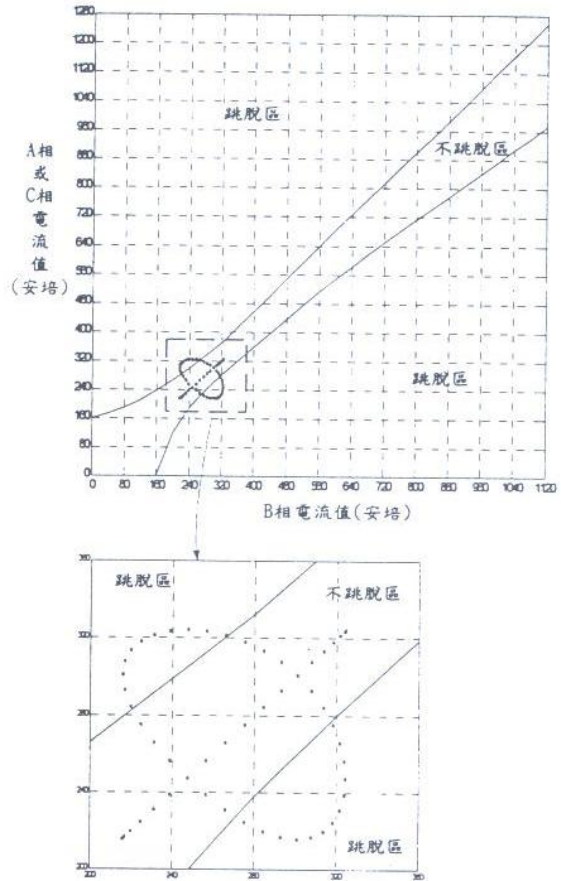


圖 8 · 當冷卻水泵馬達的不平衡電壓為 3% 時，不平衡電流在電驛動作區間的相關位置圖

一相平衡電流電驛標置為 2A (TAP=2A) 的情況

在 A 電廠 90 年 3 月廠外四回線跳脫二回線的期間中，冷卻水泵馬達的相平衡電流電驛未曾動作，應屬合理。

進一步分析得知：更改後的標置設定(即 TAP=2A)，對於 2%~3% 負序電壓所產生的不平衡電流，電驛可能無法偵測此不平衡電流、跳脫冷卻水泵馬達。至於 2%~3% 負序電壓對冷卻水泵馬達的影響，根據國際常用的不平衡管制標準，這樣程度的不平衡電壓可能會造成冷卻水泵馬達線圈溫度過熱。

此時冷卻水泵馬達便須有進一層的保護，避免當 13.8kV 匯流排存在 2%~3% 負

序電壓時，相平衡電流電驛可能無法跳脫的情形。依目前 A 電廠內冷卻水泵馬達的保護設計，僅能依賴冷卻水泵馬達的線圈溫度監測裝置。此監測裝置的監測訊號是送到控制室中，所以當線圈溫度監測裝置發出警報(Alarm)時，控制人員可由儀表上察知冷卻水泵馬達的線圈溫度，據此溫度決定是否手動解聯冷卻水泵馬達。

七、參考文獻

1. ABB Power T&D Company, "Buyer's Guide 96/97 : Protection, Monitoring and Control", Vol. 4, 1996.
2. 李宏任，實用保護電驛(修訂版)，台北市，全華科技圖書公司，民國 89 年 4 月



富貴連年