

輸電線路的最佳守護神——差電流電驛

淺談 SEL-311L

台電公司供電處電驛標置課 陳順斌

一、前言

輸電線路是傳輸電力之重要設備，其數量之多與途經環境之複雜，是系統中其他設備所無法相比的，因此其故障機率相較於其他設備也相對提高，所以輸電線路保護也就成為一非常重要的主題。

輸電線路的保護方式有很多，依線路之電壓等級、供電方式、重要性等之不同而有不同的保護方式。一般而言，過電流電驛因需考慮協調時間，因此無法做快速保護；測距電驛亦須考量比壓器、比流器、線路常數等其他誤差而無法做全線段 100% 快速保護。唯有差電流電驛是一種既快速又簡單的保護電驛，其應用於輸電線路保護時，不但能夠 100% 完全保護該線路，而且又能夠快速地動作隔離故障，因此差電流電驛可說是輸電線路最佳的保護電驛，台電目前亦全面汰換 345kV 保護電驛，改以差電流電驛當輸電線路之主保護。

二、簡介

SEL-311L 電驛除當作線路差電流保護之外，尚具有原 SEL-311C 電驛之保護、控制及通信功能，其中保護功能，如：測距保護、方向性及非方向性過電流保護、欠電壓及過電壓保護、頻率保護及多次復閉功能... 等等，在此將僅就 SEL-311L 電驛之"差電流"保護功能作一介

紹，其電驛前、後視圖如圖 1 所示。

SEL-311L 電驛之通信介面、處理器及輸出接點均與本身後衛保護功能(如：測距保護)獨立分開，因此差電流保護發生任何異常狀況時，並不影響本身電驛之其他後衛保護功能。SEL-311L 電驛標準配備具有 8 個標準輸出接點、6 個高速大電流遮斷能力之輸出接點、6 個光耦合輸入點及數個通信埠(1 個 EIA-485、3 個 EIA-232、1 個 IRIG-B 時間同步)，其電驛輸出、入配置圖如圖 2 所示。

在採購 SEL-311L 電驛時，可預先選擇差電流元件所使用之通信介面為下列任一種或任兩種之組合：

1. EIA-422 通信埠(56 或 64 Kb/s)
2. G.703 通信埠(64 Kb/s)
3. 850nm 多模光纖通信埠(IEEE 標準 PC37.94)，最長可連接至 2KM
4. 1300nm 單模直通光纖通信埠，最長可連接至 80KM

當電驛採購兩組通信介面時，第二組通信介面可於第一組通信介面(或通信媒體)故障時，自動啟用以維持正常差電流保護(第二組通信介面通常採用不同通信媒體或不同通信路徑，以避免同時故障)；其亦可用於線路三端保護用。由於差電流電驛需利用通信媒介來傳達兩端間之電流資訊，因此通信媒介將影響差電流電驛動作之快速性與正確性。

SEL-311 L 電驛包含 5 個差電流元件

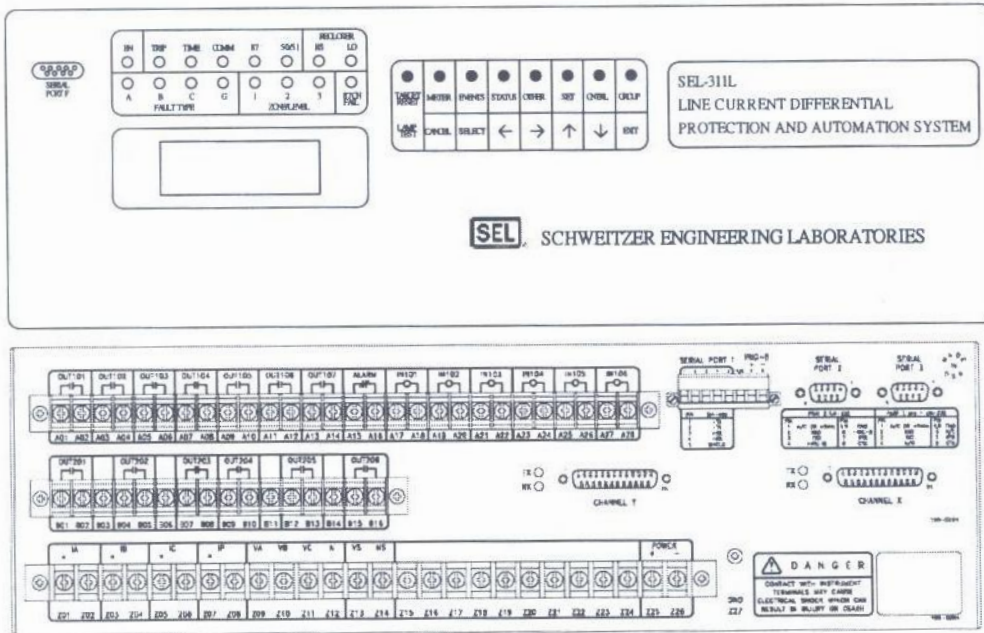


圖 1 SEL-311L 電驛前、後視圖

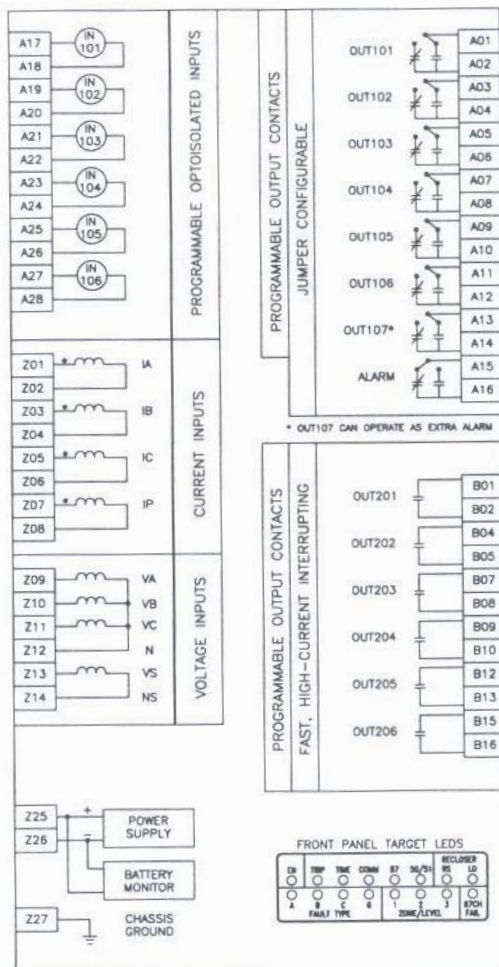


圖 2 SEL-311L 電驛輸出、入配置圖

: 3 個"相"差電流元件(3 相電流每相各 1 個)、1 個負序成分差電流元件及 1 個接地差電流元件。"相"差電流元件提供高電流故障之快速保護，負序及接地差電流元件則提供不平衡故障極靈敏的保護。

SEL-311L 電驛互相交換二端或三端

線路經時間同步之電流取樣資料，差電流元件 87LA、87LB、87LC、87L2 及 87LG 分別比較各端 I_a 、 I_b 、 I_c 、 $3I_2$ 及 $3I_0(I_G)$ 之電流取樣資料，所有電驛執行相同對等之差電流計算，以避免遠端遙跳之時間延遲，如圖 3 所示。

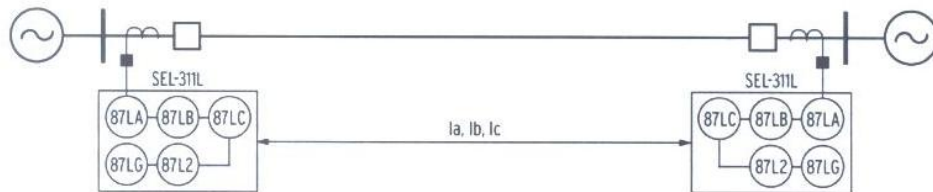


圖 3 SEL-311L 電驛差電流元件示意圖

3 相差電流元件 87LA、87LB、87LC 用來偵測 3 相故障，負序差電流元件 87L2 則用來偵測內部不平衡故障(當任何一端 3 個相電流超過 3 倍額定值(15A)時會被抑制住，以避免誤動作)，接地差電流元件 87LG 亦用來偵測內部不平衡故障(當任何一端 2 個以上相電流超過 3 倍額定值(15A)時會被抑制住，以避免誤動作)。

三、差電流動作原理

SEL 公司開發出"Alpha plane"，即為取遠端電流(I_R)與本端電流(I_L)之相量(或稱複數)比值，並將其繪於平面圖上，其為一無單位只有大小及角度之平面，且每個差電流元件各有其獨立之 Alpha plane，如圖 4。SEL-311L 電驛將流入被保護線路之電流角度設為 0° ，流出被保護線路之電流角度設為 180° ，因此現若有一 5 安培之負載電流由本端流至遠端，則本端電驛 A 相將產生 $5\angle 0^\circ$ ，且遠端電驛 A 相將產生 $5\angle 180^\circ$ ，其遠端電流(I_R)與本端電流(I_L)之比值將為

$$\frac{\bar{I}_{AR}}{\bar{I}_{AL}} = \frac{5\angle 180^\circ}{5\angle 0^\circ} = 1\angle 180^\circ$$

$$\frac{\bar{I}_{BR}}{\bar{I}_{BL}} = \frac{5\angle 60^\circ}{5\angle -120^\circ} = 1\angle 180^\circ$$

$$\frac{\bar{I}_{CR}}{\bar{I}_{CL}} = \frac{5\angle -60^\circ}{5\angle 120^\circ} = 1\angle 180^\circ$$

在 A 相電流之 Alpha plane 上，可繪出此負載電流位於原點左方 1 單位處，如圖 5 所示；同理 B、C 相電流亦個別有其 Alpha plane。事實上，當系統正常時，所有兩端線路之負載電流不論其電流大小、角度均會在 Alpha plane 上得到一接近 $1\angle 180^\circ$ 的點。相同地，一個外部故障亦會對兩端電驛產生大小相等、角度相反的故障電流，因此外部故障亦會在 Alpha plane 上得到一接近 $1\angle 180^\circ$ 的點，如圖 5。

SEL-311L 電驛在 Alpha plane 上 $1\angle 180^\circ$ 的位置圍繞一個扇形之抑制區，如圖 4。當電驛遠端電流(I_R)與本端電流(I_L)之比值落於抑制區外，且其差電流值亦大於設定值時，電驛即動作跳脫；當電驛遠端

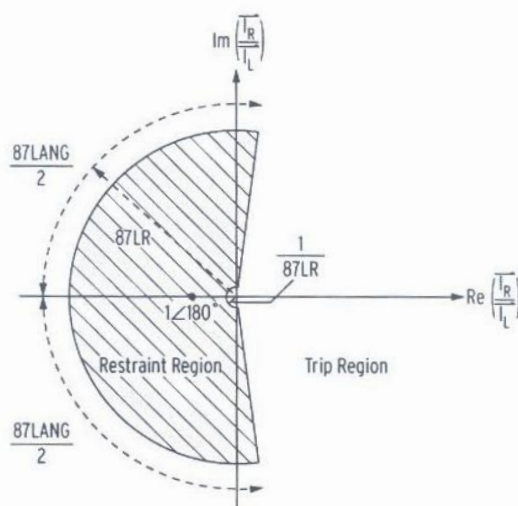


圖 4 SEL-311L 電驛 Alpha plane 圖

電流(I_R)與本端電流(I_L)之比值落於抑制區內，或雖其比值落於抑制區外，但其差電流值小於設定值時，電驛均不會動作。

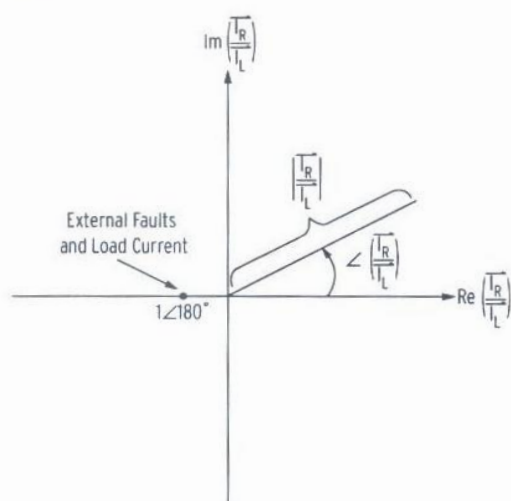


圖 5 SEL-311L 電驛於負載電流及外部故障之 Alpha plane 圖

此抑制區係由電驛 2 個設定值形成，首先是 87LANG 決定抑制區的角度範圍，87LR 決定抑制區的外徑，內徑則由 87LR 之倒數決定。電驛 3 種差電流值(相間、負序及零序)須大於差電流設定值亦是電驛動作跳脫條件之一，亦即電驛"相"差電流是否大於"相"差電流設定值

87LPP、負序差電流是否大於負序差電流設定值 87L2P 及零序差電流是否大於零序差電流設定值 87LGP，均是電驛動作跳脫條件之一。例如：A 相電流比值落於抑制區外，且其"相"差電流值亦大於 87LPP，則 87LA 元件動作，表示為一內部故障，電驛將動作跳脫。

四、差電流標置之設定

A. 抑制區標置之設定

a. 抑制區角度 87LANG 設定：

考慮一忽略負載之齊次系統 (homogenous system)，當其於被保護線路之中點發生三相短路故障，此時遠端與本端之故障電流大小相等、相位相同，因此可得 Alpha plane 上之值為 $1 \angle 0^\circ$ ；若此系統非齊次系統 (non-homogenous system)，則兩端之故障電流相位將不同，此時 Alpha plane 上之值不會是 $1 \angle 0^\circ$ 。若兩端電源角度相差 10° ，電源等效阻抗亦相差 10° ，則兩端之故障電流角度可能相差 20° ，如圖 6 之 A 部分；若再考慮差電流通信頻道傳送與接收之時間延遲不相等，亦會造

成兩端故障電流之角度差。例如：在一 20 節點單向之 SONET 環狀通信網路上，其傳送與接收可能有 2ms 之時間差(在一較極端的情形下，傳送僅經 1 個節點，而接收經 19 個節點，此時傳送僅需時 100 μ s，而接收需時約 2ms，因此完成整個傳送與接收約需時 2ms)，SEL-311L 通信傳遞時間係估計平均單向通信頻道延遲時間，即傳送與接收之平均時間，其值約為 2ms/2=1ms，兩端電驛均會以 1ms 以前取得之本端電流資料與接收到之遠端電流資料比較，因此兩端電驛均會有 1ms 的資料比較誤差(一端超前、另一端落後)，這在 60Hz 系統將造成 $(1\text{ms}/16.67\text{ms})\times 360^\circ = 21.6^\circ$ 的誤差，如

圖 6 之 B 部分，即一端電驛的誤差為正(在 Alpha plane 的逆時針方向)，另一端的誤差為負(在 Alpha plane 的順時針方向)。若再考慮 CT 飽和問題，則在較嚴重的 CT 飽和情況下，可能使得二次側電流的基本波領先一次側電流達 40° ，如圖 6 之 C 部分。因此在考慮上述系統的非齊次性、負載角度、通信非對稱時間延遲及 CT 飽和等因素，對於內部 3 相故障時其相間元件的 Alpha plane 角度，可能須有 $\pm(40^\circ + 22^\circ + 20^\circ) = \pm 82^\circ$ ，除非系統有特殊考量，否則可設定 $87\text{LANG} = 360^\circ - 82^\circ \times 2 = 196^\circ$ (預設值為 195°)，可有較佳之安全性與可靠性。

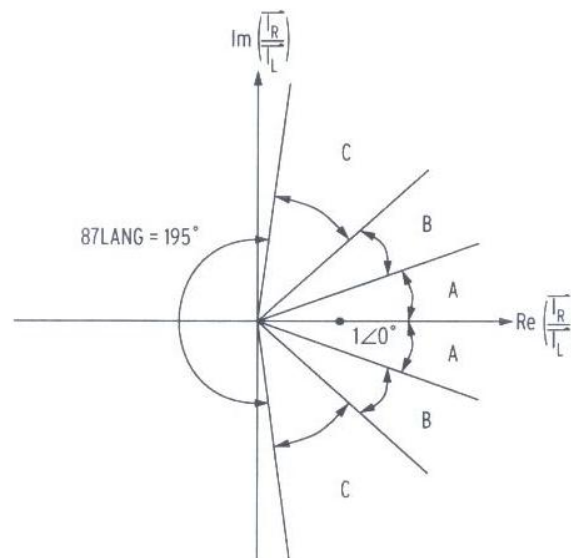


圖 6 設定 87LANG 考慮所需因素之 Alpha plane 圖

若 3 相內部故障並非發生在線路中點，或兩端之電源強度不同，則 Alpha plane 上的電流比值大小將不等於 1，而會在大小為 1 附近左右移動。在一較極端的情狀下，可能在弱電源端之故障電流會接近 0，此時將有一端電驛其遠端電流為

0，則在 Alpha plane 上的點將向原點附近的右半平面移；而另一端電驛其近端電流為 0，則在 Alpha plane 上的點將向遠離原點的右半平面移。因此一個 3 相內部故障，其相間 Alpha plane 上的點將落在右半平面正實軸上下 82° 間。

b. 抑制區半徑 87LR 之設定：

87LR 之設定值至少須使得發生所有內部故障時，均不會落在抑制區內，通常可設定 87LR 之設定值為 6，即抑制區之外徑為 6、內徑為 1/6，可使得即使有一端為弱電源端時，發生內部故障亦不會落在抑制區內(在有一端為弱電源端，發生內部高阻抗接地故障時，其電流比值有可能為零或為負值)。

在外部故障時，若有一端之 CT 嚴重飽和，則所量測之電流大小可能只有未飽和值之 1/3，這在 Alpha plane 比值上有一端可能會由 $1 \angle 180^\circ$ 移至 $1/3 \angle 180^\circ$ ，而另一端會由 $1 \angle 180^\circ$ 移至 $3 \angle 180^\circ$ (正常在外部故障時，Alpha plane 比值为 $1 \angle 180^\circ$)。因此 87LR 建議設為 6，可使抑制區考慮到嚴重 CT 飽和因素。

以上抑制區之標置(87LANG 及 87LR)為所有相間、負序及零序差電流元件所共用，無論何種差電流元件均無法單獨設定其不同之抑制區設定(即每個差電流元件有其獨立之 Alpha plane，但其 Alpha plane 上之抑制區設定值均一樣)。

B. 差電流標置之設定

a. "相" 差電流 87LPP 之設定：

87LPP 設定之最小值至少須大於線路充電電流，亦須大於所預期之最大負載電流，以避免當一端 CT 測試開關被短路時誤動作。通常設定為額定電流的 1.2 倍(6A)。

b. 負序差電流 87L2P 及接地差電流

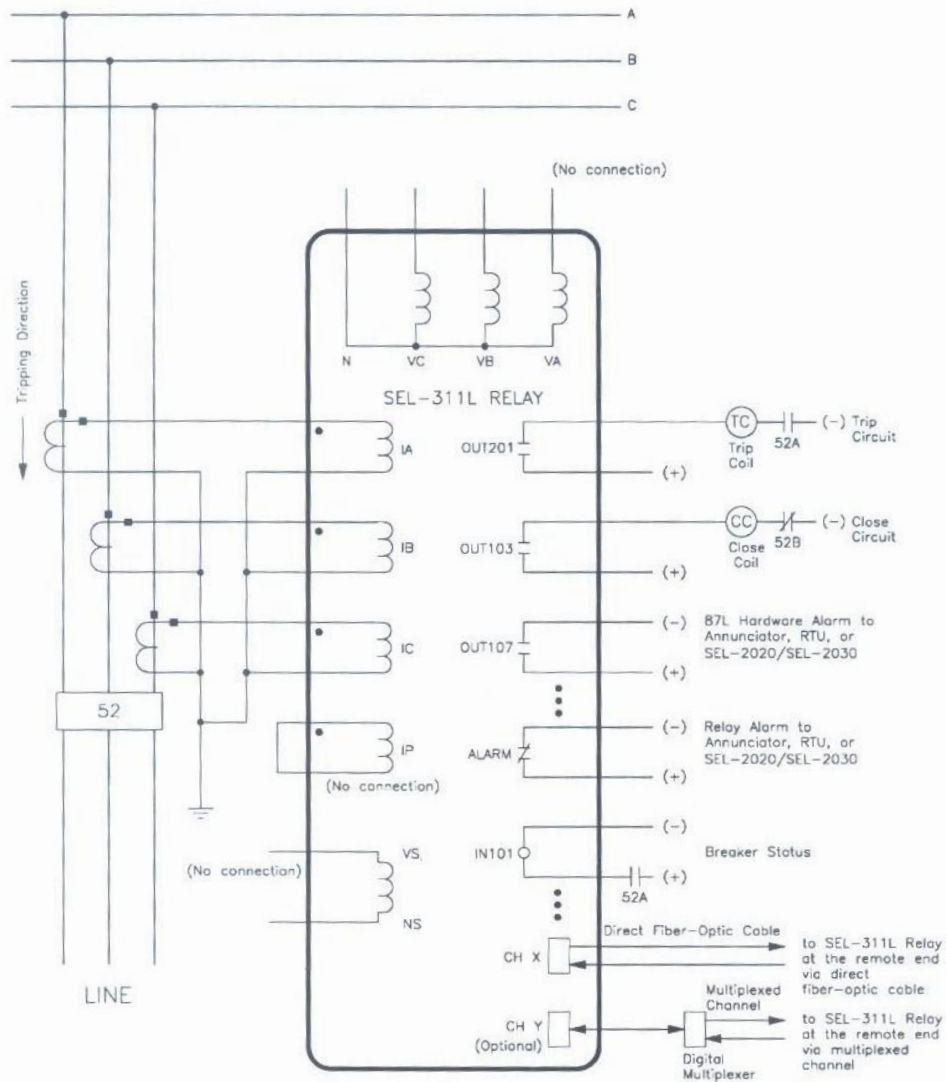
87LGP 之設定：

設定 87L2P 能有效地偵測所有內部不平衡故障，但設定值至少須大於穩態時最大線路不平衡充電電流，通常線路不平衡充電電流很小，因此可設定 87L2P 為額定電流的 0.1 倍(0.5A)，此值提供極佳之動作速度與靈敏度。87LGP 之設定同 87L2P 為額定電流的 0.1 倍(0.5A)。

考量負序差電流元件 87L2 及接地差電流 87LGP 元件之安全性：在發生外部 3 相故障時，若有一端之 CT 飽和，而另一端之 CT 未飽和，則一端可能會產生負序電流，而另一端不會，將導致其負序 Alpha plane 之值很難預測，為避免其誤動作，在當任何一端 3 個相電流超過 3 倍額定值(15A)時，87L2 即會被抑制住(此時由 3 相差電流元件偵測保護)。同理，接地差電流元件 87LG 在發生外部 3 相或相間故障時，為避免其在一端 CT 產生飽和時誤動作，在當任何一端 2 個以上相電流超過 3 倍額定值(15A)時亦會被抑制住。

五、加入系統之取載試驗

為確認保護電驛之功能是否能正常發揮，除電驛之標置須正確、特性需良好外，其引入電驛之電壓電流值亦需接線正確，否則即會造成電驛判斷錯誤而誤動作，如圖 7 為差電流保護之典型外部接線圖。



Voltage Channels (VA, VB, VC, and VS) and current Channel IP are not used in this application.

圖 7 差電流保護之典型外部接線圖

以下數據為 SEL-311L 電驛加入系統時之電流資料，其中 Local 表本端電驛電流資料、Channel X 表經通信頻道 X 所接收之遠端電驛電流資料、Vector Sum 表兩端電驛電流向量和資料、3I0 表零序電流資料、3I2 表負序電流資料、I1 表正序電流資料。由此可觀察得知，在兩端正常送電時之負載電流下，兩端電驛電流大小

接近，角度差接近 180°，可得其 Alpha Plane 之值約為 1∠180° (3 相及正序部份為 1∠180°，零序及負序部分為 0)。

Local	A	B	C	3I0	3I2	I1
IMAG (A Pri)	354.035	353.162	364.784	19.826	44.431	357.027
IANG (DEG)	-3.30	-117.70	120.80	-83.30	-104.60	0.00

Channel X	A	B	C	3I0	3I2	I1
IMAG (A Pri)	375.135	371.357	383.177	23.771	47.785	376.201
IANG (DEG)	-177.10	68.80	-52.70	109.00	84.40	-173.70

Vector Sum	A	B	C	3I0	3I2	II	Alpha Plane	A	B	C	ZERO-SEQ	NEG-SEQ	POS-SEQ
IMAG (A Pri)	44.709	44.913	46.209	6.100	7.971	44.608	RADIUS	1.050	1.050	1.050	0.000	0.000	1.050
IANG (DEG)	-118.30	131.60	10.60	152.80	145.00	-112.20	ANG (DEG)	173.80	173.50	173.40	0.00	0.00	173.60

SEL-311L (Current Differential) 電驛動作指示說明

1. LED 指示燈號：

LED 指示燈	顯 示 訊 息
EN	表示電驛正常使用中
TRIP	表示電驛動作跳脫
TIME	表示電驛經延時跳脫
COMM	表示經通信輔助跳脫，如：DTT 遠端遙跳(非 87L 差流元件動作跳脫)
87	表示差流元件或差流遙跳元件動作跳脫
50/51	表示電驛經瞬時延時過電流動作跳脫
RS	表示復閉功能正常使用中
LO	表示復閉功能閉鎖中
A	表示故障相別包含 A 相
B	表示故障相別包含 B 相
C	表示故障相別包含 C 相
G	表示接地故障
1	測距第一區間/過電流第一階段動作跳脫
2	測距第二區間/過電流第二階段動作跳脫
3	測距第三區間/過電流第三階段動作跳脫
87CH FAIL	表示差流通信頻道故障

2. 面板操作按鈕：

按 鈕 名 稱	主 要 功 能
METER	可顯示線路傳輸資訊，如：電壓、電流、有/無效功率、需量值...等
EVENTS	可顯示電驛動作事件摘要
STATUS	可顯示電驛自我測試狀態
OTHER	顯示/設定斷路器監視資訊、顯示/設定日期或時間、顯示電驛動作狀態字元、顯示自動復閉動作次數...等
SET	顯示/更改電驛設定，如：電驛標置、通信埠參數或變更密碼等
CNTRL	控制輸出接點
GROUP	顯示/更改目前設定群組

六、參考資料

TECTION AND AUTOMATION SYSTEM
INSTRUCTION MANUAL。

本文係參考 SEL 公司之 SEL-311L
LINE CURRENT DIFFERENTIAL PRO-