

線性規劃法應用於輸電系統中 過電流保護電驛之保護協調

國立台灣科技大學電機系 奉志承、陳順斌、朱文賢

一、前言

當電力系統發生故障時，其電壓、電流必定會產生極大變化，尤其是故障點距離電源愈近，則產生之故障電流就愈大；反之，故障點若離電源愈遠，則因線路阻抗的關係，所產生的故障電流則相對較小。過電流電驛即利用此特性來達到輸、配電線路的保護目的。以機電式電驛為例，當流入電驛的電流大於電驛的設定值時，其產生之轉矩便大於游絲的抑制力而使得圓盤轉動，連帶使得圓盤上的可動接點向前移動，直到可動接點與固定接點閉合，完成整個跳脫迴路，動作斷路器並隔離故障為止。

一般輻射式網路因其無背後電源(Back Source)，在故障發生時，下游非故障線路並無故障電流產生，故僅需使用非方向性過電流電驛(價格較低)即可達到保護要求，但若為提高供電可靠度而採環路式供電，在故障發生時非故障線路亦會提供故障電流，故必需使用方向性過電流電驛，以避免電驛誤動作。

當故障發生時，可能會有一個以上的保護電驛同時偵測到故障而相繼啟動，保護上必需使最接近故障點的電驛快速動作，以隔離故障，而其它相關電驛則具有較長之動作時間，以避免快速動作而造成停電區域的擴大。在此我們稱最接近故障

點之保護電驛為主保護電驛(Main protection relay)，而其他相關電驛為後衛保護電驛(Back-up protection relay)。主保護電驛應優先於後衛保護電驛動作，但兩者之動作時間究竟應相差多少才適當？相差太短，則可能後衛電驛會發生誤動作，而相差太長，則又可能使設備、人員受到的損害增加。因此，一般過電流電驛的動作協調時間(Coordination Time Interval；CTI)，必須考慮到如比流器的誤差、斷路器跳脫時間、轉盤之慣性衝程、安全餘裕...等(若是數位式電驛則可不考慮轉盤之慣性衝程)，這些因素加起來大約在 0.3~0.5 秒之間(ANSI 建議 CTI 為 0.2~0.5 秒)，一般均採 0.3 秒。

因此後衛保護電驛動作時間至少需為主保護電驛動作時間再加上協調時間(以下均以 0.3 秒為例)，亦即

$$T_{nf} \geq T_{mc} + 0.3$$

其中

T_{nf} : 後衛保護電驛 n 之動作時間

T_{mc} : 後衛保護電驛 n 之主保護電驛 m 的動作時間

輸電系統為增加其供電可靠度，一般多為環形線路架構，亦即迴路中可能尚有迴路，此環環相扣的關係，雖可提供不同路徑供、受電，以減少停電機會，但卻增加了保護協調規劃上的困難，若再考量下層輻射型饋線的保護協調，實屬不易，尤

以人工規劃時，勢必會事倍功半而可能達不到保護協調之要求。

本文首先將應用圖形理論中增廣關聯矩陣的觀念，來求取系統中所有過電流保護電驛主保護/後衛保護電驛對的關係，加上各保護電驛的動作特性，即可建立出線性規劃法中的限制條件，再配合所建立的目標函數，將可準確快速地算出各保護電驛的設定值。

當系統轉供、增減負載、供電線路架構更動或新的電源系統加入時，使用線性規劃及圖形理論，在計算保護協調最佳設定值時，除可解決人工不易取得協調參數的問題外，亦可達到符合時效性、經濟性以及準確性的需求。

有關保護電驛的動作特性，若為機電式電驛，其說明書均附有動作時間—始動電流倍數(Multiples of Tap)及時間標置(Time Dial)之動作特性曲線，為利於程式分析計算，可運用最小平方誤差法予以數位化，儲存曲線參數於資料庫之中，若為數位式電驛，則直接應用其所提供之 ANSI 或 IEC 動作特性公式即可。

二、電力系統主保護/後衛保護電驛對之建立

主保護/後衛保護電驛對之決定，為做好保護協調的首要工作之一，在一個多重環形迴路架勢下，欲藉由人工方法之判斷，取得所有主保護/後衛保護電驛對，過程較為繁複且容易發生錯誤。經研究發現以圖形理論中的起始點法或增廣關聯矩陣法之觀念，可經由程式設計，求得系統中所有主保護/後衛保護電驛對，並將其列為線性規劃法中的限制條件之一，便可進一步求出各保護電驛的最佳設定值，本文將僅就增廣關聯矩陣法做一探討。

以圖 1 含 T Tap 之環路式輸電網路系統為例，為了配合圖形理論之應用，必須將其中之 T 形連接處，假設一個虛擬匯流排 F 及虛擬電驛 7、10、14，如圖 2 所示。接著再建立此系統之增廣關聯矩陣[A]，矩陣中電驛 7、10、14 為虛擬電驛(亦即實際上並不存在)。

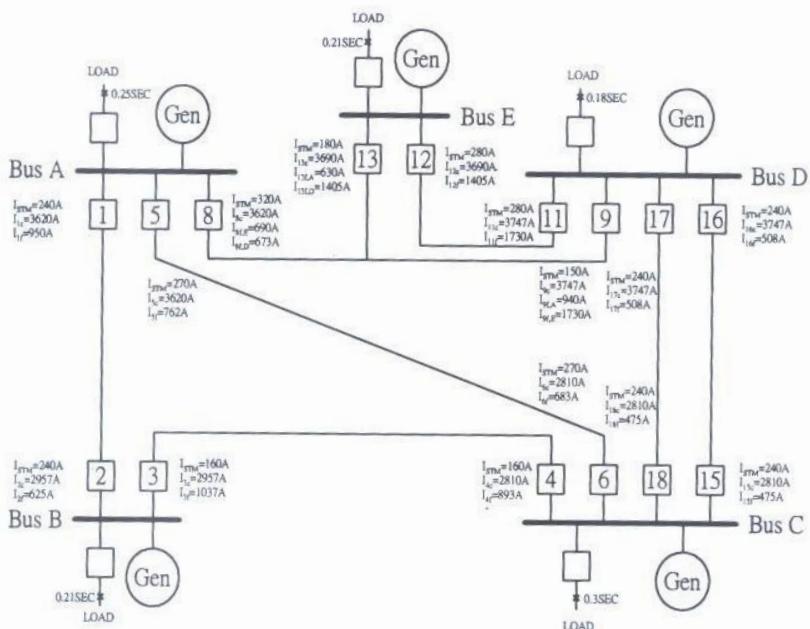


圖 1・含 T 型輸電線之系統單線圖

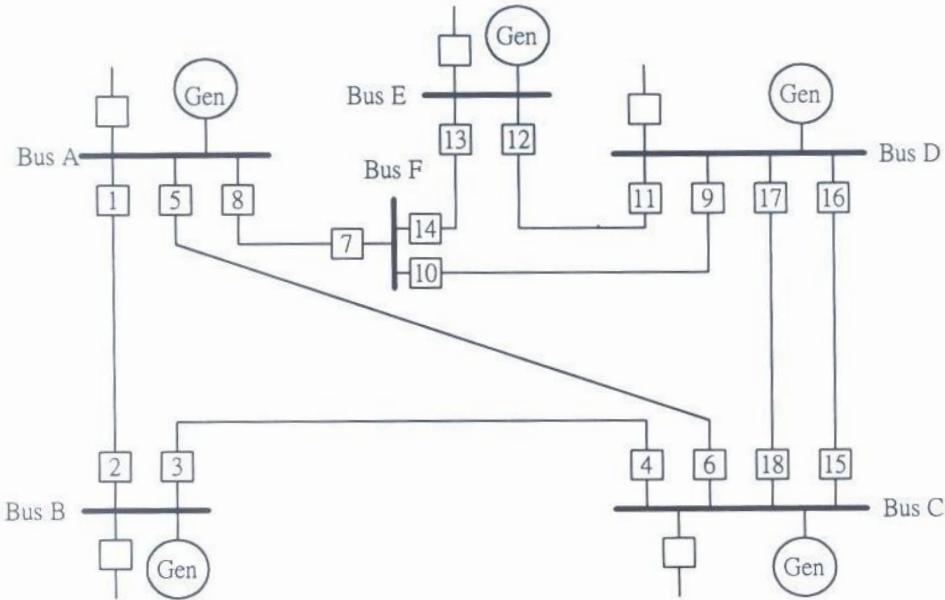


圖 2・含 T 型輸電線等效成虛擬匯流排之系統單線圖

$$[A] = [[A_l]] - [A_l] =$$

$$\begin{array}{cccccccccccccccc}
 & 1 & 7 & 11 & 15 & 3 & 5 & 17 & 9 & 13 & 2 & 8 & 12 & 16 & 4 & 6 & 18 & 10 & 14 \\
 \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{matrix} & \left[\begin{array}{rr|rrrrrrrrrrrrrrrr}
 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

其中

矩陣中為”1”的元素：表該電驛之保護方向為電流流出該匯流排

矩陣中為”-1”的元素：表該電驛之保護方向為電流流入該匯流排

矩陣中為”0”的元素：表該電驛與該匯流排沒有連接

現以匯流排 A 為例，第一列匯流排 A 電驛保護方向為電流流出該匯流排的有 1、5、8(元素為 1)，而電驛保護方向為電流流入該匯流排的有 2、6、7(元素為 -1)，其餘電驛因與匯流排 A 沒有連接，故元素

為 0。

藉由增廣關聯矩陣，決定所有主保護/後衛保護電驛對之流程，如圖 3 所示，其所求出之結果，如表 1 所示。

三、線性規劃法

線性規劃的應用係利用數學方法，以現有的資源做為限制條件，去達成欲完成的目標，求出最佳決策。其性質為建立目標函數及設定限制條件，讓欲達成最大或最小的目標函數所求得的最佳值，均在其所設定的限制範圍內。

表 1・增廣關聯矩陣法建立之主保護/後衛保護電驛對

後衛保護 電驛	主保護 電驛	後衛保護 電驛	主保護 電驛
1	3	13	11、17
11	13	2	5、8
15	9、11、17	8	11、12、16、17
3	6、15、18	12	9、16、17
5	4、15、18	16	4、6、18
17	4、6、15	4	2
9	1、5、12	6	1、8
13	1、5、16	18	9、11、16

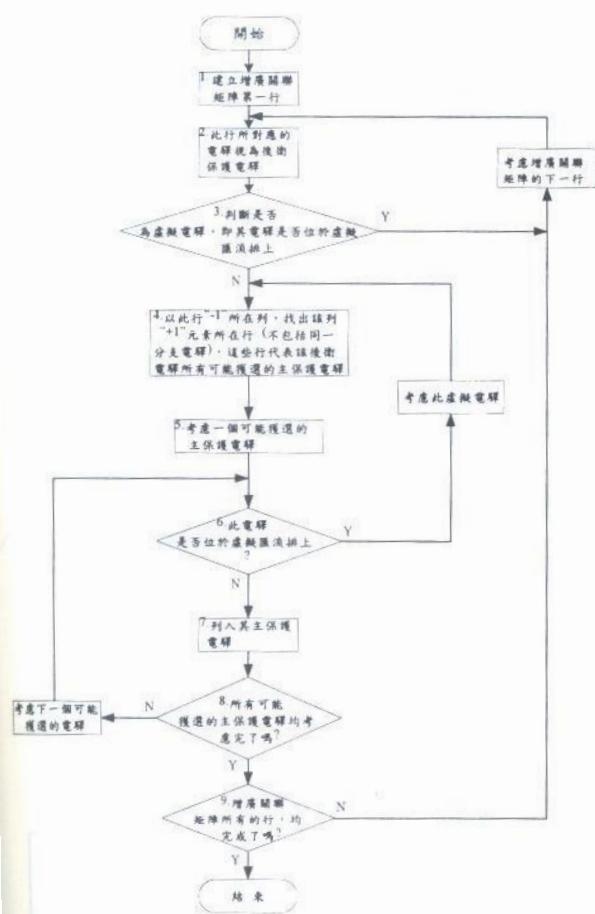


圖 3・利用增廣關聯矩陣法建立主保護/後衛保護電驛對流程圖

在規劃保護協調最佳設定值時，將限制條件定為環型輸電系統中所有主保護及後衛保護電驛間的跳脫時間，必須大於協調時間的關係及一般過電流電驛可供選擇之時間標置為 0.5~11；而目標函數則為線

路上所有主保護電驛的跳脫時間總和為最小，以求出符合這些限制條件的電驛時間標置值。

(1) 目標函數之建立

求取目標之最大或最小值，在線性規劃法中稱之為目標函數。其一般通式如下式所示：

$$\text{Max. or Min. } f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

其中

x ：變數

c ：已知係數

上式中 $f(x)$ 若是為謀取獲利，則目標函數設為最大；但在做保護協調設定規劃時，則希望事故時主保護電驛能儘快動作，故動作時間設為最小。

(2) 限制條件之建立

限制條件之通式為求取目標函數最佳值之限制，一般通式如下式所示：

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \geq b_2$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$a_{f1}x_1 + a_{f2}x_2 + \dots + a_{fn}x_n \geq b_f$$

$$a_{f+1,1}x_1 + a_{f+1,2}x_2 + \dots + a_{f+1,n}x_n \leq b_{f+1}$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

其中

$$a_{ij} : i=1 \dots m, j=1 \dots n$$

$$b_i : i=1 \dots m$$

$$x_j : j=1 \dots n$$

四、應用實例

圖 1 為含 T 型輸電線之環型輸電系統，其相關電流資料標示於輸電線路之相關位置(其中 I_{STM} 為線路之短時間最大負載電流； I_{nc} 為電驛 n 近點故障時之最大故

障電流； I_{nf} 為電驛 n 遠端匯流排故障時之最小故障電流)。各匯流排亦接有輻射型饋線，其隔離下游故障之最長動作時間亦如圖所示，需在建立各電驛間限制條件時予以考慮。

在此過電流電驛之動作特性公式採最小平方誤差法予以數位化模擬，如下：

$$T = PTDS * PI_P \quad (1)$$

$$PTDS = b_0 + b_1 * n + b_2 * n^2 + b_3 * n^3 \quad (2)$$

$$PI_P = a_0 + a_1 / (M-1) + a_2 / (M-1)^2 + a_3 / (M-1)^3 + a_4 / (M-1)^4 \quad (3)$$

其中

T : 電驛動作時間

M : 始動電流值倍數

N : 時間標置值

PTDS : 模擬之時間標置值

PI_P : 模擬之始動電流值倍數

a_i, b_i : 模擬出之係數(CO-9 之係數
如表 2)

表 2 · W. H. CO-9 動作特性曲線數位模擬之電驛係數值

電驛 係數	係 數 值	電驛 係數	係 數 值
a_0	0.2469815530	b_0	-0.0912199704
a_1	0.6255606088	b_1	0.4508050924
a_2	6.2913004080	b_2	-0.0317448314
a_3	-4.5227094521	b_3	0.0024556049
a_4	1.4721809082		

(1) 目標函數之建立

目標函數即為所有主保護電驛之動作時間為最小，如下所示：

$$\text{Min. } T_{1c} + T_{2c} + T_{3c} + T_{4c} + T_{5c} + T_{6c} + T_{8c} + T_{9c} + T_{11c} + T_{12c} + T_{13c} + T_{15c} + T_{16c} + T_{17c} + T_{18c}$$

(2) 限制條件之建立

如前節所述利用增廣關聯矩陣法，可求出保護系統之主保護/後衛保護電驛對，其中電驛動作先後順序關係及電驛之時間標置值範圍(假設為 0.5~11)，亦為限制條件因素之一，因此可列出其限制條件如下：

$$\begin{array}{lll}
 T_{1f} - T_{3c} \geq 0.3 & T_{5f} - T_{15c} \geq 0.3 & T_{5f} - T_{18c} \geq 0.3 \\
 T_{5f} - T_{4c} \geq 0.3 & T_{17f} - T_{15c} \geq 0.3 & T_{17f} - T_{6c} \geq 0.3 \\
 T_{17f} - T_{4c} \geq 0.3 & T_{8f} - T_{16c} \geq 0.3 & T_{8f} - T_{17c} \geq 0.3 \\
 T_{8f} - T_{11c} \geq 0.3 & T_{8f} - T_{12c} \geq 0.3 & T_{13f} - T_{1c} \geq 0.3 \\
 T_{13f} - T_{5c} \geq 0.3 & T_{13f} - T_{16c} \geq 0.3 & T_{13f} - T_{11c} \geq 0.3 \\
 T_{13f} - T_{17c} \geq 0.3 & T_{3f} - T_{15c} \geq 0.3 & T_{3f} - T_{6c} \geq 0.3 \\
 T_{3f} - T_{18c} \geq 0.3 & T_{15f} - T_{11c} \geq 0.3 & T_{15f} - T_{9c} \geq 0.3 \\
 T_{15f} - T_{17c} \geq 0.3 & T_{11f} - T_{13c} \geq 0.3 & T_{9f} - T_{1c} \geq 0.3 \\
 T_{9f} - T_{5c} \geq 0.3 & T_{9f} - T_{12c} \geq 0.3 & T_{2f} - T_{5c} \geq 0.3 \\
 T_{2f} - T_{8c} \geq 0.3 & T_{6f} - T_{1c} \geq 0.3 & T_{6f} - T_{8c} \geq 0.3 \\
 T_{18f} - T_{11c} \geq 0.3 & T_{18f} - T_{9c} \geq 0.3 & T_{18f} - T_{16c} \geq 0.3 \\
 T_{4f} - T_{2c} \geq 0.3 & T_{16f} - T_{18c} \geq 0.3 & T_{16f} - T_{4c} \geq 0.3 \\
 T_{16f} - T_{6c} \geq 0.3 & T_{12f} - T_{17c} \geq 0.3 & T_{12f} - T_{9c} \geq 0.3 \\
 T_{12f} - T_{16c} \geq 0.3 & T_{3f} \geq 0.6 & T_{15f} \geq 0.48 \\
 T_{18f} \geq 0.48 & T_{4f} \geq 0.51 & T_{6f} \geq 0.55 \\
 T_{16f} \geq 0.6 & T_{17f} \geq 0.6 & T_{11f} \geq 0.55 \\
 T_{12f} \geq 0.48 & T_{1f} \geq 0.51 & T_{5f} \geq 0.6 \\
 T_{9f} \geq 0.55 & T_{8f} \geq 0.51 & T_{2f} \geq 0.55 \\
 T_{13f} \geq 0.55 & & \\
 n_1 >= 0.5 & n_1 <= 11 & n_2 >= 0.5 \\
 n_2 <= 11 & n_3 >= 0.5 & n_3 <= 11 \\
 n_4 >= 0.5 & n_4 <= 11 & n_5 >= 0.5 \\
 n_5 <= 11 & n_6 >= 0.5 & n_6 <= 11 \\
 n_8 >= 0.5 & n_8 <= 11 & n_9 >= 0.5 \\
 n_9 <= 11 & n_{11} >= 0.5 & n_{11} <= 11 \\
 n_{12} >= 0.5 & n_{12} <= 11 & n_{13} >= 0.5 \\
 n_{13} <= 11 & n_{15} >= 0.5 & n_{15} <= 11 \\
 n_{16} >= 0.5 & n_{16} <= 11 & n_{17} >= 0.5 \\
 n_{17} <= 11 & n_{18} >= 0.5 & n_{18} <= 11
 \end{array}$$

將上述建立出之目標函數及限制條件關係，改成以時間標置值關係表示。如電驛 1 之 I_{STM} 為 240A，考慮負載因數 1.2，

則可選擇比流器匝比 300/5，再決定電驛 1 之 TAP=5（即比流器一次側始動電流值為 300A，其餘電驛分接頭設定如表 3），則電驛 1 近點故障時之最大故障電流 $I_{1c}=3620A$ 為始動電流值之 $(3620/300)=12.07$ 倍，代回(3)式及(1)式可得

$$T_{1c}=0.351PTDS1$$

$$T_{1f}=1.497PTDS1$$

同理可分別求出各電驛近點故障與遠端匯流排故障時之動作時間與時間標置值關係，再將其代入上述目標函數及限制條件，並利用線性規劃軟體(LINDO)，即可求出符合各限制條件之過電流電驛模擬之最佳時間標置值 PTDS，在經由(2)式之轉換，即可求出實際之過電流電驛最佳時間標置值 n ，如表 4 所示。再將所求出之時間標置值代回過電流電驛之動作特性公式，可算出所有電驛之近端故障動作時間及遠端匯流排故障動作時間，進而算出所有主保護/後衛保護電驛對之協調時間，如表 5 所示，結果顯示，所有主保護電驛近點故障動作時間均在 0.2 秒以下，協調時間最小為 0.3 秒，最大為 1 秒（因遠端匯流排故障時，該後衛保護電驛所提供之故障電流較小），均符合所求。

表 3・電驛分接頭之選擇

電驛編號	$I_{STM}(A)$	CTR	TAP	線路始動電流值
1,2	240	300/5	5	300
3,4	160	200/5	5	200
5,6	270	300/5	6	360
15,16,17,18	240	300/5	5	300
11,12	280	300/5	6	360
9	150	150/5	6	180
8	320	350/5	6	420
3	180	200/5	6	240

表 4・所有電驛之最佳時間標置值

電驛編號	電驛時間標置值(n)	電驛編號	電驛時間標置值(n)
1	1.2	11	1.9
2	0.6	12	1.5
3	2.5	13	0.9
4	1.8	15	0.5
5	0.7	16	0.5
6	0.5	17	0.5
8	0.5	18	0.5
9	2		

五、參考文獻

- Dwarakanath, M. H. and L. Nowitz. "An Application of Linear Graph Theory for Coordination of Directional Overcurrent Relays," Electric Power Problem-The Mathematical Challenge, SIAM, 1980, pp. 104~114.
- Urdaneta, A. J., R. Nadira and L. G. P. Jimenez, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relay in Interconnected Power System," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No.3, 1988, pp.903
- Elrafie, H. B. and M. Irving, "Linear Programming for Directional Overcurrent Relay Coordination in Interconnected Power Systems with Constraint Relaxation," Electric Power Systems Research, 1993, pp.209~216
- 李炤楠，"調適式過電流保護協調之研究與分析"，國立台灣工業技術學院電機工程技術研究所碩士論文，民國八十五年
- 朱文賢，"線性規劃法應用於環式及輻

射式輸電系統之保護協調",國立台灣
工業技術學院電機工程技術研究所碩

士論文，民國八十六年。

表 5・主保護/後衛保護電驛對之動作時間與協調時間

後衛保護電驛		主保護電驛		協調時間 (秒)	後衛保護電驛		主保護電驛		協調時間 (秒)	
編號	跳脫時間 (秒)	編號	跳脫時間 (秒)		編號	跳脫時間 (秒)	編號	跳脫時間 (秒)		
1	0.6	3	0.2	0.4	8	0.89	16	0.07	0.82	
5	0.6	15	0.07	0.53			17	0.07	0.82	
		18	0.07	0.53			11	0.2	0.69	
		4	0.18	0.42			12	0.17	0.72	
17	0.89	15	0.07	0.82	6	0.62	1	0.11	0.51	
		6	0.08	0.81			8	0.08	0.54	
		4	0.18	0.71	11	0.48	13	0.09	0.39	
13	0.6	1	0.11	0.49	9	0.47	1	0.11	0.36	
		5	0.09	0.51			12	0.17	0.3	
		16	0.07	0.53			5	0.09	0.38	
		11	0.2	0.4	18	1.07	11	0.2	0.87	
		17	0.07	0.53			9	0.18	0.89	
3	0.55	15	0.07	0.48	16	0.89	16	0.07	1	
		6	0.08	0.47			6	0.08	0.81	
		18	0.07	0.48			18	0.07	0.82	
15	1.07	11	0.2	0.87		12	0.49	4	0.18	0.71
		9	0.18	0.89			17	0.07	0.42	
		17	0.07	1			9	0.18	0.31	
2	0.6	8	0.08	0.52			16	0.07	0.42	
		5	0.09	0.51	4	0.48	2	0.09	0.39	

電驛協會需要你不斷的灌溉

